



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Réalisé par :

CHABOUNI ADEL

Thème

Contribution à l'optimisation du transit d'énergie dans le réseau électrique par dispositifs FACTS

Soutenu le: 30/10/2021

Devant la commission composée de :

Mme. LATRECHE Sadjia	M.A.A	Univ. Bouira	Président
M. TOUAFEK Mohamed Yaakoub	M.A.A	Univ. Bouira	Encadreur
M. DJEBIRI Mustapha	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur

Remercient

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et Sciences Appliquées de l'Université de Bouira.

Avant tous, je remercie ALLAH, le tout puissant pour m'avoir donné le courage et la patience de terminer ce travail.

Je tiens à remercier en tout premier lieu Mr. TOUAFEK Mohamed Yaakoub, Directeur de ce mémoire. Pour m'avoir laissé proposer ce sujet de soutenance et de m'avoir aidé par ses idées et ses conseils durant toutes les étapes de réalisation de ce travail.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Enfin, je remercie toute personne de près ou de loin qui a participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Bouira, 2021.
Adel CHABOUNI

Table des Matières

Remercient	I
Table des Matières	II
Liste des Figures	VI
Liste des Tableaux	VIII
Listes des Acronymes et Symboles	IX
Introduction Générale	1

CHAPITRE 1 Gestion d'énergies dans les réseaux électrique.

1.1. Introduction	3
1.2. Réseaux électriques	4
1.3. Problématique du gestionnaire des réseaux	4
1.4. Problématique de fonctionnent des réseaux	4
1.4.1. Problème de réseau algérien	4
1.4.2. Puissance active et réactive transmissible par une ligne	5
1.4.3. Chute de tension dans une ligne	7
1.5. Facteurs limités l'énergie transit dans une ligne	9
1.5.1. Transit de la puissance réactive	9
1.5.2. Limite thermique et d'affaissement	9
1.5.3. L'impédance caractéristique	9
1.5.4. Limite de stabilité	10
1.5.5. Stabilité de tension	10
1.6. Techniques conventionnelles de gestion d'énergie	10
1.6.1. Maintien de la tension de transport	11
1.6.1.1. Alternateurs de production	11
1.6.1.2. Compensateur shunt synchrone	11
1.6.1.3. Réactance shunt de compensation	12
1.6.2. Contrôle du l'angle de transport	13
1.6.2.1. Transformateur déphaseur (PST)	13
1.6.2.2. Utilisations et l'effet du fonctionnement d'un PST	14
1.6.3. Modification sur l'impédance du linge	15
1.6.3.1. L'ajout d'une nouvelle ligne	15
1.6.3.2. Compensation série	16

1.7. Conclusion	17
CHAPITRE 2 Contrôle et optimisation dynamique d'énergie avec FACTS.	
2.1. Introduction	18
2.2. Diapositifs FACTS	18
2.2.1. Définition	18
2.2.2. Concept générale	19
2.3. Classification des dispositifs FACTS	19
2.3.1. FCATS de première génération	19
2.3.2. FACTS de deuxième génération	19
2.3.3. FCATS de troisième génération	20
2.4. Différentes catégories des FACTS	20
2.4.1. Dispositifs shunts	21
2.4.2. Dispositifs séries	21
2.4.3. Dispositifs shunt-série	21
2.5. Contribution et l'avantages des FACTS	22
2.6. Utilisations pratiques des FACTS	22
2.7. Structure des principaux dispositifs FACTS	23
2.7.1. Dispositifs shunt	23
2.7.1.1. SVC (compensateur statique d'énergie réactive)	23
2.7.1.2. STATCOM (compensateur synchrone statique)	24
2.7.1.2.1. Définition	24
2.7.1.2.2. Structure de base et description	24
2.7.1.2.3. Principe de Fonctionnement	25
2.7.2. Dispositifs séries	28
2.7.2.1. TCSC (capacité série contrôlée par thyristor)	28
2.7.2.2. SSSC (compensateur statique synchrone série)	28
2.7.2.2.1. Définition	28
2.7.2.2.2. Structure de base et description	29
2.7.2.2.3. Principe de Fonctionnement	29
2.7.2.2.4. Effet de fonctionnement d'un SSSC sur le réseau électrique	32
2.7.3. Dispositifs shunt-série	34
2.7.3.1 UPFC (contrôleur de puissance unifié)	34
2.8. Conclusion	35

CHAPITRE 3 Simulation avec SSSC et discussion des résultats.

3.1. Introduction	36
3.2. Description du réseau test étudié	36
3.3. Essais de simulation et résultats (test 1)	37
3.4. L'optimisation dynamique vis-à-vis des centrales électriques avec turbine à vapeur	44
3.5. Essais de simulation et résultats (test 2)	45
3.5.1. Réponse dynamique cas de compensation	45
3.5.2. Réponse dynamique cas des perturbations	47
3.6. Conclusion	48
Conclusion Générale	49
Référence	51
Annexe	53
Résumé	58

Liste des Figures

Figure 1.1 Structure des réseaux électriques	4
Figure 1.2 Schéma unifilaire d'une ligne	5
Figure 1.3 La puissance transite P et Q en fonction de δ avec Q en fonction de P	6
Figure 1.4 Schéma unifilaire d'une ligne HT	7
Figure 1.5 Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne HT	7
Figure 1.6 Représentation de la ligne de charge	8
Figure 1.7 Représentation des composants élémentaires d'une ligne	10
Figure 1.8 La compensation shunt au point milieu	11
Figure 1.9 Diagrammes des courants et tensions du la compensation shunt point milieu	12
Figure 1.10 Les puissances P_c et Q_c comparée avec P et Q en fonction de δ	12
Figure 1.11 La compensation parallèle par réactance fixe	13
Figure 1.12 a) Schéma de PST, b) Le principe de fonctionnement	14
Figure 1.13 Effet du fonctionnement d'un PST	14
Figure 1.14 Représentation de l'ajout d'une nouvelle ligne	15
Figure 1.15 La compensation sérié par condensateur fixe	16
Figure 1.16 Diagramme des courants et tensions du la compensation série	16
Figure 1.17 Les puissances P_c et Q_c en fonction de δ pour différents valeurs de K_s	17
Figure 2.1 Structure de base d'un SVC avec schéma équivalent	23
Figure 2.2 Structure de base d'un STATCOM	24
Figure 2.3 Principe de fonctionnent d'un STATCOM	24
Figure 2.4 Schéma équivalent de STATCOM connecté au réseau	25
Figure 2.5.a Les tensions et courants avec P_{sh} et Q_{sh} en mode isolé avec schéma phaseur	27
Figure 2.5.b Les tensions et courants avec P_{sh} et Q_{sh} en mode capacitif avec schéma phaseur ...	27
Figure 2.5.c Les tensions et courants avec P_{sh} et Q_{sh} en mode inductive avec schéma phaseur ...	27
Figure 2.6 Structure d'un TCSC avec schéma équivalent	28
Figure 2.7.0 Structure de base d'un SSSC	29
Figure 2.8 Principe de fonctionnent d'un SSSC	29
Figure 2.9 schéma équivalent d'un SSSC dans un réseau	30
Figure 2.10.a Les tensions, courant, puissances, phaseur de fonctionnement en mode isolé	31
Figure 2.10.b Les tensions, courant, puissances, phaseur de fonctionnement en mode inductif ...	31
Figure 2.10.c Les tensions, courant, puissances, phaseur de fonctionnement en mode capacitif ...	31
Figure 2.11 La puissance active transporté P_s en fonction de δ avec différent valeurs de V_{se} (Left), avec la puissance réactive Q_s en fonction de P_s pour différents valeurs de V_{se} (Right)	33

Figure 2.12 Les puissances $P_{SSSC}, Q_{SSSC}, P_S, Q_S$ en fonction de V_{se}	33
Figure 2.13 Structure de base d'un UPFC	34
Figure 2.14 Schéma équivalent de L'UPFC connecté au réseau	35
Figure 3.1 Schéma unifilaire du réseau test étudié	36
Figure 3.2 Schéma équivalent de réseau test étudié	37
Figure 3.3 Schéma phaseurs du réseau test étudié	38
Figure 3.4 Le model simulink de réseau test étudié	38
Figure 3.5 Les différents tensions avec courant du ligne non-compensée	39
Figure 3.6 La tension V_x avec courant I non-compensée dans le repère d-q	39
Figure 3.7 Les puissances transmissibles sans-compensation	40
Figure 3.8 La tension série $V_q inj$ injecté par L'SSSC	41
Figure 3.9 Le courant I dans la ligne de transport test	42
Figure 3.10 La réactance injecté X_q et effective X_{eff} de la ligne test	42
Figure 3.11 Les puissances active réactive transportée par la ligne test	43
Figure 3.12 Les puissances échangées entre le réseau et L'SSSC	44
Figure 3.13 Schéma unifilaire du réseau test 2 étudié	44
Figure 3.14 Principe de contrôleur POD	45
Figure 3.15 Les tensions références et injectées sans et avec contrôleur	46
Figure 3.16 La puissance active transmise sans et avec contrôleur	46
Figure 3.17 La puissance réactive transmise sans et avec contrôleur	46
Figure 3.18 Les tensions références et injectées sans et avec contrôleur	47
Figure 3.19 La vitesse et l'angle de transport sans et avec contrôleur	47
Figure 3.20 La puissance active transmise sans et avec contrôleur	47

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Les principaux dispositifs FACTS 20

Tableau 2.2 Les FACTS installés dans le monde avec leurs puissances totales 22

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

GDRE	Gestion D'énergie dans les Réseaux Electrique.
NESC	National Electrical Safety Code.
PST	Phase Shifting Transformer.
UCPTE	Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity.
SSR	Sub Synchronous Resonance.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
HT	Haute Tension.
MT	Moyenne tension.
BT	Basse Tension.
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System.
SSSC	Static Synchronous Serie Compensator.
STATCOM	Static Synchronous Compensator.
SVC	Static Var Compensator.
TCR	Thyristor Controlled Reactor.
TCSC	Thyristor Controlled Serie Capacitor.
TSC	Thyristor Switched Capacitor.
TSR	Thyristor Switched Reactor.
TSSC	Thyristor Switched Serie Capacitor.
UPFC	Unified Power Flow Controller.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors.
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor.
PWM	Pulse Width Modulation.
JB	Jeu de Barre.
SC	Sans Contrôleur.
POD	Power Oscillation Damping.

