

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement et de la recherche scientifique
Université de Constantine 1
Faculté des sciences de la technologie
Département d'électrotechnique



Présenté pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique

Option : modélisation et contrôle des procédés de conversion de l'énergie

Thème

L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS

Présenté par : **SEKHANE Hocine**

Ingénieur d'état en électrotechnique de l'université de Constantine 1

Soutenu publiquement le : [/ /2013] devant le jury composé de :

Pr. BENALLA Hocine	Professeur	Université-Constantine 1	Président
Dr. LABED Djamel	Maitre de conférence classe A	Université-Constantine 1	Rapporteur
Dr. KERDOUN Djallel	Maitre de conférence classe A	Université-Constantine 1	Examineur
Dr. MEHASNI Rabia	Maitre de conférence classe A	Université-Constantine 1	Examineur



DEDICACE



À ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage

♥ *À ma très chère mère et à mon cher père*

♥ *À mes frères et mes sœurs*

♥ *À mon encadreur M^{eur} labed Djamel*

♥ *À tous mes amis et mes collègues de l'électrotechnique*

♥ *À tous les proches que j'ai mentionnés et les autres que j'ai oubliés veuillez m'excuser*





Remerciement



Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de ce mémoire.

Je remercie, en deuxième position, ma chère mère et mon cher père, mes frères et mes sœurs, et surtout mes neveux Abdou, *M^{ed}* Adam, Ishak, ouassim, et ma nièce Awatif, sans lesquelles je n'aurai jamais pu arriver à terme dans la rédaction, et qui m'ont toujours entouré d'affection et de soutien dans les moments pénibles comme dans les moments de joie.

Egalement, je remercie l'encadreur de ce mémoire Dr. Djamel Labeled pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie.

Je veux remercier aussi les membres de jury qui ont bien voulu examiné ce travail.

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

Enfin, je ne peux oublier de remercier mes amis, notamment Khaled Nasri pour leur soutien moral, et à mes collègues de département d'Electrotechnique.

Liste des symboles et abréviations

*Abbreviations

ASC:	A dvanced S eries C apacitor.
CCT:	C ondensateurs C ommandés par T hyristor.
CSPR:	C ompensateur S tatique de P uissance R éactive.
DVR:	D ynamic V oltage R estorer.
FACTS:	F lexible A lternating C urrent T ransmission S ystems.
FC:	F ixed C apacitor.
GTO:	G ate T urn O ff.
HT:	H aute T ension.
IGBT:	I nsulated G ate B ipolar T ransistors.
IGCT:	I nsulated G ate C ommutated T hyristors.
IPFC:	I nterline P ower F low C ontroller.
LTC:	L oad T ap C hanger.
MSC:	M echanically- S witched C apacitor.
MT:	M oyenne T ension.
PI :	P roportionnel I ntégral (régulateur).
STATCOM:	S tatic S ynchronous C ompensator.
SSSC:	S tatic S ynchronous S eries C ompensator.
SVC:	S tatic V ar C ompensator.
TCPAR:	T hyristor C ontrolled P hase A ngle R egulator.
TCPST:	T hyristor C ontrolled P hase S hifting T ransformer.
TCR:	T hyristor C ontrolled R eactor.
TCSR:	T hyristor C ontrolled S eries R eactor.
TCVR:	T hyristor C ontrolled V oltage R egulator.
THT:	T rés H aute T ension.
TSC:	T hyristor S witched C apacitor.
TSR:	T hyristor S witched R eactor.
TCBR:	T hyristor C ontrol B reaking R esistor.
TCSC:	T hyristor C ontrolled S eries C apacitor.
TSSC:	T hyristor S witched S eries C apacitor.
TSSR:	T hyristor S witched S eries R eactor.
UPFC:	U nified P ower F low C ontroller.
VSC :	V oltage S ource C onverter.

MLI : Modulation par **L**argeur d'**I**mpulsion.

****Variables**

d (indice) : La composante sur l'axe d du repère (d-q).

q (indice) : La composante sur l'axe q du repère (d-q).

p.u (indice) : La grandeur en unité relative (grandeur réduite).

X_L : Réactance inductive.

X_c : Réactance capacitive.

α : L'angle d'allumage.

σ : L'angle de conduction.

L _{ℓ} : Inductance d'atténuation.

V_r : Tension au jeu de barre de réception.

I_{Sh} : Courant (shunt) injecté par le STATCOM.

V_{Sh} : Tension (shunt) injectée par le STATCOM.

P_{Sh} : Puissance active délivrée par le STATCOM.

P_{Sh_ref} : Puissance active de référence délivrée par le STATCOM.

Q_{Sh} : Puissance réactive délivrée par le STATCOM.

Q_{Sh_ref} : Puissance réactive de référence délivrée par le STATCOM.

θ : Déphasage du courant de la ligne.

P_s : Puissance active fournie par la source.

Q_s : Puissance réactive fournie par la source.

L_{sh} : L'inductance du transformateur de couplage.

R_{sh} : Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.

I_{sh_d} : La composante directe du courant fournit par le STATCOM.

I_{shd_ref} : La composante directe de référence du courant fournit par le STATCOM.

I_{sh_q} : La composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.

I_{shq_ref} : La composante quadrature de référence du courant fournit par le STATCOM.

V_{sh_d} : La composante directe de la tension générée par le STATCOM.

V_{sh_q} : La composante quadrature de la tension générée par le STATCOM.

I_{DC}	: Courant dans le circuit continu.
U_{DC}	: Tension continu aux bornes du condensateur.
I_C	: Courant capacitif dans le circuit continu.
I_{RC}	: Courant résistif dans le circuit continu.
P_{dc}	: La puissance active absorbée coté continu.
B_{SVC_p}	: Susceptance du SVC au primaire du transformateur.
B_{SVC_s}	: Susceptance du SVC au secondaire du transformateur.
B_{δ}	: Susceptance de fuite de transformateur.
I_{SVC}	: Le courant total du compensateur.
Q_{TSC}	: La puissance produite par un banc de TSC d'une phase.
Q_{TCR}	: La puissance absorbée par le TCR d'une phase.
T_O	: Constante de temps en boucle ouverte du SVC.
T_F	: La constante de temps en boucle fermée du SVC.
K_p	: Constante proportionnel.
K_i	: Constante intégrale.
τ	: Temps de repense du STATCOM.
B_{TCR}	: Susceptance effective du TCR.
Q_{SVC}	: Puissance réactive injectée ou absorbée par le SVC.
P_{tr}	: Puissance active transportée par la ligne.
Q_{tr}	: Puissance réactive transportée par la ligne.
n	: Nombre de banc du TSC utilisé.

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des figures

Figure I.1: Exemple de fluctuation de la fréquence	11
Figure I.1: Exemple de variation rapide de la tension	12
Figure I.2: Creux de tension	12
Figure I.3: Exemple de cas de surtensions transitoires.....	14
Figure I.4: Déséquilibre de tension	15
Figure I.5: Distorsion provoquée par un seul harmonique (h=5)	16
Figure I.7: Perturbation de tension dans les réseaux électriques.....	16
Figure II.6: Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques	21
Figure II.7: Compensation série	23
Figure II.8: Structure du TCSC	23
Figure II.9: Structure du TCSR	24
Figure II.10: Structure du SSSC	25
Figure II.11: Compensateur shunt	26
Figure II.12: Structure du TCR	26
Figure II.13: Structure du TSC	27
Figure II. 14: Structure du SVC	27
Figure II.15: Structure du TCBR	28
Figure II.16: Structure du STATCOM	29
Figure II.17: Structure du TCPAR	31
Figure II.18: Structure de l'IPFC	32
Figure II.19: Structure de l'UPFC	33
Figure III.20: Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006	42
Figure III.21: Représentation schématique monophasée d'un compensateur statique	43
Figure III.22: Schéma équivalent d'un SVC	43
Figure III.23: Élément de base d'un TCR	44

Figure III.24: Angle d'amorçage et de conduction d'un TCR	45
Figure III.25: Eléments de base d'un TSC	46
Figure III.26: Principe d'un TSC	47
Figure III.27: Schéma de principe d'un FC/TCR	48
Figure III.28: Forme du courant d'inductance	48
Figure III.29: Schéma de principe d'un TCR/TSC	49
Figure III.30: Schéma monofilaire d'un compensateur mobile "TSC"	50
Figure III.31: Différentes schémas du compensateur statique SVC	50
Figure III.32: Caractéristique en V d'un SVC.....	51
Figure III.33: Variation de la puissance réactive en fonction de courant.....	52
Figure III.34: Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.....	54
Figure III.35: Principe de fonctionnement du STATCOM	55
Figure III.36: Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique.....	55
Figure III.37: Courant et tensions en mode capacitif	57
Figure III.19: Courant et tensions en mode inductif	57
Figure III.20: Q_s en fonction de P_s pour différentes valeurs de V_{sh}	59
Figure III.21: P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}	60
Figure IV.38: Schéma simplifié d'un STATCOM connecté au réseau	63
Figure IV.39: Schéma équivalent du STATCOM	64
Figure IV.40: Repère de Park "passage du repère (abc) vers le repère (dq)"	65
Figure IV.41: Schéma équivalent du circuit DC du STATCOM	66
Figure IV.42: Identification des courants de référence	69
Figure IV.43: Transfert de I_{sh_d} en fonction de X_1	70
Figure IV.7: Transfert de I_{sh_q} en fonction de X_2	71
Figure IV.8: Schéma bloc de la méthode watt var découplée du STATCOM	71
Figure IV.9: Schéma bloc de la régulation PI des courants de STATCOM	72
Figure IV.10: Schéma globale du contrôle par la méthode watt var découplée	74

Figure IV.11: Schéma de régulation de la tension continue	75
Figure IV.12: Contrôle de l'onduleur par hystérésis	76
Figure IV.13: Contrôle de l'onduleur par MLI	76
Figure IV.14: Cas général de n bancs de TSC et un TCR	77
Figure IV.15: Configuration du compensateur TCR-FC	78
Figure IV.16: SVC comporte 3 TSC et un TCR	80
Figure IV.17: Constitution principale d'un seul TSC	81
Figure IV.18: Constitution principale du TCR	82
Figure IV.19: Schéma du circuit de commande du SVC (1TCR+3TSC)	83
Figure IV.20: Boucle de régulateur PI de tension	84
Figure V.1: Schéma unifilaire du réseau test étudié	87
Figure V.2: Schéma unifilaire équivalent du réseau en grandeurs réduites	88
Figure V.3: Schéma de simulation du STATCOM	90-91
Figure V.4: Tension au jeu de barre de réception non compensée	91
Figure V.5: Courant de la ligne non compensée	92
Figure V.6 : Tensions du STATCOM (V_{shd} et V_{shq})	92
Figure V.7: Courants du STATCOM (I_{shd} et I_{shd_ref})	93
Figure V.8: Courants du STATCOM (I_{shq} et I_{shq_ref})	93
Figure V.9: Puissance réactive (Q_{sh} et Q_{sh_ref}) du STATCOM	93
Figure V.10: Puissance active (P_{sh} et P_{sh_ref}) du STATCOM	94
Figure V.11: Puissance active transportée par la ligne sans et avec STATCOM	94
Figure V.12: Puissance réactive transportée par la ligne sans et avec STATCOM	94
Figure V.13: Tension continue VDC régulée et VDC_ref	95
Figure V.14: Temps de repense du STATCOM	95
Figure V.15: Tension de réception V_r compensée par le STATCOM	95
Figure V.16: Schéma unifilaire du réseau test utilisé avec le compensateur SVC (3TSC+1TCR)	98
Figure V.17: Schéma de simulation du SVC (3TSC+1TCR)	98-99
Figure V.18: Variation de la susceptance primaire (B_{svc})	100

Figure V.19: Susceptance effective du TCR (B _{TCR})	100
Figure V.20: Puissance réactive (Q _{svc}) injectée ou absorbée par le SVC.....	100
Figure V.21: L'angle de commutation (α) du TCR	101
Figure V.22: Puissance active transportée par la ligne sans et avec le SVC	101
Figure V.23: Puissance réactive transportée par la ligne sans et avec le SVC	101
Figure V.24: Nombre de banc (n) du TSC utilisé	102
Figure V.25: Temps de réponse du SVC (Zoom de la figure (V.24) à l'intervalle [1- 1,03 sec]).	102
Figure V.26: Tension de réception V_r compensée par le SVC	102
Figure V.27: Susceptance effective B _{TCR} en fonction de α fournie par look up table	105

Liste des tableaux

Tableau II.1: Application des FACTS à la resolution des problemes dans le reseau	34
Tableau II.2 : Dispositifs FACTS installés dans le monde	35
Tableau V.1 : Les références de puissances actives et réactives.....	89
Tableau V.2: Susceptance effective B _{TCR} en fonction de α	105
Tableau V.3: Comparaison entre Q _{sh} , Q _{svc} et Q _{ref}	107

Sommaire

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	1
Chapitre I : puissance réactive et tension dans les réseaux électriques	5
I.1.Introduction	6
I.2.La puissance réactive	6
I.2.1.Moyens de compensation de la puissance réactive	7
I.2.2 Les dispositifs conventionnels	8
I.2.2.1 Les groupes de production (générateurs)	8
I.2.2.2 Les condensateurs	8
I.2.2.3 Les inductances	8
I.2.2.4.Les compensateurs synchrones	9
I.2.2.5.Les compensateurs statiques	9
I.3.La tension	9
I.3.1. La qualité de tension	9
I.3.2. Dégradation de la qualité de tension	10
I.3.3. Variation ou fluctuation de la fréquence	10
I.3.4. Composante lente des variations de tension	11
I.3.5. Fluctuation de tension (flicker)	11
I.3.6. Creux de tension	12
I.3.7. Interruption courte ou coupure brève	13

I.3.8. Bosses de tension	13
I.3.9. Baisses de tension	13
I.3.10. Chutes de tension	13
I.3.11. Tension et/ou courant transitoire	14
I.3.12. Déséquilibre de tension	15
I.3.13. Perturbations harmonique	15
I.4. Conclusion	17
Chapitre II : les systèmes FACTS	18
II.1. Introduction	19
II.2. Définition de l'acronyme « FACTS »	19
II.3. Classification des dispositifs FACTS	20
II.4. Différentes Catégories des FACTS	21
II.5. Les principaux dispositifs FACTS	22
II.5.1. Dispositifs séries	22
II.5.1.1. Compensateurs séries a base de thyristors	23
II.5.1.1.1. TCSC (Thyristor controlled series capacitor)	23
II.5.1.1.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)	24
II.5.1.1.3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)	24
II.5.1.1.4. TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)	24
II.5.1.2. Compensateurs séries a base de GTO thyristors	24
SSSC (Static Synchronous Series Compensator)	24
II.5.2. Dispositifs shunts (parallèles)	25
II.5.2.1. Compensateurs shunts à base de thyristors	26
II.5.2.1.1. TCR (Thyristor Controlled Reactor) ou TSR (Thyristor Switched Reactor).....	26
II.5.2.1.2. TSC (Thyristor Switched Capacitor)	27
II.5.2.1.3. SVC (Static Var Compensator)	27
II.5.2.1.4. TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)	28
II.5.2.2. Compensateurs shunt à base de thyristors GTO	28
II.5.2.2.1. STATCOM (STATIC COMPensator)	28
II.5.3. Dispositifs hybrides (série-shunt)	29

II.5.3.1.Compensateur hybrides à base de thyristors	29
II.5.3.1.1. (TCPST) (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer)	30
II.5.3.1.2. TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)	30
II.5.3.1.3. (TCVR) (Thyristor Controlled Voltage Regulator)	31
II.5.3.2.Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors	31
II.5.3.2.1.IPFC (Interline Power Flow Controller)	31
II.5.3.2.2.UPFC (Unified Power Controller)	32
II.6.Synthèse	34
II.7.Apports et Avantages des dispositifs FACTS	34
II.8.Applications Pratiques des Dispositifs FACTS	35
A. Condensateur Série Avancé (ASC) de Kayenta	36
B. TCSC d'Imperatriz	36
C. STATCOM de Sullivan	37
D. UPFC d'Inez	37
II.10. Coût des dispositifs FACTS	38
II.11. Conclusion	38
Chapitre III : structure et principe de fonctionnement du STATCOM et du SVC	40
III.1. introduction	41
III.2. le compensateur statique SVC	41
III.2.1. Historique du SVC	41
III.2.2. Définition du SVC	42
III.2.3. Structure et constitution d'un SVC	42
Principe de fonctionnement.	43
III.2.3.1. Condensateur fixe (FC)	44
III.2.3.2. Réactance commandée par thyristors (TCR)	44
Principe de fonctionnement	44
III.2.3.3. Condensateur commuté par thyristors (TSC)	45
III.2.4. Les différents types du compensateur SVC	47

III.2.4.1. Dispositif type "TCR" ou "FC/TCR":(<i>Thyristor Controlled Reactor or Fixed Capacitors/thyristor - Controlled Reactor</i>)	47
III.2.4.2. Dispositif type TCR/TSC (Thyristor Controlled Reactor/ Thyristor Switched Capacitor)	48
III.2.4.3. Dispositif mobile type TSC (thyristor switched capacitor)	49
III.2.5. Caractéristique d'un compensateur statique SVC	50
III.2.5.1. Caractéristique en V d'un SVC	50
III.2.5.2. Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC	52
III.3. Le Compensateur Statique d'Energie Réactive de type Avancé (STATCOM)	53
III.3.1. Définition du STATCOM	54
III.3.2. Principe de Fonctionnement	54
III.3.3. Caractéristiques du compensateur statique STATCOM	57
III.3.3.1. Caractéristique $Q_S(P_S)$ d'un STATCOM	58
III.3.3.2. Caractéristique P_S, Q_S, P_{sh}, Q_{sh} en fonction de (V_{Sh}) d'un STATCOM	59
III.4. Conclusion	60
Chapitre IV : Modélisation et commande du STATCOM et SVC	61
IV.1. Introduction	62
IV.2. Modélisation du STATCOM	63
IV.3. Contrôle du STATCOM	67
IV.3.1. Identification des références	68
IV.3.2. La méthode watt var découplée	69
IV.3.3. Régulateur PI avec compensation de pôles	71
IV.3.4. Régulation de la tension continue	74
IV.3.5. Commande de l'onduleur	75
IV.3.5.1. Commande par hystérésis	76
IV.3.5.2. Commande par MLI	76
IV.4. Modélisation du SVC	77
IV.4.1. Réactance contrôlé par thyristor-condensateur fixe (TCR-FC)	77
IV.4.2. Calcul des limites de marge de fonctionnement	79

IV.4.3. Calcul des paramètres du TSC	81
IV.4.4. Calcul des paramètres du TCR	82
IV.5. Commande du SVC	82
a) Système de mesure	83
b) Régulateur PI de tension	83
c) Unité de distribution (unité de calcul de l'angle de commutation)	84
d) Générateur d'impulsions (unité de commutation)	84
IV.6. Conclusion	85
Chapitre V : Simulations et résultats	86
V.1. Introduction	87
V.2. Simulation du STATCOM	87
V.2.1. Description du réseau étudié	87
V.2.2. Equation du STATCOM en grandeurs réduites	88
V.2.3. Essais de simulation et résultats	89
V.2.3.1. Schéma de simulation	90
V.2.3.2. résultats de simulation	91
a) Sans STATCOM	91
b) Avec STATCOM	92
V.2.3.3. Interprétation des résultats obtenus	96
a) Tension du STATCOM V_{sh}	96
b) Courant du STATCOM I_{sh}	96
c) Puissance active et réactive du STATCOM P_{sh} et Q_{sh}	96
d) Puissances transportées par la ligne P_r et Q_r	97
e) Tension continue VDC	97
f) Temps de repense du STATCOM (τ)	97
V.3. Simulation du SVC	97
V.3.1. Description du réseau étudié	97
V.3.2. Essais de simulation et résultats	98
V.3.2.1. Schéma de simulation	98
V.3.2.2. résultats de simulation	99
a) Sans SVC	99
b) Avec SVC	99

V.3.2.3. Interprétation des résultats obtenus	103
a) Puissance réactive injectée ou absorbée par le SVC (Q_{svc})	103
b) Susceptance primaire (B_{svc})	103
c) Nombre de banc (n) du TSC utilisé	104
d) L'angle de commutation (α) du TCR	105
e) Susceptance effective du TCR (B_{TCR})	105
f) Puissances transportées par la ligne P_{tr} et Q_{tr}	106
g) Temps de repense du SVC (τ)	106
V.4. Comparaison technico-économique entre le STATCOM et le SVC	106
V.4.1. Sur le plan technique	106
V.4.2. Sur le plan économique	107
V.5. Conclusion	108
Conclusion générale	109

Annexe

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. De plus on voit aujourd'hui dans l'ère de l'électronique et de l'informatique et toutes les charges sont très sensibles aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations: une perte d'alimentation peut causer l'interruption des différents processus de la production; et devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et de meilleure qualité, les entreprises de production de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement régulier de cette demande, et sans interruption, à travers un réseau maillé et interconnecté afin de prouver une fiabilité dans leur service ; et augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation du coût et une dégradation du milieu naturel.

D'autre part plus que le réseau augmente plus qu'il devient complexe et plus difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence des dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats, beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que: le transit de la puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau...etc. et de ce fait le potentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploité.

Jusqu'à la fin des années quatre vingt, Les réseaux électriques étaient contrôlés par des dispositifs électromécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permettent pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour ; ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance. Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves.

La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences.

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

Introduction générale

contrôle de leurs paramètres par l'introduction des dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS: « Flexible Alternating Current Transmission Systems ».[1]

L'apport de cette technologie « FACTS » pour les compagnies de l'électricité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour contrôler le flux de puissance dans les réseaux et d'augmenter les capacités utilisées des lignes existantes semblables à des extensions dans ces dernières. Ces apports résultent de l'habilité de ces contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres interdépendants qui gouvernent l'opération de transport de l'énergie électrique y compris l'impédance série, impédance shunt, courant, tension, angle de phase... etc. [1]

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que: STATCOM, SSSC, UPFC respectivement. [1]

L'objectif de ce travail est de proposer une solution adéquate pour optimiser la puissance réactive et le contrôle de la tension dans un réseau électrique à travers l'incorporation de deux dispositifs FACTS : le « STATCOM » et le « SVC ».

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons abordé par un rappel de la puissance réactive et la tension avec les différents problèmes rencontrés dans les réseaux électriques.

Le second chapitre, est une présentation générale du concept « FACTS ». Une classification des différents types est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits, et présente aussi les différentes structures de FACTS (série, shunt, et hybride) basées sur les thyristors ou les (IGBT/GTO).

Le troisième chapitre est consacré à la description de la structure de ces deux dispositifs (STATCOM et SVC), et une explication en détail des principes de leurs fonctionnements.

La modélisation et la commande de ces deux dispositifs a fait l'objectif du quatrième chapitre, et différents modèles mathématiques de chaque circuit sont développés séparément.

Introduction générale

Afin de valider la théorie et les modèles exposés dans les chapitres précédents une simulation structurée est exécutée dans l'environnement du logiciel (MATLAB /SIMULINK) de ces contrôleurs intégrés séparément dans un réel réseau de transport de l'énergie électriques.

Les courbes de la majorité des paramètres du réseau dans plusieurs cas de simulation sont présentées et interprétées dans le cinquième chapitre.

A la fin de ce travail des conclusions sont tirées et des recommandations sont proposées.

Chapitre I

Puissance réactive et tension dans les réseaux électriques

Chapitre I

Puissance réactive et tension dans les réseaux électriques

I.1.Introduction

Aujourd'hui l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leurs taille, de la présence des lignes d'interconnexion de grande longueur, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques... ; Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité. [2]

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, *dont la puissance réactive et le niveau de tension*: la tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes. [3]

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

I.2.La puissance réactive

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent de la puissance apparente. Cette puissance se décompose en deux formes:

- ➡ La puissance active: est la puissance utilisée et transformée en énergie mécanique (travail), chimique, radiante, etc. plus la puissance abandonnée en chaleur (pertes).
- ➡ La puissance réactive: se transforme en champs magnétiques.

Les consommateurs de la puissance réactive sont : les moteurs asynchrones, les transformateurs, les inductances (ballasts de tubes fluorescents) et les convertisseurs statiques (redresseurs). [6]

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active. [4]

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

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

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. [4]

I.2.1.Moyens de compensation de la puissance réactive [4]

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

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

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

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

condensateurs et les inductances installées sur les réseaux.

- le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en œuvre de moyens dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques.

I.2.2. Les dispositifs conventionnels [4]

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.2.2.1. Les groupes de production (générateurs)

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

I.2.2.2. Les condensateurs

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

1. Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
2. Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport.

I.2.2.3. Les inductances

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit

branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau.

I.2.2.4. Les compensateurs synchrones

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

I.2.2.5. Les compensateurs statiques

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

I.3. La tension [3]

I.3.1. La qualité de tension

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement.

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- ◆ La fréquence.
- ◆ L'amplitude.
- ◆ La forme d'onde.
- ◆ La symétrie.

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

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

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

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

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

I.3.2. Dégradation de la qualité de tension [3]

Les perturbations dégradant la qualité de tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :
 - court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
 - causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
 - matérielles (vieillesse des isolants...).
 - humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

- Installations perturbatrices :
 - fours à arc.
 - Soudeuses.
 - variateurs de vitesse.
 - toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc.

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

I.3.3. Variation ou fluctuation de la fréquence [4]

Les fluctuations de la fréquence sont observées le plus souvent sur les réseaux non interconnectés ou les réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans

l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. La figure (I.1) présente un exemple qui illustre cette fluctuation de la fréquence.

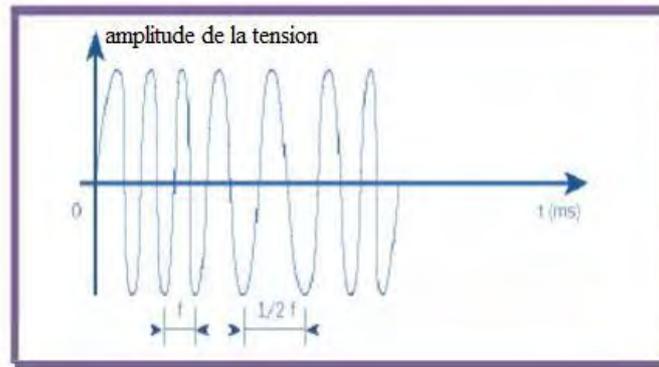


Figure I.1: Exemple de fluctuation de la fréquence.

I. 3.4. Composante lente des variations de tension

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

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

I.3.5. Fluctuation de tension (flicker) [3]

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

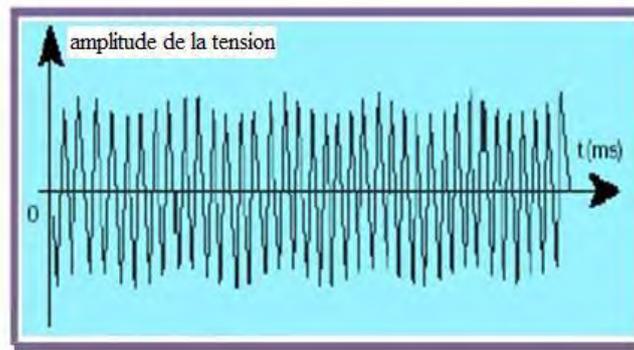


Figure I.2:Exemple de variation rapide de la tension.

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

I.3.6. Creux de tension [4]

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure I.3). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1 - 0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT).

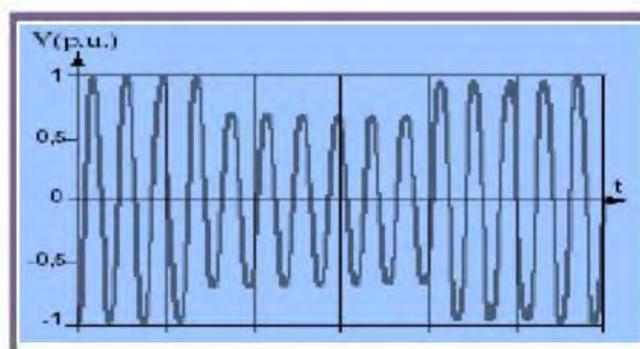


Figure I.3:Creux de tension.

Ils sont caractérisés par leurs: amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

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

I.3.7. Interruption courte ou coupure brève

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycle jusqu'à 3 s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 p.u. [20]

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

I.3.8. Bosses de tension

La bosse de tension est une augmentation de la tension au dessus de la tension nominale pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants. [4]

I.3.9. Baisses de tension [5]

Les baisses de tension (*sags*) sont une réduction de la tension d'une durée plus longue et sont dans la plupart du temps dues à une diminution volontaire de la tension par le fournisseur afin de réduire la puissance aux moments où la demande est maximale. Lorsque la puissance est anormalement faible par rapport à celle requise par la charge on parle également de sags.

I.3.10. Chutes de tension

Une chute de tension (*dips*) est une brève diminution ou bien une disparition complète de la tension. Elle se caractérise par sa durée et par la tension résiduelle, généralement exprimée en pourcentage de la valeur RMS de la tension, au point le plus bas pendant la chute de tension.

Lors d'une chute de tension la charge ne reçoit pas toute l'énergie nécessaire à son fonctionnement, ce qui peut bien évidemment avoir de graves conséquences selon le type d'appareil concerné. [5]

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante. [4]

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel la production et la consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. [4]

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

I.3.11. Tension et/ou courant transitoire [3]

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

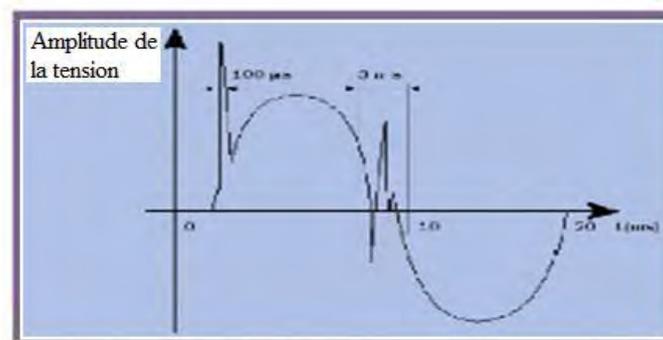


Figure I.4: Exemple de cas de surtensions transitoires.

I.3.12. Déséquilibre de tension [3]

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau figure (I.5). Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

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

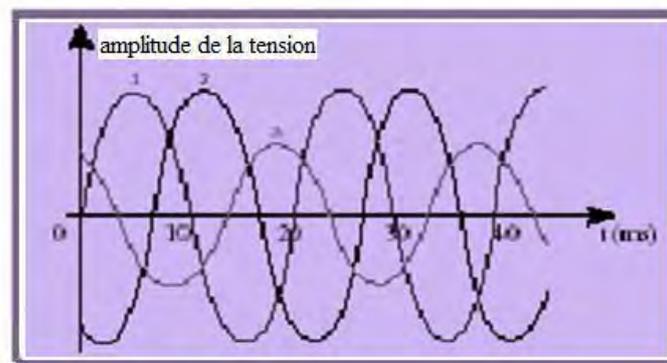


Figure I.5: Déséquilibre de tension.

I.3.13. Perturbations harmonique [3]

On entend par harmonique, toute perturbation non transitoire affectant la forme d'onde de tension du réseau électrique.

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale et l'amplitude est divisée par le rang d'harmonique (h) (l'amplitude de l'harmonique est inférieure de h fois de l'amplitude fondamentale) figure (I.6), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, etc.

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements.

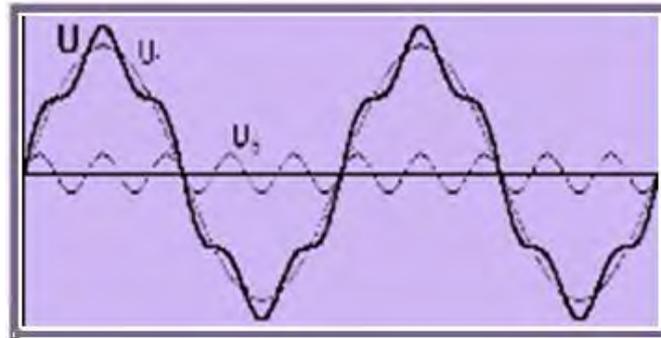


Figure I.6: Distorsion provoquée par un seul harmonique (h=5).

On peut illustrer les différentes perturbations de tension dans les réseaux électriques ainsi que leurs durées dans la figure (I.7).

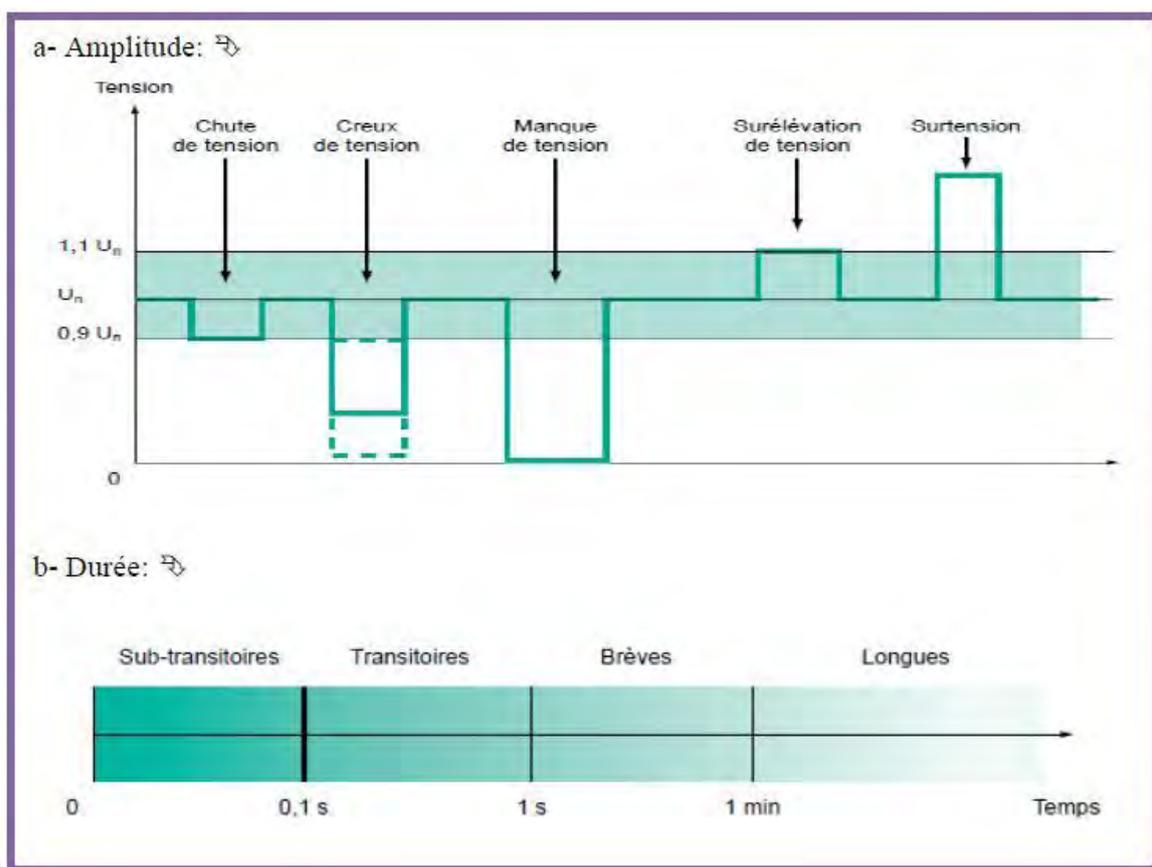


Figure I.7: Perturbation de tension dans les réseaux électriques. [7]

I.4.Conclusion

Ce chapitre a traité les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de tension, ainsi les différents moyens de compensation conventionnelle de la puissance réactive.

Cela nous persuade que le contrôle de tension et l'optimisation de la puissance réactive est un objectif important pour maintenir un profil adéquat dans les réseaux électriques. D'autre part il doit maintenir des réserves de puissance réactive dans les différentes zones du système pour faire face aux incidents de tension.

Actuellement il existe une méthode moderne et sophistiqué pour le contrôle de tension et pour optimiser la puissance réactive dans les réseaux électriques. Cette méthode utilise les dispositifs FACTS (basées sur l'électronique de puissance) qu'ils seront traités en détaille dans le prochain chapitre.

Chapitre II

Les systèmes FACTS

Chapitre II

Les systèmes FACTS

II.1. Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées.

Les problèmes des réseaux énoncés précédemment devenant plus présents d'année en année, l'EPRI (Electric Power Research Institute), qui représente un consortium de recherche sur les réseaux électriques et regroupant plusieurs compagnies d'électricité des Etats Unis et d'ailleurs, a lancé en 1988 le concept FACTS (Flexible AC Transmission System). C'est un projet à long terme qui vise à rendre l'exploitation des réseaux plus "flexibles". [9][21]

Aussi ces réseaux électriques de taille importantes seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport à ces nouveaux systèmes FACTS à base d'interrupteurs statiques et de court temps de réponse (moins d'une seconde). Aujourd'hui cette technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité. [1]

II.2. Définition de l'acronyme « FACTS »

D'après l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), FACTS qui est l'abréviation de «*Flexible Alternating Current Transmission Systems*» est défini comme suit:

« Les systèmes de transmission en courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes électriques ».

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: (tension, impédance, déphasage ...etc.). Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie.

***Flexibilité de Transmission de l'énergie:** l'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire. [1][22][23]

II.3. Classification des dispositifs FACTS [7] [4]

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

1- La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

2- La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

3- Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que les transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Dans notre proposition, une autre classification des contrôleurs FATCS basée sur les cinq caractéristiques indépendantes :

1. Selon le type de Raccordement sur le réseau (Connexion) ;
2. Selon le mode de Commutation ;

3. Selon la Fréquences de Commutation ;
4. Selon le mode de Stockage d'énergie ;
5. Selon le mode de Connexion au Port DC.

Selon ces critères, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence:

- Les dispositifs shunt connectés en parallèle dans les postes du réseau.
- Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport.
- Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages

II.4. Différentes Catégories des FACTS

Le tableau de la figure(II.1) représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base (R L C). Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance. [2][7][1][22]

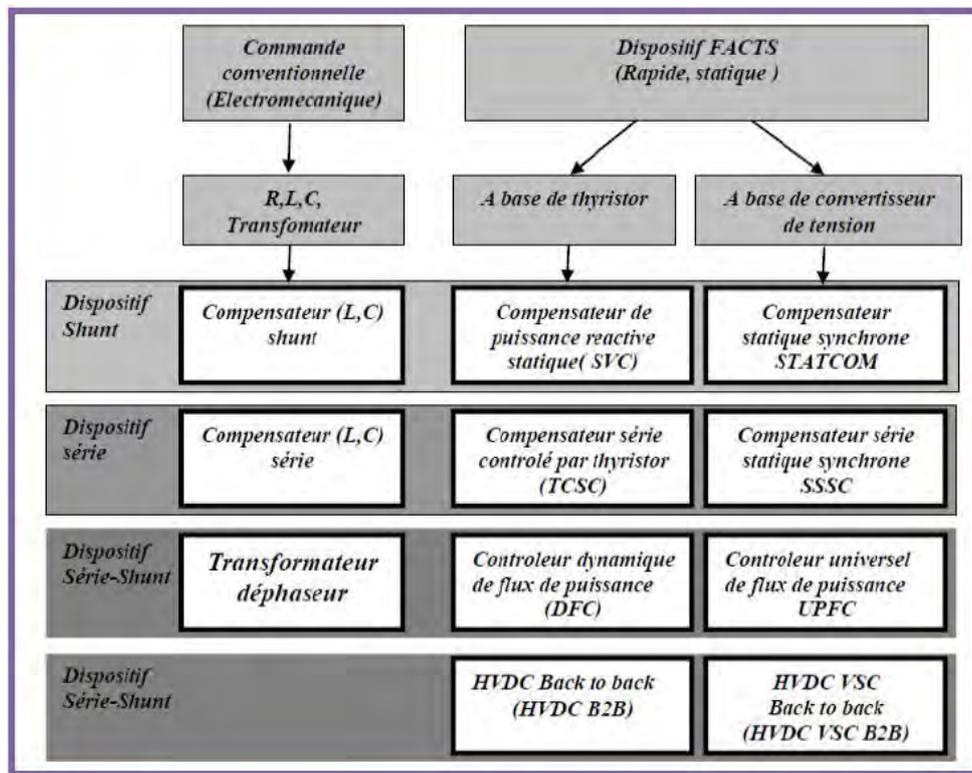


Figure II.1:différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques. [22]

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle. Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau. [2][7][1]

II.5. Les principaux dispositifs FACTS

La famille des dispositifs FACTS est grande. Parmi ceux-ci, on peut distinguer :

- ✚ Compensateurs séries
- ✚ Compensateurs shunts
- ✚ Compensateurs hybrides (série-shunt)

II.5.1. Dispositifs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission. [1][23]

Les FACTS dans la compensation série modifient l'impédance de la ligne : la réactance (X) de la ligne est diminuée, donc augmenter la puissance active transmissible. Cependant la puissance réactive doit être plus fournie. [7][24]

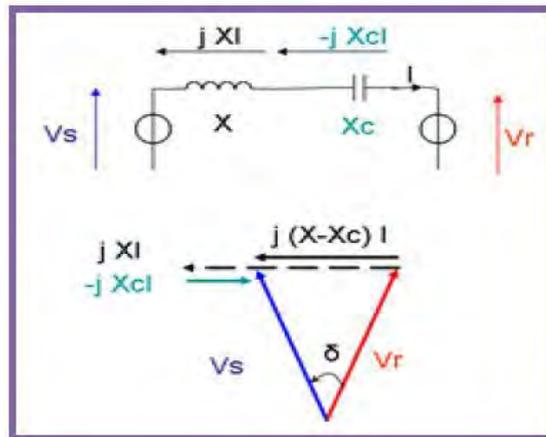


Figure II.2: Compensation série.

II.5.1.1. Compensateurs séries a base de thyristors

Parmi ces compensateurs, en trouve :

II.5.1.1.1. TCSC (Thyristor controlled series capacitor):

Le compensateur série commandé par thyristor TCSC (Thyristor controlled series capacitor) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur. [25][21]

Pour augmenter la puissance transitée par une ligne triphasée, on doit ajouter un condensateur de capacité fixe en série dans chaque phase de la ligne. Ce qui a pour effet de réduire la réactance inductive de celle-ci. Le condensateur série commandé par thyristors permet de faire varier le transit de la puissance en agissant sur la nouvelle valeur de la réactance de la ligne.

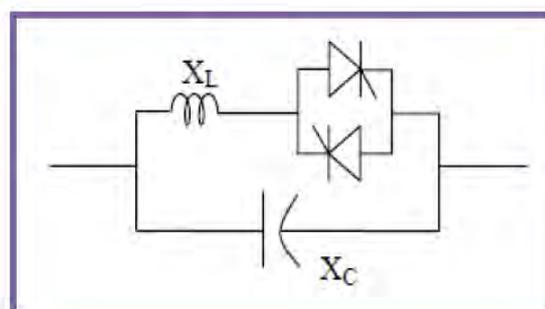


Figure II.3: Structure du TCSC.

Les principales applications des condensateurs séries commandé par thyristors sont :

- L'augmentation du transit de la puissance dans les lignes ;
- La compensation du déséquilibre des courants de charge ;
- L'amélioration de la stabilité dynamique ;
- L'amortissement des oscillations de puissance ;
- L'interconnexion des réseaux ;
- La stabilisation de la tension ; [26]

II.5.1.1.2.TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

Le compensateur série commuté par thyristor TSSC est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. [8] La différence entre le (TSSC) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de "90" soit de "180". [25][21]

II.5.1.1.3.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 thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable. [25][7]

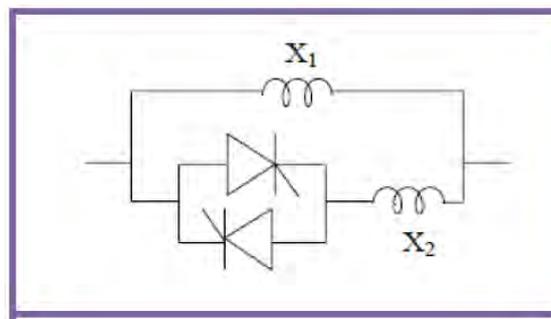


Figure II.4:Structure du TCSR.

II.5.1.1.4.TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de "90" soit de "180". [25][7]

II.5.1.2.Compensateurs séries a base de thyristors GTO

Il s'agit de :

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Le compensateur série synchrone (Static Synchronous Series Compensator) est le plus important dispositif de cette famille [7] [25]. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle 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. nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduire dans la ligne. si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de la ligne. [7][4]

Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants. [1]

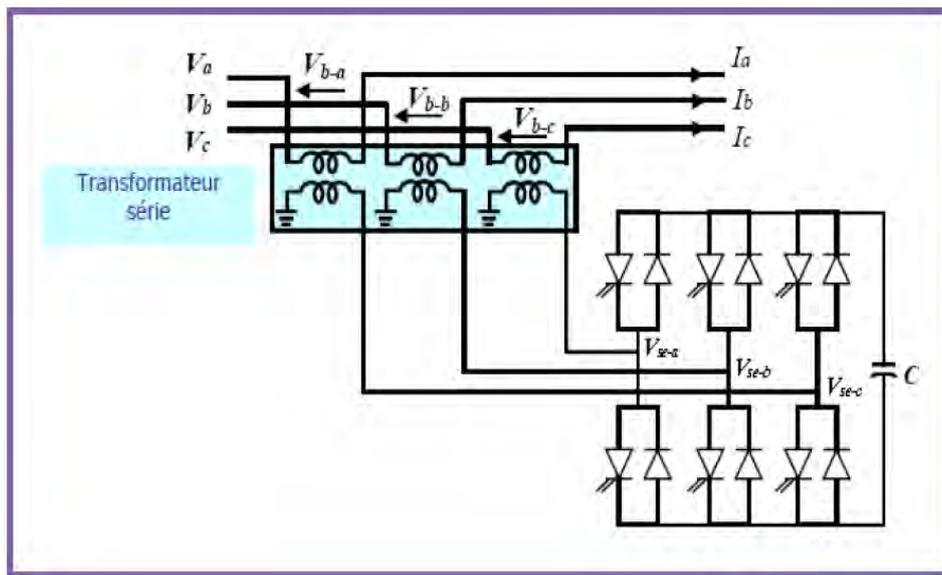


Figure II.5: Structure du SSSC.

II.5.2. Dispositifs shunts (parallèles)

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds. [7]

Le courant réactif est injecté dans la ligne pour maintenir la magnitude du voltage. La

puissance active transmissible est augmentée mais la puissance réactive sera plus fournie. [24]

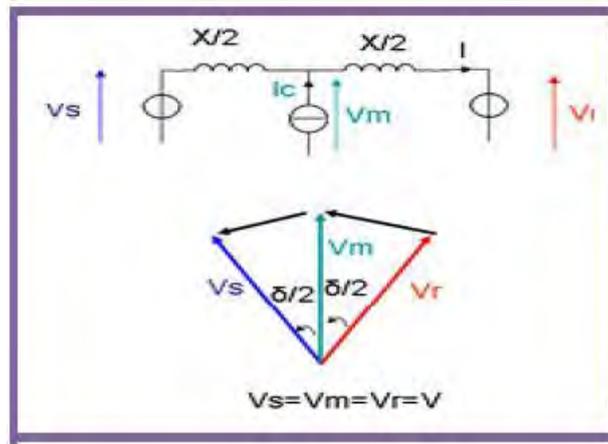


Figure II.6:Compensateur shunt.

II.5.2.1.Compensateurs shunts à base de thyristors

IL s'agit de:

II.5.2.1.1.TCR (Thyristor Controlled Reactor) ou TSR (Thyristor Switched Reactor)

Dans le TCR (RCT: Réactance Commandées par Thyristors), le circuit est composé d'une réactance placé en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors. [27][15]

Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé. Et la tension à ses bornes est positive, il s'arrêt de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule.

Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive. Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance. [27][28]

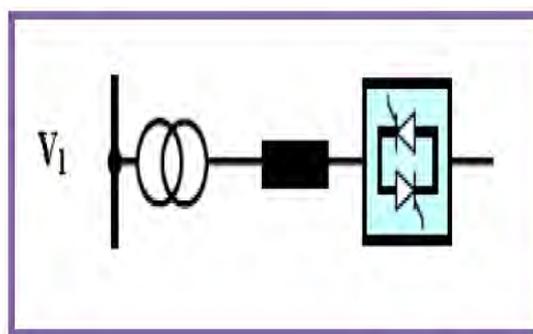


Figure II.7:Structure du TCR(TSR).

II.5.2.1.2.TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Dans le TSC (CCT: Condensateurs Commandés par Thyristor), le circuit est composé d'un condensateur placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. Les thyristors fonctionnent en pleine conduction. [27]

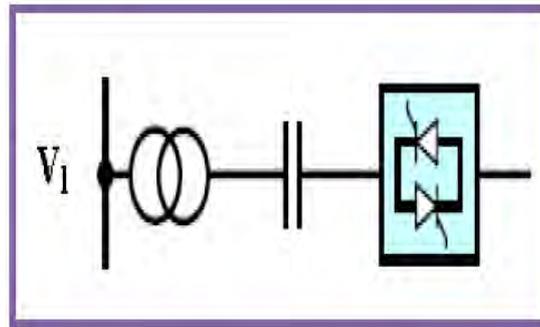


Figure II.8:Structure du TSC.

II.5.2.1.3.SVC (Static Var Compensator)

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique de puissance réactive) (CSPR). [25][7]

Pour augmenter ou diminuer la tension d'une ligne de transport, on peut brancher un condensateur ou une inductance shunt qui génère ou absorbe de la puissance réactive. Cette manœuvre peut se faire automatiquement en utilisant un compensateur statique.

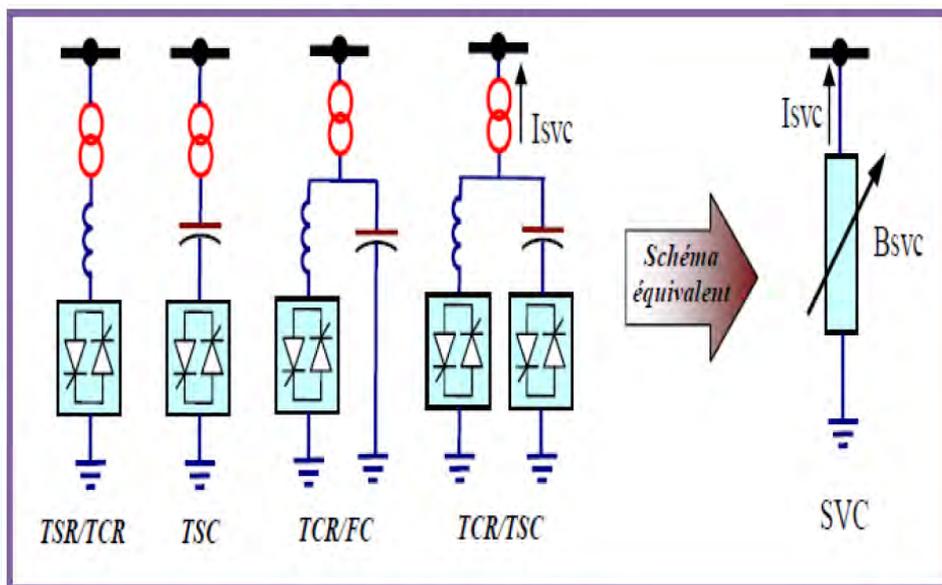


Figure II. 9:Structure du SVC.

Les principales applications du compensateur statique de puissance réactive sont :

- ✓ Soutien de la tension en régime permanent ;
- ✓ Compensation rapide de la puissance réactive ;
- ✓ Stabilisation statique et transitoire de la tension ;
- ✓ Equilibrage dynamique des charges ; [26]

II.5.2.1.4. TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur TCBR (résistance de freinage contrôlée par thyristors) ; connecté en parallèle et utilisée pour améliorer la stabilité du réseau ou pour diminuer l'accélération des générateurs en cas de la présence des perturbations. La figure (II.10) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique.

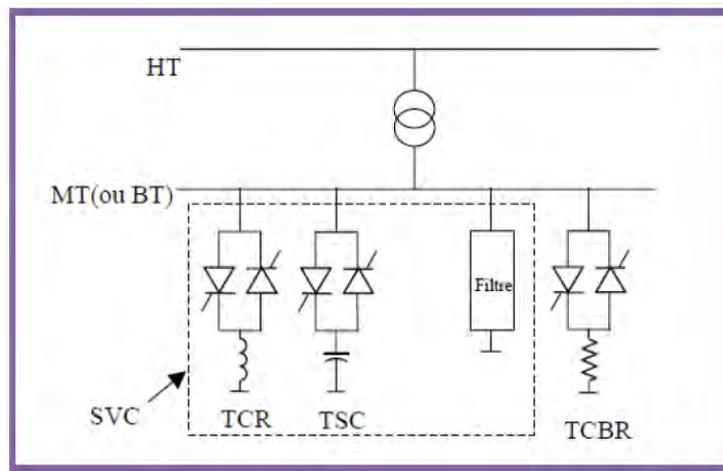


Figure II.10: Structure du TCBR.

II.5.2.2. Compensateurs shunt à base de thyristors GTO

Il s'agit de :

STATCOM (STATIC COMPensator)

Ce type de compensateur shunt (compensateur statique synchrone) a connu jusqu'à présent différentes appellations :

- ⊕ ASVC (Advanced Static Var Compensator) ;
- ⊕ SVG (Static Var Generator);
- ⊕ SVClight;
- ⊕ SVCplus.

Le STATCOM présente plusieurs avantages:

- ⊙ Un contrôle optimale de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système ;
- ⊙ Bonne repense à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle ;
- ⊙ Bonne repense dynamique c.à.d. le système reprend instantanément. [25]

La figure (II.11) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance de fuite du transformateur de couplage. [27][29]

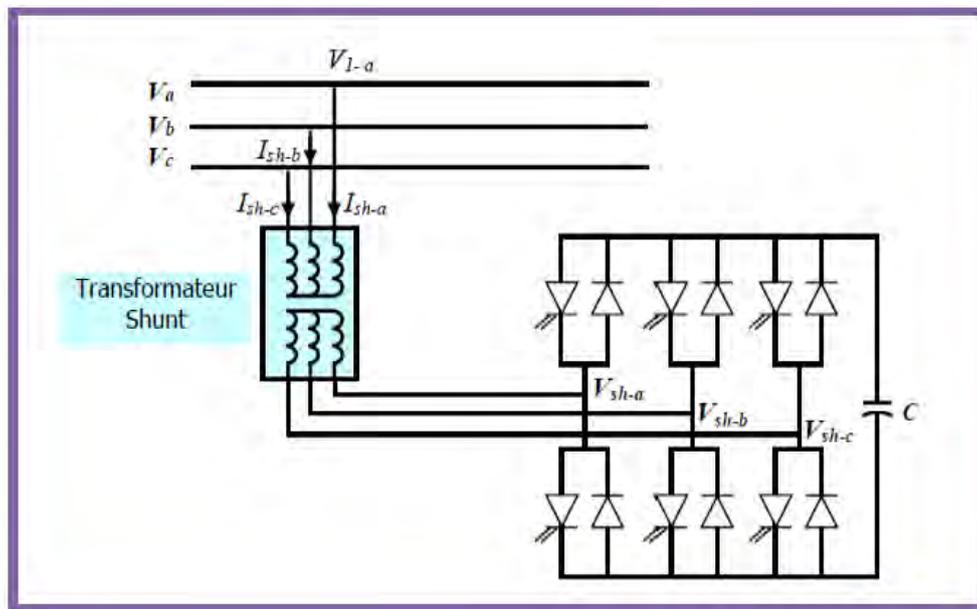


Figure II.12: Structure du STATCOM.

II.5.3. Dispositifs hybrides (série-shunt)

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini. 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. [7]

II.5.3.1. Compensateur hybrides à base de thyristors

II.5.3.1.1. TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer)

L'IEEE définit le Transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST comme étant un transformateur déphaseur ajusté par thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable. [8][30]

Le transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST, est le premier équipement FACTS combiné. [8][30]

II.5.3.1.2. TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

L'IEEE définit le TCPAR (*Thyristor Controlled Phase Angle Regulator*), comme étant un transformateur déphaseur qui permet le contrôle du déphasage entre ses tensions terminales tout en gardant leurs amplitudes invariables. [8][30]

Le régulateur d'angle de phase commandé par thyristor TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristor. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs ou régulateurs en charge (LTC : Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, seule une étude est actuellement menée afin d'introduire un déphaseur à thyristor dans l'interconnexion des réseaux du nord ouest du Minnesota et du nord de l'Ontario.

L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont (n_1 , n_2 et n_3). [7]

Le régulateur d'angle de phase commandé par thyristor TCPAR, contrairement au TCPST, est capable de fournir (ou d'absorber) l'énergie réactive au réseau [8]. de plus il a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction. [7]

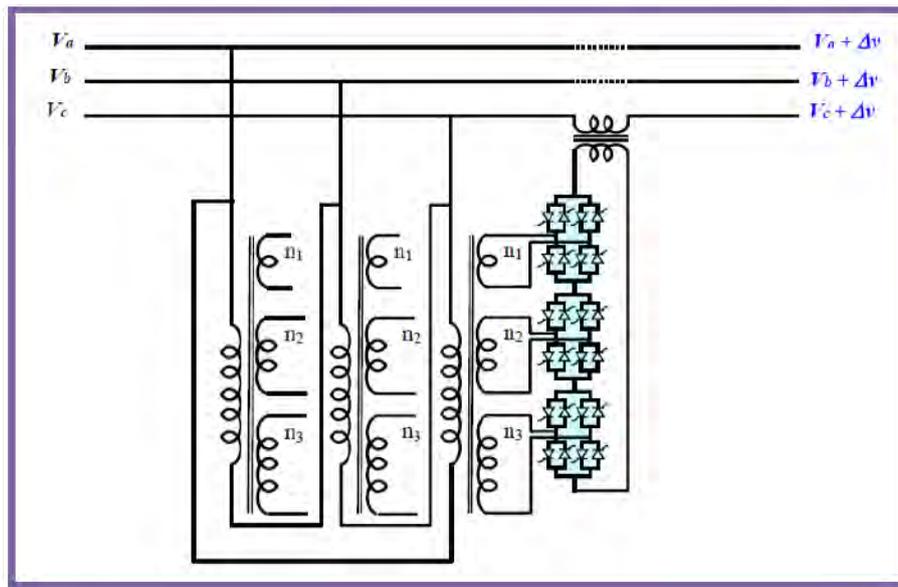


Figure II.13:Structure du TCPAR.

II.5.3.1.3. (TCVR) (Thyristor Controlled Voltage Regulator)

L'IEEE définit le Régulateur de tension commandé par thyristor TCVR comme étant un transformateur contrôlé par thyristor qui permet la commande de la phase de tension d'une manière continue. [8][30]

Le régulateur de tension commandé par thyristor TCVR, est un autre membre de la famille des FACTS combinés. Leur prix relativement réduit. [8]

II.5.3.2.Compensateurs hybrides à base de GTO

II.5.3.2.1.IPFC (Interline Power Flow Controller)

Le contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC est utilisé dans le cas d'un système de lignes multiples reliées à un même poste. Son principe est illustré à la figure (II.13), il 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. [7][4]

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. [7][4]

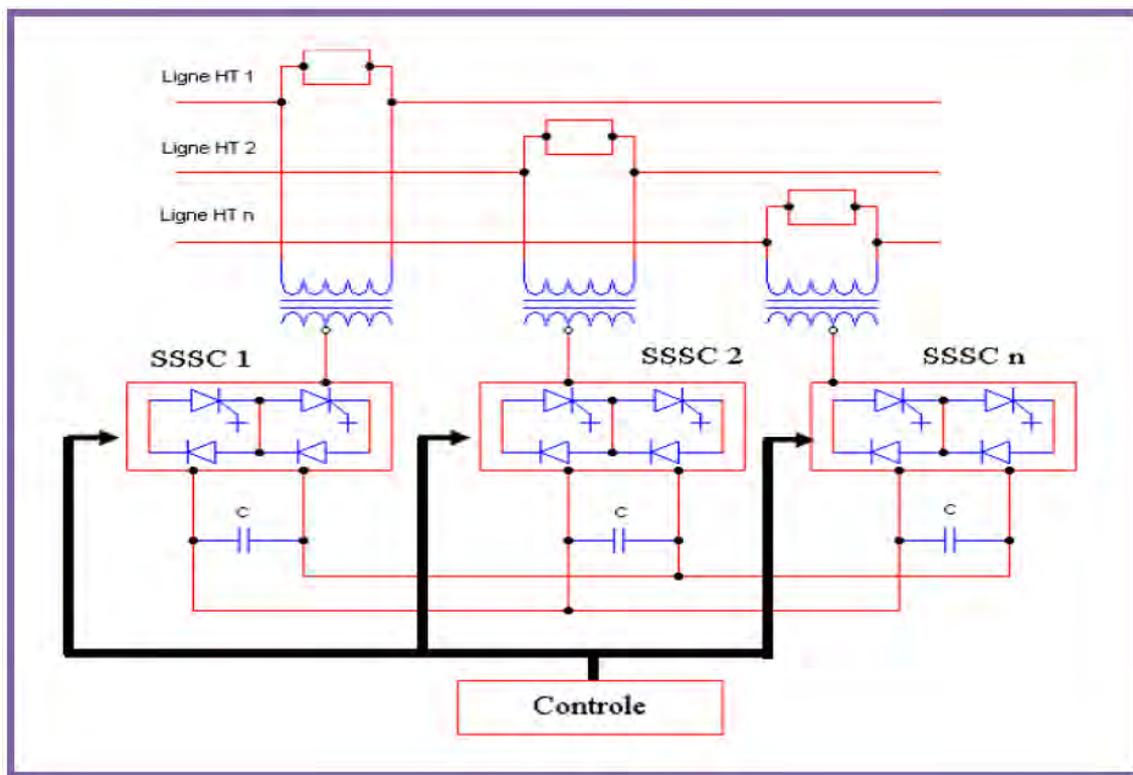


Figure II.14: Structure de l'IPFC.

II.5.3.2.2. UPFC (Unified Power Flow Controller)

Le contrôleur de transit de puissance universel UPFC est l'union de deux compensateurs, l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle. Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. [7] Son schéma de base est donné par la figure (II.14).

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur. [7]

Le premier concept a été présenté par Gyugyi en 1999. L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne, il 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.

Dans la figure (II.14) l'onduleur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur (2). L'onduleur (2) injecte la tension (V_b) et fournit les puissances actives et réactives nécessaires à la compensation série.

L'UPFC offre une flexibilité énorme qui permet le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne par un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. [27][10]

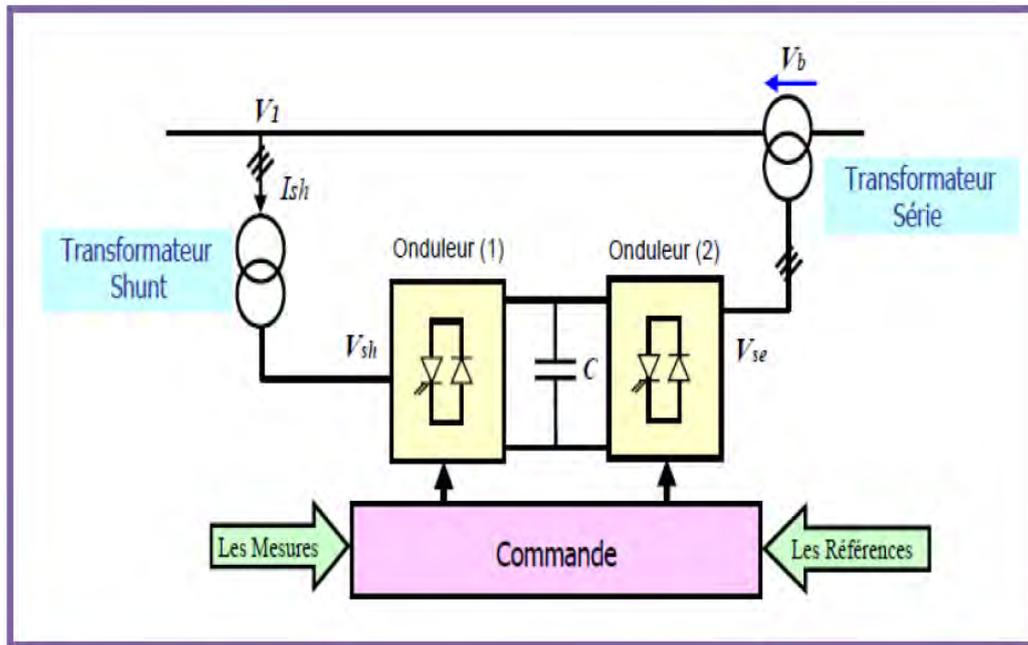


Figure II.15: Structure de l'UPFC.

Les principales applications du contrôleur de puissance universel sont :

- La commande des transits de puissances sur les lignes ;
- L'amélioration de la stabilité des réseaux électriques ;
- L'exploitation à pleine capacité des équipements et des lignes ;
- L'interconnexion des réseaux ; [26]
- 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 ; [4]

II.6.Synthèse

Le tableau (II.1) résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque dispositif FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique.

	Contrôle de Charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC STATCOM	★	★★★	★	★★
TCSC	★★	★	★★★	★★
SSSC	★★★	★	★★★	★★
TCPAR	★★★	★★	★	★★
UPFC	★★★	★★★	★★★	★★★

Influence:
Petite ★. Moyenne ★★. Forte ★★★.

Tableau II.1:Application des FACTS à la resolution des problemes dans le reseau.[25]

II.7.Apports et Avantages des dispositifs FACTS

Les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbant si la tension est trop élevée;
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire voire supprimé les surcharges dans les lignes ou les transformateurs. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages. [8]

Par cette action les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un sinon plusieurs des bénéfices suivants: [1]

- contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. ce

contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.

- Améliorer la stabilité dynamique du système: entre autre des fonctions des FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquence réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité d'énergie.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.

II.8.Applications Pratiques des Dispositifs FACTS en Exploitation

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau II.2 montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées. [1][22]

Type	Nombre	Puissance installée (MVA)
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	41	14.000
UPFC	2-3	250

Tableau II.2:Dispositifs FACTS installés dans le monde.

A ce jour, plusieurs centaines d'installations FACTS sont exploitées ou en cours de réalisation dans le monde. Un petit nombre de fabricants se partagent le marché. La majorité des dispositifs sont des compensateurs de puissance réactive de type SVC utilisés pour le maintien de la tension dans le réseau.

La grande majorité de ces dispositifs est placée dans le réseau pour accomplir une tâche bien précise et très locale. Rares sont les cas où plusieurs dispositifs peuvent interagir entre eux et nécessitent un contrôle coordonné. Dans cette section, quatre installations en exploitation sont présentées :

A. Condensateur Série Avancé (ASC) de Kayenta

Le condensateur série avancé ASC (*Advanced Series Capacitor*) est le nom commercial donné par le fabricant Siemens au dispositif série mixte comprenant un TCSC et un condensateur conventionnel. Un FACTS de ce type a été mis en service en 1992 à Kayenta (Arizona, USA), sur le réseau « Western Area Power Administration » (WAPA). Il a pour but d'utiliser une ligne 230 kV, longue de 230 km, à sa capacité de transport maximale. Celle-ci avait été dimensionnée pour transporter une puissance de 300 MW. De nouvelles lignes 345 kV et 500kV situées sur des chemins parallèles en empêchaient la pleine utilisation. Avec l'augmentation des échanges, certaines lignes étaient proches de leurs limites alors que la ligne 230 kV était sous-exploitée.