Symboles

V_s	Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).	V
V_r	Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).	V
V_m	Tension à ce point m.	V

V_{sh}	Tension (shunt) injectée par le STATCOM.	V
V_{se}	Tension (série) injecté par le SSSC.	V
X_s	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.	Ω
I_{sh}	Courant (shunt) injecté par le STATCOM.	A
Z	Impédance équivalent de la ligne.	Ω
δ_1	Angle de tension de source.	rad
δ_2	Angle de tension de charge.	rad
R	Résistance.	Ω
G	Conductance.	S
L	Inductance.	H
C	Capacité.	F
X	Réactance.	Ω
X_L	Réactance inductive.	Ω
X_c	Réactance capacitive.	Ω
X_{eff}	Réactance effective.	Ω
Φ	Angle de l'impédance de la ligne.	$degré$
φ_S	Angle entre tension-courant de source.	$degré$
φ_R	Angle entre tension-courant de charge.	$degré$
θ_l	Angle de courant de la ligne.	$degré$
ω	Pulsation angulaire.	rad/s
I_s	Courante de source.	A
I_c	Coutant absorbé par le compensateur.	A
I_R	Courante de charge.	A
I_L	Courant de ligne.	A
ΔV	Chute de tension.	V
ΔV_T	Chute de tension transversale.	V
ΔV_L	Chute de tension longitudinale.	V
δ	Angle de transport.	rad
P	Puissance active.	W
P_{SSSC}	Puissance active injecte par L'SSSC.	W
P_s	Puissance active de ligne compensée.	W
P_{max}	Puissance active maximale transmise.	W
P_{ZC}	Puissance active transporté par impédance caractéristiques.	W

Q	Puissance réactive.	<i>Var</i>
Q_c	Puissance réactive de compensation.	<i>Var</i>
Q_{SSSC}	Puissance réactive injecté par L'SSSC.	<i>Var</i>
Q_{SSSC}	Puissance réactive injecté par L'SSSC.	<i>Var</i>
B_{SVC}	Susceptance du SVC.	S
Q_{SVC}	Puissance réactive délivré par SVC.	<i>Var</i>
d (<i>indice</i>)	La composante sur l'axe d du repère d-q.	-
q (<i>indice</i>)	La composante sur l'axe q du repère d-q.	-

Introduction Générale

Le réseau électrique est considéré parmi les grands systèmes industriels construits par l'humain. Sa fonction principale est d'assurer le transport d'énergie électrique de centre de production au centre de consommation dans les meilleures conditions. D'autre part, plus que le réseau augmente plus qu'il devient plus complexe et plus difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire une grande quantité de l'énergie en l'absence d'un dispositif de contrôle efficace et adéquate peu engendre beaucoup des problèmes qui peuvent survenir sur ce réseau. Donc pour maintenir l'équilibre à tous moments entre la production et la consommation il nécessite alors une surveillance permanente du système afin d'assurer la qualité du service (problème de gestion), garantir sa sécurité (problème de protection) et sa stabilité (problème de réglage).

Les méthodes conventionnelles de compensation habituellement utilisées pour traiter le problème de la réactance de ligne sont appliquées depuis de nombreuses années. Cependant, l'augmentation de la demande énergétique et la complexité croissent des réseaux électriques avec les contraintes technico-économiques et environnementales ont rendu ces solutions peu susceptibles de s'implanter et plus de tout inefficaces. L'intégration de ces nouvelles technologies des dispositifs FACTS permet un contrôle plus dynamique fiable et plus facile des réseaux électrique, même si dans les moments critiques lorsqu'ils sont soumis à une perturbation ou aux ces contraintes d'implantation donné précédemment.

Le développement récent dans l'électronique de puissance à permet d'améliorer la GDRE. En introduisant un nouveau concept des systèmes des transmissions d'énergie électrique flexible à courant alternatif appelée « FACTS ». Avec lequel, le contrôle du flux de puissance active et/ou réactive ainsi que l'augmentation dans la capacité de transfert de ces lignes existants, peut atteints et performés plus dynamiquement et très rapidement, par l'injection des tensions et/ou des courants par des convertisseurs conçus avec des interrupteur statiques très rapide et modernes commandées en ouverture et en fermeture, qui concernant une nouvelle génération des FACTS.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte, sur le contrôle et l'optimisation dynamique du flux de puissance et l'augmentation de la capacité maximale de charge des ces lignes existantes en utilisant un dispositif FACTS (SSSC).

Dans le premier chapitre, le problème de fonctionnement et de GDRE est discuté, des définitions et explication avec l'étude sur les lois fondamentales de transport d'énergie en exposant la pro-

blématique de la limite de puissance transportable dans les ligne en fonction des paramètres de réseau. Ainsi que les méthodes conventionnelles de contrôle et de GDRE avec une présentation rapide sur leurs différents principes de fonctionnement et leurs efficacité limitée, et le besoin d'une manière plus adéquate de contrôle et d'optimisation du transit d'énergie ont été également introduites.

Le chapitre deuxième est consacré à la présentation des types, caractéristiques, principe de fonctionnement et l'influences des principaux FACTS sur les différents paramètres des réseaux électriques. Ils ont été classés en trois catégories: série, shunt, série–shunt avec des explications sur leur contribution considérable pour le contrôle rapide plus dynamique et pour GDRE plus adéquate afin d'augmenter la capacité maximale avec une flexibilité de transfert d'énergie de ces lignes électriques existantes.

Le troisième chapitre est consacré à effectué plusieurs essais de simulations sur un dispositif FACTS (SSSC) inséré dans une ligne de transport d'énergie électrique test à jeu de barres infini en termes de contrôle dynamique du flux de puissance et l'augmentation de la capacité maximale de charge des ces lignes électriques. Un test de simulation sera donné aussi sur un réseau multi machines pour montrer l'efficacité des systèmes FACTS équipé avec contrôleur POD sur l'amortissement des oscillations de puissance et l'angle de charge locale et entre régionale et par conséquence l'amélioration de la stabilité du réseau électrique pendant des perturbations.

Le présent travail sera terminé par des conclusions générales sur le travail effectué ainsi que des commentaires sur les résultats obtenus. Des perspectives pour des travaux futurs sont fournies dans la dernière section.

Gestion d'énergies dans les réseaux électriques

1.1. Introduction

Aujourd'hui, la gestion d'énergie dans les réseaux électrique (GDRE), est l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leur taille, de présence des lignes de transport et d'interconnexion très longues. L'industrialisation et l'accroissement continu de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi que, l'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence un équilibre entre la production et la consommation [1]. Donc, il est nécessaire d'augmenter le nombre des centrales électriques, des lignes, des transformateurs ...etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel [2].

La majeure problème d'exploitation des réseaux électriques et reste encore de maintenir, instantanément et en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle, qui imposé l'obligation de la GDRE dynamique, pour optimisé le transit de cette énergies et maximiser la puissance disponible pour les consommateurs. Aussi, avec l'expansion des ces réseaux de transport d'énergie poussent les gestionnaires de réseaux à exploiter le système au plus près de ses limites thermiques et dynamiques. Alors, les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et a la continuité de service [3].

Un réseau de puissance fournit l'énergie aux appareils des utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il doit y maintient à des valeurs nominale acceptable. Il est évident que la qualité et la continuité d'énergie électrique est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons.

C'est dans ce contexte que nous s'inscrit ce premier chapitre qui commencer par une brève description sur les réseaux électriques, ainsi la problématique de fonctionnement et de gestion de l'énergie, ensuite nous intéressé à traité les différents technique et les moyens conventionnelle utilisé pour la GDRE, comme des solutions limité dans sont efficacité est sont difficulté d'implantation liés à plusieurs contraintes technico-économique, et à la fin de ce chapitre nous avons proposé des autres moyens comme des nouvelles solutions et technologies plus avancée et moderne, car à des plusieurs avantages environnemental et technico-économique pour la GDRE plus dynamique comme des solutions très efficace et plus adéquate.

1.2. Réseaux électriques

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée. Donc, en permanence la production doit s'adapter à la consommation. De ce fait la, l'ensemble : des centrales des productions, les lignes de transport d'énergie électrique et les consommateurs constitue un système complexe appelé : Le réseau électrique (Figure 1.1) [4].

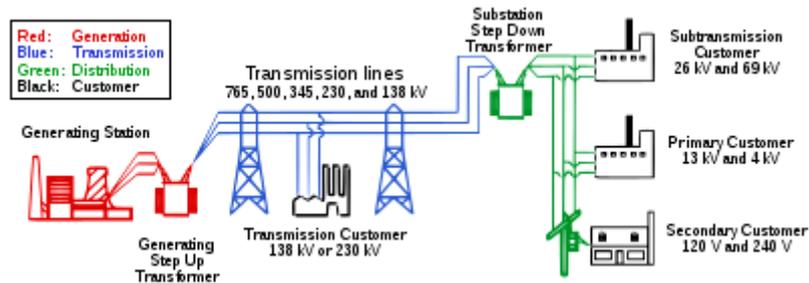


Figure 1.1 Structure des réseaux électriques.

- Le bloc production électrique : regroupant l'ensemble des éléments des unités de production, tels que les alternateurs, les turbines ...etc).
- Le bloc transport et distribution : regroupant l'ensemble des éléments d'acheminement d'énergie électrique vers les consommateurs.
- Le bloc de consommateur : regroupant l'ensemble des charges.

1.3. Problématique du gestionnaire des réseaux

Le réseau de transport assure la liaison entre les centres de productions et les zones de consommation. L'exploitation du système production–transport–consommation doit permettre de faire face aux aléas courants (augmentation de la puissance, perte d'une ligne, perte d'un centre de production ...etc), et d'éviter les incidents majeurs (écroulements, ilotage, mise hors tension ...etc), ou à défaut d'en limiter les conséquences. L'interconnexion des lignes impose que tous les centres de productions de l'électricité doit fonctionner en synchronisme. Les capacités de transport sur les lignes sont limitées par les seuils de surcharge admissible et par les marges de sécurité liée au niveau de tension. Donc les gestionnaires utiliser plusieurs moyens de GDRE pour faire face à ces problèmes est assuré la continuité de fonctionnement des réseaux.

1.4. Problématique de fonctionnement des réseaux

1.4.1. Problème de réseau algérien

Aujourd'hui, dans des nombreux pays, et aussi ici en algérie dans ces récent années la consommation d'énergie électrique est en augmentation très rapidement, avec la crise financière qui rendre investissement à grande échelle très difficile (nouvel centrale électrique, lignes HT ...etc).

Il résulte de tout ceci, que les réseaux doivent aujourd'hui transporter plus de puissance avec un dimensionnement non-proportionnel. Alor, la nécessité d'optimiser le transit de cette énergie, augmente la capacité des ces lignes existante, pour maximiser l'efficacité de transport et diminué les pertes des lignes devient un sujet récent intéressant et plus important. Les gestionnaire de réseau électrique doit donc assurer des moyens de GDRE dynamique, très efficace et adéquat, pour l'ensemble de production–transport–consommation, mettant en œuvre ayant but de l'ensemble de :

- Minimisation le cout de production.
- L'optimisation le transit du cette énergie.
- Assuré la qualité et la continuité de service.