L'installation d'un ASC au milieu de la ligne permet d'accroître de 100 MW le transit de puissance dans la ligne et de l'exploiter proche de sa limite thermique. L'ASC permet une compensation réactive maximale de 330 MVar. [8][31]

B. TCSC d'Imperatriz

Un TCSC est utilisé depuis 1999 pour réaliser l'interconnexion nord-sud de Brésil. Ce pays possède deux systèmes électriques principaux qui n'étaient pas interconnectés. La puissance transportée est à 95% d'origine hydraulique. Pour bénéficier de la diversité hydrologique, une liaison consistant en un corridor de transmission de 500 kV, d'une longueur dépassant 1000 km a été construite. La ligne a été compensée par des compensateurs série en plusieurs endroits.

Un TCSC a été implanté au poste d'Imperatriz. Il permet une compensation comprise entre 5% et 15% de la ligne. Son rôle est principalement d'amortir les oscillations de puissance interzones à basse fréquence (0.2 Hz) qui peuvent présenter un risque pour la stabilité du

système. De plus, la réactance apparente inductive du TCSC aux fréquences hyposynchrones est bénéfique en cas de résonance introduite par la compensation. [8][31]

C. STATCOM de Sullivan

C'est en 1995 que fut installé un STATCOM à la sous-station de Sullivan, dans le réseau de la Tennessee Valley Authority (TVA). Ce poste est alimenté par le réseau 500 kV, via un transformateur de 1200 MVA avec un régleur en charge, ainsi que par quatre lignes 161 kV. Situé en bordure du réseau 500 kV de la TVA, la poste 500 kV de Sullivan était exposé à des surtensions en période creuse alors que la tension était trop faible sur le nœud 161 kV pendant les périodes de forte charge. De plus, la TVA possède une interconnexion avec la compagnie American Power Electric (AEP) par laquelle des oscillations de puissance pourraient arriver. Un STATCOM d'une puissance initiale de 100MVar permet de contrôler la tension du poste 161 kV lorsque la charge augmente afin d'éviter les changements de prises du transformateur 500/161 kV.

L'utilisation du STATCOM pour le réglage de la tension en ce nœud a permis de réduire le nombre d'interventions du transformateur d'environ 250 à (2-5) fois par mois. [8][31]

D. UPFC d'Inez

Le premier UPFC au monde a été installé en 1998 à Inez (Kentucky, USA), sur le réseau de l'American Power Electric (AEP). Cette région est alimentée par des unités de production situées à sa périphérie par le biais de longues lignes de transport 138 kV. Dans des conditions normales d'exploitation, un grand nombre de ces lignes transportaient des puissances de l'ordre de 300 MVA. Cette valeur est supérieure à la puissance naturelle des lignes à ce niveau de tension. Les lignes fonctionnaient proches de leur limite thermique, ce qui laissait peu de marge de sécurité en cas de défaut. De plus, les niveaux de tension dans la région d'Inez étaient généralement bas, soit aux environs de 95% de la valeur nominale.

Pour renforcer le système, une ligne à haute capacité 138 kV, 950 MVA et un transformateur 345/128 kV ont été construits. Un UPFC d'une puissance de ± 320 MVA a été installé. Il a pour but l'utilisation de la pleine capacité de la nouvelle ligne de manière à soulager le reste du réseau d'une part, et le maintien de la tension de la région d'autre part. Des réactances séries ont également été insérées dans les lignes de plus faible capacité afin d'en limiter la charge.

Dans les conditions normales d'exploitation. L'UPFC est géré de sorte que le transit de puissance conduise à un minimum de pertes dans le réseau. Une diminution moyenne des pertes de 24 MW a pu être observée. Lorsque la puissance circulant dans une des lignes critiques du réseau dépasse 90% de sa capacité, l'installation est contrôlée de manière à accroître le transit dans la nouvelle ligne pour réduire le courant dans les lignes surchargées. En cas de défaillance dans le réseau, l'UPFC permet d'éviter l'écroulement de tension en maintenant la tension à la sous station d'Inez. [8][31]

II.9. Coût des dispositifs FACTS

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que :

- ❖ Les performances requises.
- ❖ la puissance de l'installation.
- ❖ le niveau de tension du système.
- ❖ la technologie du semi-conducteur utilisé. [8]

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue globale (overview) sur les dispositifs FACTS (leurs classification et différentes catégories) avec des schémas qui structurent chaque dispositifs .de plus nous avons présenté quelques installations FACTS en exploitation dans le monde tel que l'ASC de kayenta, le STATCOM de Sullivan aux états unis, le TCSC d'Imperatriz au Brésil, etc. et à la fin une petite discussion sur le plan économique des installations FACTS.

Dans les chapitres suivants nous avons choisi d'étudier le STATCOM (*static compensator*) et le SVC (*Static Var Compensator*) comme dispositifs FACTS pour contrôler la tension et optimiser la puissance réactive dans un réseau de transport de l'énergie électrique.

Chapitre III

Structure et principe de fonctionnement du STATCOM et du SVC

Chapitre III

Structure et principe de fonctionnement du STATCOM et du SVC

III.1. Introduction

Le SVC est devenu un moyen populaire très répandu permettant de fournir un apport réactif rapide dans des systèmes de puissance, Ce dispositif est utilisé pour le contrôle de la tension, la compensation de l'énergie réactive et des pertes de système ainsi que pour améliorer les limites de stabilité.

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est très faible. Dans ce chapitre nous proposons à étudier la structure et le principe de fonctionnement de ces derniers « STATCOM et SVC ».

III.2. Le compensateur statique SVC

III.2.1. 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 Amérique du Nord [4][2][33], 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. Les SVCs sont des FACTS de la première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage.

Plusieurs conceptions différentes ont été proposées. Toutefois, la plupart des SVCs sont construits à partir des mêmes éléments de base permettant de fournir ou d'absorber de la puissance réactive.

Depuis 1970 plus de 300 SVC est installé autours du monde, plus de 90 installé en Amérique du Nord. La figure (III.1) montre l'évolution d'installation du SVC dans le monde jusqu'à l'année 2006. [4][2]

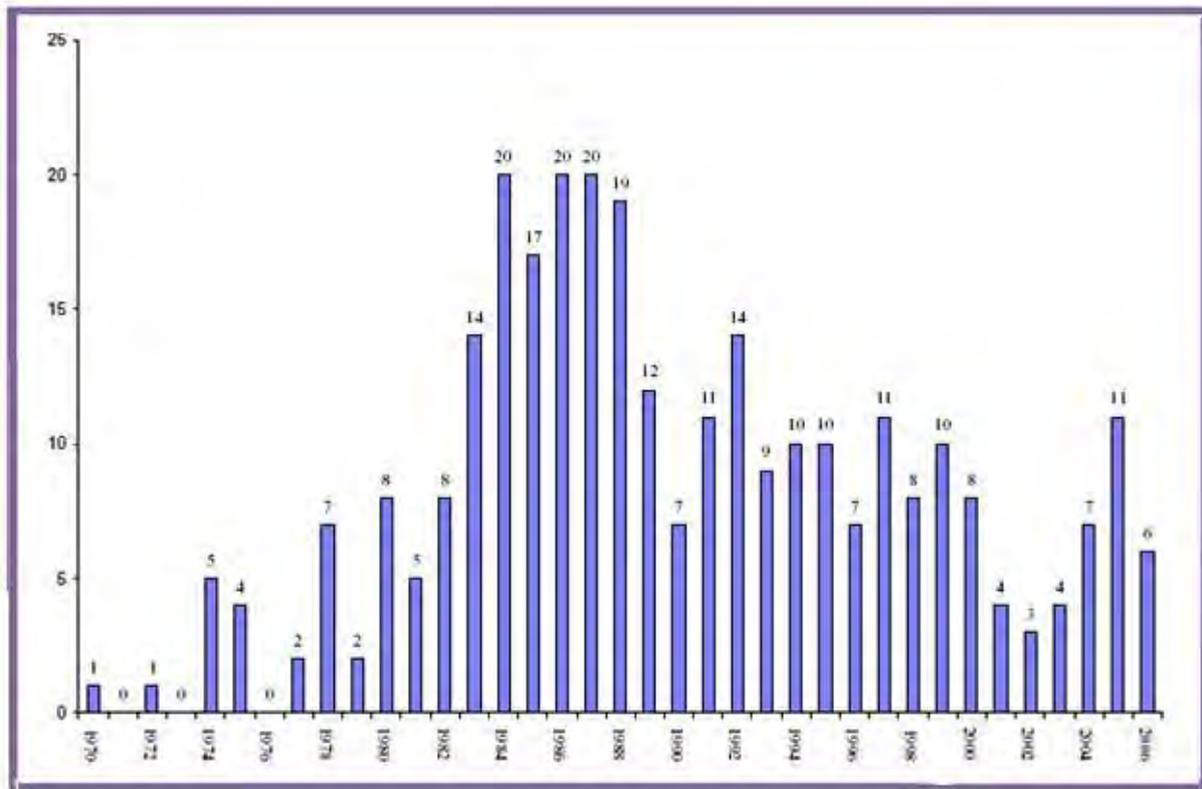


Figure III.1: Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006.

(Basée sur liste compilée en 2006 par groupe IEEE I4 travaillé sur SVC et autre données des fabricants).

III.2.2. Définition du SVC

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur des limites désirées. Le SVC injecte (ou absorbe) de la puissance réactive dans le jeu de barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge. [20]

III.2.3. Structure et constitution d'un SVC

La figure (III.2) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique shunt (SVC). Il est composé d'un condensateur de réactance " X_c " dont la puissance réactive fournie peut être complètement enclenchée ou complètement déclenchée et d'une bobine d'induction de réactance inductive " X_L " dont la puissance réactive absorbée est commandée entre zéro et sa valeur maximale par des thyristors montés en tête-bêche pour assurer des inversions très rapides du courant.[4], la figure (III.3) montre son schéma équivalent.

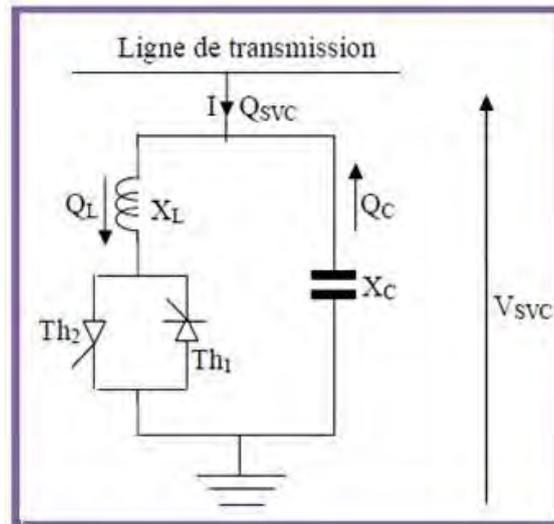


Figure III.2: Représentation schématique monophasée d'un compensateur statique (SVC).

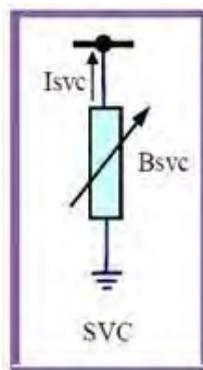


Figure III.3: Schéma équivalent d'un SVC.

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

$$p_i = 0 \dots\dots\dots(III.1)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{SVC} \dots\dots\dots(III.2)$$

***Principe de fonctionnement**

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

III.2.3.1. Condensateur fixe (FC)

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

III.2.3.2. Réactance commandée par thyristors (TCR)

*Principe de fonctionnement

La réactance commandée par thyristors TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*) possède une bobine d'inductance fixe "L" branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle montré dans la figure (III.4), La réactance contrôlée par thyristors permet un contrôle plus fin de la puissance réactive car elle permet un contrôle continu du courant de compensation.

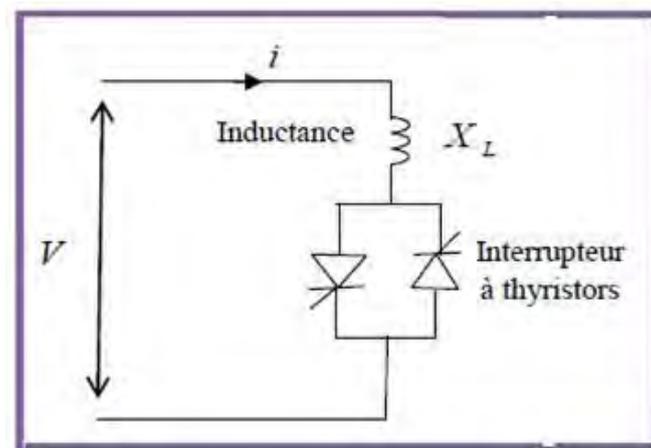


Figure III.4:Eléments de base d'un TCR. [6]

Les thyristors sont enclenchés avec un certain angle d'allumage α et conduisent alternativement sur une demi-période. On définit l'angle d'allumage α à partir du passage par zéro dans le sens positif de la tension aux bornes du thyristor à allumer. L'angle de conduction σ est l'angle pendant lequel les thyristors conduisent. Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé et la tension à ses bornes est positive. Il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule. Les thyristors sont allumés de façon symétrique toutes les demi-périodes. Le courant à fréquence fondamentale est réglé par la commande de phase de la valve à thyristors. En pleine conduction ($\alpha = 90^\circ$), le courant est essentiellement réactif et sinusoïdal, et lorsque $\alpha = 180^\circ$, on est en conduction nulle. [34][35]

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

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \dots\dots\dots(III.3)$$

Une conduction partielle des thyristors est accomplie avec un angle d'amorçage α compris entre 90° et 180° , a pour effet de réduire la fondamentale du courant, figure (III.5) (les courbes b et c), et donc de diminuer la susceptance apparente de l'inductance.

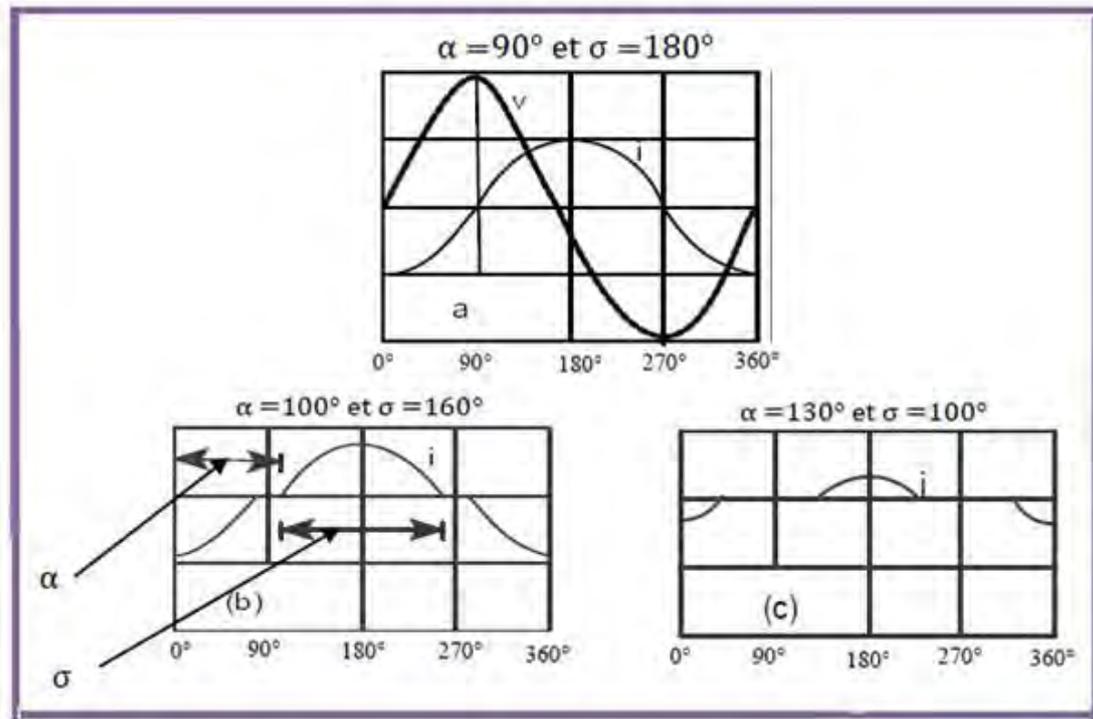


Figure III.5: Angle d'amorçage et de conduction d'un TCR.

III.2.3.3. 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 " L_ℓ ", figure (III.6).

Le commutateur a pour rôle d'enclencher et de déclencher le condensateur pour un nombre entier de demi-cycles de la tension appliquée. Le condensateur n'est ainsi pas commandé en phase, mais simplement enclenché et déclenché. L'inductance d'atténuation sert à limiter le courant en cas de fonctionnement anormal et à éviter la résonance avec le réseau à des fréquences particulières [4] [34]. 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.

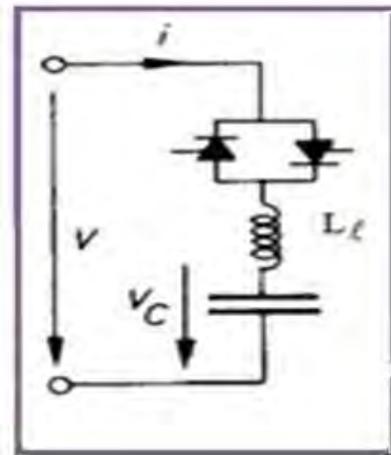


Figure III.6:Eléments de base d'un TSC.

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

La susceptance étant fixe, le courant dans le TSC varie linéairement avec la tension V (qui explique l'absence des harmoniques sur le TSC). La zone de fonctionnement est similaire à celle d'un TSR; elle est illustrée à la figure (III.7.a). Généralement le SVC de type TSC contient n banc de TSC montés en parallèle. La susceptance est ajusté par le contrôle du nombre de condensateurs parallèles en conduction. Chaque condensateur conduit toujours pour un nombre intégrant de demi-cycle. La relation qui relie le courant de compensation et le nombre de condensateurs en conduction est montrée dans la figure (III.7.b). [4]

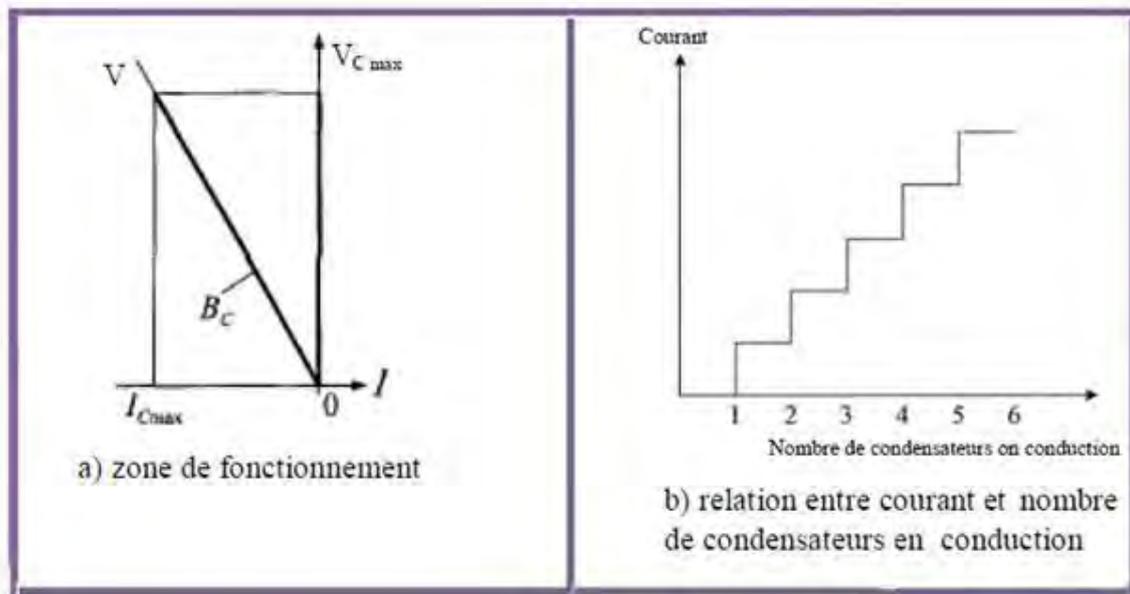


Figure III.7: Principe d'un TSC.

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

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

III.2.4. Les différents types du compensateur SVC

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

III.2.4.1. Dispositif type "TCR" ou "FC/TCR": (Thyristor Controlled Reactor or Fixed Capacitors/thyristor - Controlled Reactor)

Ce dispositif est principalement constitué d'une batterie de condensateurs et d'un absorbeur réactif, figure (III.8). La batterie de condensateurs est dimensionnée pour fournir une puissance réactive fixe " Q_c " dont le rôle est de relever le facteur de puissance de l'installation à la valeur désirée. L'absorbeur réactif comprend une inductance alimentée à travers un gradateur constitué de deux thyristors montés en tête bêche, il prélève une puissance réactive variable " Q_L " qui permet de compenser les perturbations causées par la charge " Q_{ch} ".

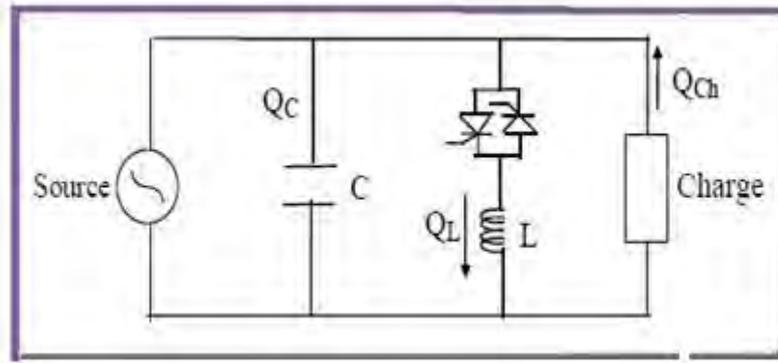


Figure III.8: Schéma de principe d'un FC/TCR.

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

La figure (III.9) montre le courant traversant l'inductance en fonction de la tension à ses bornes et de la commande du thyristor en série.

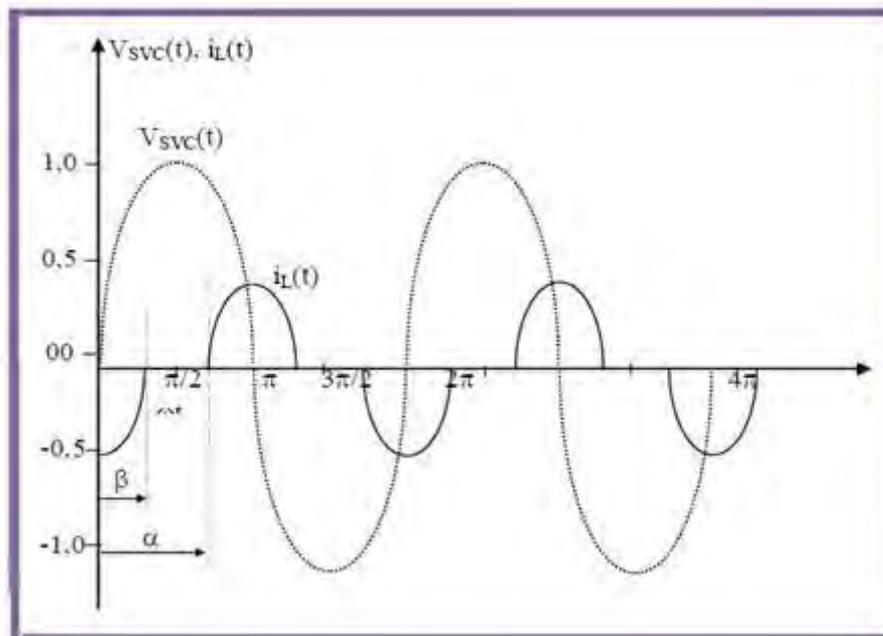


Figure III.9 : Forme du courant d'inductance.

III.2.4.2. Dispositif type TCR/TSC (Thyristor Controlled Reactor/ Thyristor Switched Capacitor)

Ce dispositif est une association de réactance réglable et de condensateurs couplés par thyristors, figure (III.10).

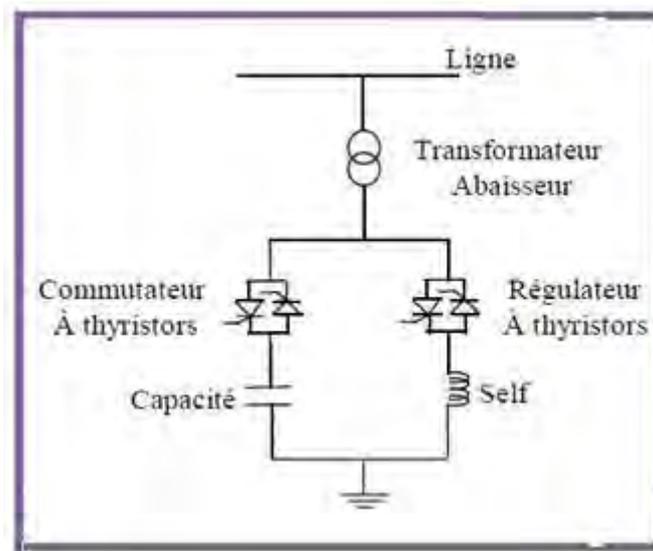


Figure III.7: Schéma de principe d'un SVC de type TCR/TSC.

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

Le principe général consiste à compenser le plus exactement possible les variations de puissance réactive de la charge par une puissance réactive variante dans un sens opposé par une bobine d'inductance dont le courant est réglé par le gradateur. Un banc de condensateurs complète le dispositif et permet d'ajuster le réactif absorbé par l'ensemble charge et compensateurs [36]. L'application de ce dispositif dans les réseaux à haute tension exige un transformateur abaisseur pour l'adaptation aux caractéristiques électriques optimisées des thyristors. [37]

III.2.4.3. Dispositif mobile type TSC (Thyristor Switched Capacitor)

On a retenu une exécution avec des condensateurs connectés par thyristors sur des véhicules routiers. La gamme de réglage dynamique totale de compensateur s'étale de 0 à 60 MVAR, elle est fournie par trois bancs de condensateurs commutés par thyristors. Bien que les condensateurs commutés par thyristors ne produisent eux mêmes pas d'harmoniques, on a installé des réactances afin d'éviter l'amplification des harmoniques existantes dans le réseau, figure (III.11). [38][4]

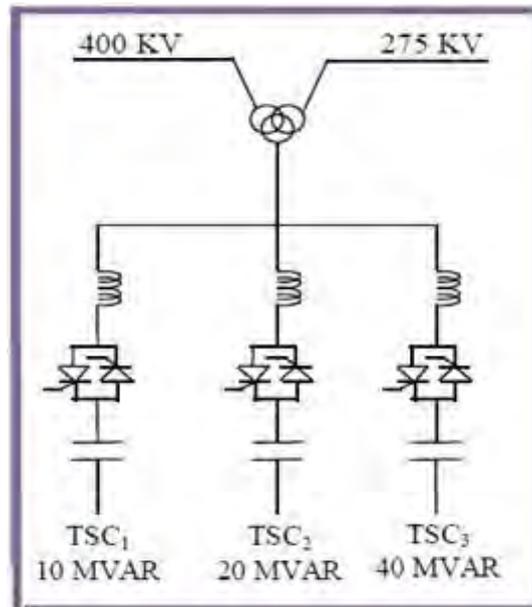


Figure III.8: Schéma monofilaire d'un compensateur mobile "TSC".

La figure (III.12), donne quelques différentes configurations possibles existantes du compensateur SVC. Dont les schémas (a) et (c) comporte un filtre permettant de réduire les harmoniques.

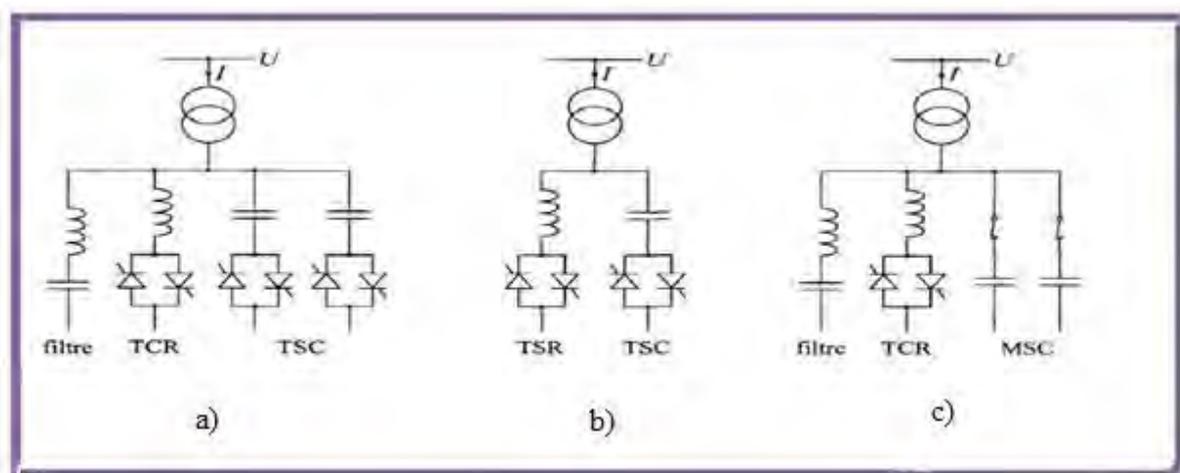


Figure III.9: Différents schémas du compensateur statique SVC.

III.2.5. Caractéristiques d'un compensateur statique SVC

III.2.5.1. Caractéristique en V d'un SVC

Ajustons l'angle α des thyristors commandant la branche inductive à 90° , de façon à obtenir la pleine conduction. Le courant est alors à sa valeur maximal, la droite (L//C) de la figure (III.13) montre la relation entre la tension U et le courant I_{SVC} . [6]

$$I_{SVC} = \frac{V_{SVC}}{X_L // X_C} \dots\dots\dots (III.4)$$

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

$$I_{SVC} = \frac{V_{SVC}}{X_C} \dots\dots\dots (III.5)$$

La coutume est d'ajouter un signe (-) à ce courant capacitif pour le distinguer du courant inductif. La relation entre le courant et la tension est alors une nouvelle droite, désignée par (C), figure (III.13).

Les droites (L//C) et (C) forment ensemble une « courbe en V » qui correspond aux limites inductive et capacitive du compensateur statique. [6]

*Cette figure pour : $X_C = 2 * X_L$

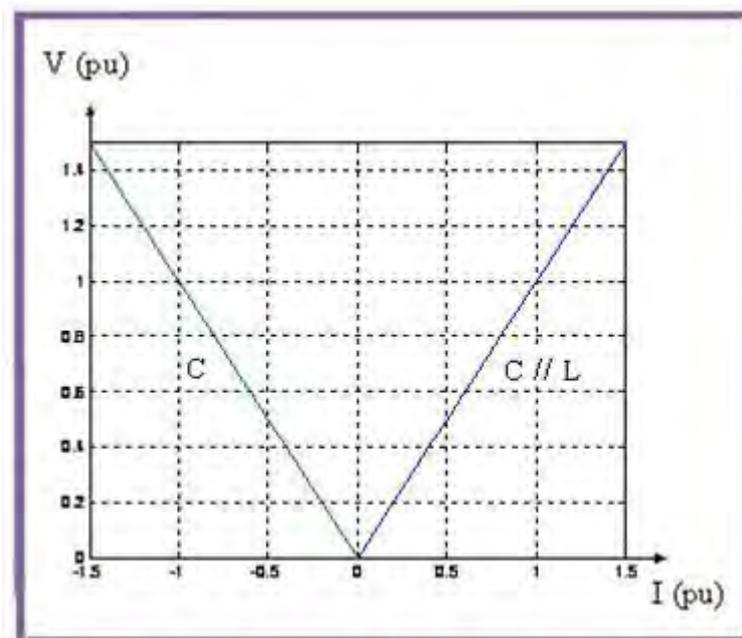


Figure III.10: Caractéristique en V d'un SVC.

D'après cette courbe, on a un courant capacitif lorsque le condensateur est en service et l'inductance est débranchée donc le montage génère une puissance réactive et cette puissance

est en fonction de la capacité du condensateur et de la tension. Lorsque les deux sont en service le montage génère ou consomme une puissance réactive. [39]

III.2.5.2. Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC

Pour fixer le signe de puissance réactive Q_{SVC} , le compensateur est considéré comme un commutateur. La puissance réactive Q_{SVC} est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (*comportement inductif*), le courant d'entrée I est un courant réactif, il est supposé positif lorsqu'il est retardé de 90° par rapport à la tension V_{SVC} . Si par contre, le compensateur fournit de la puissance réactive (*comportement capacitif*), cette dernière est considérée comme étant négative, ainsi que le courant I . Ces relations sont prises en compte sur la figure (III.14). Par conséquent, la puissance réactive Q_L est positive alors que la puissance réactive Q_C est négative. [6]

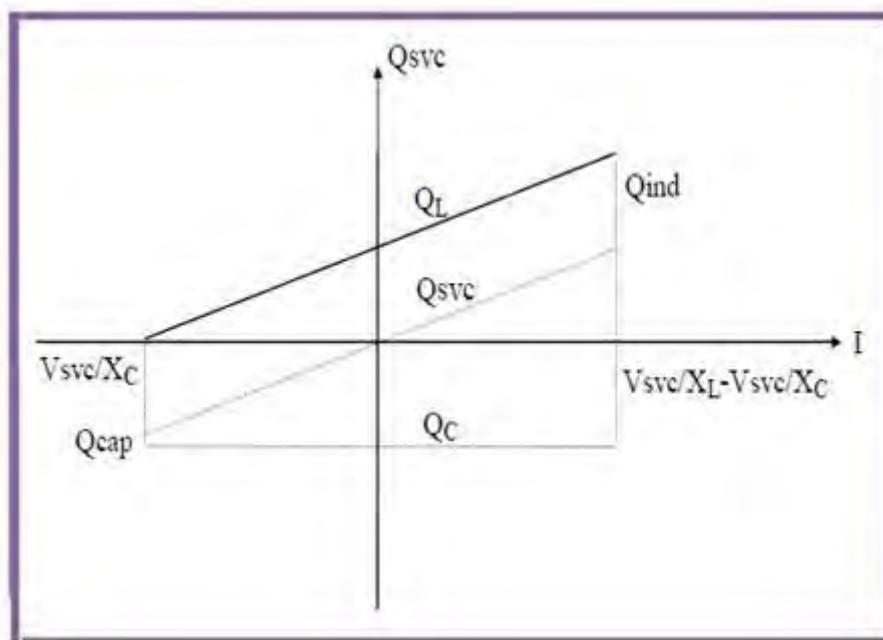


Figure III.11: Variation de la puissance réactive en fonction de courant.

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

$$Q_{cap} = \frac{v_{svc}^2}{x_c} \dots\dots\dots (III.6)$$

De cette équation on obtient alors la réactance capacitive X_c nécessaire pour le condensateur, et de la relation suivante on peut déterminer la réactance X_L de la bobine d'inductance :

$$Q_{ind} = \frac{V_{SVC}^2}{X_L} - \frac{V_{SVC}^2}{X_c} \dots\dots\dots(III.7)$$

Les équations (III-6) et (III-7) se rapportent à une phase du compensateur triphasé.

III.3. Le Compensateur Statique d'Energie Réactive de type Avancé (STATCOM)

Après le SVC, l'arrivée des thyristors GTO a conduit au développement d'un autre dispositif FACTS shunt: le STATCOM. Similaire au compensateur synchrone tournant classique, le STATCOM présente un temps de réponse plus court. Il est capable de fournir ou d'absorber de l'énergie réactive. Il se présente le plus souvent sous la forme d'un onduleur de tension.

Le concept de base du STATCOM a été proposé par Gyugyi en 1976. Les premiers STATCOM, à base de convertisseurs de deux niveaux, appliqués dans les réseaux de transports sont:

- Le STATCOM de $\pm 80MVAR$ appliqués à un réseau de transport de 154KV à Inuyama au Japon et à été commercialisé par Kansai Electric Power Corporation et Mitsubishi Electric Power Corporation.
- LE STATCOM de $\pm 100MVAR$ à 161 KV installé à la station de Sullivan du Nord-Est de Tennessee par Westinghouse Electric Corporation aux Etats Unis.

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.15). [1][22][32]

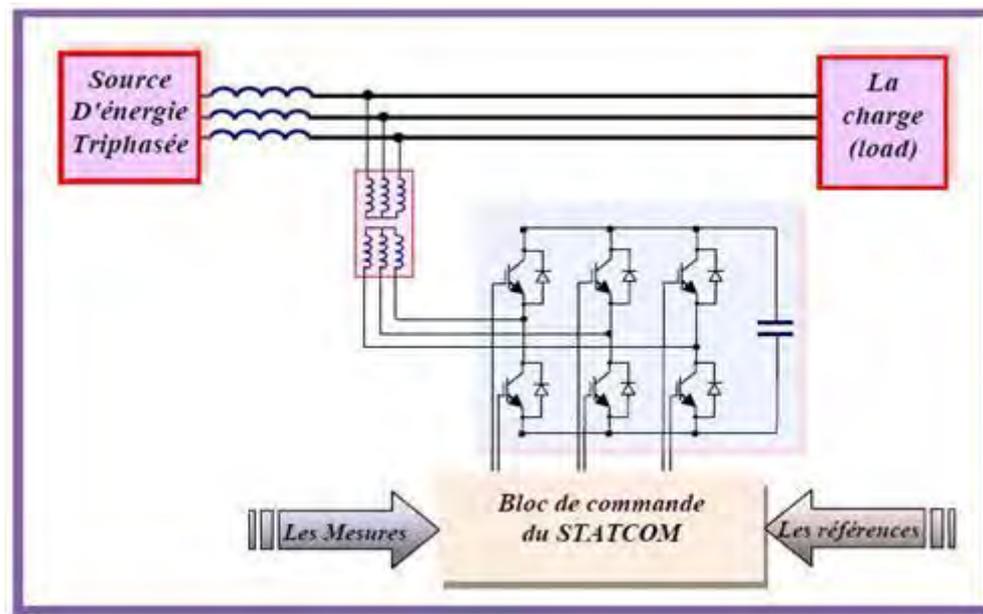


Figure III.12: Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

III.3.1. Définition du STATCOM

La définition du STATCOM selon l'IEEE est comme suite:

«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 ». [1][32]

III.3.2. Principe de Fonctionnement du STATCOM

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé 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.

En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement de la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM comme le résume la figure (III.16). [32]

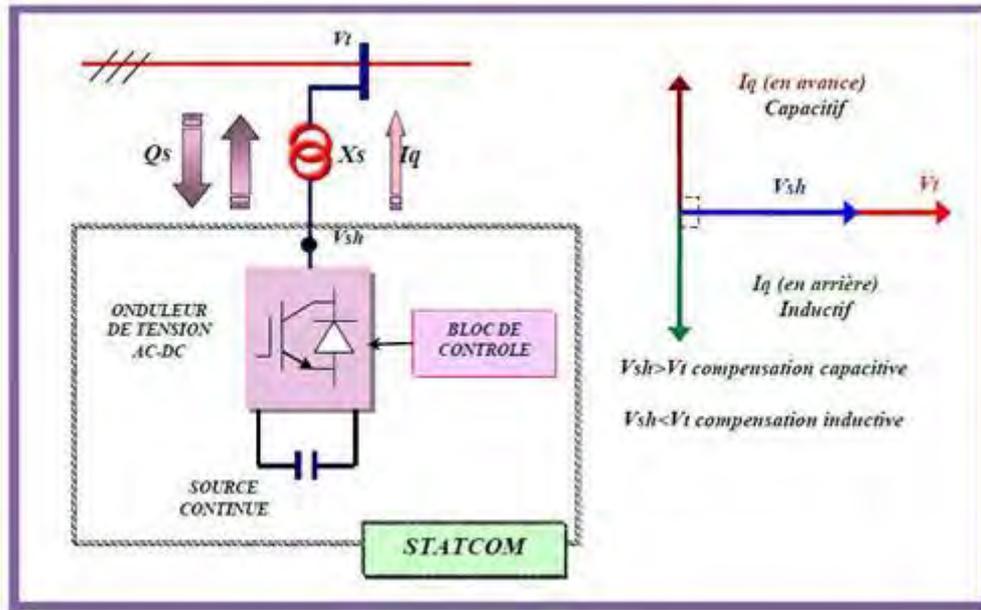


Figure III.13: Principe de fonctionnement du STATCOM.

Considérant le STATCOM de la figure (III.15) connecté à un jeu de barre dans le système énergétique (source de tension, ligne et charge), le schéma équivalent de ce dispositif est donné par la figure (III.17).

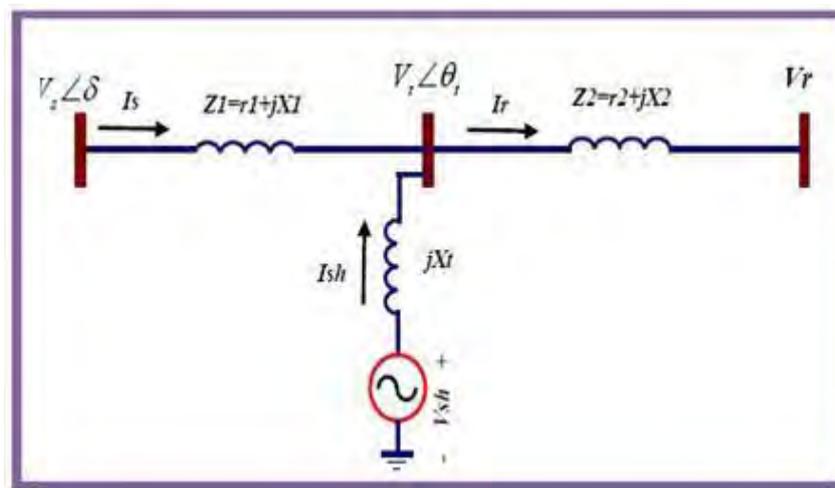


Figure III.14: Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique.

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{Sh} = \frac{\bar{V}_{Sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \dots\dots\dots(III.8)$$

La puissance injectée au jeu de barre "t" est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{Sh} = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}_{Sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_{Sh}^* - \bar{V}_t^2}{-jX_t} \dots\dots\dots(III.9)$$

D'où on abouti aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées par les formules suivantes:

$$P_{Sh} = -V_t V_{Sh} \cdot \frac{\sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} \dots\dots\dots(III.10)$$

$$Q_{Sh} = V_t \cdot \frac{(V_{Sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t)}{X_t} \dots\dots\dots(III.11)$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

Donc: $P_{Sh} = 0 \dots\dots\dots(III.12)$

D'où la condition : $\theta_t - \theta_{sh} = 0 \Rightarrow \theta_t = \theta_{sh} \dots\dots\dots(III.13)$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM V_{Sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement V_t . Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante.

Comme les tensions V_{Sh} et V_t sont en phase, le courant I_{Sh} du STATCOM est en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif, son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations suivantes (en admettant que la tension V_t est sur l'axe d (comme référence des phases)):

$$V_{Shd} = V_{Sh}; V_{Shq} = 0$$

$$|I_{Sh}| = I_{Shq} = \frac{V_{Sh} - V_t}{X_t} \dots\dots\dots(III.14)$$

$$Q_{Sh} = V_{Sh} \cdot I_{Shq} = \frac{V_{Sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{Sh}}\right) \dots\dots\dots(III.15)$$

A partir de l'équation (III.15) il paraît clair que si le module de la tension du STATCOM V_{Sh} égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{Sh} > V_t$, donc $Q_{Sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau. Figure (III.18), et si $V_{Sh} < V_t$ alors $Q_{Sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif Figure (III.19).

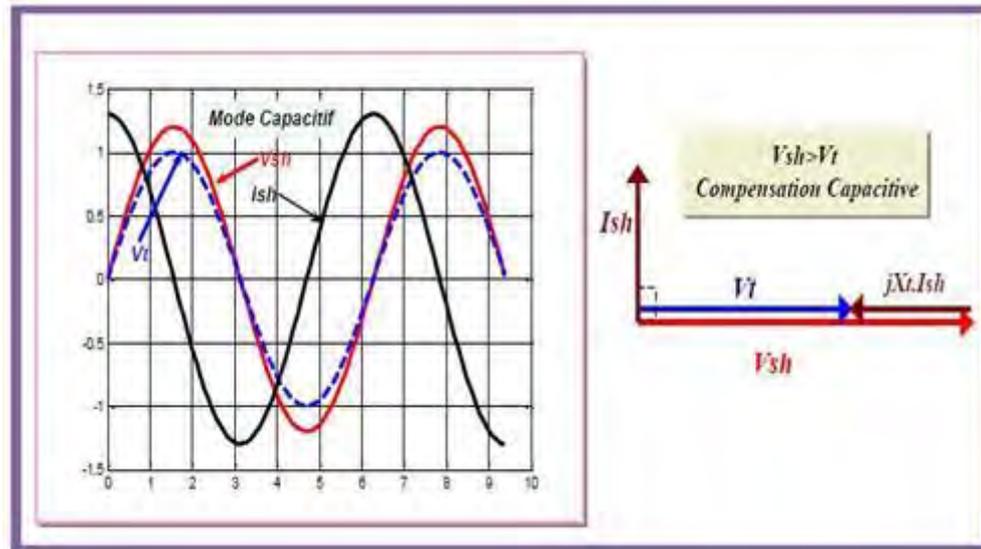


Figure III.15: Courant et tensions en mode capacitif. [1]

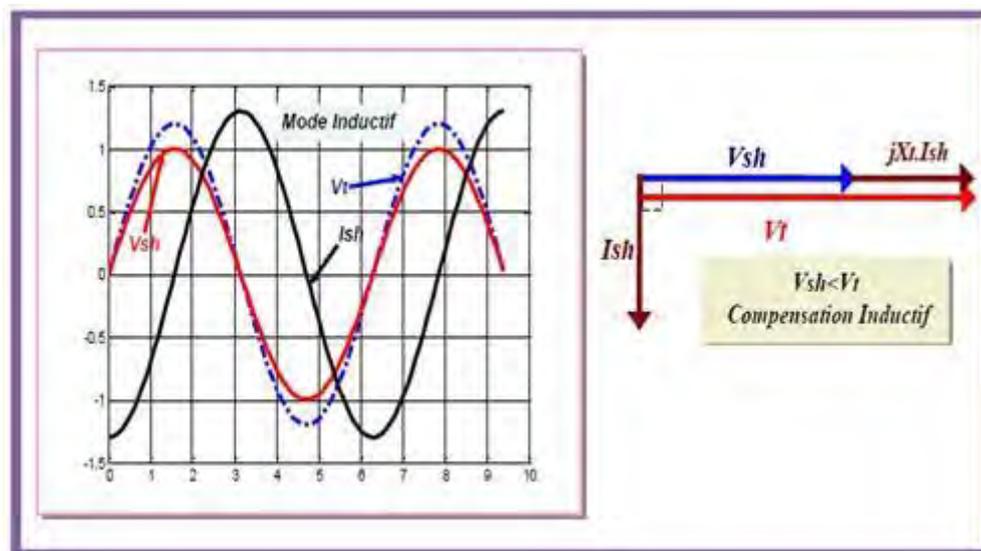


Figure III.19: Courant et tensions en mode inductif. [1]

III.3.3. Caractéristiques du compensateur statique STATCOM

A partir de la figure (III.17) qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un STATCOM installé dans une ligne de transport. On peut visualiser les différentes caractéristiques de ce dernier.

On détermine d'abord les équations des courants I_s , I_{sh} et I_r :

$$\bar{I}_s = \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \dots\dots\dots (III.16)$$

$$\bar{I}_{sh} = \frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \dots\dots\dots (III.17)$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t + \bar{Z}_1\bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + jX_t)\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \dots\dots\dots (III.18)$$

Les puissances injectées par la source V_s peuvent être calculée à partir des équations:

$$P_s = \text{Re}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Re}[\bar{V}_s \times (\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)})^*] \dots\dots\dots (III.19)$$

$$Q_s = \text{Im}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Im}[\bar{V}_s \times (\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)})^*] \dots\dots\dots (III.20)$$

III.3.3.1. Caractéristique $Q_s(P_s)$

En visualisant sur la courbe de la figure (III.20), les puissances actives et réactives (Q_s en fonction de P_s) délivrées par la source pour différentes valeurs de la tension V_{sh} injectée par le STATCOM, on voit que la puissance réactive Q_s diminue (*compensée*) ce qui explique l'augmentation du réactive injectée par le compensateur shunt dans le réseau. [10][1]

Par exemple, sur la même courbe de la figure (III.20), afin de transmettre une puissance active P_s égale 1.0 pu, la puissance réactive Q_s doit être égale à 0.8 pu si la tension à la sortie de l'onduleur V_{sh} est égale à 0.2 pu. Par contre Q_s diminue jusqu'à 0.13 pu si la tension injectée $V_{sh}=1.1$ pu, pour transmettre la même quantité de la puissance active P_s .

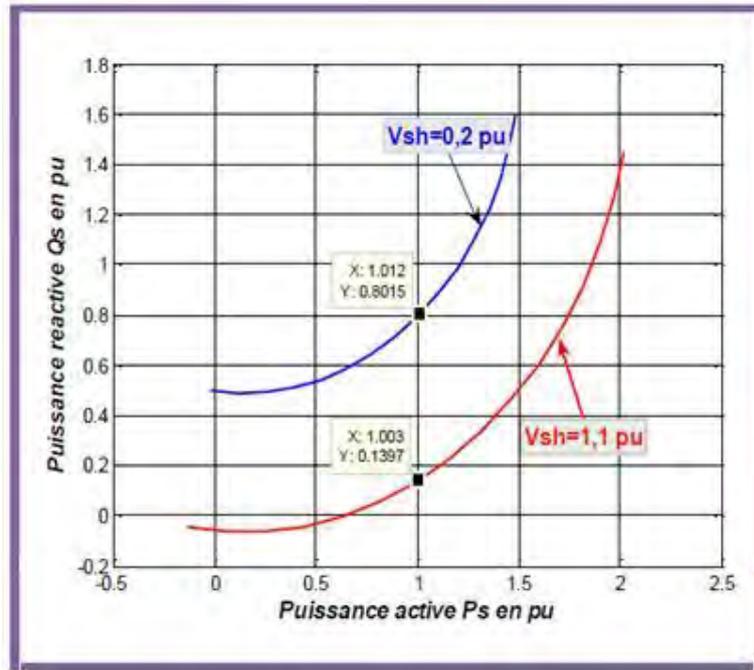


Figure III.16: Qs en fonction de Ps pour différentes valeurs de Vsh.

III.3.3.2. Caractéristique Ps, Qs, Psh, Qsh en fonction de Vsh

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations (III.21) et (III.22) suivants sont représentées sur la figure (III.21).

$$P_{Sh} = \text{Re}(\bar{V}_{Sh} \cdot \bar{I}_{Sh}^*) = \text{Re}[\bar{V}_{Sh} \times (\frac{-\bar{Z}_2 \bar{V}_S + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \bar{V}_{Sh} - \bar{Z}_1 \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)})^*] \dots\dots\dots (III.21)$$

$$Q_{Sh} = \text{Im}(\bar{V}_{Sh} \cdot \bar{I}_{Sh}^*) = \text{Im}[\bar{V}_{Sh} \times (\frac{-\bar{Z}_2 \bar{V}_S + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \bar{V}_{Sh} - \bar{Z}_1 \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)})^*] \dots\dots\dots (III.22)$$

Sur la caractéristique de la figure (III.21) qui représente la variation des puissances active et réactive Ps et Qs transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive Psh et Qsh injectées par le STATCOM, en fonction des variations de l'amplitude de la tension Vsh il paraît clair que l'influence de la tension Vsh sur la puissance réactive Qs est plus grande que sur la puissance Ps. Et on voit qu'en augmentant la tension Vsh la puissance réactive injectée par le STATCOM augmente et par conséquent la puissance réactive injectée au réseau par le générateur diminue.

Nous pouvons constater aussi que la capacité de transit de la puissance active est améliorée. Celle-ci était occupée par la puissance réactive. [10]

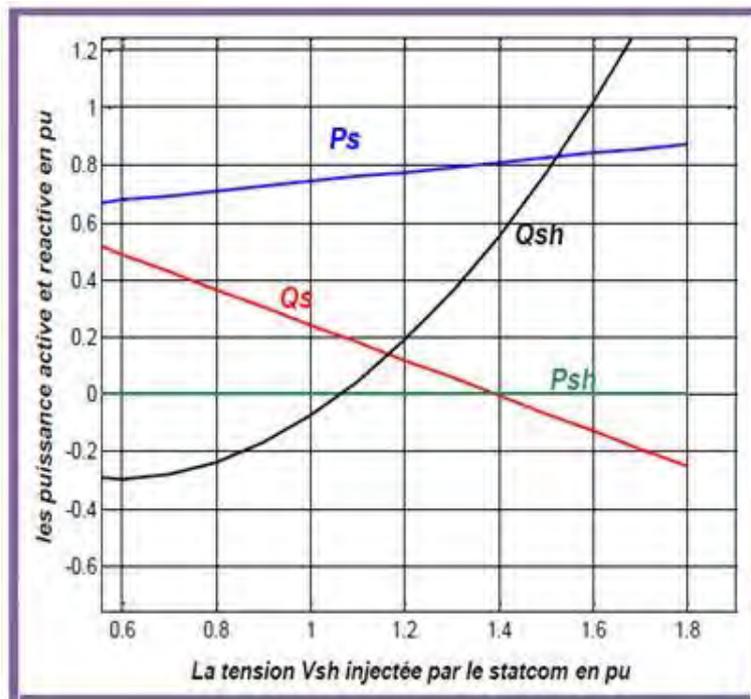


Figure III.17: P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh} . [1]

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté principalement la structure et le principe de fonctionnement des deux dispositifs FACTS (STATCOM et SVC). Nous avons aussi présenté quelques caractéristiques pour chaque compensateur étudié. Avec des schémas présentatifs sont bien illustrés.

Chapitre IV

Modélisation et commande du STATCOM et du SVC

Chapitre IV

Modélisation et commande du STATCOM et du SVC

IV.1.Introduction

Pour pouvoir observer l'impact des deux dispositifs FACTS (STATCOM et SVC) dans un réseau électrique, il est nécessaire de les représenter par des modèles mathématiques appropriés. Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électrique, série ou parallèle, sont très utiles sinon obligatoire pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande de ces dispositifs (FACTS) à base de ces convertisseurs.

Plusieurs modèles de FACTS ont été développés. La description mathématique est basée sur la transformation du système triphasé à un système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par la transformation de PARK afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d, q) (Annexe (a)). Pour cette modélisation nous avons opté pour les hypothèses suivantes:

- ✚ Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- ✚ Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- ✚ Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que le fondamentale.
- ✚ L'inductance de fuite du transformateur de couplage Parallèle du STATCOM est représentée par l'inductance L_{sh} .
- ✚ Pour simplifier le modèle mathématique, il est utile de travailler avec le système d'unité relative [P.U] (pour un), où les grandeurs I_B et U_B sont des grandeurs de base:

$$\begin{cases} Z_{pu} = \frac{U_B}{I_B} \\ U_{pu} = \frac{U}{U_B} \\ I_{pu} = \frac{I}{I_B} \end{cases} \quad \text{Et} \quad \begin{cases} L_{pu} = \frac{X_{pu}}{\omega_B} \\ R_{pu} = \frac{R}{Z_B} \\ C_{pu} = \frac{1}{\omega_B C Z_B} \end{cases}$$

ω_B : est la vitesse angulaire de la composante fondamentale de la tension du réseau.

IV.2.Modélisation du STATCOM

Comme il était déjà décrit dans le chapitre précédant, la structure triphasée du STATCOM est donnée par la figure (IV.1), où on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante qui est représenté par les capacités (C_1)et (C_2) (C est l'équivalente des deux $C = C_1 + C_2$) en parallèle avec les résistances (R_1)et (R_2) qui présente ses pertes, L'onduleur est modélisé par des interrupteurs idéaux en série avec la résistance R qui représente les pertes par conduction. Les tensions simples (V_{ra},V_{rb},V_{rc}) représentent les tensions des points auxquels le STATCOM est raccordé avec la ligne de transport.

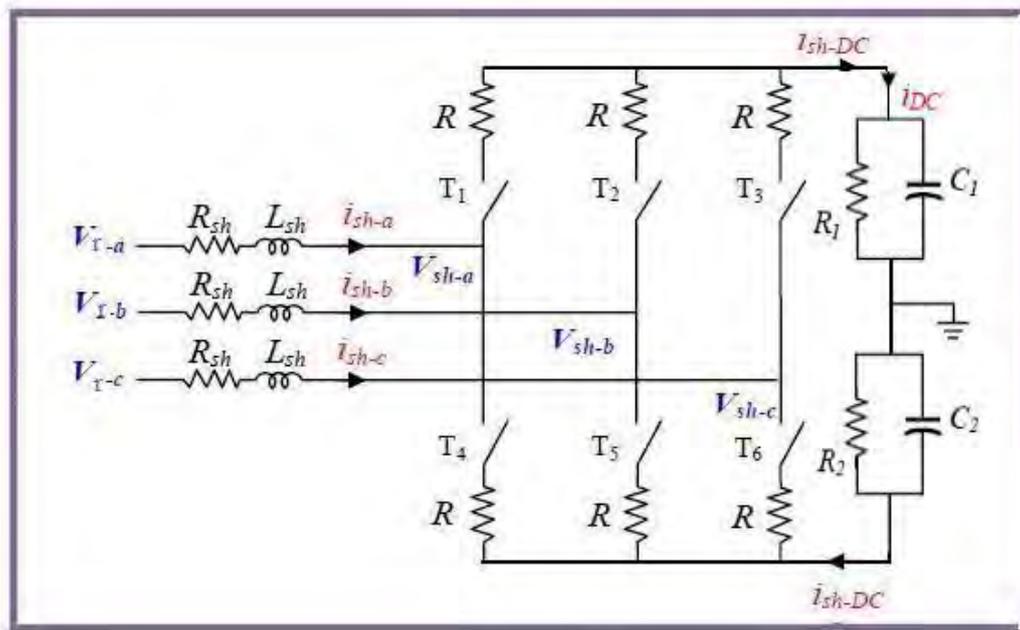


Figure IV.1:Schéma simplifié d'un STATCOM connecté au réseau. [10]

Le schéma équivalent du STATCOM est comme reproduit sur la figure (IV.2) en tenant compte uniquement du jeu de barre où il est connecté ce dispositif. Le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle, le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage ; le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur. Figure (IV.2)

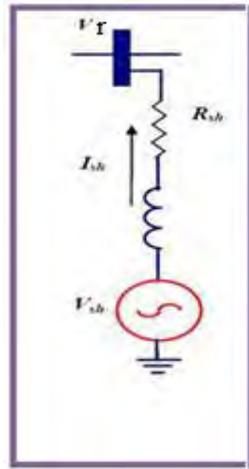


Figure IV.2:Schéma équivalent du STATCOM. [1]

L'équation (IV.1) illustre la relation entre les courants et les tensions pour chaque phase, côté alternatif :

$$\bar{V}_r - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \dots\dots\dots (IV.1)$$

Tel que :

$$\bar{V}_r = \begin{bmatrix} V_{r-a} \\ V_{r-b} \\ V_{r-c} \end{bmatrix} ; \quad \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{sh-a} \\ V_{sh-b} \\ V_{sh-c} \end{bmatrix} ; \quad \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sh-a} \\ I_{sh-b} \\ I_{sh-c} \end{bmatrix}$$

Alors on peut écrire l'équation (IV.1) sous la forme matricielle comme suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{r-a} \\ V_{r-b} \\ V_{r-c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sh-a} \\ V_{sh-b} \\ V_{sh-c} \end{bmatrix} = R_{sh} \begin{bmatrix} I_{sh-a} \\ I_{sh-b} \\ I_{sh-c} \end{bmatrix} + L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh-a} \\ I_{sh-b} \\ I_{sh-c} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.2)$$

Pour simplifier ces équations on utilise la transformation de Park dite « des deux axes » (en 1920).la matrice de Park modifiée est :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\theta & -\sin\theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasé, Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (dq). [11] Figure (IV.3).

Généralement on peut écrire :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)][X_{odq}] \dots\dots\dots(IV.3)$$

Alors $[X_{odq}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{abc}] \dots\dots\dots(IV.4)$

L'équation (IV.1) est de la forme : $[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + L \frac{d[I_{abc}]}{dt}$

Alors

$$[V_{r-abc} - V_{sh-abc}] = R_{sh}[I_{sh-abc}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh-abc}]}{dt}$$

Après le développement de cette équation (voire l'annexe (a)) on a trouvé :

$$[V_{r-dq} - V_{sh-dq}] = R_{sh}[I_{sh-dq}] + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} L_{sh} \frac{d\theta}{dt} [I_{sh-dq}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh-dq}]}{dt} \dots\dots\dots(IV.5)$$

Tel que : $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ alors :

$$\begin{cases} V_{r-d} - V_{sh-d} = R_{sh}I_{sh-d} - L_{sh}\omega I_{sh-q} + L_{sh} \frac{dI_{sh-d}}{dt} \dots\dots\dots(IV.6) \\ V_{r-q} - V_{sh-q} = R_{sh}I_{sh-q} + L_{sh}\omega I_{sh-d} + L_{sh} \frac{dI_{sh-q}}{dt} \dots\dots\dots(IV.7) \end{cases}$$

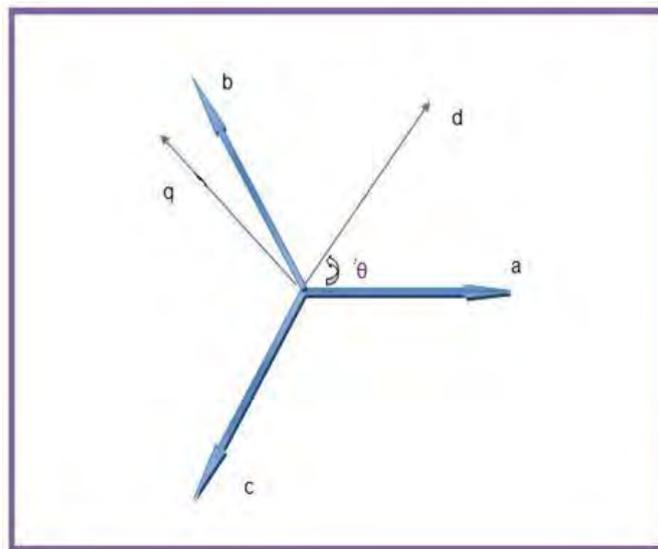


Figure IV.3:Repère de Park "passage du repère (abc) vers le repère (dq)".

De l'équation (IV.5) :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} - V_{sh_d} \\ V_{rq} - V_{sh_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sh} & 0 \\ 0 & R_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L_{sh}\omega \\ L_{sh}\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} + L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix}$$

On peut trouver :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{rd} - V_{sh_d} \\ V_{rq} - V_{sh_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(IV.8)$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_{r-d} - V_{sh_d} \\ V_{r-q} - V_{sh_q} \end{bmatrix}$ présente le vecteur de commande du système.

Maintenant on tient compte le circuit DC dans le modèle mathématique du STATCOM, le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continu. Figure (IV.4)

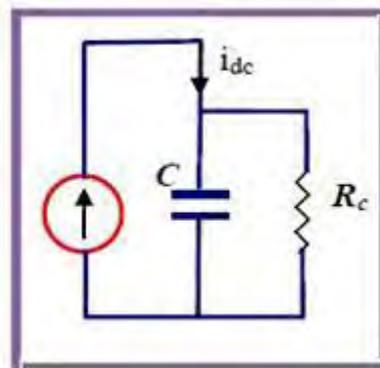


Figure IV.4:Schéma équivalent du circuit DC du STATCOM. [1]

On peut écrire le V_{sh_dq} qui possède deux composantes (d et q) sous forme d'un nombre complexe comme suivant :

$$V_{sh_dq} = V_{sh_d} + jV_{sh_q} = v \cos\theta + jv \sin\theta \dots\dots\dots(IV.9)$$

v : étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et peut être exprimé par:

$$v = m * U_{dc} \dots\dots\dots(IV.10)$$

m : est l'indice de modulation il ne dépend que de type de l'onduleur.

On remplace (IV.9) et (IV.10) dans les équations (IV.6) et (IV.7) on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} - mU_{dc} \cos\theta = R_{sh}I_{sh_d} - L_{sh}\omega I_{sh_q} + L_{sh} \frac{dI_{sh_d}}{dt} \dots\dots\dots (IV.11) \\ V_{rq} - mU_{dc} \sin\theta = R_{sh}I_{sh_q} + L_{sh}\omega I_{sh_d} + L_{sh} \frac{dI_{sh_q}}{dt} \dots\dots\dots (IV.12) \end{cases}$$

La puissance circulante entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (IV.13) (voire l'annexe (b)) :

$$P_{sh} = U_{dc}I_{dc} = \frac{3}{2}(V_{sh_d}I_{sh_d} + V_{sh_q}I_{sh_q}) \dots\dots\dots(IV.13)$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif " I_c " et le courant résistif " I_{rc} " dans la branche de la résistance R_c :

$$I_{dc} = I_c + I_{rc} \dots\dots\dots(IV.14)$$

Avec :

$$I_c = C \frac{U_{dc}}{dt} \quad \text{Et} \quad I_{rc} = \frac{U_{dc}}{R_c} \quad \text{alors (IV.14) devient :}$$

$$I_{dc} = C \frac{U_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \dots\dots\dots (IV.15)$$

De ces équations (IV.9-10-13-15) on peut tirer l'équation dynamique du coté continu du STATCOM suivante:

$$C \frac{U_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}m(I_{sh_d} \cos\theta - I_{sh_q} \sin\theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \dots\dots\dots(IV.16)$$

Les équations (IV.11-12) et (IV.16) forment le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos\theta \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin\theta \\ \frac{3m}{2C} \cos\theta & \frac{-3m}{2C} \sin\theta & \frac{-1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.17)$$

IV.3. Contrôle du STATCOM

Le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion, et par conséquent maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce

dispositif injecte ou absorbe un courant I_{sh}^* , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants (I_{shd}^* , I_{shq}^*) sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées. [1]

Alors nous allons développer la méthode d'identification des références la plus utilisée ainsi que la commande de l'onduleur, sans oublier bien sûr la régulation de la tension continue.

IV.3.1. Identification des références

Pour commander le dispositif il faut déterminer les références. il existe plusieurs méthodes d'identification parmi lesquelles :

- ❖ Méthode basée sur le principe du courant actif.
- ❖ Méthode watt-var découplé.
- ❖ Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanée.

Dans la suite de ce chapitre On va utiliser la Méthode watt-var découplé parce qu'elle est la plus utilisée.

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{sh}^* et la puissance active $P_{sh}^* \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur.