Pour plusieurs raisons économiques (effet de cout ...etc), ou techniques (localisation des réserves et les sources froides ...etc). Les unités de production sont installations sur le site est géographiquement très concentrée, par contre la consommation est beaucoup plus dispersé [5]. Lui qui imposer le problème de la construction d'un system de transport fiable et optimisé assuré le transport de l'énergie à moyenne est à très longue distances le moin chère possible.

D'autre part, ce système il doit y capable instantanément et en permanence à transport cette énergies avec moin des pertes et quelque soit la quantité de cette énergie implique par les charges.

1.4.2. Puissance active et réactive transmissible par une ligne

La figure suivante (Figure 1.2) représente une ligne de transmission d'impédance Z avec une source de tension V_s , aliment une charge.

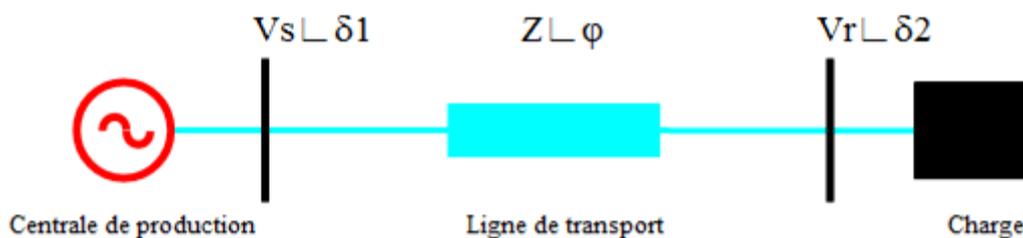


Figure 1.2 Schéma unifilaire d'une ligne.

Le calcul des puissances active et réactive transmises de la source vers la charge est présenté en détail dans l'annexe (Annexe A) et sont équations est donné comme suivant :

$$P = \frac{|V_s||V_r|}{|X|} \sin(\delta) \quad (1.1)$$

$$Q = \frac{|V_s|^2}{|X|} - \frac{|V_s||V_r|}{|X|} \cos(\delta) \quad (1.2)$$

Après l'analyse des équations ci-dessus (1.1) et (1.2), pour bien comprendre on supposant dans ce cas que les tensions $V_s = V_r = X = V$ en Pu. La figure suivante (Figure 1.3) représente la variation de la puissance active et réactive transmissible par la ligne en fonction de l'angle de transport ($0 \leq \delta \leq \pi$).

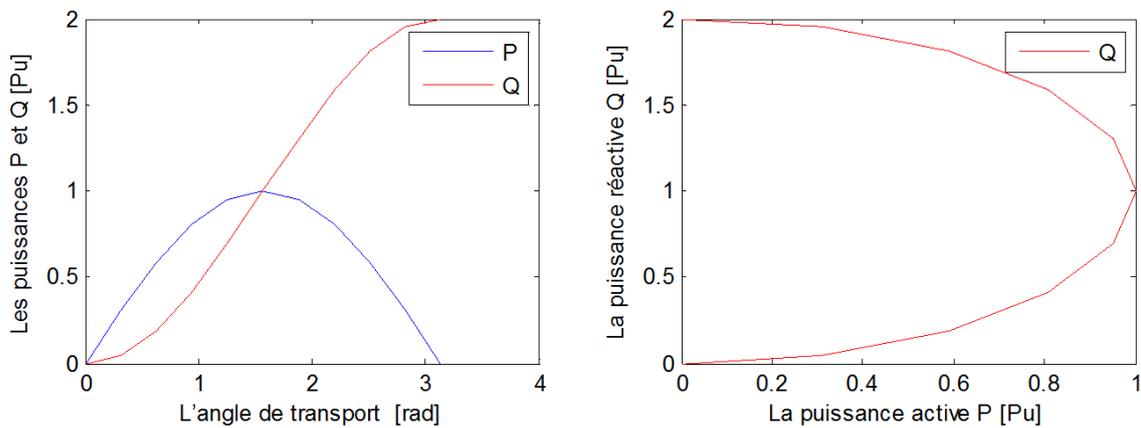


Figure 1.3 La puissance transite P et Q en fonction de δ avec Q en fonction de P.

De la figure (Figure 1.3.Left), est claire que la puissance active P prend sa valeur maximale pour une valeur d'angle transport égale $\delta = (\frac{\pi}{2})$.

$$P = P_{max} = \frac{|V_s||V_r|}{|X|} \quad (1.3)$$

De la figure (Figure 1.3.Right), il montre bien l'influence de l'augmentation de la puissance active P sur la puissance réactive Q transmise par la ligne. Après l'analyse de ces courbes donc pour plus de puissance active transmise, il faut plus de puissance réactive à fournir par le générateur pour satisfaire la demande de la charge, alors plus de pertes dans les lignes de transports [7]. Pour ces raisons, la compensation de puissance réactive devient un facteur important pour optimiser l'énergie transit, et augmente la capacité de transport plus de puissance active et diminué les pertes des lignes.

1.4.3. Chute de tension dans une ligne

Quelques simplifications peuvent être introduites dans le schéma équivalent de la ligne dans les cas suivants :

- $G' \approx 0$ pour une tension $V_s < 225$ kV (HT)
- $C' \approx 0$ pour une tension $V_s < 60$ kV (MT)
- $L' \approx 0$ pour une tension $V_s < 1$ kV (BT)

La figure (Figure 1.4) représente un circuit équivalent d'une ligne HT, du 3^{ème} ordre ($G' \approx 0$).

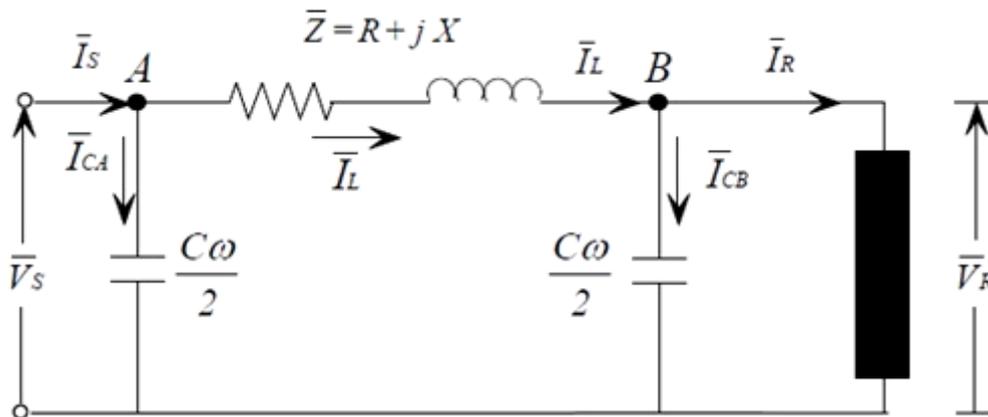


Figure 1.4 Schéma unifilaire d'une ligne HT.

Aussi le diagramme vectoriel de cette ligne est représenté sur la figure (Figure 1.5).

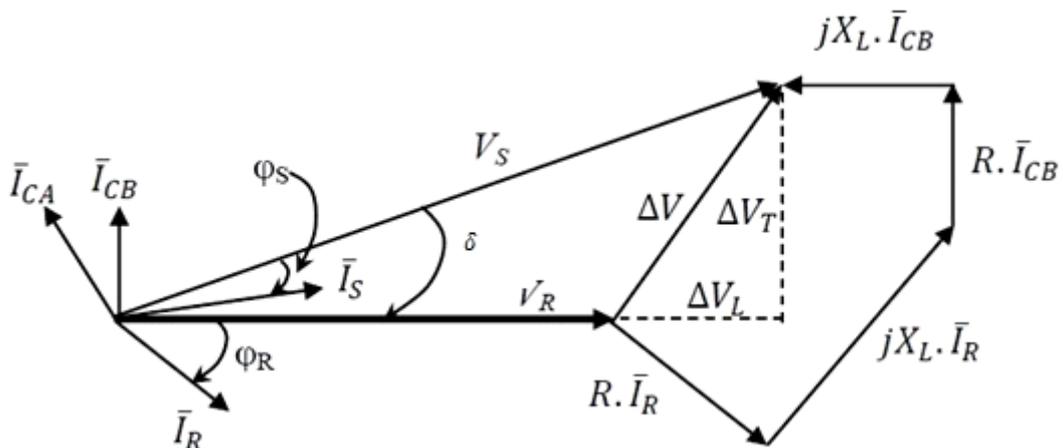


Figure 1.5 Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne HT.

De la figure (Figure 1.5), le développement des équations est présenté en détail dans l'annexe (annexe B), et les équations des chutes des tensions résultats est donné par l'équation (1.4) suivant :

$$\Delta U = \frac{R P_R + X_L (Q_R \frac{Q_{CB}}{2})}{U_R} + j \frac{X_L P_R - R (Q_R \frac{Q_{CB}}{2})}{U_R} = \Delta U_L + \Delta U_T \quad (1.4)$$

De l'équation (1.4), il est clair que la chute de tension dépend simultanément de la puissance active et puissance réactive transit ver la charge. Puisque la réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance Z de la ligne de transport c'est-à-dire ($R \ll X$), on peut écrire :

$$\Delta U = U_s - U_r = \left(\frac{XQ}{U_r}\right) \quad (1.5)$$

De l'équation (1.5), la cause de la chute de tension à travers l'impédance de ligne est due principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est due à la variation de la puissance réactive [6]. Pour maintenir (U_r) constant si la courant I change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

La tension à la source est alors donnée par :

$$U_s = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad (1.6)$$

La régulation de la tension est donnée comme suit :

$$\text{Régulation \%} = \frac{U_s - U_R}{U_R} 100 \quad (1.7)$$

La relation entre la tension au jeu de barre de charge et le courant de charge I est décrite par la droite de la figure (Figure 1.6) appelée la ligne de charge du système, qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par V_s et de pente ($-Z$).

$$I = \frac{V_s - V_r}{Z} \Rightarrow V_r = ZI + V_s \quad (1.8)$$

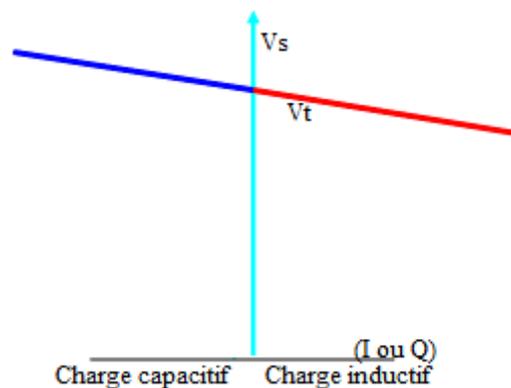


Figure 1.6 Représentation de la ligne de charge.