Ces puissances qui sont les images des courants (I_{shd}^* , I_{shq}^*) active et réactive qu'on déterminer depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) :

$$\begin{cases} P_{sh}^* = \frac{3}{2}(V_{rd} I_{shd}^* + V_{rq} I_{shq}^*) \\ Q_{sh}^* = \frac{3}{2}(V_{rq} I_{shd}^* - V_{rd} I_{shq}^*) \end{cases} \dots\dots\dots (IV.18)$$

L'écriture matricielle du système d'équation (IV.18) est la suivante :

$$\begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{rd} & V_{rq} \\ V_{rq} & -V_{rd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.19)$$

La formule des courants s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3(V_d^2 + V_q^2)} \begin{bmatrix} -V_{rd} & V_{rq} \\ V_{rq} & V_{rd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.20)$$

Où les tensions V_{rd} et V_{rq} sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure (IV.5) suivante:

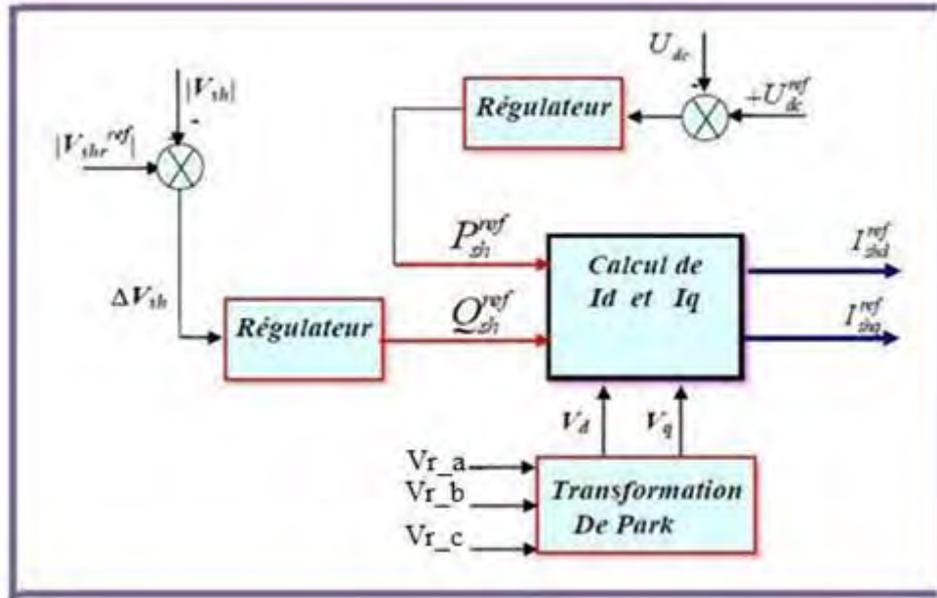


Figure IV.5: Identification des courants de référence.

IV.3.2. La méthode watt var découplée

Nous avons le système d'équation (IV.8) précédent :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{rd} - V_{sh_d} \\ V_{rq} - V_{sh_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(IV.8)$$

D'après le système d'équation (IV.8), on voit qu'il y a un couplage entre les deux composantes du courant I_{sh} . Pour pouvoir aboutir à une commande aisée du système, il est indispensable de procéder à un découplage des deux composantes.

On pose :

$$X_1 = \frac{V_{rd} - V_{sh_d}}{L_{sh}} \quad \text{Et} \quad X_2 = \frac{V_{rq} - V_{sh_q}}{L_{sh}} \quad \text{alors (IV.8) devient :}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(IV.21)$$

De (IV.21) on aura :

$$\frac{dI_{sh_d}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh_d} + \omega I_{sh_q} + X_1$$

En appliquant la transformation de Laplace sur cette équation on obtient: (voire l'annexe©)

$$\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right) I_{sh_d} = \omega I_{sh_q} + X_1 = \widetilde{X}_1 \dots\dots\dots (IV.22)$$

Tel que : $S = \frac{d}{dt}$

De cette équation on trouve le I_{sh_d} en fonction de \widetilde{X}_1 :

$$I_{sh_d} = \widetilde{X}_1 * \frac{1}{\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right)} \dots\dots\dots (IV.23)$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\widetilde{X}_1 = \omega I_{sh_q} + X_1$, on doit ajouter donc le terme ωI_{sh_q} Pour retrouver \widetilde{X}_1 à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure (IV.6) suivante:

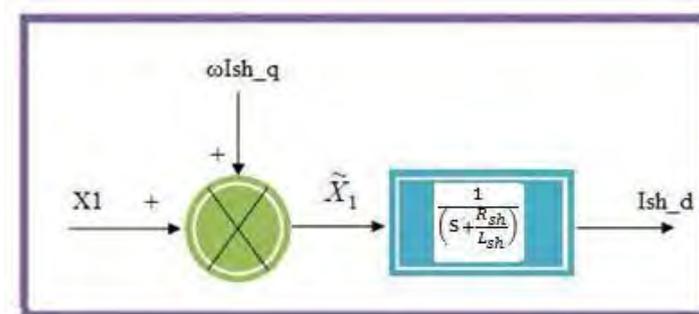


Figure IV.6: Transfert de I_{sh_d} en fonction de X_1 .

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédent, on trouve le transfert I_{sh_q} en fonction de \widetilde{X}_2 :

$$\frac{dI_{sh_q}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh_q} - \omega I_{sh_d} + X_2$$

Avec transformation de Laplace on obtient :

$$\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right) I_{sh_q} = -\omega I_{sh_d} + X_2 = \widetilde{X}_2 \dots\dots\dots (IV.24)$$

$$\Rightarrow I_{sh_q} = \widetilde{X}_2 * \frac{1}{\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right)} \dots\dots\dots (IV.25)$$

Son schéma de transfert est le suivant :

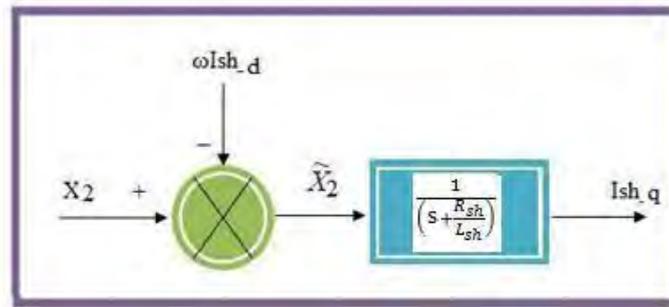


Figure IV.7: Transfert de I_{sh_q} en fonction de X_2 .

On constate qu'il y a un couplage dans les transferts des courants I_{sh_d} et I_{sh_q} ; pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et les faire suivre leurs consignes $I_{sh_d}^*$ et $I_{sh_q}^*$ comme le représente le schéma bloc de la figure (IV.8).

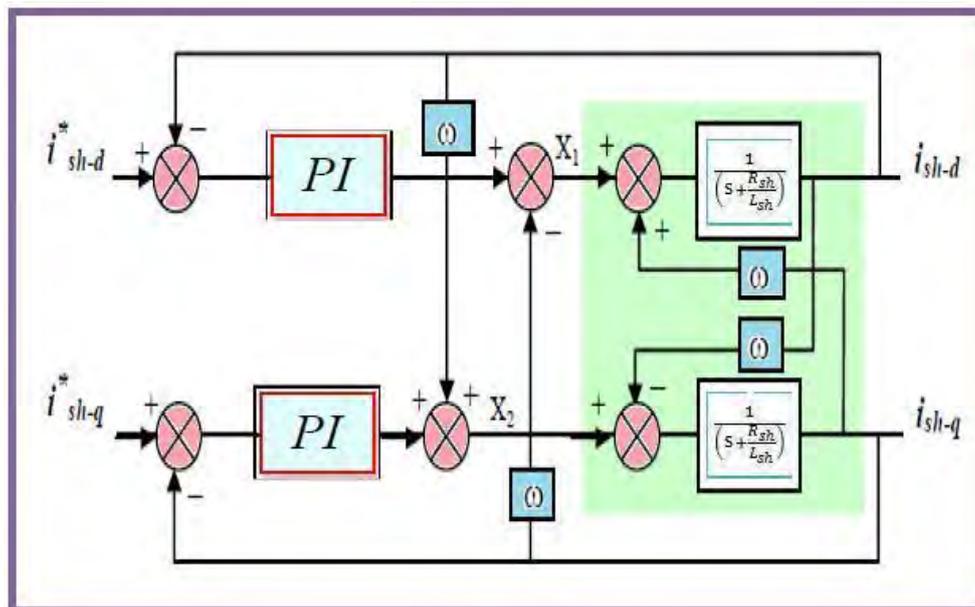


Figure IV.8: Schéma bloc de la méthode watt var découplée du STATCOM.

IV.3.3. Régulateur PI avec compensation de pôles

L'objectif de la régulation est de contrôler le courant à la sortie du STATCOM. La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les critères suivants :

- ♣ la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important.

- ♣ le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur. [10]

Il existe certains nombre de régulateur de STATCOM, on peut citer :

- régulateur proportionnel.
- régulateur PI avec compensation de pôle.
- régulateur PI sans compensation de pôle.
- régulateur IP.
- régulateur RST.

En général pour la méthode "Watt-Var découplé" Nous choisissons le régulateur PI avec compensation de pôle parce qu'il assure une bonne régulation.

On peut écrire aussi d'une autre façon les deux composantes X_1 et X_2 comme suit :

$$\begin{cases} X_1 = (K_p + \frac{K_i}{s})(I_{shd}^* - I_{shd}) - \omega I_{shq} \\ X_2 = (K_p + \frac{K_i}{s})(I_{shq}^* - I_{shq}) + \omega I_{shd} \end{cases} \dots\dots\dots (IV.26)$$

Avec l'utilisation de (IV.26), et pour la régulation des courants du STATCOM on utilise des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure (IV.9) suivant:

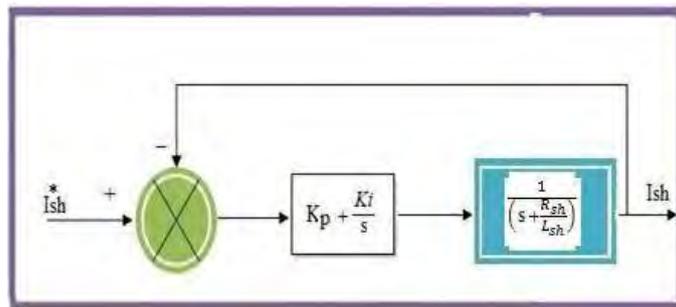


Figure IV.9:Schéma bloc de la régulation PI des courants de STATCOM.

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte (FTBO) est:

$$FTBO = G(s) = (K_p + \frac{K_i}{s}) \left(\frac{1}{(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}})} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{1}{(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}})} \right) \dots\dots\dots (IV.27)$$

Et par compensation de pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \dots\dots\dots (IV.28)$$

Tel que

T_{BO} : Constante de temps en boucle ouverte.

Alors G(S) devient: $G(s) = K_p \left(\frac{1}{s}\right) \dots\dots\dots (IV.29)$

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation de pôle sera de la forme suivante:

$$F(s) = \frac{FTBO}{1+FTBO} = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} = \frac{1}{1+sT_{BF}} \dots\dots\dots (IV.30)$$

T_{BF} : est la constante de temps de la régulation en boucle fermée, et appelé aussi « temps de repense du système ».

De (IV.30) on tire : $T_{BF} = \frac{1}{K_p} \dots\dots\dots(IV.31)$

En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (IV.28et31) les gains du contrôleur PI.

De (IV.28) on trouve : $K_i = K_p * \frac{R_{sh}}{L_{sh}}$

De (IV.31) on trouve : $K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}}$

On peut globaliser le contrôle par la méthode watt var découplée à l'aide de la figure (IV.10) suivante :

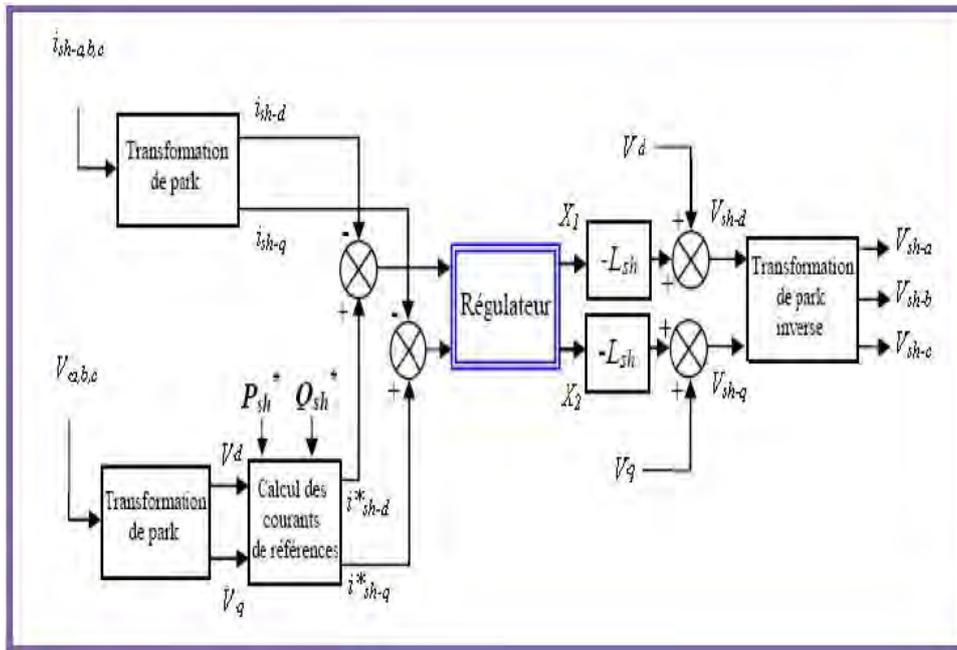


Figure IV.10:Schéma globale du contrôle par la méthode watt var découplée.

IV.3.4.Régulation de la tension continue

Dans le circuit DC du STATCOM Le condensateur C absorbe les fluctuations de puissance occasionnées par la compensation du réactif, présence des harmoniques et aussi par les pertes des convertisseurs. La tension continue aux bornes de ce condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau.

La puissance active fournie coté alternatif (P_{sh}) est égale à la puissance active absorbée coté continu (P_{dc}) par le condensateur, donc on peut exprimer cette égalité par l'équation suivante :

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2P_{sh}}{c} \dots\dots\dots(IV.32)$$

La transformation de Laplace de cette équation nous donne : (voire l'annexe (d))

$$U_{dc}^2 = \frac{1}{s} * \frac{2P_{sh}}{c} \dots\dots\dots(IV.33)$$

De (IV.33) on trouve le rapport :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{s * c} \dots\dots\dots(IV.34)$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous choisissons le régulateur proportionnel intégral (PI) puisqu'il est souvent préférable. [7]

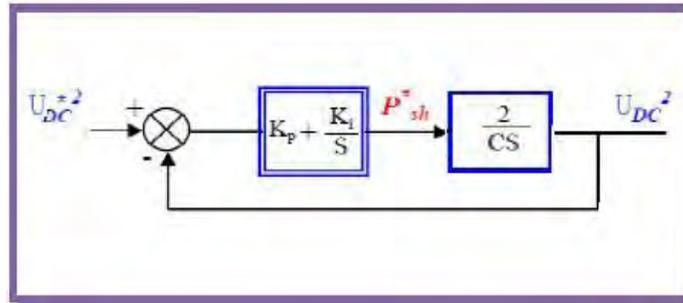


Figure IV.11:Schéma de régulation de la tension continue.

La fonction de transfert de la boucle fermée de ce système est la suivante :

$$F(S) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc}^{*2}} = \frac{\frac{2K_p S + 2K_i}{C}}{S^2 + \frac{2K_p S + 2K_i}{C}} \dots\dots\dots (IV.35)$$

On pose :

$$\omega_n^2 = \frac{2K_i}{C} \quad \text{Et} \quad \xi = K_p * \sqrt{\frac{1}{2CK_i}}$$

Alors on peut réécrire (IV.35) de la façon suivante :

$$F(S) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc}^{*2}} = \frac{2\xi\omega_n S + \omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \dots\dots\dots (IV.36)$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi " $\xi = 0.7$ ". Et afin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage nous avons choisi $\omega_n = \frac{2\pi * 300}{10}$ rad/sec. Dans ce cas et avec la valeur d'une capa de " $C_1 = C_2 = 0.005pu$ ", les gains K_p et K_i sont : " $K_i = 88.82$ " et " $K_p = 0.659$ ".

IV.3.5. Commande de l'onduleur

La technique de commande appliquée sur l'onduleur de tension dans le STATCOM a pour but de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs afin que la tension donnée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

Il y a deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- Commande par hystérésis.
- Commande par MLI.

IV.3.5.1. Commande par hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de références. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation. [7][10]

La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur. [7][10][40] Cette technique est schématisée sur la figure (IV.12) suivante.

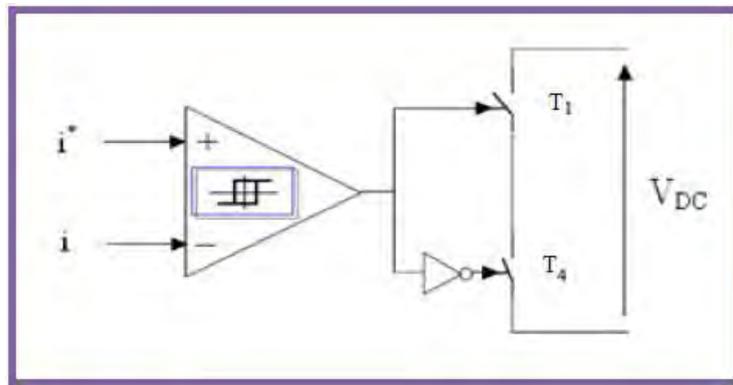


Figure IV.12: Contrôle de l'onduleur par hystérésis.

IV.3.5.2. Commande par MLI

La méthode basée sur la MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) consiste à comparer la tension de référence de l'onduleur "Modulatrice" avec un signal en dent de scie à fréquence élevée "Porteuse", la sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme le montre le schéma de principe de la figure (IV.13). [1][10][40][41]

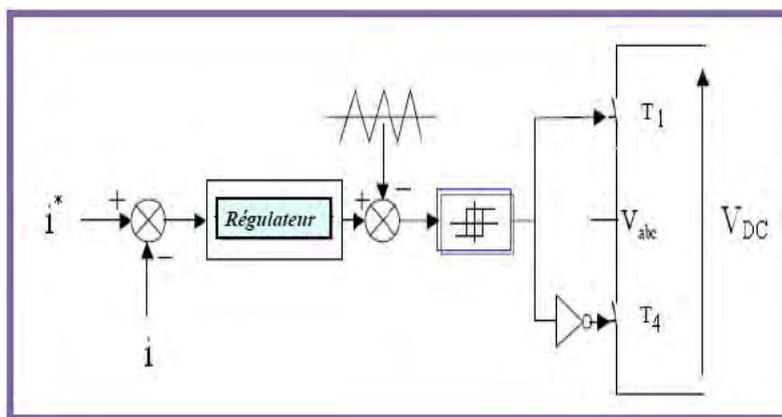


Figure IV.13: Contrôle de l'onduleur par MLI.

Nous avons choisi la commande par MLI car le dispositif STATCOM commande de fortes puissances et a besoin d'une fréquence fixe pour les commutations.

IV.4.Modélisation du SVC

Durant les dernières années, l'utilisation du compensateur statique de puissance réactive (SVC) demeure indispensable dans le système électrique. Elle est destinée à la compensation de l'énergie réactive et l'amélioration de la stabilité de tension. Le rôle principale du SVC est de maintenir essentiellement la tension constante au jeu de barre où il est raccordé, et bénéficie à l'équilibre de la puissance réactive du système électrique. [12]

Comme il est mentionné précédemment au chapitre III, dans la pratique il y a différents types de compensateur statique SVC sur les lignes de transmission, dont lesquelles on a choisi le « TSC-TCR » (condensateur commuté par thyristors et réactance contrôlée par thyristors) pour notre travail.

Le compensateur TSC-TCR montré dans la figure (IV.14) comporte n bancs de TSC et un simple TCR qui sont reliés en parallèle. Les condensateurs peuvent être branchés dans des étapes discrètes. Le TSC est raccordé en série avec une inductance pour éliminer les différents harmoniques.

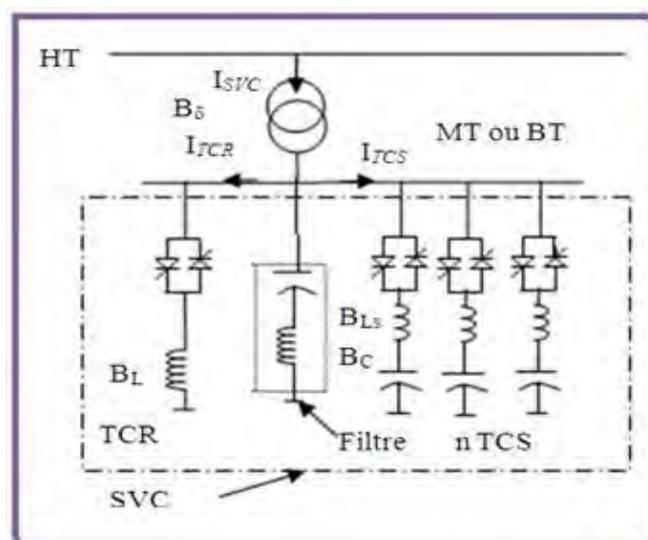


Figure IV.14: Cas général de n bancs de TSC et un TCR.

IV.4.1. Réactance contrôlé par thyristor-condensateur fixe (TCR-FC)

Le TCR est conçu par une inductance L connecté en série avec deux thyristors connectés en tête bêche qui conduit en demi-période d'une façon alternative. Le courant du TCR est

principalement réactif, en retard de 90° par rapport à la tension entre ces bornes (effet inductive).

Les thyristors sont amorcés symétriquement, de ce fait l'angle d'amorçage maximal possible est de 180°. Une conduction complète est obtenue pour un angle d'amorçage de 90°. Une conduction partielle est obtenue pour des angles compris entre 90° et 180°, et un courant nul à 180°. Les angles d'amorçage inférieurs de 90° ne sont pas autorisés. [13][14][15]

La configuration du compensateur TCR-FC est illustrée dans la Figure (IV.15) :

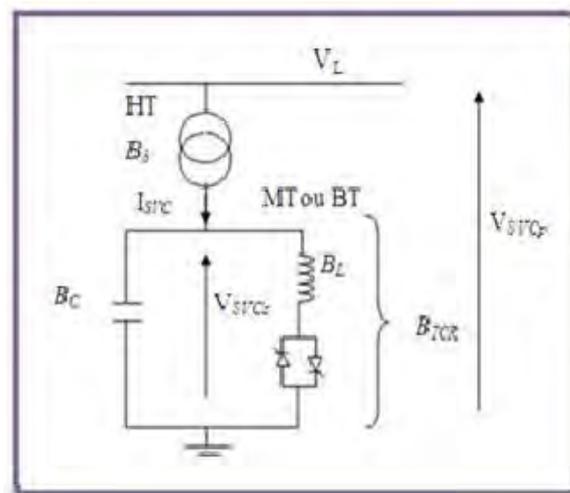


Figure IV.15: Configuration du compensateur TCR-FC. [16][17]

B_{SVCp} : susceptance du SVC au primaire du transformateur.

B_{SVCs} : Susceptance du SVC au secondaire du transformateur où on prend en considération la susceptance de fuite de transformateur B_{δ}

Par l'utilisation des paramètres de la figure (IV.15), B_{SVC} est donnée par :

$$B_{SVC} = \frac{B_{\delta}(B_C+B_{TCR})}{B_{\delta}+B_C+B_{TCR}} \dots\dots\dots (IV.37)$$

Où: $B_C = \omega C$

La susceptance B_L en fonction de l'angle α est donnée par l'équation suivante :

$$B_L(\alpha) = \frac{2(\pi-\alpha)+\sin(2\alpha)}{\pi X_L} \dots\dots\dots(IV.38)$$

Avec : $X_L = \omega L$

Si l'angle d'amorçage α varie entre 90° et 180°, la valeur de B_{TCR} varie entre B_L et 0, si $\alpha=180^\circ$ $B_{TCR}=0$, et la valeur maximale de la susceptance B_{SVC} devient:

$$B_{SVC_{max}} = \frac{B_{\delta}B_C}{B_{\delta}+B_C} \dots\dots\dots(IV.39)$$

Et aussi, si $\alpha=90^\circ$, $B_{TCR}=B_L$, et la valeur minimale de la susceptance B_{SVC} devient :

$$B_{SVC_{min}} = \frac{B_\delta(B_C+B_L)}{B_\delta+B_C+B_L} \dots\dots\dots (IV.40)$$

On peut tirer la variation du B_{SVC} en fonction de B_{TCR} comme suit :

$$B_{SVC} = \left(1 - \frac{B_c}{B_\delta}\right)B_c + \left(1 - \frac{2B_c+B_L}{B_\delta}\right)B_{TCR} \dots\dots\dots (IV.41)$$

De l'équation ci-dessus, les valeurs limites de la susceptance du SVC peuvent être données comme suit:

$$B_{SVC_{max}} = \left(1 - \frac{B_c}{B_\delta}\right)B_c \quad \text{si} \quad B_{TCR} = 0 \dots\dots\dots (IV.42)$$

$$B_{SVC_{min}} = \left(1 - \frac{B_c+B_L}{B_\delta}\right)(B_c + B_L) \quad \text{si} \quad B_{TCR} = B_L \dots\dots\dots (IV.43)$$

La tension secondaire du transformateur est :

$$V_2 = V_{svc} = \bar{I}_{SVC} \frac{1}{j(B_c+B_{TCR})} \dots\dots\dots (IV.44)$$

On peut écrire aussi :

$$V_2 = V_{svc} = V \frac{B_\delta}{B_\delta+B_c+B_{TCR}} \dots\dots\dots (IV.45)$$

A partir des valeurs limites de la susceptance du compensateur, la valeur maximale et minimale de la tension au secondaire du transformateur devraient être :

$$V_{SVC_{max}} = V_m \frac{B_\delta}{B_\delta+B_c} \approx V_m \left(1 - \frac{B_\delta}{B_c}\right) \dots\dots\dots (IV.46)$$

Où $B_{TCR} = 0$ et $B_c \ll B_\delta$

$$V_{SVC_{min}} = V_m \frac{B_\delta}{B_\delta+B_c+B_L} \approx V_m \left(1 - \frac{B_c+B_L}{B_\delta}\right) \dots\dots\dots (IV.47)$$

Où $B_{TCR} = B_L$ et $B_L \ll B_\delta$

IV.4.2. Calcul des limites de marge de fonctionnement

Pour notre étude on prend $n=3$, c.-à-d 3 TSC et 1TCR, la figure (IV.16) présente le schéma simplifié de ce modèle choisi:

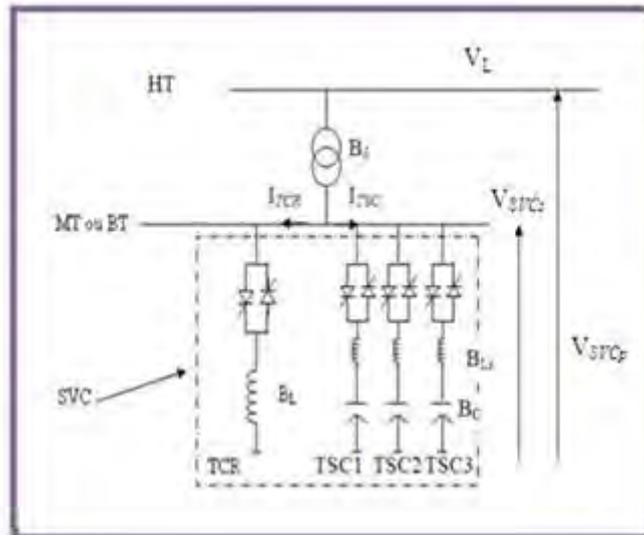


Figure IV.16: SVC comporte 3 TSC et un TCR.

Les équations (IV.37) et (IV.39) peuvent être utilisées pour déterminer la marge des limites de fonctionnement de la susceptance du SVC. Dans l'équation (IV.37), B_C est remplacée par B_{3C} du TSC pour obtenir la susceptance à la limite maximum de production de l'énergie réactive.

Avec les données précédentes, la susceptance maximale est donnée comme suit:

$$B_{svc_{max}} = \frac{B_{\delta} * B_{3C}}{B_{\delta} + B_{3C}} \dots\dots\dots (IV.48)$$

Et la susceptance minimale :

$$B_{svc_{min}} = \frac{B_{\delta}(B_{3C} + B_{TCR})}{B_{\delta} + B_{3C} + B_{TCR}} \dots\dots\dots (IV.49)$$

Pour le cas général :

$$B_{svc_{min}} = \frac{B_{\delta}(B_{nC} + B_{TCR})}{B_{\delta} + B_{nC} + B_{TCR}} \dots\dots\dots (IV.50)$$

Où $n = 1, 2, \dots$ le nombre de Banc du TSC en fonction et B_{nC} est la susceptance totale des TSC de n bancs.

Avec :

$$B_{3C} = 3 * B_C \dots\dots\dots (IV.51)$$

$$B_C = \frac{B_c B_{Lc}}{B_c + B_{Lc}} \dots\dots\dots (IV.52)$$

Le courant total du compensateur est donné comme suit :

$$I_{svc} = V_m \frac{B_{\delta}(B_{3C} + B_{TCR})}{B_{\delta} + B_{3C} + B_{TCR}} \dots\dots\dots (IV.53)$$

Le signe négatif indique que le courant est capacitif. Les courants des trois modes capacitifs peuvent être donnés par l'équation suivante:

$$I_{svc} = -V \frac{B_{\delta} B_{3C}}{B_{\delta} + B_{3C}} \dots\dots\dots (IV.54)$$

Et pour le mode inductif, le courant est donnée par :

$$I_{svc} = V \frac{B_{\delta} B_L}{B_{\delta} + B_L} \dots\dots\dots (IV.55)$$

IV.4.3. Calcul des paramètres du TSC

La figure (IV.17) montre la constitution principale d'un seule TSC :

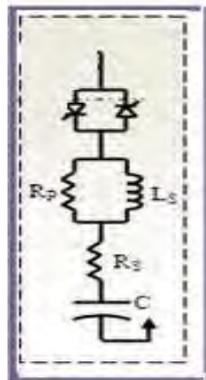


Figure IV.17: Constitution principale d'un seul TSC.

Les caractéristiques du TSC utilisé sont les suivantes :

$$L_s = 1.03 \cdot 10^{-3} H; R_c = 4.26 \cdot 10^{-3} \Omega; R_p = 95.85 \Omega; C = 308.4 \cdot 10^{-6} F$$

Pour calculer la puissance de chaque banc du TSC, on considère que le TCR est totalement déconnecté.

Selon la figure (IV.17), l'impédance d'une seule phase du TSC est :

$$z_{TSC} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{jL_s\omega}} + R_s + \frac{1}{jC\omega} \dots\dots\dots (IV.56)$$

$$z_{TSC} = R_s + \frac{R_p (L_s\omega)^2}{R_p^2 + (L_s\omega)^2} + j \left(\frac{R_p^2 + R_p (L_s\omega)^2}{R_p^2 + (L_s\omega)^2} - \frac{1}{C\omega} \right) \dots\dots\dots (IV.57)$$

$$z_{TSC} = 0.0095 - j8.18 \Omega$$

$$|z_{TSC}| = 8.18 \Omega$$

$$I_{TSC} = \frac{V}{z_{TSC}} = 1955.98 A$$

Alors la puissance produite par banc de TSC d'une phase est:

$$Q_{TSC} = X_C I^2 = 8.18 * 1955.98^2 \approx 31.29 MVAR$$

IV.4.4. Calcul des paramètres du TCR

La figure (IV.18) montre la constitution principale du TCR :

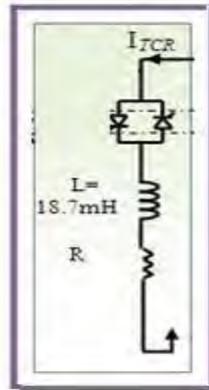


Figure IV.18: Constitution principale du TCR.

Les caractéristiques du TCR utilisé sont les suivantes :

$$L = 18.7 \cdot 10^{-3} \text{H}; R_s = 0.141 \Omega$$

Pour calculer la puissance du TCR, on considère que les trois bancs du TSC sont totalement déconnectés, et le TCR est en pleine conduction ($\alpha=90^\circ$).

L'impédance d'une seule phase du TCR est :

$$Z = R + jL\omega$$

$$|z_{TCR}| = 7.05 \Omega$$

La puissance absorbée par le TCR d'une phase est:

$$Q_{TCR} = \frac{V^2}{X_{TCR}} = \frac{V^2}{j7.049} = -36.31 \text{ MVAR}$$

IV.5. Commande du SVC

L'implémentation pratique de la commande du SVC constitué d'un TCR et de trois bancs de TSC est résumée dans le schéma synoptique présenté dans la figure (IV.19) :

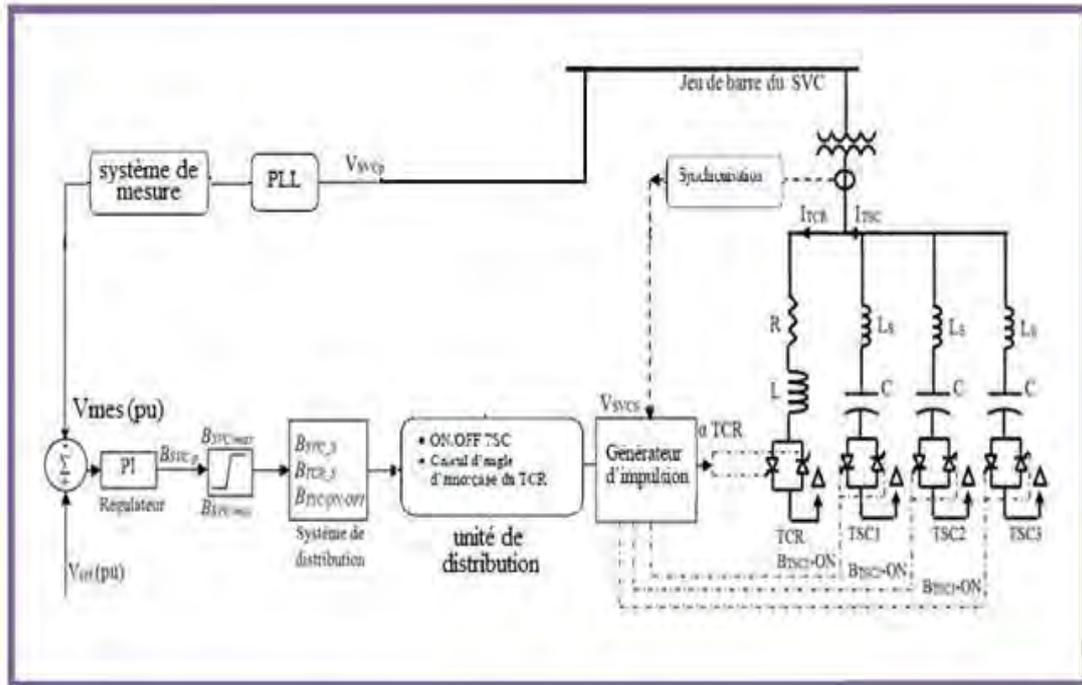


Figure IV.19: Schéma du circuit de commande du SVC (1TCR+3TSC). [17]

Le système de commande du SVC comporte les quatre principaux modules suivants:

a) Système de mesure

Ce système mesure la fondamentale de la tension primaire du transformateur par la prise en compte de la variation de la fréquence du réseau. Le calcul du fondamental de la tension et de la fréquence est achevé par la méthode de Fourier discret durant un cycle de fonctionnement. [18]

b) Régulateur PI de tension

assure une régulation de la tension autour de la valeur de consigne V_{ref} . Le régulateur PI fournit la valeur B_{SVC} appropriée pour chaque point de fonctionnement. [18]

Le courant du SVC est donné par l'équation :

$$I_{SVC} = B_{SVC} V_{SVC} \dots\dots\dots(IV.58)$$

La figure (IV.20) montre la boucle de régulation de la tension au jeu de barre du SVC :

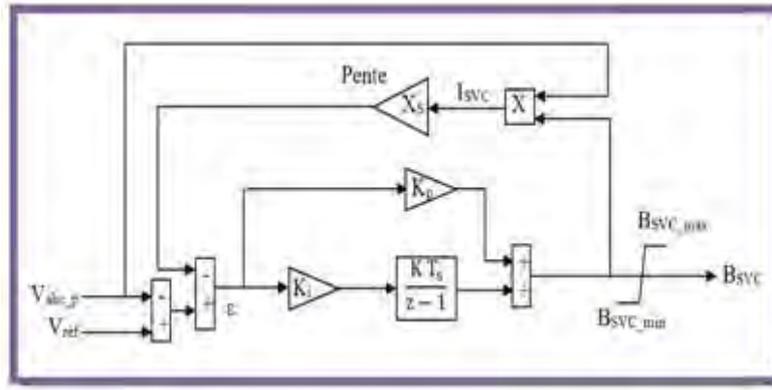


Figure IV.20: Boucle de régulateur PI de tension. [17]

Le système peut être ayant une constante de temps en boucle ouverte donnée par:

$$T_O = \frac{1}{X_S * K_p} \dots\dots\dots (IV.59)$$

La constante de temps en boucle fermée est donnée par :

$$T_F \cong \frac{X_S}{(X_L + X_S)} * T_O \dots\dots\dots (IV.60)$$

L'équation d'état de la commande PI est donnée par :

$$F(Z) = K_p + K_i \frac{T_s}{z-1} \dots\dots\dots (IV.61)$$

\$K_p\$: Constante proportionnel.

\$K_i\$: Constante intégrale.

c) Unité de distribution (unité de calcul de l'angle de commutation)

Cette unité utilise la valeur \$B_{SVC}\$ fournie par le régulateur pour calculer l'angle d'amorçage du TCR ainsi que l'état (ON/OFF) des trois bancs de TSC. Le calcul de chaque angle d'amorçage approprié pour chaque valeur de \$B_{TCR}\$ est effectué via une base de données (Look up Table) générée à base de l'équation : [19]

$$B_{TCR} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi} \dots\dots\dots (IV.62)$$

\$\alpha\$: l'angle d'amorçage en radian.

d) Générateur d'impulsions (unité de commutation)

Le générateur d'impulsion utilise l'angle \$\alpha\$ de commutation et l'état (ON/OFF) des trois bancs de TSC pour générer les impulsions. Il est relié aussi avec l'unité de synchronisation utilisée pour mesurer la phase de la tension secondaire du transformateur.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation mathématique des deux dispositifs FACTS (STATCOM et SVC), Nous avons présenté ses modèles mathématiques pour lesquels nous avons identifié les références de leurs systèmes de commande de ces deux dispositifs.

La loi de commande utilisée pour le STATCOM été la méthode dite « Watt- Var découplée » basée sur le principe de découplage dans le contrôle des courants actif et réactif du système accompli avec des régulateur PI par compensation de pôles.

Les deux composants principaux du SVC à savoir l'inductance commandée par thyristors (TCR) et le condensateur commutée par thyristors (3 bancs de TSC) sont bien expliqués en termes de la modélisation mathématique et le principe de fonctionnement ainsi que la commande utilisée est bien détaillé.

Chapitre V

Simulations et résultats

Chapitre V

Simulations et résultats

V.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation du STATCOM et du SVC introduits dans un réseau test réel. Cette simulation a été performée dans l'environnement « MATLAB/SIMULINK » et basée sur les lois de fonctionnement et de commande développées dans le chapitre précédent.

Les résultats de simulations des deux dispositifs obtenus sont bien présentés et interprétés dans ce chapitre.

V.2. Simulation du STATCOM

V.2.1. Description du réseau étudié

Nous avons proposé le réel réseau test de transport de l'énergie électrique à 400 KV qui existe déjà nommée « **Tie line** » [10] où on introduit notre dispositif FACTS d'étude « STATCOM » dans une tranche au jeu de barre « **R** » situé à 200 Km du générateur « **G** » ; il est noté que la ligne de transmission est de type « **CURLEW** »[10],et la charge varie dans des instants de temps différents. De ce fait le célèbre schéma présentatif de notre réseau test est illustré par la figure (V.1) suivante :

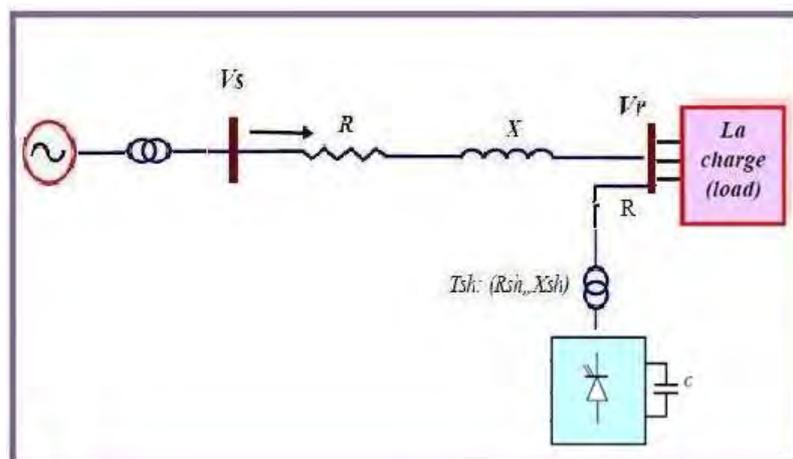


Figure V.1:Schéma unifilaire du réseau test étudié. [10][1]

Le réseau test « **Tie line** » de notre étude peut être décrit par leurs caractéristiques réelles suivantes :

- ☀ Un générateur de 1000MVA, avec une tension de sortie de 15.7KV.
- ☀ Un transformateur élévateur de 1000MVA, 15.7/400KV.
- ☀ Une longueur du réseau test de 200Km. (La ligne est modélisée en (π) pour chaque 100 Km).
- ☀ Un transformateur Tsh sert à baisser la tension de 400KV du réseau à 20KV (tension d'entrée des convertisseurs).
- ☀ La ligne alimente une charge variable dans le temps au jeu de barre de réception« R ».

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

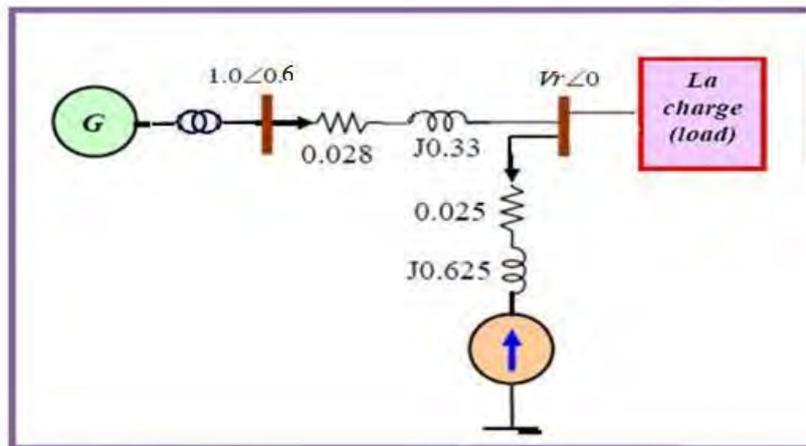


Figure V.2:Schéma unifilaire équivalent du réseau en grandeurs réduites.

V.2.2. Equation du STATCOM en grandeurs réduites

Pour simplifier les calculs nous avons utilisé les grandeurs réduites en considérant les bases du système comme suit:

$$S_{base} = 1000 \text{ MVA} \quad \text{Et} \quad U_{base} = 400 \text{ KV} .$$

D'autre part le courant et l'impédance de base du système sont calculés à partir des équations suivantes :

$$Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{1000 \cdot 10^6} = 160 \Omega \quad \dots\dots\dots (V.1)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}U_{base}} = \frac{1000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} = 1443.375 \text{ A} \quad \dots\dots\dots (V.2)$$

Le système d'équation (IV.8) du chapitre précédent représentant le modèle du STATCOM devient en grandeurs réduites (pu) le suivant:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d}^{pu} \\ I_{sh_q}^{pu} \end{bmatrix} = \frac{\omega}{X_{sh}^{pu}} \begin{bmatrix} V_{rd}^{pu} - V_{sh_d}^{pu} \\ V_{rq}^{pu} - V_{sh_q}^{pu} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d}^{pu} \\ I_{sh_q}^{pu} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(V.3)$$

Tel que : $\frac{1}{L_{sh}^{pu}} = \frac{\omega}{X_{sh}^{pu}}$ (V.4)

Si on tient compte l'équation (V.3), la fonction de transfert des courants avec un régulateur PI sera de celle de l'équation suivante:

$$F(s) = \frac{I_{sh_d}^{pu}}{I_{sh_d}^{pu}} = \frac{I_{sh_q}^{pu}}{I_{sh_q}^{pu}} = (K_p + \frac{K_i}{s}) \left(\frac{1}{(s + \frac{R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}})} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{1}{(s + \frac{R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}})} \right) \dots\dots\dots (V.5)$$

Avec compensation de pôles, et en prenant le temps de réponse en boucle fermé ($T_{BF} = \frac{1}{3} * T_{BO}$) les coefficients des régulateurs seront donnés comme suit:

$$K_i = K_p * \frac{R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}} \dots\dots\dots(V.6)$$

$K_p = \frac{3}{T_{BO}}$ Avec $T_{BO} = \frac{L_{sh}^{pu}}{R_{sh}^{pu}}$ alors :

$$K_p = \frac{3R_{sh}^{pu}}{L_{sh}^{pu}} = \frac{3R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}} = \frac{3 \times 0.025 \times 2\pi \times 50}{0.625} = 37.699 \dots\dots\dots (V.7)$$

De (V.6) on trouve :

$$K_i = K_p * \frac{R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}} = 37.699 \times \frac{0.025 \times 2\pi \times 50}{0.625} = 473.741 \dots\dots\dots(V.8)$$

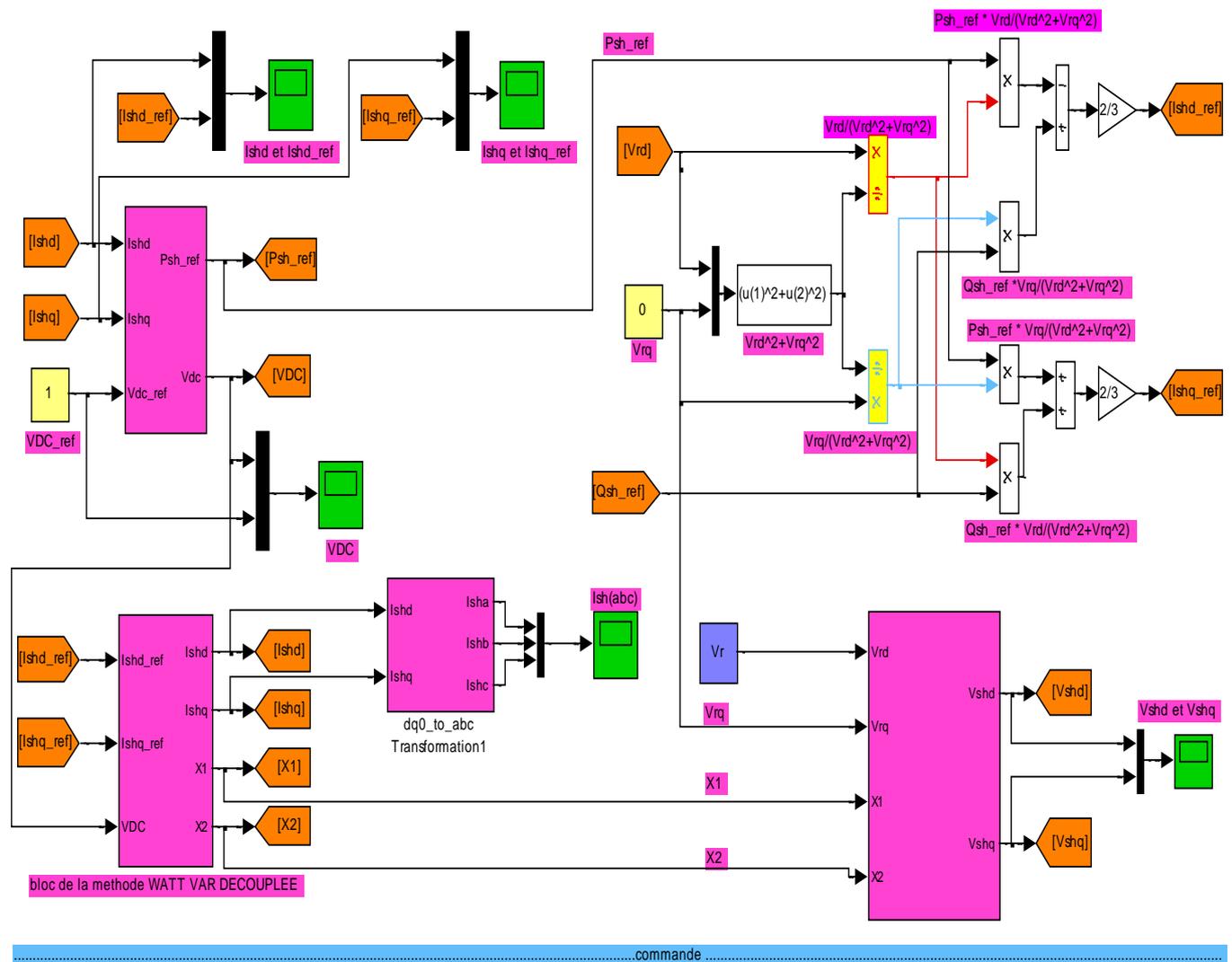
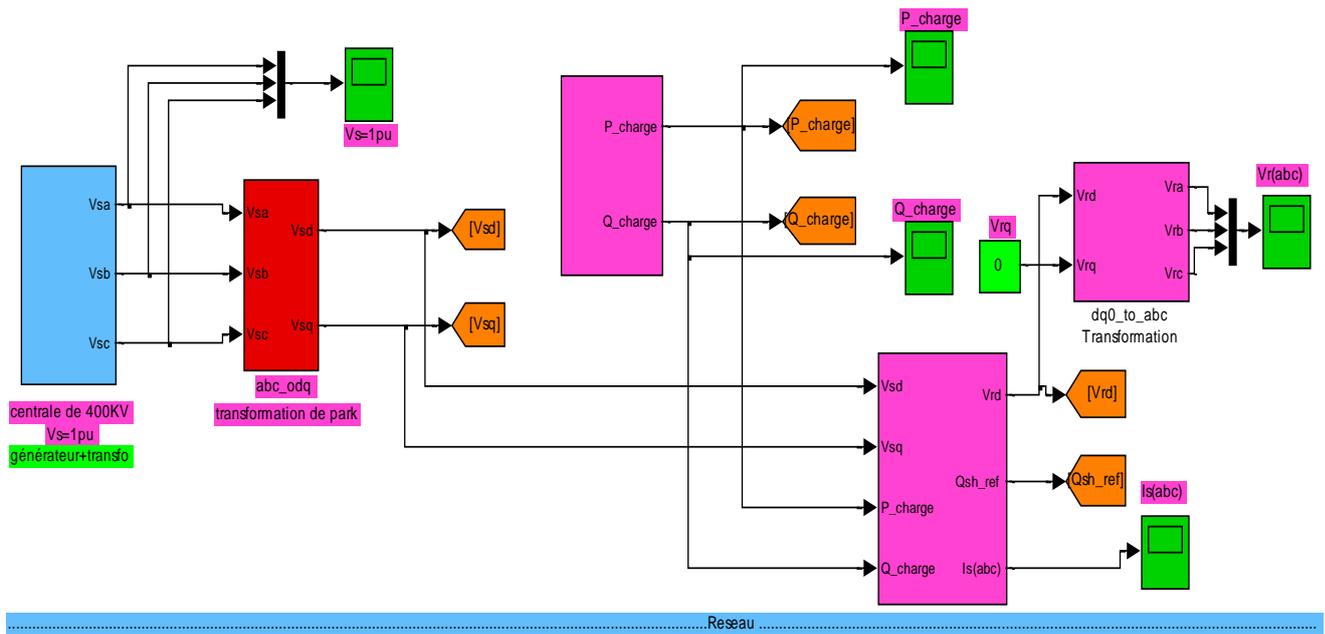
V.2.3. Essais de simulation et résultats

Tout d'abord il est noté que la tension du jeu de barre de génération ($V_s=1$ pu), et le condensateur est chargé. Notre système fonctionne initialement ($t=0s$) à une charge inductive ($P_{0s} = 1pu, Q_{0s} = 0.32pu$) dans un état d'équilibre. Cette charge sera variée arbitrairement dans le temps comme il montre le tableau (V.1) suivant :

Temps (s)	0	0.6	0.6	1	1	1.4	1.4	1.8	1.8	2.2
P (pu)	1	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	1.1
Q (pu)	0.32	0.12	0.12	0.42	0.42	0.42	0.43	0.43	0.14	0.14

Tableau V.1 : Les références de puissances actives et réactives.

V.2.3.1. Schéma de simulation



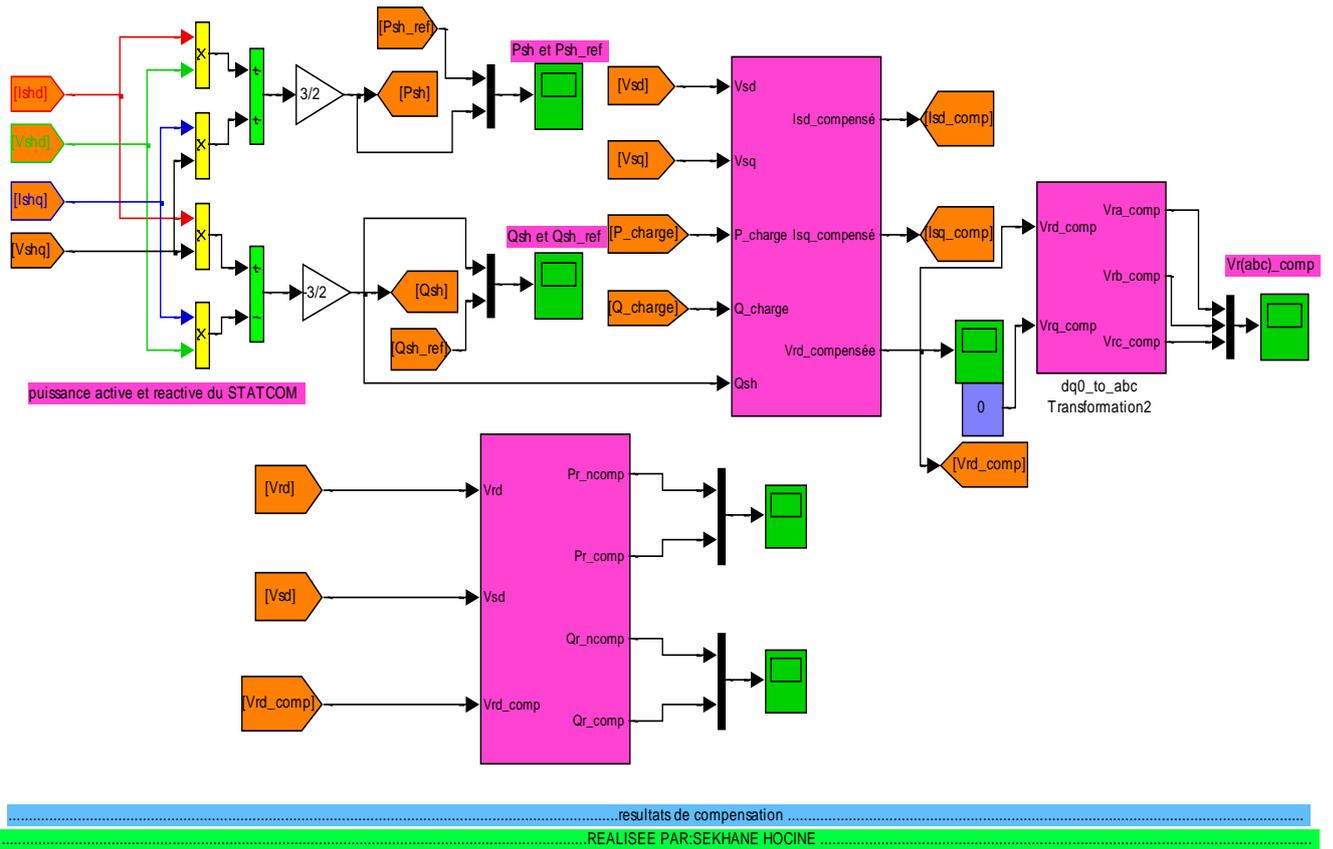


Figure V.3:Schéma de simulation du STATCOM.

V.2.3.2. résultats de simulation

a) Sans STATCOM

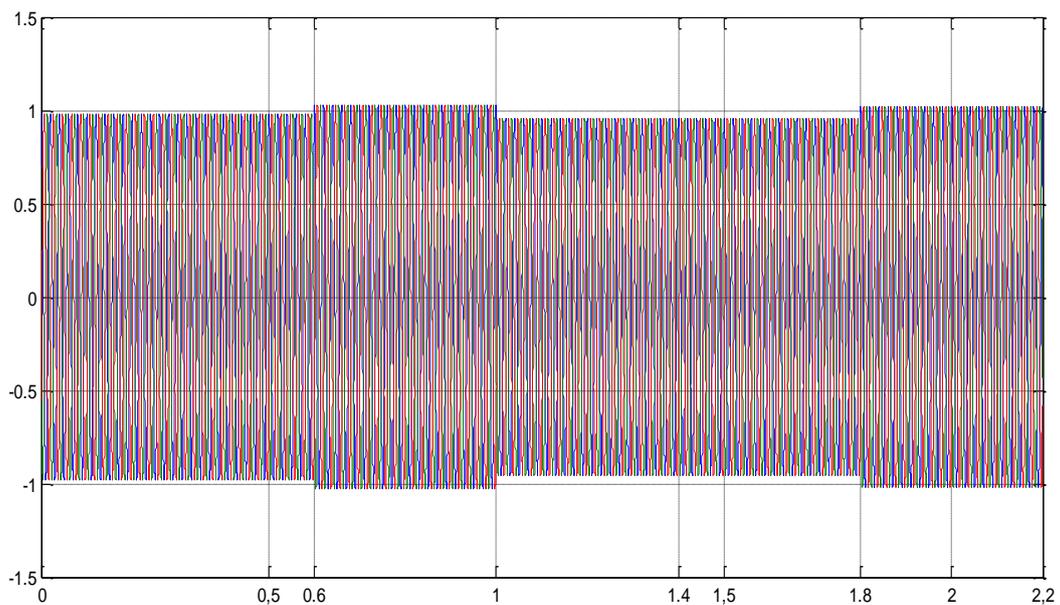


Figure V.4:Tension au jeu de barre de réception non compensée.

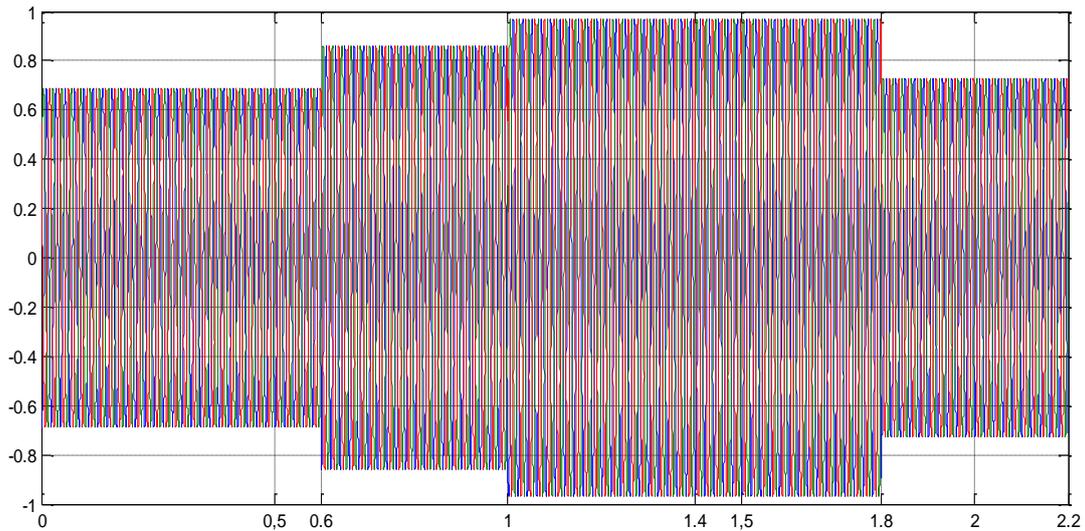


Figure V.5: Courant de la ligne non compensée.

La figure (V.4) montre les différentes variations provoquées sur la tension au jeu de barre de réception, dont l'intervalle [0-0.6s] on a une petite chute de tension provoquée par la charge inductive ($P_{0s} = 1pu, Q_{0s} = 0.32pu$), ensuite nous avons une élévation de tension à cause de la charge ($P_{0.6s} = 1.3pu, Q_{0.6s} = 0.12pu$).

À l'instant ($t=1s$) on remarque une chute de tension appréciable due à la charge ($P_{1s} = 1.4pu, Q_{1s} = 0.42pu$), cependant une très petite variation dans la puissance réactive ($P_{1.4s} = 1.4pu, Q_{1.4s} = 0.43pu$) provoque un très petit décroissement de tension.

Dans le dernier intervalle [1.8-2.2s], il apparaît une autre élévation de tension due au changement des références des puissances à ($P_{1.8s} = 1.1pu, Q_{1.8s} = 0.14pu$).

b) Avec STATCOM

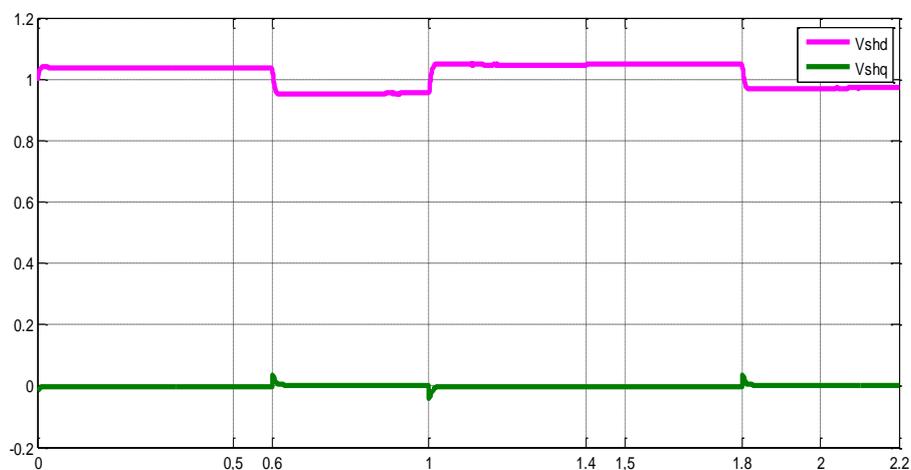


Figure V.6 : Tensions du STATCOM (V_{shd} et V_{shq}).

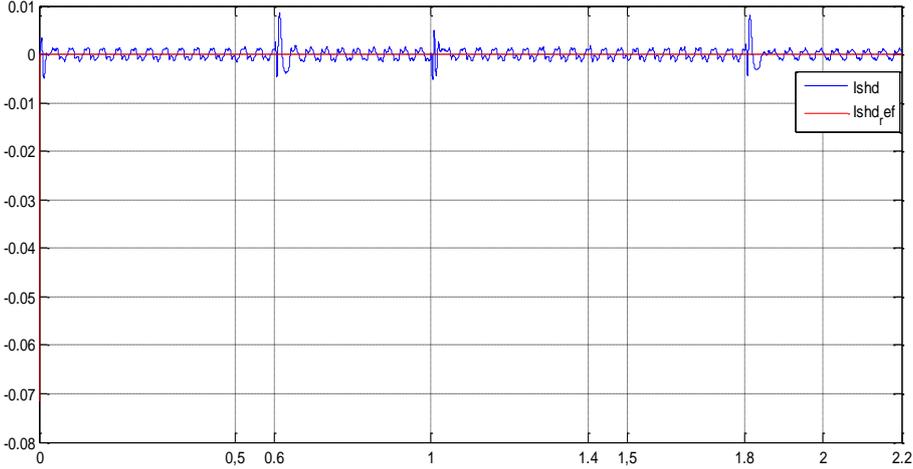


Figure V.7: Courants du STATCOM (I_{shd} et I_{shd_ref}).

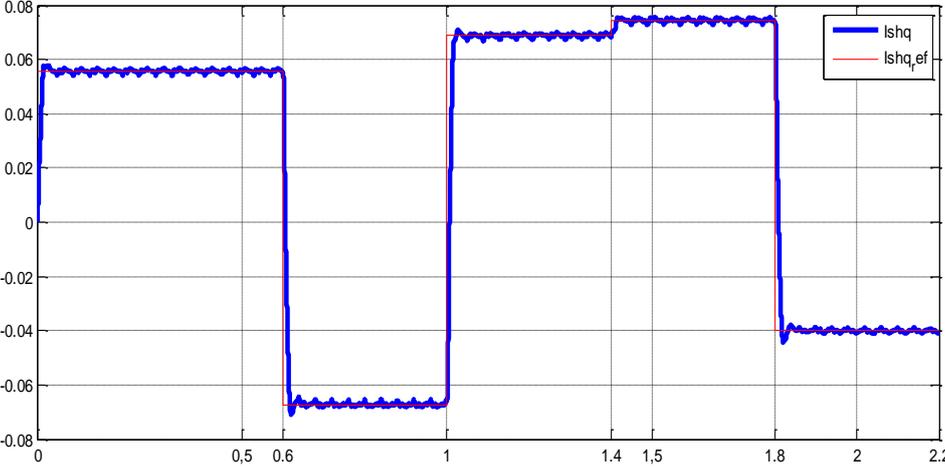


Figure V.8: Courants du STATCOM (I_{shq} et I_{shq_ref}).

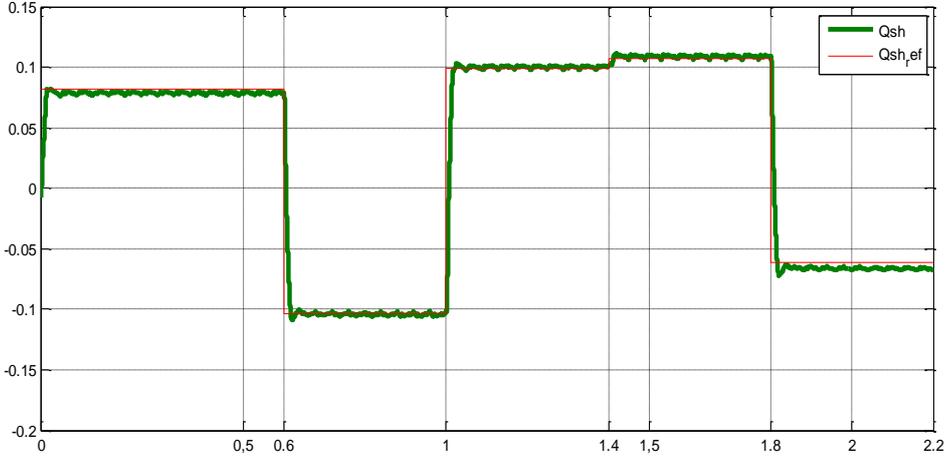


Figure V.9: Puissance réactive (Q_{sh} et Q_{sh_ref}) du STATCOM.

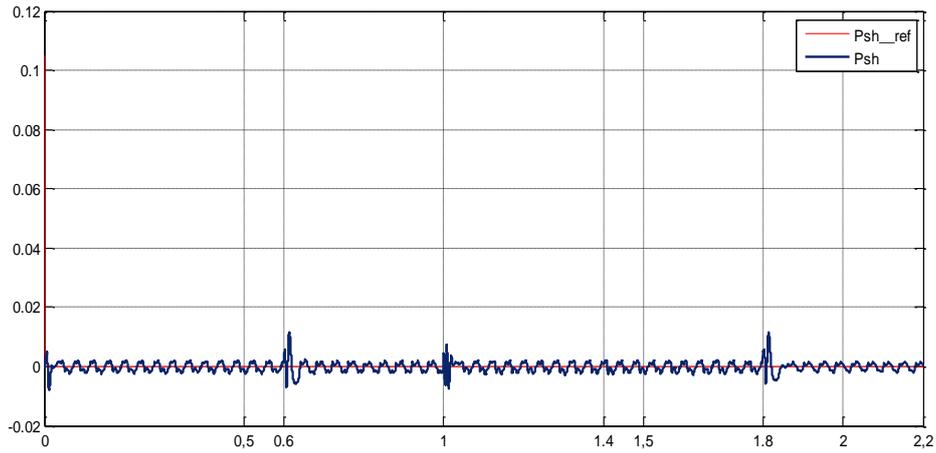


Figure V.10: Puissance active (Psh et Psh_ref) du STATCOM.