1.5. Facteurs limités l'énergie transit dans une ligne

La capacité de transfert de puissance d'une ligne de transmission HT dépend de divers facteurs tels que : l'impédance caractéristique Z_c , les limites thermiques et d'affaissement, les limites de stabilité et la stabilité de tension [7].

Ce chapitre explique en détail les différentes limites de la capacité de transfert de puissance d'une ligne de transmission.

1.5.1. Transit de la puissance réactive

Le transit de la puissance réactive dans les lignes diminue la capacité des ces lignes pour transport plus de puissance active, et augmente les pertes des lignes, qui va diminuer considérablement l'efficacité de transport.

1.5.2. Limite thermique et d'affaissement

En pratique le transport de puissance électrique à travers les lignes de longue distances est conditionné par les limites thermiques de ces dernières, de plus la consommation excessive de la puissance réactive par certaines charges augmente considérablement les pertes dans ces lignes [6]. Si le courant transporté par le conducteur augmente (courant maximal supporté par les conducteurs), la température du conducteur augmente aussi ce qui entraîne son allongement. Cet allongement réduit la hauteur du conducteur depuis le niveau du sol. Une distance minimale entre la hauteur du conducteur et la terre doivent être maintenue. L'NESC standardise l'espace d'isolation minimum pour un fonctionnement sûr des lignes sous tension qui doit être maintenu [8].

1.5.3. L'impédance caractéristique

La capacité de transfert de puissance d'une ligne de transmission pourrait être approchée par la connaissance de l'impédance caractéristique de la ligne de figure (Figure 1.7). Cette caractéristique de la ligne est appelée l'impédance caractéristique de charge (Z_c). L'équation (1.9) montre la capacité de transfert de puissance d'une ligne de transport triphasée avec une impédance caractéristique (Z_c).

$$P_{zc} = \frac{|U|^2}{Z_c} \quad \text{Avec : } Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.9)$$

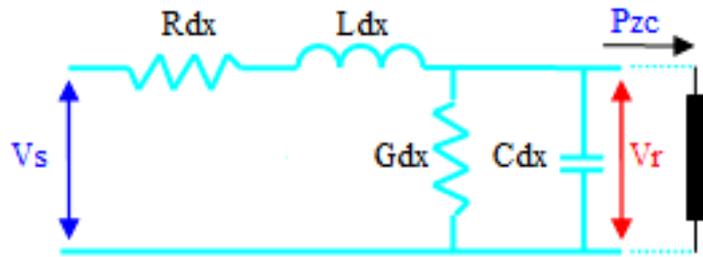


Figure 1.7 Représentation des composants élémentaires d'une ligne.

1.5.4. Limite de stabilité

La stabilité angulaire du rotor, c'est la capacité de système interconnecté à rester synchrone lorsqu'il est soumis à une perturbation. Le système de transmission est conçu de telle sorte que tous les générateurs fonctionnent en synchronisme en régime permanent ainsi qu'en état transitoire, par conséquent il est important de considérer les critères de stabilité pour obtenir la capacité maximale de transfert de puissance d'une ligne de transmission. L'équation (1.1) montre que le transfert de puissance sur une ligne de transmission, connectée à un système plus important aux deux extrémités, est inversement proportionnel à la réactance de la ligne et directement proportionnel à l'angle de transport. Cette réactance de valeur fixe limite la puissance maximale transmise sur une ligne de transmission HT, donc on peut dire que dans cet intervalle ($0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{3}$), le réseau reste stable (la stabilité est limitée par la valeur de δ), mais ailleurs ce dernier peut devenir instable [1,7].

1.5.5. Stabilité de tension

La stabilité de la tension indique la capacité du système d'alimentation à atteindre une stabilité de niveau de tension après tout changement de charge ou perte d'un élément de système [9]. La variation de tension acceptée au niveau du bus est de $\pm 5\%$ de la tension nominale [7]. Une ligne de transmission en pratique transportant un courant, il y a une chute de tension due à la résistance et à la réactance de la ligne (Figure 1.7) et équation (1.4). Cela se traduit par une tension de réception (V_R) inférieure par rapport à la tension d'envoi (V_S). La différence en pourcentage entre la tension d'extrémité d'envoi et la réception est appelée régulation de tension comme montre dans équation (1.7), Cette différence doit être conservée le plus faible possible, aussi pour éviter la transite de la puissance réactive montré par l'équation (1.2).

1.6. Techniques conventionnelles de gestion d'énergie

Des équations (1.1) et (1.2), ça montre bien qu'il est possible d'augmenter la puissance active transit entre deux réseaux par le contrôle de ces trois paramètres principaux :

- Soit en maintenant la tension des systèmes.
- Soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes.
- Soit en réduisant artificiellement l'impédance de la ligne de transport.

1.6.1. Maintien de la tension de transport

1.6.1.1. Alternateurs de production

Les alternateurs de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent lorsque le transit d'énergie réactive sur les réseaux montré par l'équation (1.4).

1.6.1.2. Compensateur shunt synchrone

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes à vide qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées (V_m), absorber ou fournir de la puissance réactive respectivement représenté sur la figure suivant (Figure 1.8).

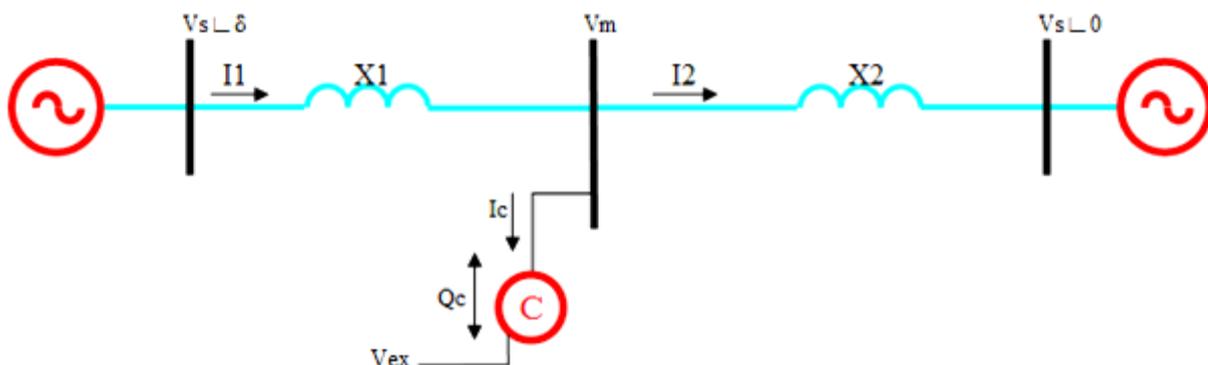


Figure 1.8 La compensation shunt au point milieu.

Considérant un réseau électrique simple avec un compensateur shunt idéal ($P = 0$) connecté au point milieu de la ligne de transport (Figure 1.8). La relation entre les tensions des extrémités de

la ligne et la tension du compensateur V_m ainsi que les courants dans les deux segments de la ligne est représenté par le diagramme de phase de la figure (Figure 1.9) suivant :

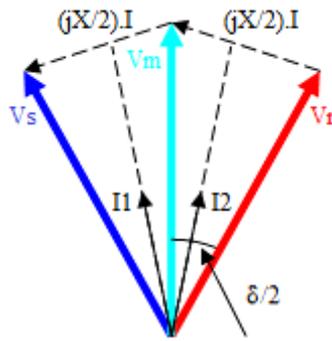


Figure 1.9 Diagrammes des courants et tensions du la compensation shunt point milieu.

Les puissances active compensé P_c et réactive de compensation Q_c transportées par la ligne et donné par les équations (1.10) et (1.11) [10], et comparer avec les puissances de la ligne non-compensée P et Q en fonction de l'angle de transport δ par la figure (Figure 1.10) suivant :

$$P_c = \frac{2 V_s V_r}{X} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \tag{1.10}$$

$$Q_c = \frac{4 V_r (V_s \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) - V_r)}{X} \tag{1.11}$$

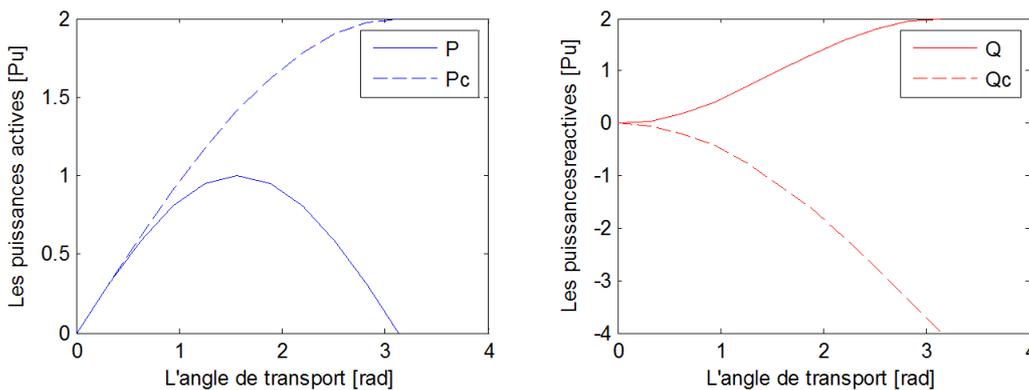


Figure 1.10 Les puissances P_c et Q_c comparée avec P et Q en fonction de δ .

1.6.1.3. Réactance shunt de compensation

La compensation parallèle (shunt compensation) consiste en l'installation des réactances ou bancs de condensateurs des valeurs fixes, connectées entre les phases du réseau et la terre en général par le

biais d'un disjoncteur (Figure 1.11). Ces éléments permettent de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites contractuelles montrée par l'équation (1.5).

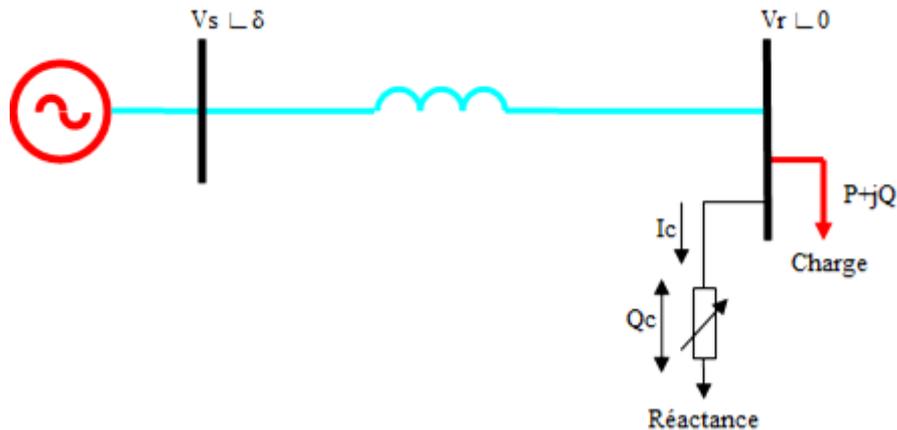


Figure 1.11 La compensation parallèle par réactance fixe.