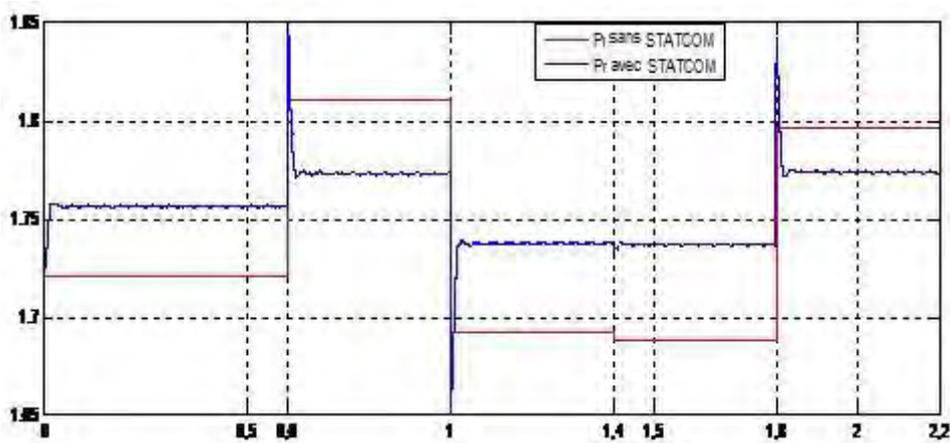


Figure V.11: Puissance active transportée par la ligne sans et avec STATCOM.

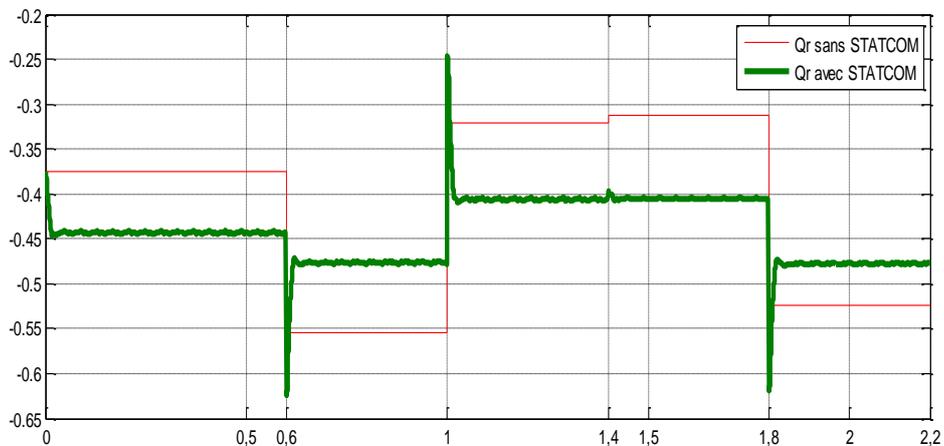


Figure V.12: Puissance réactive transportée par la ligne sans et avec STATCOM.

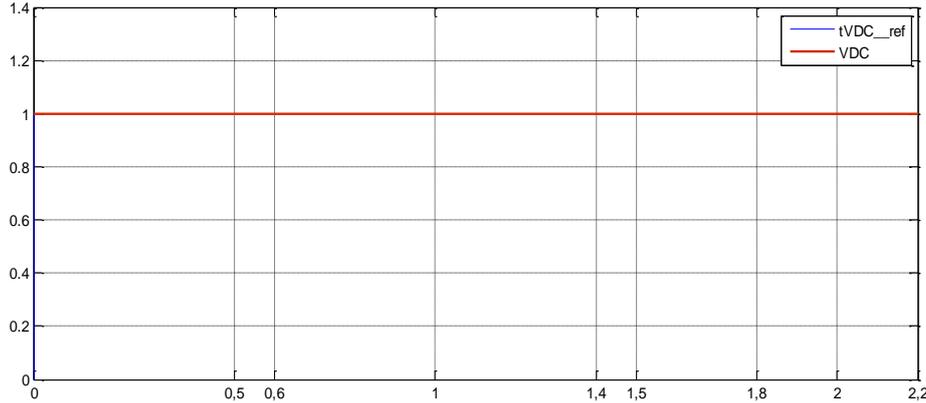


Figure V.13: Tension continue VDC régulée et VDC_ref.

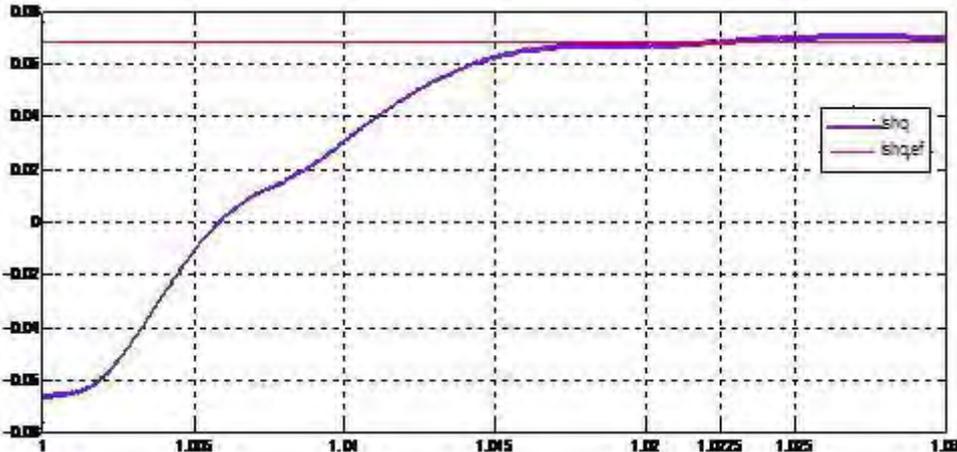


Figure V.14: Temps de repense du STATCOM.

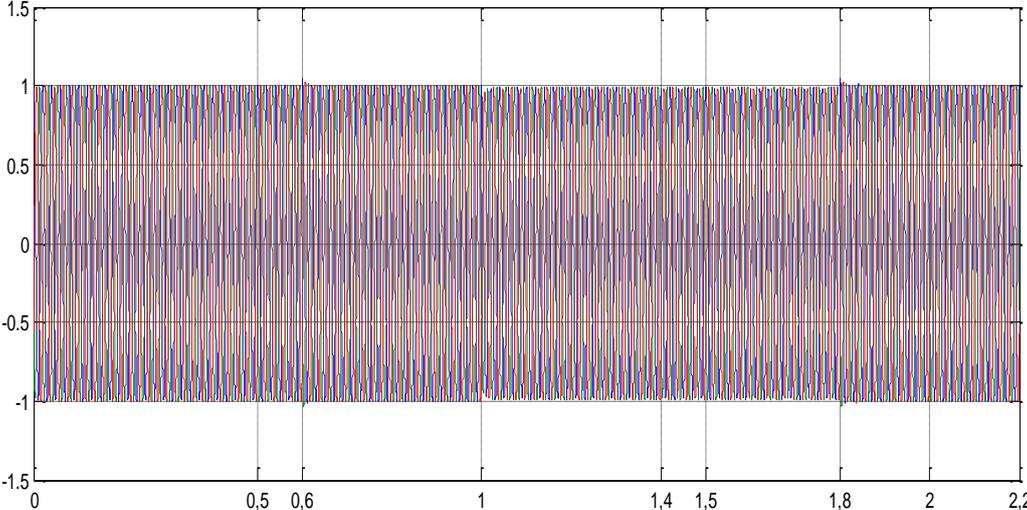


Figure V.15: Tension de réception Vr compensée par le STATCOM.

V.2.3.3. Interprétation des résultats obtenus

a) Tension du STATCOM V_{sh}

De la figure (V.6), on constate que la composante V_{shq} est nulle ($V_{shq}=0$), tandis que la composante V_{shd} est variée dans le temps.

La figure (V.6) montre que : lorsque la tension « V_{shd} » est en mode inductif et supérieur à la tension V_r détermine le sens positif du courant réactif « I_{shq} » injecté par le STATCOM au réseau (figure (V.8)), ce qui indique que le compensateur délivre une puissance réactive vers le réseau (figure(V.9)). (Les intervalles : [0s-0.6s], [1s-1.4s], [1.4-1.8]).

D'autre part, lorsque la tension V_{shd} est inférieur à V_r le STATCOM absorbe un courant I_{shq} de sens négatif (figure (V.8)), ce qui explique l'absorption du réactive depuis le réseau par le STATCOM (figure (V.9)). (Les intervalles : [0.6s-1s], [1.8-2.2s]).

b) Courant du STATCOM I_{sh}

De la figure (V.7) et (V.8), on constate que les courants ($I_{shd}=0$) et I_{shq} suivent leurs grandeurs de références (qui sont calculés à partir des puissances de références) ce qui valide le bon fonctionnement du régulateur proportionnel intégral "PI" utilisé.

c) Puissance active et réactive du STATCOM P_{sh} et Q_{sh}

Dans l'intervalle [0s-0.6s] le STATCOM injecte une petite quantité de puissance réactive Q_{sh} de l'ordre de (0.081 pu) pour soulever la tension V_r .

Dans l'intervalle [0.6s-1s] la charge provoque une élévation de tension au jeu de barre de réception V_r et fait que le STATCOM absorbe l'énergie réactive de l'ordre de (0.1 pu) depuis le réseau pour compenser la tension V_r (figure (V.9)).

A l'instant ($t=1s$) le STATCOM commence une deuxième fois à injecter la puissance réactive Q_{sh} au réseau, et à l'instant ($t=1.4s$) un très petit décroissement dans la tension par rapport à l'intervalle [1s-1.4s] provoque une très petite élévation dans la puissance réactive injectée, ce qui démontre la grande sensibilité du STATCOM aux petites variations dans le réseau.

Dans la dernière étape, le STATCOM absorbe une autre fois la puissance réactive à cause de la charge qui a provoqué une élévation de tension dans le réseau.

- ♥ Ce comportement du STATCOM du fait qu'une fois injecte et d'autre absorbe démontre la grande flexibilité de notre dispositif.

L'échange de la puissance active entre le réseau et le STATCOM est généralement nulle ($P_{sh}=0$) (figure (V.10)).

d) Puissances transportées par la ligne P_r et Q_r

L'effet de la compensation de l'énergie réactive se répercute directement sur le transit de la puissance active dans la ligne (figures (V.11) et (V.12)) ci-dessus; la fourniture de l'énergie réactive au point de consommation permet un transit plus important de la puissance active dans la ligne de transport.

e) Tension continue VDC

Selon la courbe de la figure (V.13) il paraît très claire que le bloc de régulation de la tension continue a prouvé son efficacité au maintien constante de la tension aux bornes du condensateur $V_{DC}=1.0$ pu.

f) Temps de repense du STATCOM (τ)

Selon la figure (V.14) le STATCOM a un temps de repense plus court, de l'ordre de ($\tau=0.018$ sec) afin de compenser la puissance réactive et régler la tension du réseau aussi vite que possible, ce qui donne une autre caractéristique du STATCOM, c'est la rapidité de fonctionnement.

- ♣ En fin la puissance réactive est optimisée et la tension au jeu de barre où le STATCOM est connecté est régulière (figure (V.15)), alors nous pouvons dire que le STATCOM a effectué son rôle.

V.3. Simulation du SVC

V.3.1. Description du réseau étudié

On utilise les mêmes paramètres du réseau test « Tie line » utilisé précédemment pour le STATCOM, le schéma unifilaire de notre réseau avec le compensateur utilisé (3TSC+1TCR) est représenté dans la figure (V.16).

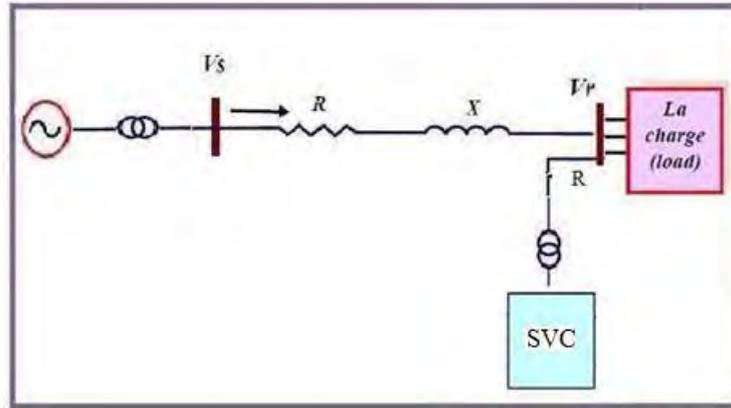
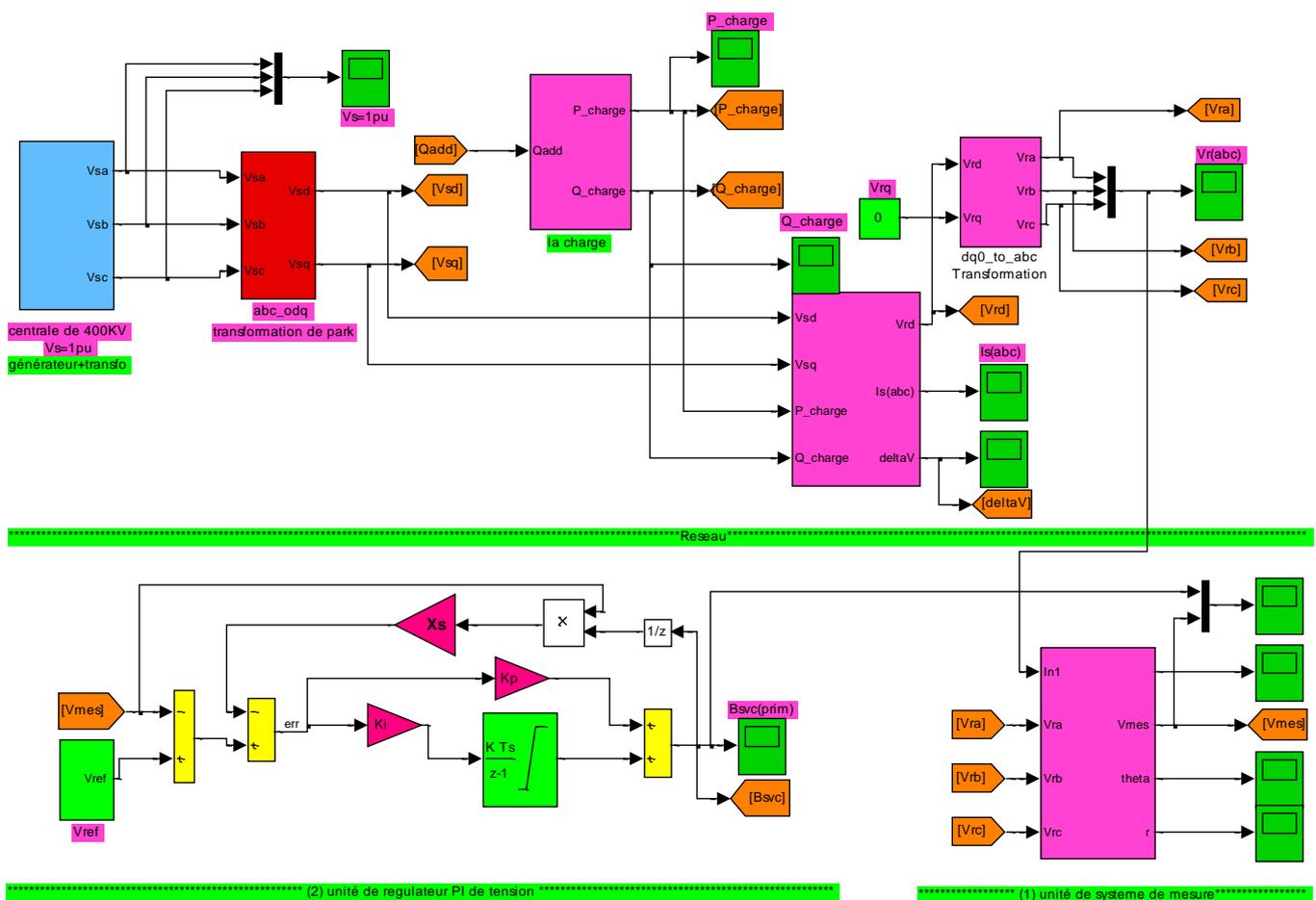


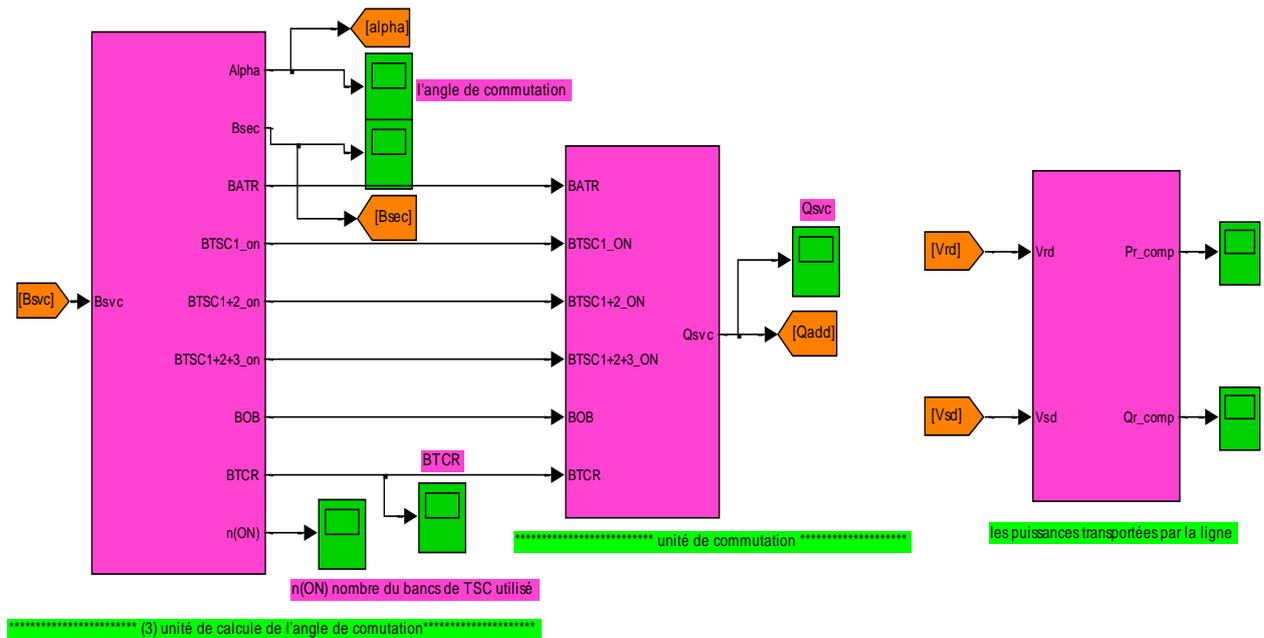
Figure V.16: Schéma unifilaire du réseau test utilisé avec le compensateur SVC (3TSC+1TCR).

V.3.2. Essais de simulation et résultats

De même façon on applique les mêmes références de puissances actives et réactives aux mêmes instants de temps mentionnées précédemment dans la section (V.2.3) du STATCOM. On rappelle que la tension du jeu de barre de génération ($V_s=1\text{ pu}$).

V.3.2.1. Schéma de simulation





REALISEE PAR:SEKHANE HOCINE

Figure V.17:Schéma de simulation du SVC (3TSC+1TCR).

V.3.2.2. résultats de simulation

a) Sans SVC

Puisque on a utilisé le même réseau test pour le STATCOM et pour le SVC, on a obtenu les mêmes courbes du courant et de tension au jeu de barre de réception (sans compensation), on rappelle que la figure (V.4) montre les différentes variations provoquées sur la tension au jeu de barre de réception, dont l'intervalle [0-0.6s] on a une petite chute de tension provoquée par la charge inductive ($P_{0s} = 1pu, Q_{0s} = 0.32pu$), ensuite nous avons une élévation de tension à cause de la charge ($P_{0.6s} = 1.3pu, Q_{0.6s} = 0.12pu$).

À l'instant($t=1s$) on remarque une chute de tension appréciable due à la charge ($P_{1s} = 1.4pu, Q_{1s} = 0.42pu$), cependant une très petite variation dans la puissance réactive ($P_{1.4s} = 1.4pu, Q_{1.4s} = 0.43pu$) provoque un très petit décroissement de tension.

Dans le dernier intervalle [1.8-2.2s], il apparait une autre élévation de tension due au changement des références des puissances à ($P_{1.8s} = 1.1pu, Q_{1.8s} = 0.14pu$).

b) Avec SVC

Avec le raccordement du SVC au jeu de barre de réception on a obtenu les figures suivantes :

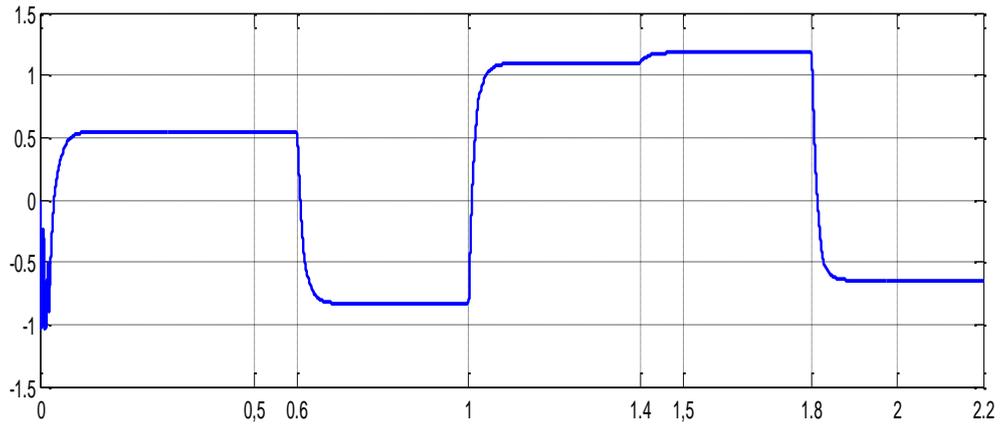


Figure V.18:Variation de la susceptance primaire (B_{svc}).

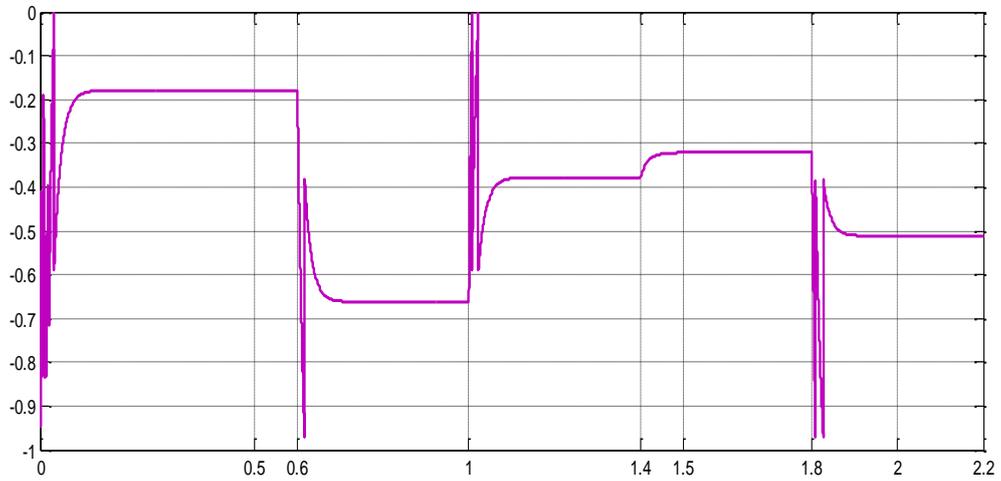


Figure V.19:Susceptance effective du TCR (B_{TCR}).

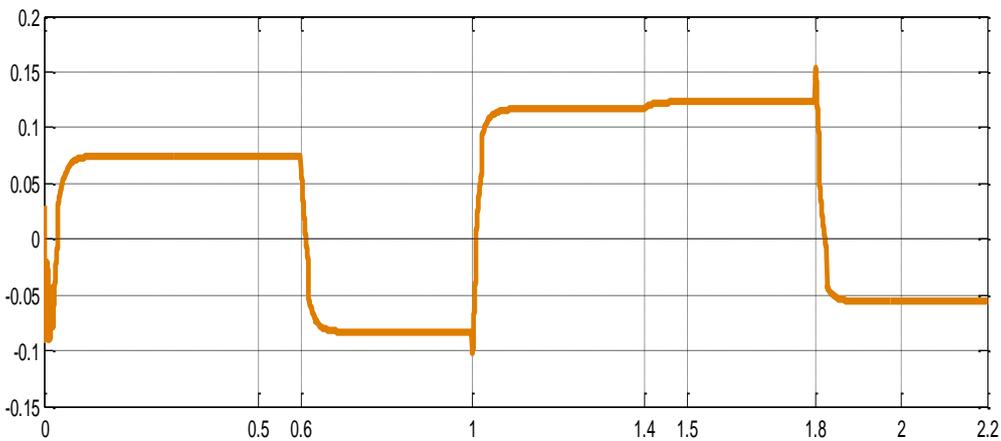


Figure V.20:Puissance réactive (Q_{svc}) injectée ou absorbée par le SVC.

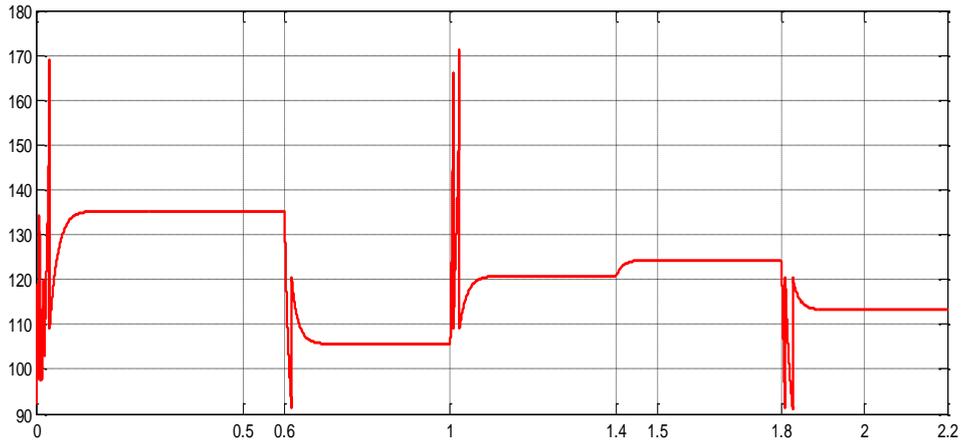


Figure V.21: L'angle de commutation (α) du TCR.

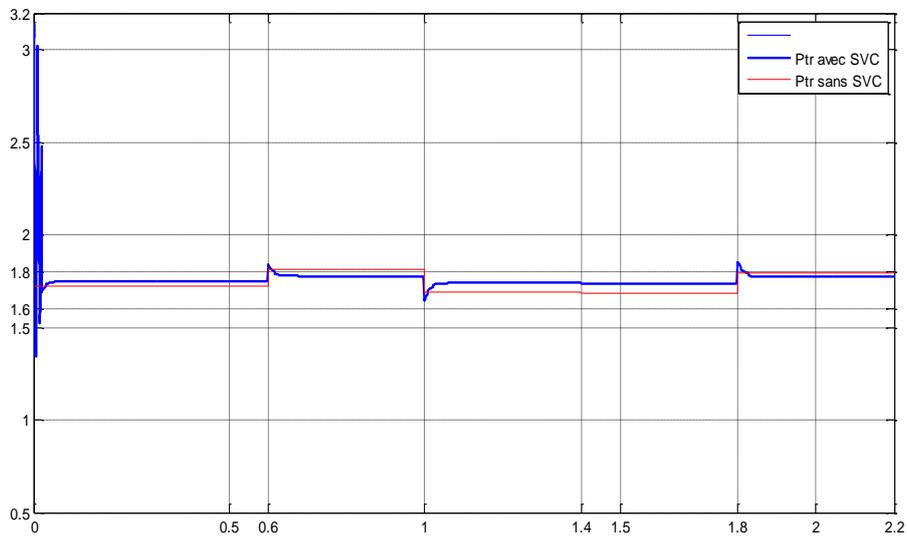


Figure V.22: Puissance active transportée par la ligne sans et avec le SVC.

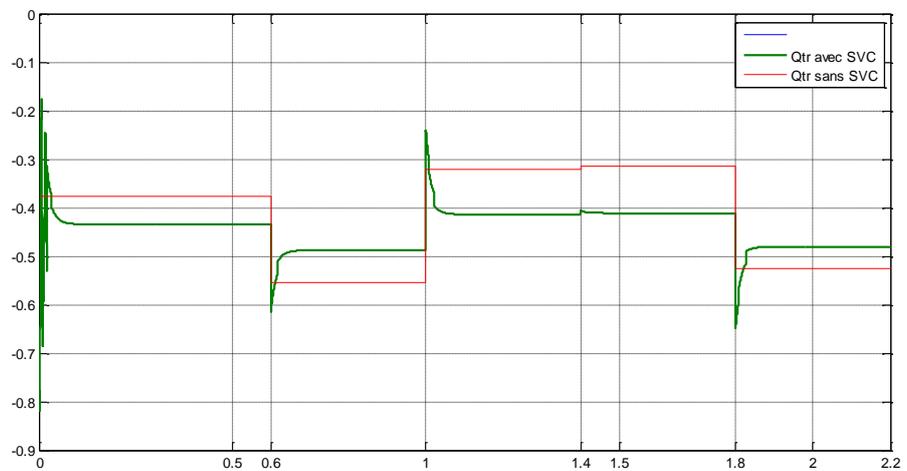


Figure V.23: Puissance réactive transportée par la ligne sans et avec le SVC.

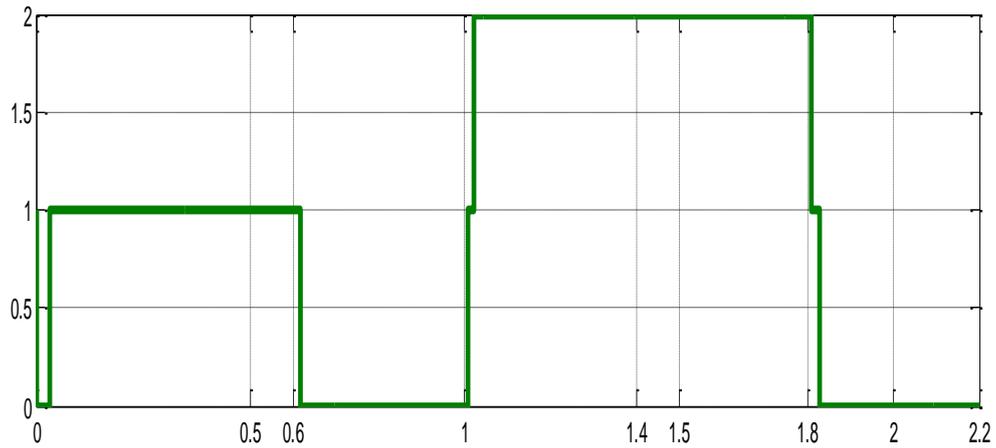


Figure V.24: Nombre de banc (n) du TSC utilisé.

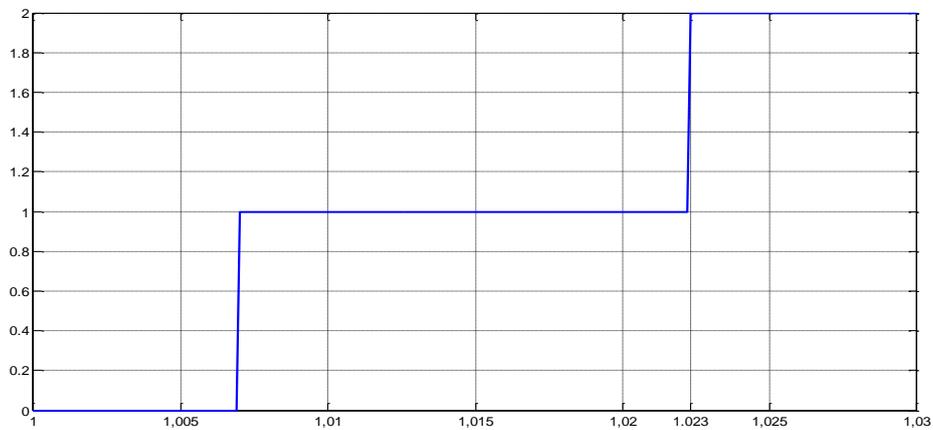


Figure V.25: Temps de réponse du SVC (Zoom de la figure (V.24) à l'intervalle [1- 1,03 sec]).

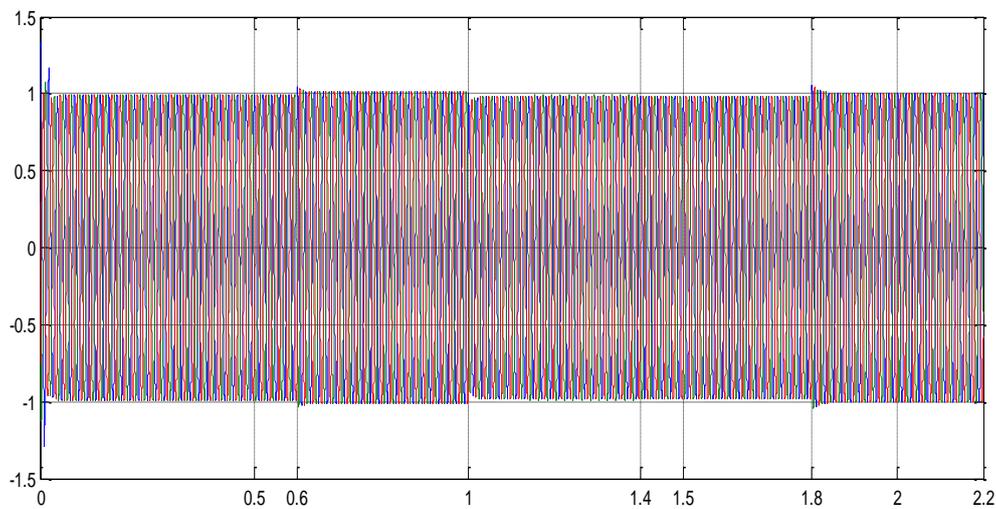


Figure V.26: Tension de réception V_r compensée par le SVC.

V.3.2.3. Interprétation des résultats obtenus

a) Puissance réactive injectée ou absorbée par le SVC (Q_{svc})

Puisque on a une petite chute de tension au jeu de barre de réception dans l'intervalle de temps $[0 - 0.6 \text{ sec}]$, le SVC injecte une petite quantité de puissance réactive Q_{svc} de l'ordre de (0.075 pu) pour soulever la tension V_r .

De la figure (V.20), on constate dans l'intervalle $[0.6 - 1 \text{ sec}]$ que le SVC absorbe une quantité de l'énergie réactive de l'ordre de $(-0,084 \text{ pu})$ (le signe moins indique l'absorption du réactif), à cause de la charge ($P_{0,6s} = 1.3pu, Q_{0,6s} = 0.12pu$). qui a provoqué une élévation de tension considérable au jeu de barre de réception.

A l'instant ($t=1s$) le SVC commence une deuxième fois à injecter la puissance réactive Q_{svc} avec une quantité importante au réseau, et à l'instant ($t=1.4s$) un très petit décroissement dans la tension V_r par rapport à l'intervalle $[1s-1.4s]$ provoque une très petite élévation dans la puissance réactive injectée, ce qui démontre la sensibilité du SVC aux petites variations dans le réseau.

Dans le dernier intervalle $[1,8 - 2,2 \text{ sec}]$, la charge provoque une deuxième fois une élévation de tension, ce qui oblige à l'SVC d'absorber certaine valeur de puissance réactive de l'ordre de $(-0,055 \text{ pu})$ pour réguler cette tension (figure (V.20)).

b) Susceptance primaire (B_{svc})

Tout d'abord la courbe de la susceptance primaire du SVC (B_{svc}) a la même forme fondamentale que celle obtenue de la puissance réactive Q_{svc} , lorsque le SVC injecte une puissance réactive au réseau (Q_{svc} est de signe positive) on aura une susceptance B_{svc} positive, de même lorsque le compensateur absorbe du réactif on obtient B_{svc} négative comme elle montre la figure (V.18).

Dans le premier intervalle le SVC injecte la puissance réactive, ce qui donne une susceptance de $(0,55 \text{ pu})$, ensuite le SVC absorbe une Q_{svc} dans le deuxième intervalle alors que la susceptance porte une valeur négatif de l'ordre de (-0.84 pu) .

Dans les intervalles de temps $[1,1 - 1,4 \text{ sec}]$ et $[1,4 - 1,8 \text{ sec}]$, la B_{svc} devient successivement $(1,1pu)$ et $(1,18pu)$. finalement le compensateur absorbe une deuxième fois le réactif ce qui provoque un affaissement de la valeur de susceptance jusqu'à $(-0,65 \text{ pu})$ (figure (V.18)).

c) Nombre de banc (n) du TSC utilisé

En comparant les figures (V.20) et (V.24), il paraît clair que lorsque le SVC injecte une petite quantité de puissance réactive (intervalle [0 0,6sec]), on constate qu'un seul banc de TSC est en service. et quand le compensateur fournit plus de réactif avec des valeurs appréciables (intervalle [1 1,8sec]), le SVC utilise deux (02) bancs de TSC pour l'approvisionnement de la puissance réactive nécessaire au réseau.

D'autre part lorsque le SVC absorbe de la puissance réactive Q_{svc} du réseau (intervalles [0,6 1sec] et [1,8 2,2sec]), le TSC est complètement hors service, et seul le TCR qui fonctionne pour optimiser cette puissance et par conséquent maintenir la tension à la valeur désirée.

Il est important de noter que les bancs de TSC sont branchés dans des étapes discrètes ce qui explique un petit retard de fonctionnement constaté à la figure (V.24).

d) L'angle de commutation (α) du TCR

En premier lieu on rappelle que lorsque l'angle de commutation $\alpha=90^\circ$ le TCR est en pleine conduction, et lorsque $\alpha=180^\circ$ aucune conduction n'est effectuée par le TCR. D'autre part si l'angle de commutation α est compris entre 90° et 180° on dit que le TCR conduit partiellement.

Selon la figure (V.21), on constate que l'angle de commutation α est toujours compris entre 90° et 180° dans tous les intervalles de temps, on déduit alors que le TCR fonctionne dans toute la plage du temps [0 2,2sec] mais il absorbe des pourcentages différents de la puissance réactive.

Dans l'intervalle [0 0,6sec] un seul banc de TSC injecte de la puissance réactive alors que le TCR n'absorbe que très peu du réactif pour obtenir la valeur désirée du Q_{svc} afin d'optimiser la puissance réactive au réseau, ce qui explique la valeur de l'angle de commutation de l'ordre de ($135,3^\circ$). de même dans l'intervalle de temps [1 1,8sec] on a deux (02) bancs de TSC qui sont en service et le TCR absorbe la quantité excessive avec des angles de commutation de ($120,75^\circ$) pour l'intervalle [1 1,4sec] et ($124,38^\circ$) pour [1,4 1,8sec].

Lorsque le TCR fonctionne seul (les 3 bancs du TSC sont hors service), l'angle de commutation α prend des valeurs importantes (un peu près de 90°), de l'ordre de ($105,6^\circ$) dans l'intervalle [0,6 1sec] et ($113,2^\circ$) dans l'intervalle [1,8 2,2sec] (figure (V.21)).

e) Susceptance effective du TCR (B_{TCR})

On peut calculer la susceptance effective du TCR en fonction de l'angle de commutation α à travers l'équation (IV.62) (du chapitre précédent) : $B_{TCR} = (-) \frac{2(\pi-\alpha)+\sin(2\alpha)}{\pi}$

Le calcul analytique de B_{TCR} en fonction de α avec l'utilisation de cette équation nous donne le tableau suivant :

Temps (s)	0	0.6	0.6	1	1	1.4	1.4	1.8	1.8	2.2
α (deg)	135,3		105,6		120,75		124,38		113,2	
B_{TCR}(pu)	-0,179		-0,662		-0,378		-0,321		-0,511	

Tableau V.2: Susceptance effective B_{TCR} en fonction de α .

La base de données (look up table) (voir l'annexe (d)) de l'unité de distribution peut donner numériquement les mêmes valeurs calculées analytiquement dans le tableau ci-dessus.

Le calcul effectué par la base de données de l'unité de distribution est montré dans la figure suivante :

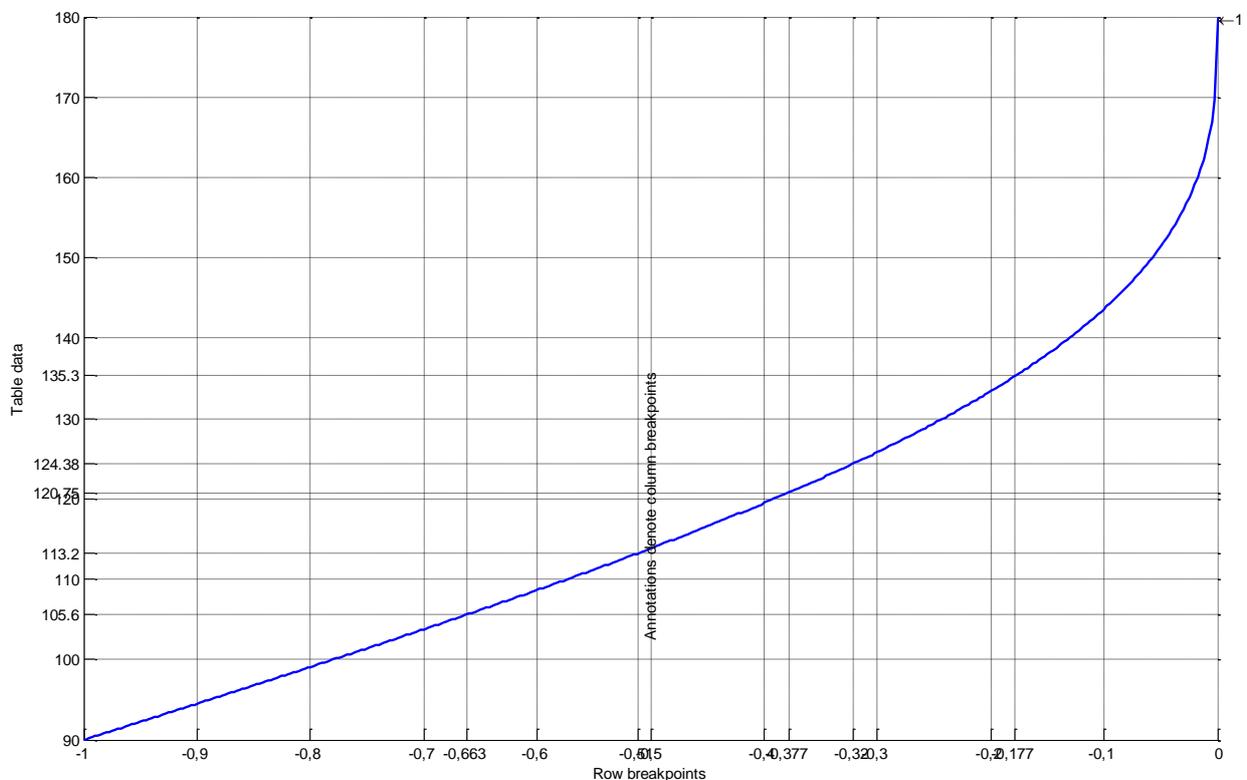


Figure V.27: Susceptance effective B_{TCR} en fonction de α fournie par look up table.

En comparant les valeurs analytiques calculés à partir de l'équation (IV.62), et numériques obtenues par look up table de l'unité de distribution traduits dans la figure (V.19), on constate que les valeurs sont presque les mêmes. On déduit alors que l'unité de distribution utilisée dans la simulation du SVC fonctionne scrupuleusement.

f) Puissances transportées par la ligne P_{tr} et Q_{tr}

L'effet de la compensation de l'énergie réactive se répercute directement sur le transit de la puissance active dans la ligne (figures (V.22) et (V.23)); la fourniture de l'énergie réactive au point de consommation permet un transit plus important de la puissance active dans la ligne de transport.

g) Temps de repense du SVC (τ)

La figure (V.25) présente un zoom de la figure (V.24) à l'intervalle [1- 1,03 sec], cette figure montre que pour les deux bancs de TSC fonctionnent il faut que l'SVC prend un temps de retard que nous appelons le temps de réponse de l'ordre de ($\tau=0,023\text{sec}$). Ce qui donne une caractéristique du SVC, c'est la rapidité de fonctionnement.

♣ D'après la figure (V.26) qui présente que la tension au jeu de barre de réception V_r est aussi régulière, et les figures (V.22 et 23) qui montrent que la puissance réactive est bien optimisée et le transit de la puissance active devient plus important dans la ligne de transport, nous pouvons dire que le SVC a présenté une grande performance de fonctionnement.

V.4. Comparaison technico-économique entre le STATCOM et le SVC

Dans cette section, nous allons effectuer une courte étude comparative entre les deux compensateurs étudiés le STATCOM et le SVC sur deux plans principaux :

V.4.1. Sur le plan technique

* Le zoom des courbes de tension compensées au jeu de barre de réception (V_r) par le STATCOM et par le SVC obtenues dans les figures (V.15) et (V.26) respectivement montre que la compensation par ces deux dispositifs a presque les mêmes valeurs qui sont dans les normes de compensation [0,95 1,1pu], avec une petite préférence au STATCOM qui donne

des valeurs (Q_{sh}) les plus proches au référence (Q_{ref}) que celle données par le SVC (Q_{svc}) comme il montre le tableau suivant :

Temps (s)	0 0.6	0.6 1	1 1.4	1.4 1.8	1.8 2.2
Q_{sh} (pu)	0,081	-0,1	0,1	0,106	-0,065
Q_{svc} (pu)	0,074	-0,083	0,11	0,12	-0,055
Q_{ref} (pu)	0,085	-0,103	0,1	0,105	-0,06

Tableau V.3: Comparaison entre Q_{sh} , Q_{svc} et Q_{ref} .

****Temps de réponse :**

D'après la simulation effectuée des deux compensateurs, on a obtenu un temps de réponse de l'ordre de ($\tau=0,018\text{sec}$) pour le STATCOM, et ($\tau=0,023\text{sec}$) pour le SVC avec une différence de l'ordre de ($0,005\text{sec}$). On déduit alors que le STATCOM est plus rapide que l'SVC.

V.4.2. Sur le plan économique

Mis à part la comparaison technique effectuée entre les deux dispositifs FACTS étudiés, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un STATCOM ou un SVC. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un STATCOM et par un SVC doit excéder les coûts d'exploitations et de maintenance de l'installation.

******* Tant que le STATCOM et le SVC sont utilisés dans un même réseau test ayant la même puissance d'installation et le même niveau de tension, il n'y a qu'à dire que la structure et la constitution du STATCOM qui utilise un composant de l'électronique de puissance moderne et très avancé (GTO) avec la nature excellente du semi conducteur de ce dernier par rapport aux thyristors simple du SVC, ainsi que la commande compliqué du STATCOM qui exige beaucoup de matérielle, sont les grandes critères économiques qui impose que le STATCOM est plus cher que l'SVC.

V.5.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit notre réel réseau test souvent étudié dans la recherche, ensuite nous avons fait des essais de simulation pour le STATCOM et pour le SVC dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus sont bien illustrés et interprétés, et ils ont prouvés que la puissance réactive du réseau est optimisée et la tension au jeu de barre de réception est bien régulier, ils ont prouvés aussi la flexibilité, la sensibilité et la rapidité des deux dispositifs FACTS utilisés.

Finalement une petite comparaison dans les plans technique et économique prouve que le STATCOM est le plus rapide, le plus robuste mais le plus cher qu'un SVC.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le développement rapide de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion, les conditions de fonctionnement et le contrôle des réseaux électriques en introduisant les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible FACTS qui utilisent des interrupteurs statiques modernes commandés en ouverture et en fermeture tels que les (GTO, IGBT,...), avec ce système FACTS le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que la compensation de tension, est atteint et performé.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce domaine de recherche, on a proposé une solution adéquate pour optimiser la puissance réactive et le contrôle de la tension dans un réseau électrique à travers l'incorporation de deux dispositifs FACTS : le « STATCOM » et le « SVC ».

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par les étapes suivantes :

Dans la première étape nous avons présenté en bref un rappel sur la puissance réactive et ces moyens de compensation, la tension et les différents problèmes rencontrés dans les réseaux électriques.

La deuxième étape de notre travail a été consacrée à la description des différents systèmes permettant d'assurer le transport d'énergie électrique dans les meilleures conditions et qui sont rangés sous l'appellation « systèmes FACTS ». Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories : les compensateurs parallèles, les compensateurs séries et les compensateurs hybrides (parallèle-série), de plus on a mentionné quelques installations FACTS installées dans le monde tel que l'ASC de Kayenta, le TCSC d'Imperatriz...etc.

Dans la troisième étape nous avons présenté en détaille la structure de base et le principe de fonctionnement des deux dispositifs FACTS étudiés le STATCOM et le SVC, ainsi que leurs caractéristiques qui sont bien expliqués et illustrés.

Dans la quatrième étape nous avons développé le modèle mathématique dans le repère synchrone (d-q) pour les deux compensateurs étudiés quand ils sont raccordés au réseau électrique. Afin d'analyser l'influence de chaque dispositif sur le réseau, nous avons démontré les relations entre les différentes variables de ce dernier en fonction des paramètres de contrôle de ces deux compensateurs. Pour le STATCOM nous avons choisi la commande par MLI car ce dispositif commande de fortes puissances, et un système de commande pour le SVC de type (3TSC+1TCR) comporte quatre unités de commande principaux (unité de

Conclusion générale

système de mesure, unité de régulateur PI de tension, unité de distribution et l'unité de commutation). Nous avons choisi la méthode (Watt-var Découplé) pour l'identification des références du STATCOM, et nous avons appliqué le régulateur PI pour la commande des deux dispositifs.

Dans la dernière étape, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau test étudié en grandeurs réduites. Afin de voir le comportement des deux dispositifs connecté au réseau pour l'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension, nous avons fait des simulations par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus par les différentes simulations effectuées pour le STATCOM et pour le SVC ont validé d'une manière générale les modèles des deux dispositifs utilisés, et ils ont bien montré que ces deux compensateurs ont réalisé avec une grande efficacité notre objectif crucial dans l'optimisation de la puissance réactive et la compensation de tension dans le réseau test étudié. A la fin de cette étape nous avons fait une brève comparaison sur les plans technique et économique entre ces deux compensateurs FACTS.

Il reste encore beaucoup de voies à explorer mais il nous semble prioritaire de poursuivre une étude plus approfondie dans ce domaine de recherche sur les systèmes FACTS, on peut proposer comme thématiques :

- ❖ Etude de l'impact des autres dispositifs FACTS sur les réseaux de l'énergie électrique.
- ❖ Utilisation des intelligences artificielles (logique floue, algorithmes génétiques) pour choisir l'emplacement optimal des dispositifs FACTS en général, et le STATCOM et le SVC en particulier dans un réseau électrique, en considérant des critères tel la minimisation du temps de réponse et du cout de l'installation FACTS.
- ❖ Contribution des systèmes FACTS (en particulier le STATCOM le SVC) dans l'amélioration de la stabilité des systèmes énergétiques surtout dans les conditions de fonctionnement critiques et inattendus tels que les courts-circuits.

Annexe

Annexe

a) Transformation de Park

$$[\mathbf{P}(\theta)][V_{odq} - V_{sh_{odq}}] = \mathbf{R}_{sh}[\mathbf{P}(\theta)][I_{sh_{odq}}] + L_{sh} \frac{d[\mathbf{P}(\theta)][I_{sh_{odq}}]}{dt}$$

$$[V_{odq} - V_{sh_{odq}}] = [\mathbf{P}(\theta)]^{-1} \mathbf{R}_{sh}[\mathbf{P}(\theta)][I_{sh_{odq}}] + [\mathbf{P}(\theta)]^{-1} L_{sh} \frac{d[\mathbf{P}(\theta)][I_{sh_{odq}}]}{dt}$$

Tel que : $[\mathbf{P}(\theta)] * [\mathbf{P}(\theta)]^{-1} = \mathbf{1}$ alors :

$$[V_{odq} - V_{sh_{odq}}] = \mathbf{R}_{sh}[I_{sh_{odq}}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh_{odq}}]}{dt} + [\mathbf{P}(\theta)]^{-1} L_{sh} \frac{d[\mathbf{P}(\theta)]}{dt} [I_{sh_{odq}}] \quad \text{Avec :}$$

$$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1} \frac{d[\mathbf{P}(\theta)]}{dt} = \frac{d\theta}{dt} [\mathbf{P}(\theta)]^{-1} \frac{d[\mathbf{P}(\theta)]}{d\theta}$$

$$\frac{d[\mathbf{P}(\theta)]}{d\theta} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\sin \theta & -\cos \theta \\ \mathbf{0} & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \mathbf{0} & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{On obtient :}$$

$$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1} \frac{d[\mathbf{P}(\theta)]}{d\theta} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \text{On trouve finalement :}$$

$$[V_{r-abc} - V_{sh_{abc}}] = \mathbf{R}_{sh}[I_{sh_{abc}}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh_{abc}}]}{dt}$$

b) la puissance P_{sh}

$$[P_{sh_{abc}}] = [V_{sh_a} \ V_{sh_b} \ V_{sh_c}] * \begin{bmatrix} I_{sh_a} \\ I_{sh_b} \\ I_{sh_c} \end{bmatrix} = \left\{ [\mathbf{P}(\theta)] \begin{bmatrix} V_{sh_o} \\ V_{sh_d} \\ V_{sh_q} \end{bmatrix} \right\}^t * \left\{ [\mathbf{P}(\theta)] \begin{bmatrix} I_{sh_o} \\ I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \right\}$$

$$[P_{sh_{dq}}] = [V_{sh_d} \ V_{sh_q}] [\mathbf{P}(\theta)]^t [\mathbf{P}(\theta)] \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \quad \text{Tel que :}$$

$$[\mathbf{P}(\theta)]^t [\mathbf{P}(\theta)] = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \mathbf{1} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \mathbf{1} & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix}$$

Alors :

$$[P_{sh_dq}] = \frac{3}{2} (V_{sh_d} I_{sh_d} + V_{sh_q} I_{sh_q})$$

c) Transformation de Laplace

Soit $f(t)$ une fonction quelconque positive pour $t > 0$ et nulle pour $t < 0$, la transformée de Laplace de $f(t)$ est donnée par :

$$f(s) = \int_0^{+\infty} f(t) e^{-st} dt$$

s : est l'opérateur de Laplace.

$f(s)$: L'image de $f(t)$.

$f(t)$: L'original de $f(s)$.

On applique la transformation de Laplace sur l'équation :

$$\frac{dI_{sh_d}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh_d} + \omega I_{sh_q} + X_1$$

$$f1(s) = \int_0^{+\infty} \frac{dI_{sh_d}}{dt} e^{-st} dt = \int_0^{+\infty} s I_{sh_d} e^{-st} dt = -I_{sh_d} e^{-st} \Big|_0^{+\infty} = I_{sh_d}$$

$$f2(s) = \int_0^{+\infty} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh_d} e^{-st} dt = \frac{1}{s} * \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh_d}$$

$$f3(s) = \int_0^{+\infty} \omega I_{sh_q} e^{-st} dt = \frac{1}{s} * \omega I_{sh_q}$$

$$f4(s) = \int_0^{+\infty} X_1 e^{-st} dt = \frac{1}{s} * X_1$$

Alors :

$$I_{sh_d} = \frac{1}{s} * \left(\frac{-R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh_d} + \omega I_{sh_q} + X_1 \right) \Rightarrow s I_{sh_d} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh_d} + \omega I_{sh_q} + X_1$$

$$\Rightarrow \left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{sh_d} = \omega I_{sh_q} + X_1 = \widetilde{X}_1 \dots\dots\dots (IV.22)$$

d) transformation de Laplace de l'équation (IV.32) :

$$\frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2P_{sh}}{c} \dots\dots\dots(IV.32)$$

$$F1(s) = \int_0^{+\infty} \frac{dU_{dc}^2}{dt} e^{-st} dt = \int_0^{+\infty} sU_{dc}^2 e^{-st} dt = -U_{dc}^2 e^{-st} \Big|_0^{+\infty} = U_{dc}^2$$

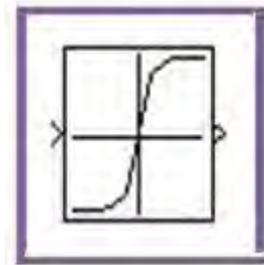
$$F2(s) = \int_0^{+\infty} \frac{2P_{sh}}{c} e^{-st} dt = \frac{1}{s} \frac{2P_{sh}}{c}$$

De F1 et F2 on obtient :

$$U_{dc}^2 = \frac{1}{s} \frac{2P_{sh}}{c} \dots\dots\dots(IV.33)$$

Alors on trouve finalement : $\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{s \cdot c} \dots\dots\dots(IV.34)$

e) look up table



Look up table.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] Abdelaali Alibi, « contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS », mémoire de magistère, option : électricité industrielle, université de Batna, soutenue le 13/06/2009.
- [2] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « *La planification des réseaux électriques* » Editions EYROLLES 1984.
- [3] Boudjella Houari, « contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositif FACTS (SVC) », mémoire de magistère, option : conversion d'énergie et commande, université de sidi bel-Abbes, soutenu le 23 janvier 2008.
- [4] Haimour Rachida, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, option identification modélisation et commande numérique des processus, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, année universitaire 2008-2009.
- [5] David Chapman, « variation de tension », european copper institute, juillet 2002.
- [6] Mammeri Oussama, « différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », mémoire de magistère, option : réseaux électriques, université de Batna, année universitaire 2011/2012.
- [7] Mezaache Mohamed, « analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de stabilité de la tension », mémoire de magister, option réseaux électriques, université de Batna, soutenu le 24/11/2011.
- [8] Rabah Benabid, « Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », mémoire de magister, option : Analyse, Conduite et Commande des réseaux électriques, université Amar Telidji, Laghouat, soutenu le 04/09/2007.
- [9] Sami AMMARI, « Interaction des dispositifs FACTS avec les charges dynamiques dans les réseaux de transport et d'interconnexion. », thèse de doctorat, spécialité : génie électrique, institue national polytechnique de Grenoble, soutenu le 10 Novembre 2000.

- [10] Eskandar Gholipour Shahraki, « apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », thèse de doctorat, spécialité génie électrique, université Henri Poincaré Nancy-I, soutenue le 13 octobre 2003.
- [11] L.Baghli, « modélisation et commande de la machine asynchrone », notes de cours, université Henri Poincaré Nancy-1, 2005.
- [12] John Wiley & sons from, www.knovel.com "Thyristor-based FACTS controllers and electrical transmission systems", party n° 01, copyrighted materials, 2002.
- [13] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [14] T.J.E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley, New York, 1982.
- [15] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, understanding FACTS; concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, New York, 2000.
- [16] Qian lu Yuanzhang sun Shengwei Mei, "Nonlinear Control and power system dynamics " book, cluwer academic publishers 2001.
- [17] Belguidoum Hocine, « les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandé », mémoire de magistère, option réseaux électriques, université de Sétif, soutenue : mars 2011.
- [18] Kehileche Houcine, Nassah Tayeb, «Commande intelligente d'un SVC pour le contrôle de la tension dans les réseaux électriques», mémoire d'ingénieur d'état en Électrotechnique, Option : Électromécanique, Université Ziane Achour de Djelfa, soutenue en 2010.
- [19] Nitin Ved, Satish Natti, Abur ELEN "Static VAR Compensation using Thyristor Controlled Reactor " Course project, December 12, 2003.
- [20] Hanene Kouara, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », mémoire de magister, université de Batna, soutenue le 28/02/2006.
- [21] J. C. Passelergue, rapport de thèse "Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques" LEGIINPG, Novembre 1998.
- [22] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.
- [23] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho, " FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [24] Site internet: en.wikipedia.org/wiki/flexible_AC_transmission_system.

- [25] Kartobi Lamia, «Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques », mémoire de magistère, option réseaux électriques et haute tension, école nationale polytechnique Alger, Soutenue le 29 Novembre 2006.
- [26] Bekki Brahim, « contribution du SMES, dispositifs FACTS, à la stabilisation d'un réseau électrique haute tension », mémoire de magistère en électrotechnique, option réseaux électriques et haute tension, école nationale polytechnique Alger, Soutenue le 20 septembre 2006.
- [27] Delendi Louardi, « contrôle de l'écoulement de puissance active par système », mémoire de magistère en électrotechnique, Option : Electricité industrielle, université de Batna, soutenue le 25/06/ 2009.
- [28] A. A. Ladjici, A. Barar, « Introduction aux systèmes flexibles de transmission en courant alternatif FACTS », Mémoire d'ingénieur, Ecole National Polytechnique, Alger, Juin 2002.
- [29] P. Petitclair, « Modélisation et commande de structures FACTS : Application au STATCOM », Thèse de doctorat de l'INGP, 16 Juillet 1997.
- [30] A. Edris et al, «Proposed Terms and Definition of FACTS», IEEE trans on power delivery, 12(4):1884-1853, October 1997.
- [31] Stéphane GERBEX, « Metaheuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique, “ thèse PHD, Ecole polytechnique de Lausanne, Lausanne 2003.
- [32] Amir H. Norouzi, « Flexible AC Transmission Systems: Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC », Thèse de magister de l'université de New Brunswick, 2003.
- [33] Michel Crappe, « *Commande et régulation des réseaux électriques* », Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [34] De Vre R, Jacquet B « *Perturbations dans les installations électriques et électroniques Problèmes et solutions*» Note d'information.
- [35] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet « *Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II)* » Techniques de l'ingénieur D 4 315.
- [36] Richard Gagnon, « *Étude de la Ferrorésonance dans les réseaux compensées séries et Shunt* », thèse de doctorat, université de LAVAL, QUEBEC. Canada, soutenue en Mai 1997.
- [37] SAMI. Repo, « *On-line Voltage Stability Assessment of Power system – An Approach of Back-box Modelling* », thèse de doctorat, université de Tampere,soutenue en 2001.
- [38] KUNDUR.P « *Power System Stability and Control* » IEEE Transactions on Power System 1994.

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

[40] J. XU, "Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité", Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994.

[41] Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Jian Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller", publication IEEE 2005.

لمخص: من اشر على تحقيق ذ حلا فلياً نكيدم الخطائت السجلات ويشلقت الخشي خالل ادخال ال ظنتان شت نؤمجان بلران ح اوب فلك خظ"ي اخم زمان هدفن ح ا حدض" ي كيا لبت خفسش ع ه ا "خججيو" و "اط.ف.ع" ع"ي ع) 3 ح. اط. ع+ح. ع بس ب ا بطرفص م خركب ه ا وبيذا كنه ا وبع طا اضا ا رخه ا اشر اضر. ف ا كيه ا ن خض ا ي) دك(وب ان القا شب ي تخمف ي خن اشر ا ش بلك انك شعلت ذل ا شت ي ب جان شلقت ن مز" ا كيه ا ض. فب ا خص خججيو ا شج ا طش ق ت ان خك ي "و.ال.اي" و طاو ح ك ي ل" اط.ف.ع" ع لحي ي 4 و ح ذات (ظاوق اط. ب كذل "ب.اي" ف خ ي ش. و ح ص ع و و ح ص ب ذ م (ا شج ا طش ق ت "وا طفلا ي فط ك ي ل ق ل" ان خ ح ذ د شرا غ خججيو و ط بق ا ل ك ذ ل ب ا ي ف خ لحي ف ا ال ا خ دض" . ي ل ح ان ح ك ا ق با خ ذ ا و يش لحي ال اب ي ح ك ا ق ل ب ح ص ح ت ان ا ر ج ان ع ك م ت وب ي ش ك م خ ذ ا " مز" ا كيه ا ض. ف ق ل ك ي ا ن ا ل ب ش ا ه ذ ف ا ا ش ا ن ع ا ن ح ك م ف ك ذ م الخطائت السجلات و كيه ا ضن ا شج ف ن ش بلك ت انك شعلت ل ا خ ش ر ي ت ان نؤ و ع ت ف ا ل ش ق "ل ب ق ل ر ت و خ ن ر ك م ت ه ا ن غ خ ي" ل ن خ ق و الا ق ص ا د ي ب " مز" ا كيه ا ض. فلك خظ".

لنم ا ت م ف ت ا ح ا ة ب ك خ ظ. خججيو. اط.ف.ع. ح. اط. ع. ح. ع بس ط ش ق ت ان خك ي "و.ال.اي", ل ك ذ ل ب ا ي.

Résumé:

Ce mémoire propose une solution adéquate pour l’optimisation de la puissance réactive et le contrôle de la tension à travers l’incorporation des systèmes flexible de transmission en courant alternatif « FACTS ».pour cet objectif on a proposé deux dispositifs de la famille shunt le STATCOM et le SVC de type (3TSC+1TCR). Nous avons présenté en détaille leurs structure et principe de fonctionnement, nous avons aussi développé leurs modèles mathématiques dans le repère synchrone (d-q) et démontré les relations entre les différentes variables du réseau en fonction des paramètres de contrôle de ces deux compensateurs. Pour le STATCOM nous avons choisi la commande MLI, et un système de commande pour le SVC (3TSC+1TCR) comporte 04 unités (système de mesure, régulateur PI de tension, unité de distribution et l’unité de commutation). Nous avons choisi la méthode (Watt-var Découplé) pour l’identification des références du STATCOM, et nous avons appliqué le régulateur PI pour la commande des deux dispositifs. Les résultats de simulation avec MATLAB/SIMULINK ont validé les modèles utilisés et ils ont bien montré que ces deux compensateurs ont réalisé avec une grande efficacité notre objectif crucial dans l’optimisation de la puissance réactive et la compensation de tension dans le réseau test étudié. A la fin nous avons fait une brève comparaison sur les plans technique et économique entre ces deux compensateurs FACTS.

Mots clés : FACTS, STATCOM, SVC, TSC, TCR, commande MLI, régulateur PI

Abstract: This memory proposes an appropriate solution for the optimization of reactive power, and voltage control through the incorporation of the flexible alternating current transmission systems “FACTS”. For this objective we proposed two shunt family devices the STATCOM and the SVC of (3TSC+1TCR) type. We presented by details their structure and operating principle, we also developed their mathematical models in the synchronous reference (d-q), and shown the relations between the various variables of the network according to the control parameters of these two compensators. For the STATCOM we chose the MLI command, and a command system for the SVC (3TSC+1TCR) comprises 04 units (measurement system, PI regulator of voltage, distribution unit and the switching unit). We chose the method (Watt-Var uncoupled) for the identification of the STATCOM references, and we applied the PI regulator for the command of two devices. The results of simulation with MATLAB/SIMULINK validated the models used and they indeed showed that these two compensators carried out with a great effectiveness our crucial objective in the optimization of reactive power and the voltage compensation in the test network studied. At the end we made a short comparison on technical and economical plans between these two FACTS compensators.

Keywords: FACTS, STATCOM, SVC, TSC, TCR, MLI command, PI regulator