Une ligne HT peut être modélisée par un schéma en π de figure (Figure 1.7). Lorsque la ligne de transport n'est pas ou peu chargée, la tension en bout de ligne est supérieure à la tension du générateur (Effet-Ferranti). Pour réduire la tension en bout de ligne, on peut connecter une ou plusieurs réactances en parallèle. Cependant, lorsque le réseau est fortement chargé, les réactances parallèles deviennent inutiles pour maintenir la tension dans les limites contractuelles. Le gestionnaire de réseau électrique doit donc connecter ou déconnecter les réactances selon la charge du réseau pour GDRE plus près dynamique. Cependant du fait du nombre limité d'opérations et des délais d'ouverture/fermeture des disjoncteurs, ces réactances et condensateurs parallèles ne doivent pas être commutés trop souvent et ne peuvent pas être utilisés pour une compensation dynamique. Dans le cas où le contrôle du réseau nécessite des commutations nombreuses et/ou rapides, on fera appel à des équipements contreclés par thyristors [3], qui sont l'intérêt de chapitre suivant.

1.6.2. Contrôle de l'angle de transport

1.6.2.1. Transformateur déphaseur (PST)

L'équation (1.1) montre qu'il est possible de réguler le transit de puissance active entre deux systèmes par l'ajustement de l'angle de transport δ entre les réseaux. Ceci que réalise le transformateur déphaseur PST de figure suivant (Figure 1.7) [3]. Les PSTs sont des machines statiques dont les caractéristiques constructives générales sont à quelques détails près identiques aux transformateurs classiques. D'autre part leurs connexions internes permettent d'obtenir un déphasage entre les tensions en entrée et en sortie. Le déphasage entre les tensions d'entrée et de sortie est obtenu par l'adjonction en série avec la ligne d'une tension prélevée par une autre phase (Figure 1.12).

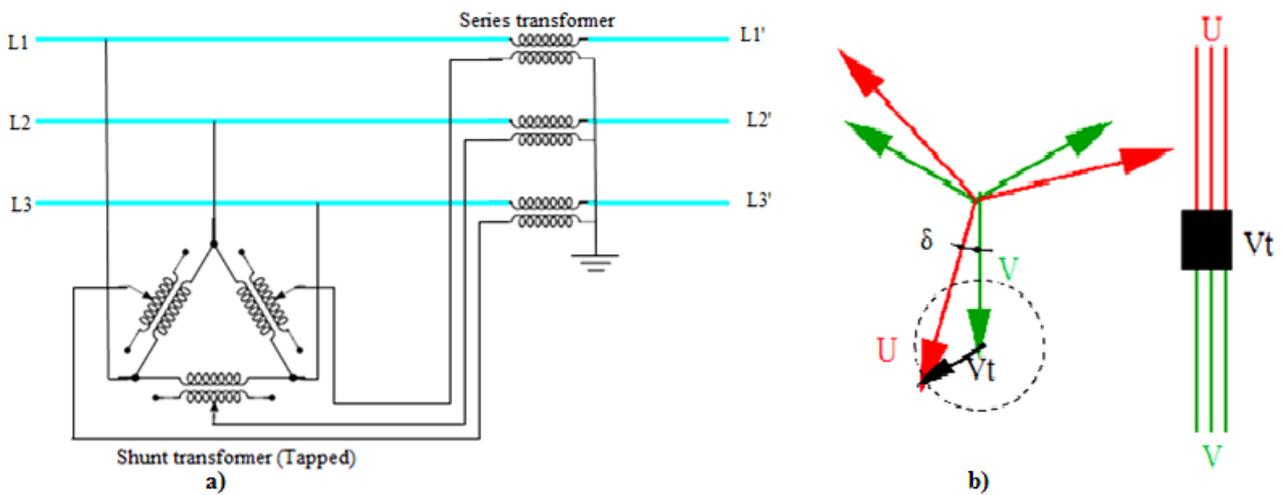


Figure 1.12 a) Schéma de PST, b) Le principe de fonctionnement.

Par le biais de changeur de prise en charge il est possible d'obtenir un angle variable des valeurs avec des pas. Plus simplement un transformateur déphaseur peut être assimilé à une impédance variable insérée dans une ligne, cette impédance pouvant aussi être négative [11].

1.6.2.2. Utilisations et l'effet du fonctionnement d'un PST

Le PST a donc la possibilité d'accroître ou de réduire le transit de puissance active sur la en fonction de la valeur du déphasage δ . Il peut par conséquent être installé sur une ligne à faible capacité thermique pour y limiter les transits de puissance, ou sur une ligne à forte capacité thermique pour y augmenter le transit de puissance comme monté dans exemple de la figure suivant (Figure 1.13).

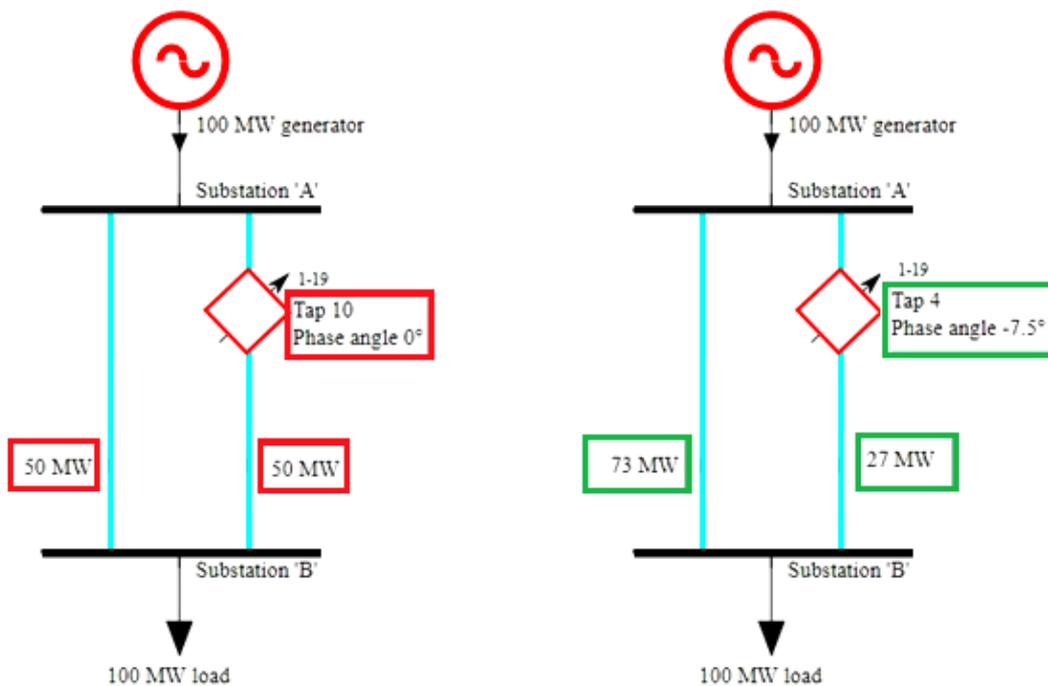


Figure 1.13 Effet du fonctionnement d'un PST.

Donc l'une des principales applications du transformateur déphaseur se trouve lorsque deux réseaux sont connectés par des lignes parallèles d'impédances différentes. Dans ce cas, le transfert de puissance et sa répartition sont directement liés aux impédances de chaque branche et ne tiennent pas compte des capacités thermiques de chaque liaison. L'installation d'un transformateur déphaseur dans l'une quelconque des branches permet de modifier artificiellement la répartition naturelle des transits et d'obtenir une nouvelle distribution de la charge entre les deux branches. L'interconnexion France-Espagne comprend deux liaisons 400kV et deux liaisons 225kV. Au niveau des transits de puissance, le cas le plus contraignant pour la liaison 225kV entre Pragnères et Biescas correspond à la perte simultanée d'une des deux liaisons 400kV et de la perte d'une unité de production de 970MW en Espagne. La prise en compte de ces deux contraintes simultanées est imposée par les règles de fonctionnement entre réseaux électriques au sein de L'UCPTE. En l'absence de liaison supplémentaire, l'échange de puissance entre la France et L'Espagne doit être limité pour ne pas créer de surcharge sur la ligne Pragnères-Biescas. L'installation d'un transformateur déphaseur 321MVA +/- 25° à Pragnères permet de limiter les transits de puissance sur Pragnères-Biescas à la capacité thermique de la liaison. Le reste de la puissance est repoussé sur la liaison 400kV restante. Grace à cet appareil l'échange de puissance entre la France et VEspagne peut être augmenté de 200MW environ sur les lignes existantes [12].

1.6.3. Modification sur l'impédance du linge

1.6.3.1. L'ajout d'une nouvelle ligne

Est toujours possible lever les limitations en transit de puissance d'un réseau en créant de nouvelles lignes (Figure 1.14) et/ou en plaçant des unités de production plus près des centres de consommation. Cependant la création de nouvelles lignes et/ou de générateurs est très couteuse et demande des délais de réalisation longs. De plus l'obtention des nouveaux droits de passage peut être difficile et l'aspect environnemental limite toujours la construction d'ouvrages nouveaux mettre cette solution défavorable et impossible à la réalisation avec le cout d'investissement limité.

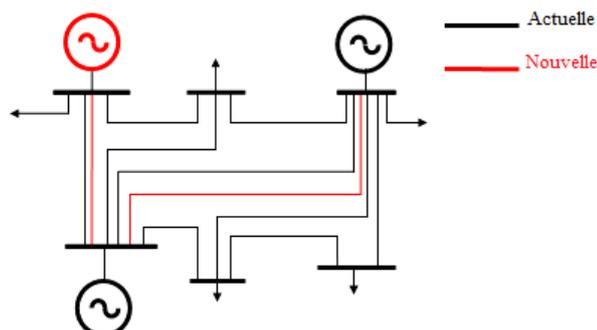


Figure 1.14 Représentation de l'ajout d'une nouvelle ligne.

1.6.3.2. Compensation série

La compensation série est basée sur le principe de réduire la réactance effective X_{eff} d'une ligne, conventionnellement c'est la réactance du compensateur série capacitif qui élimine une quantité de la réactance de la ligne l'inductive et donc l'impédance effective de la ligne électrique est réduit comme si sa longueur physique a été diminuée. Egalement on peut atteindre cet objectif est l'insertion des condensateurs X_c en série avec la ligne de transport électrique [10,13]. Comme dans la figure ci-dessous (Figure 1.15). La compensation série propose donc une alternative à la construction des nouvelles lignes. Cependant dans certaines conditions défavorables d'exploitation pour des lignes fortement compensées (compensation supérieure à 40 %), un phénomène de résonance peut apparaitre entre le banc de condensateurs et l'arbre des générateurs de production, il s'agit de SSR. En cas de risque de SSR il faut soit limiter le taux de compensation de la ligne, soit avoir recours à dispositifs de compensation plus dynamiques (FACTS), qui sont l'intérêt de chapitre suivant [3].

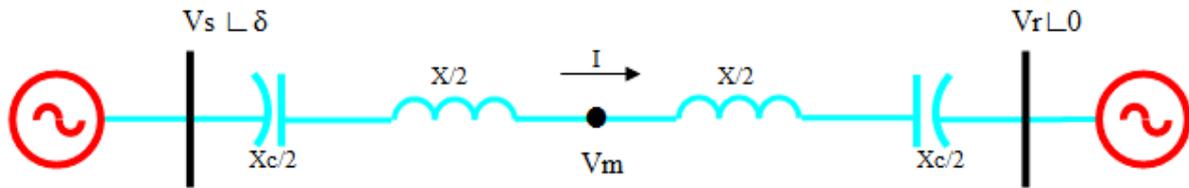


Figure 1.15 La compensation sérié par condensateur fixe.

La relation entre les différentes tensions et courants, dans l'ensemble ligne électrique et condensateur série, est expliquée par le diagramme de la figure (Figure 1.16) suivant :

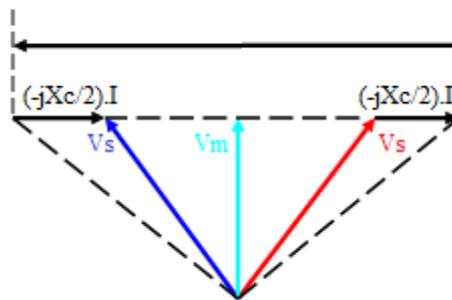


Figure 1.16 Diagramme des courants et tensions du la compensation sérié.

Systématiquement, en insérant ces condensateurs, la réactance effective de la ligne X_{eff} doit être diminué et avoir une nouvelle valeur :

$$X_{eff} = X - X_c = X(1 - K_s) \quad (1.12)$$

Avec : $K_s = \left(\frac{X_c}{X}\right)$ est défini comme le coefficient de la compensation série. Les puissances transportées par une ligne non-compensée donnée par les équations (1.1) et (1.2) seront modifier est devient par les équations (1.13) et (1.14) et varie selon la valeur de la compensation K_s (Figure 1.17).

$$P_c = \frac{V_s V_r}{X_{eff}} \sin(\delta) \quad (1.13)$$

$$Q_c = \frac{V_s^2}{X_{eff}} - \frac{V_s V_r}{X_{eff}} \cos(\delta) \quad (1.14)$$

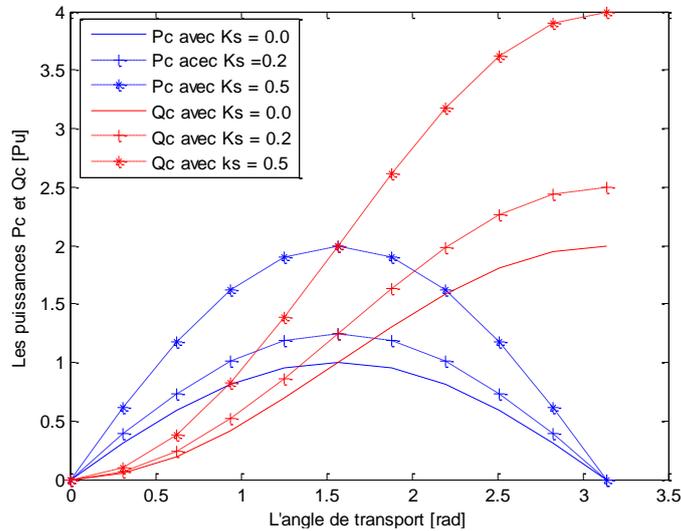


Figure 1.17 Les puissances P_c et Q_c en fonction de δ pour différents valeurs de K_s .

Il est facile d'observer à partir des courbes de la figure (Figure 1.17) que la compensation série peut augmenter significativement la capacité de transport de la puissance active à travers une ligne électrique [10,13].

1.7. Conclusion

Ce chapitre a traité les différents problèmes de fonctionnement et de gestion de l'énergie dans les réseaux électriques, ainsi que les facteurs qui limitent l'efficacité et la capacité de transports et de transit de l'énergie dans les lignes électriques. Ensuite nous avons traité les différents moyens et les techniques conventionnelles utilisées pour faire face à ces problèmes comme des solutions limitées dans leur efficacité et dont la difficulté d'implantation est liée à plusieurs contraintes environnementales et technico-économiques. Cela nous persuade que le contrôle et l'optimisation dynamique du transit d'énergie est un objectif important pour maintenir la qualité et la continuité avec un profil adéquat dans le fonctionnement des réseaux électriques. Cela nécessite l'intégration de moyens plus avancés et adéquats. Cette méthode est basée sur l'utilisation de dispositifs FACTS (basés sur l'électronique de puissance), qui possèdent plus d'avantages que les moyens traités précédemment. Ces dispositifs seront traités en détail dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 2

Contrôle et optimisation dynamique d'énergie avec FACTS

2.1. Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vu 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 lignes de transport d'énergie électriques, ayant des capacités de transit de puissance limité à cause des plusieurs facteur qui sont traité dans le chapitre précédent, doivent s'élargir et des nouvelles lignes d'extension doit être ajoutées. Face à ces problèmes et devant les contraintes environnementale et techno-économique avec la difficulté de reconstructions des nouvelles lignes. La compagnie américaine EPRI fait l'appel d'un projet d'étude des dispositifs FACTS. Aussi, ces réseaux électriques de taille importante seront confrontés par plusieurs problèmes de fonctionnement à cause du la contrôle avec des dispositifs conventionnelle qui utilise la commande électromécaniques ayant temps de réponse lent qui sont traité en détail dans le chapitre précédent, par rapport à ces nouveaux dispositifs FACTS basé sur les interrupteurs statiques de temps de réponse très rapide (moins d'une seconde).

Le concept de ces nouveaux dispositifs FACTS regroupe tous les dispositifs à base de l'électronique de puissance qui permettent : d'améliorer l'exploitation et la GDRE dynamique par l'amélioration de contrôle les différents paramètres de ces réseaux électriques, d'augmenter la capacité de transport et assurer une flexibilité et l'optimisation du transfert de cette énergie électriques.

Dans ce chapitre, nous présentons des principaux dispositifs FACTS, avec leurs structures de bases et leurs principes avec l'effet de fonctionnement sur les réseaux électriques. Nous sommes particulièrement intéressée par la catégorie appelée (SSSC), qui sera développée car elle fera l'objet de notre étude dans ce chapitre et le chapitre suivant.

2.2. Dispositifs FACTS

2.2.1. Définition

D'après IEEE, 'FACTS' est l'abréviation de 'Flexible Alternative Current Transmission Systems'. Sont définis comme suit : Les systèmes de transmission du 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 [14].

2.2.2. Concept générale

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif, mais elle regroupe un ensemble des dispositifs à base de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT ...etc) implantés dans les réseaux électriques. Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation des réseaux électrique, c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique : tension, impédance, déphasage, ...etc. La technologie de ces dispositifs (interrupteur statique) assurée une vitesse très rapide à celle-ci des systèmes électromécaniques conventionnels traités dans le chapitre précédent. Par l'action de contrôle rapide de ces paramètres du réseau, ils permettent d'améliorer l'exploitation et la GDRE dynamique, d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure *flexibilité* du transfert d'énergie. De plus, ils peuvent contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité et l'efficacité de transport [15].

Flexibilité de Transmission de l'énergie : C'est l'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnements en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire [14].

2.3. Classification des dispositifs FACTS

Depuis le premier dispositif, trois générations des dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et les éléments d'électronique de puissance utilisés [16].

2.3.1. FCATS de 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.

2.3.2. FACTS de deuxième génération

Est dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandée à la fermeture et à l'ouverture (GTO et IGBT). Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

2.3.3. FCATS de troisième génération

Est utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas, contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas des dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Une autre classification des dispositifs FATCS peut être effectuée basée sur les cinq caractéristiques indépendantes suivantes [17] :

- Selon le type de raccordement sur le réseau.
- Selon le mode de commutation.
- Selon la fréquence de commutation.
- Selon le mode de stockage d'énergie.
- Selon le mode de connexion au port DC.

2.4. Différentes catégories des FACTS [14].

Le tableau (Tableau 2.1) représente les grandes catégories des contrôleurs des réseaux électriques.

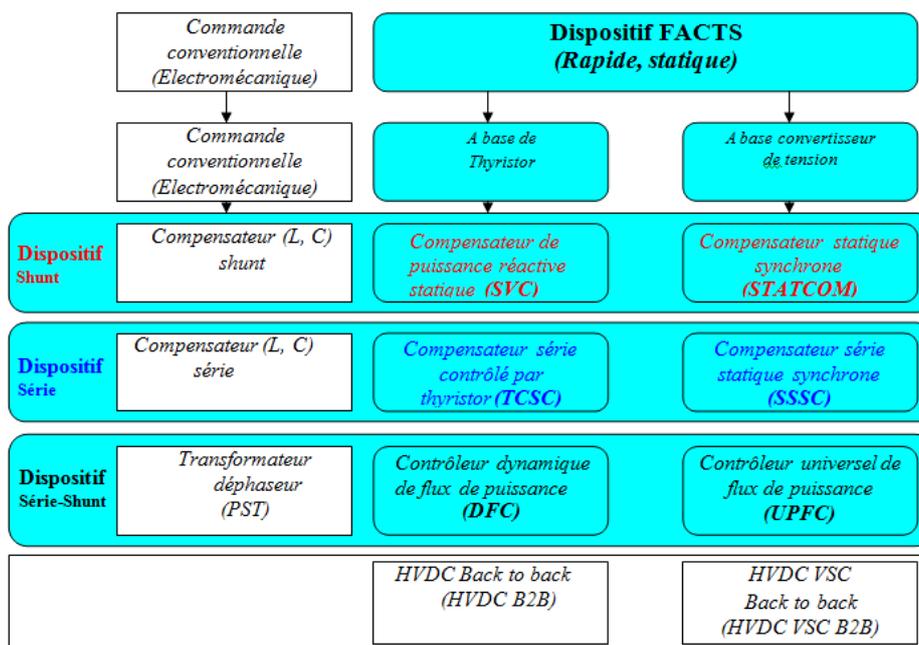


Tableau 2.1 Les principaux dispositifs FACTS.

- La colonne sur la 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 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 à droite, sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT ou bien les IGCT tel que : STATCOM, SSSC avec 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 en exerçant une PWM sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs.

Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau, en général les FACTS sont divisés en trois grandes catégories :

2.4.1. Dispositifs shunts

Appelés aussi compensateurs de puissance réactive, Ils consistent à en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion et par conséquent contrôlent le flux de puissance réactive dans la ligne. Ils permettent de maintenir la tension du réseau au point des nœuds de connexion dans une plage bien déterminée pour le bon fonctionnement du réseau.

2.4.2. Dispositifs séries

Ces dispositifs 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 des puissances et la stabilité des réseaux. Ce type des dispositifs est capable de contrôler et augmenter la capacité des lignes. Cet avantage là, qui fait l'objet de notre étude dans ce chapitre.

2.4.3. Dispositifs shunt-série

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandés d'une manière de contrôle unifié prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables : puissance active et réactive, tension et l'angle.

2.5. Contribution et l'avantages des FACTS

L'intérêt majeur des technologies FACTS pour la GDRE, est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle dynamique et l'optimisation du transit et d'augmenter les capacités de transport utilisables des ces lignes existant sous les conditions normales. Ces possibilités résultent par l'habilité de ces contrôleurs FACTS à contrôler rapidement et plus dynamiquement les paramètres intervenant dans les équations (1.9) et (1.5.2) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que : l'impédance série, impédances shunts, courant, tension, angle de transport [15]. Par cette action, les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un plusieurs avantages sur l'environnement et techno-économiques comme suivant [14] :

- Contrôle plus dynamique et adéquat du flux des puissances qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. ce contrôle doit être réalisé selon un schéma de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- Contrôle des tensions dans les nœuds et la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergie active et diminuer les pertes dans les lignes.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques sans besoin d'ajout des nouvelles constructions traité dans le chapitre précédent.
- Améliorer la qualité de l'énergie et la stabilité dynamique du système c'est un autre avantage des fonctions des FACTS, l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.

2.6. Utilisations pratiques des FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, particulièrement SVC est depuis 1970, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau suivant (Tableau 2.2) montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS avec leurs puissances totales installés dans le monde [14].

Type	Nombre	Puissance installée en MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
Série compensation	700	350.000
TCSC	10	2.000
UPFC	2-3	250
HVDC B2B	41	14.000

Tableau 2.2 Les FACTS installés dans le monde avec leurs puissances totales.

2.7. Structure des principaux dispositifs FACTS

2.7.1. Dispositifs shunt

2.7.1.1. SVC (compensateur statique d'énergie réactive) [1,14].

Un SVC est un générateur ou absorbeur d'énergie réactive connecté en shunt à la ligne de transport auquel sa sortie est ajustée pour échanger un courant (inductif ou capacitif) pour maintenir ou contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique (généralement la tension). La structure de base d'un SVC est l'association en parallèles des dispositifs TCR et TSC connectés au réseau à travers un transformateur de couplage comme montrée par la figure suivant (Figure 2.1).

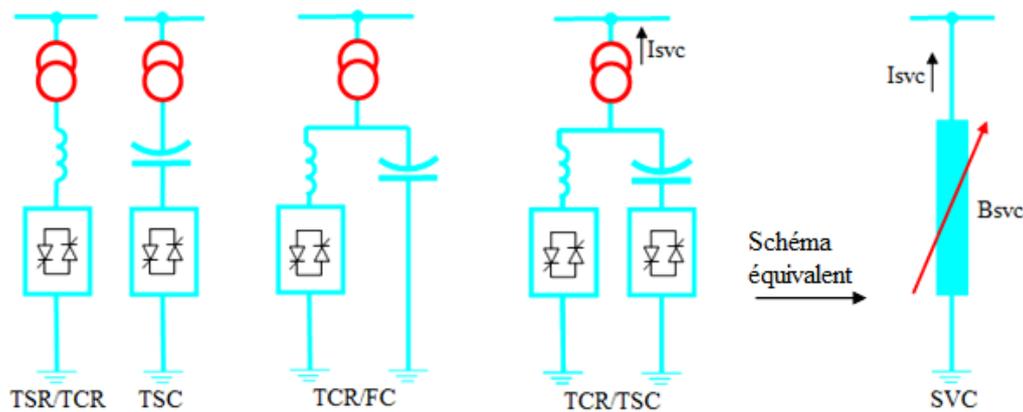


Figure 2.1 Structure de base d'un SVC avec schéma équivalent.

- TCR (réactance contrôlée par thyristor) Un élément TCR pour une phase est représenté dans la figure (Figure 2.1), c'est une réactance en série avec un gradateur, sa valeur est continuellement variable selon l'angle d'amorçage des thyristors.
- TSC (capacité commutée par thyristor) Un élément TSC pour une phase est représenté dans la figure (Figure 2.1), c'est une capacité commandée par thyristors fonctionnant en pleine onde. Sa valeur effective est variable d'une façon tout ou rien. Pour éviter un régime transitoire lors l'amorçage du TSC, Le cas idéal est la connexion avec la capacité déchargée et au moment du passage de la tension du réseau par zéro. L'inductance a pour rôle de limiter le courant transitoire lors de l'amorçage du thyristor. Donc une capacité ne peut pas être contrôlée avec angle d'amorçage variable, mais avec deux possibilités : maximum ou zéro.

Un SVC supposé idéal ne contient pas de composant résistif $G_{svc} = 0$, donc il ne consomme pas d'énergie active du réseau $P_{svc} = P_L = 0$. Sa puissance réactive est fonction de la tension au jeu de barre de connexion et de la susceptance équivalent de SVC ($Q_{svc} = -|V_L|^2 |B_{svc}$).

2.7.1.2. STATCOM (compensateur synchrone statique)

2.7.1.2.1. Définition

Selon IEEE : c'est un générateur synchrone statique fonctionnant comme un SVC connecté en parallèle dont le courant de sortie (capacitif ou inductif) peut être contrôlé indépendamment de la tension AC du réseau [19].

2.7.1.2.2. Structure de base et description

Le concept de base du STATCOM a été proposé par Gyugyi en 1976 [14]. Les premiers STATCOM à base de convertisseurs de deux niveaux appliqués dans les réseaux de transports sont :

- Le STATCOM de $\pm 80\text{MVAR}$ appliqués à un réseau de transport de 154KV à *Inuyama au Japon* et à été commercialisé depuis 1991 par *Kansai Electric Power Corporation*.
- LE STATCOM $\pm 100\text{MVAR}$ à 161 KV installé à la station de *Sullivan du Nord-Est de Tennessee* par *Westinghouse Electric Corporation* aux Etats Unis en 1995.

Le STATCOM est une version de SVC composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT), 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 (Figure 2.2) suivant [15,19] :

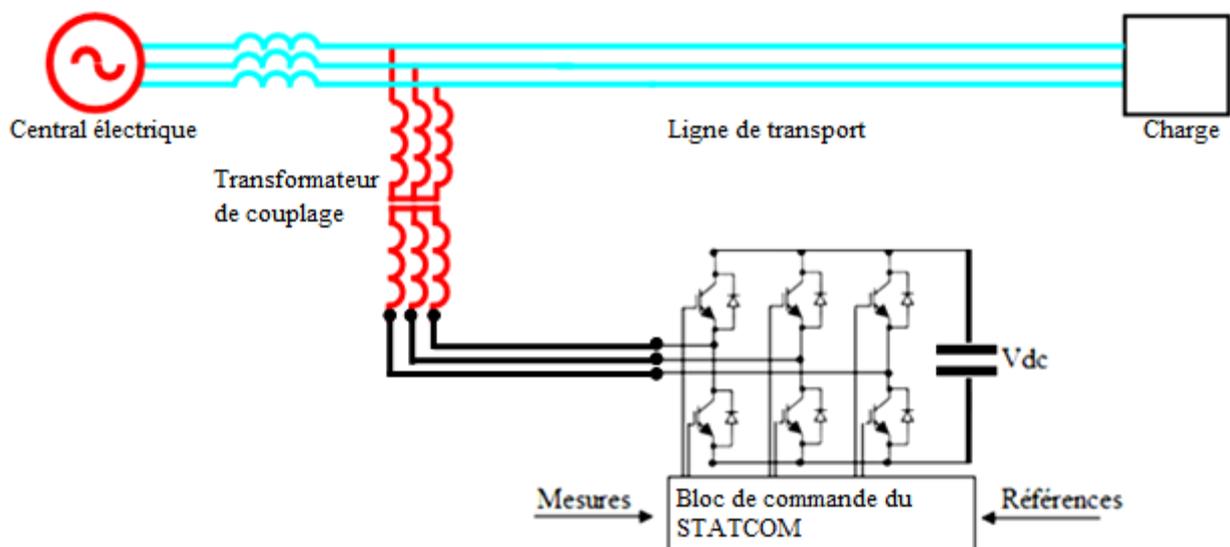


Figure 2.2 Structure de base d'un STATCOM.

2.7.1.2.3. Principe de Fonctionnement

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquence la régulation de la tension au jeu de barre de connections. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau par un onduleur de tension à partir d'une source de tension continue V_{dc} . 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_L de la ligne, dans ce cas il n'y a pas d'échange d'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive Q_s qui sera injectée ou absorbée par le STATCOM [15], comme il est résumé sur la figure suivante (Figure 2.3).

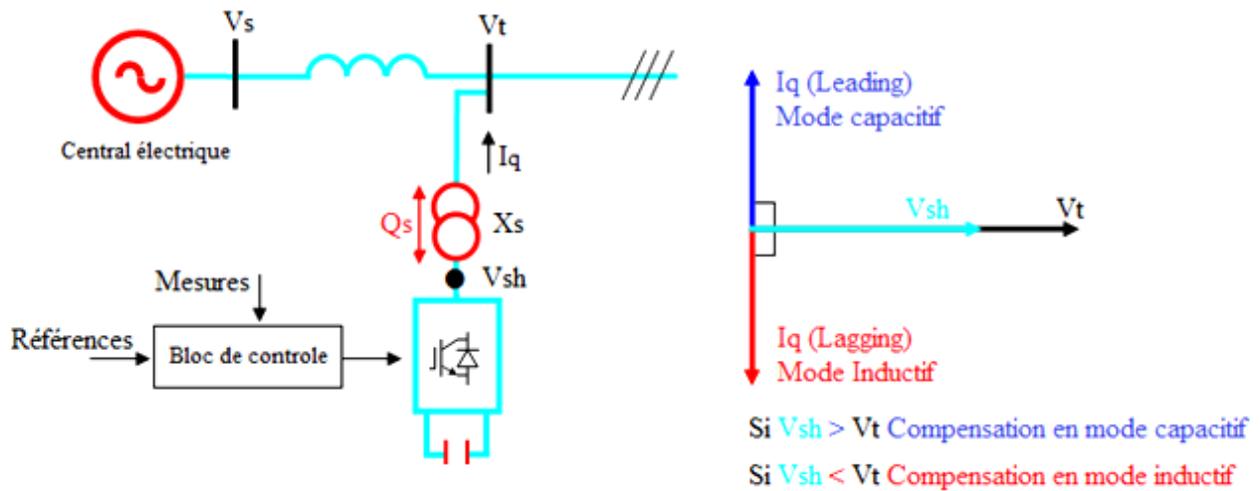


Figure 2.3 Principe de fonctionnement d'un STATCOM.

On considérant le schéma équivalent du STATCOM (Figure 2.3) connecté à un système énergétique : centrale électrique, ligne de transport, charge, est donné par la figure suivant (Figure 2.4).

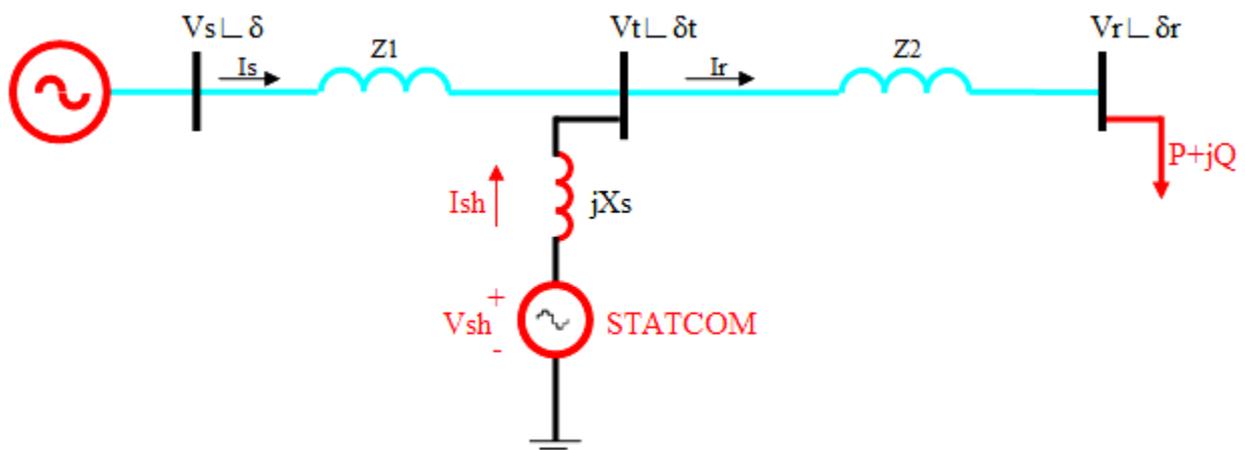


Figure 2.4 Schéma équivalent de STATCOM connecté au réseau.

Le courant injecté par le STATCOM est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{jX_s} \quad (2.1)$$

Les puissances active et réactive injectées au jeu de barre "t" est donnée par :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \bar{I}_{sh}^* \quad \text{Alor : } \begin{cases} P_{sh} = -\frac{V_t V_{sh}}{X_s} \sin(\theta_t - \theta_{sh}) \\ Q_{sh} = -\frac{V_t^2}{X_t} + \frac{V_t V_{sh}}{X_t} \cos(\theta_t - \theta_{sh}) \end{cases} \quad (2.2)$$

Avec STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement de STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau, donc : $P_{sh} = -\frac{V_t V_{sh}}{X_s} \sin(\theta_t - \theta_{sh}) = 0$ Alor : $(\theta_t - \theta_{sh}) = 0 \Rightarrow \theta_t = \theta_{sh}$. D'où la condition, la tension injectée par le STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de connexion V_t , 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 de compensation échangée avec le réseau est contrôlables et données par les équations suivantes :

$$|\bar{I}_{sh}| = I_{shq} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_s} \quad (2.3)$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{shq} = -\frac{V_t^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_{sh}}{V_t}\right) \quad (2.4)$$

Cependant il y a en pratique une petite quantité de puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes de convertisseur du STATCOM, et les pertes au niveau du transformateur de couplage, et pour maintenir la tension aux bornes du condensateur constante [13]. A partir de l'équation (2.4), il est clair que les modes de fonctionnement du STATCOM est imposé selon l'écarte entre les tensions V_{sh} et V_t comme suivante :

- Si $V_{sh} = V_t$: $Q_{sh} = 0$, aucun transfert de l'énergie n'est effectué (Figure 2.5.a).
- Si $V_{sh} > V_t$: donc $Q_{sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau (Figure 2.5.b).
- Si $V_{sh} < V_t$: donc $Q_{sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductive (Figure 2.5.c).

NB : La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Calcul de la répartition de charge détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif [15].

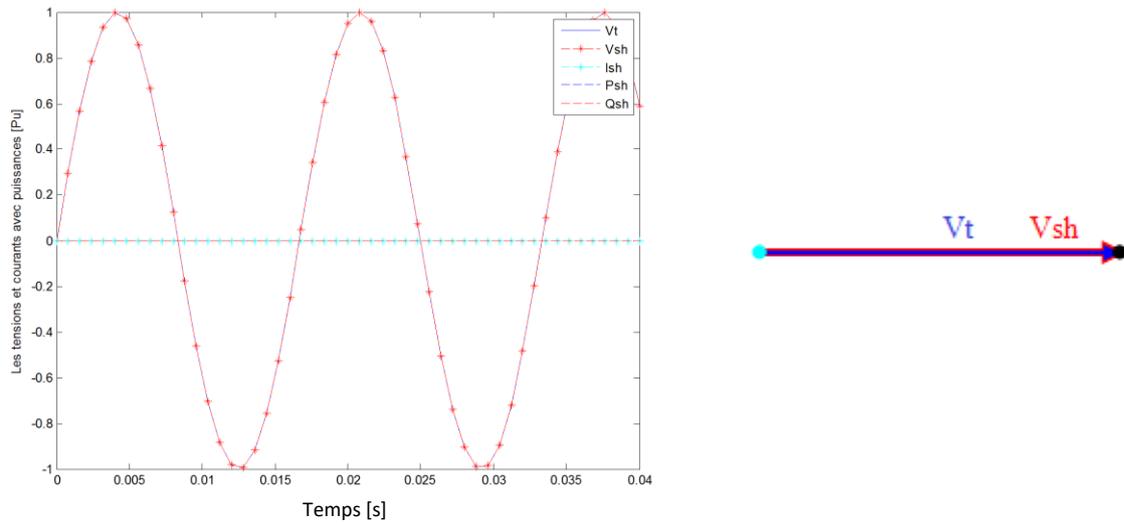


Figure 2.5.a Les tensions et courants avec Psh et Qsh en mode isolé avec schéma phaseur.

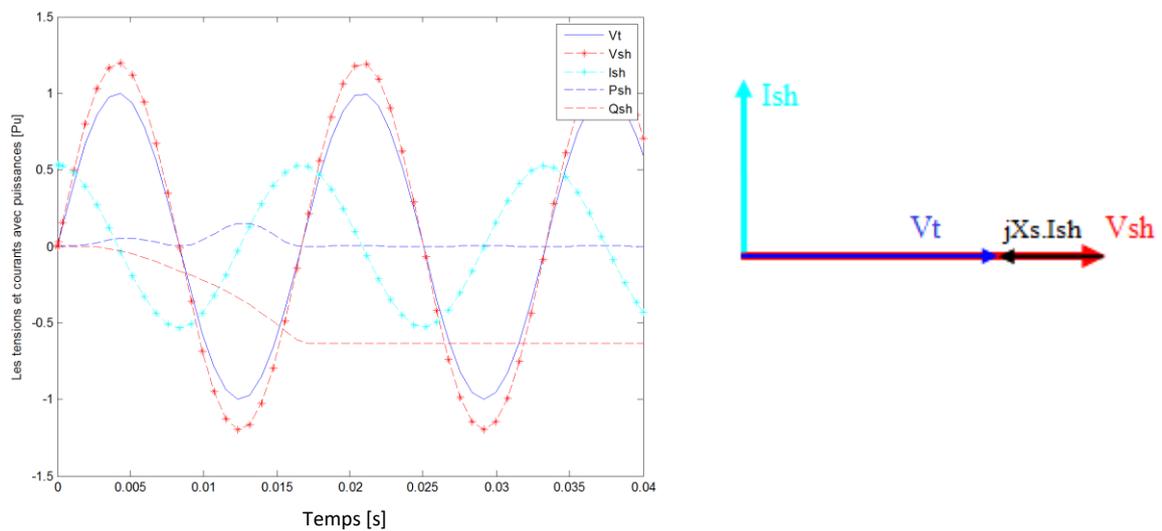


Figure 2.5.b Les tensions et courants avec Psh et Qsh en mode capacitif avec schéma phaseur.

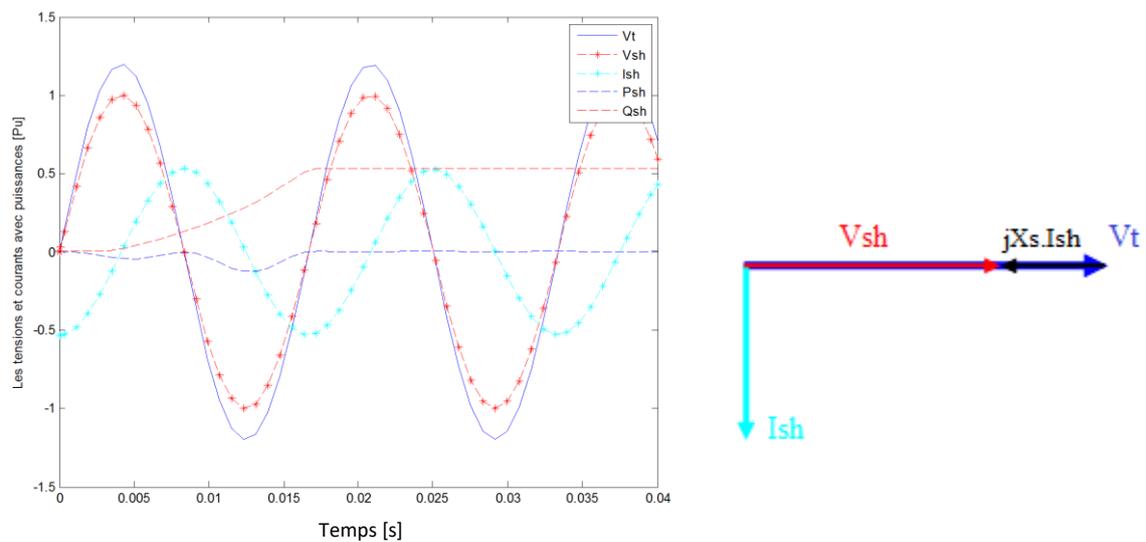


Figure 2.5.c Les tensions et courants avec Psh et Qsh en mode inductive avec schéma phaseur.

2.7.2. Dispositifs séries

2.7.2.1. TCSC (capacité série contrôlée par thyristor)

Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité comme représenté dans la figure (Figure 2.6) suivant :

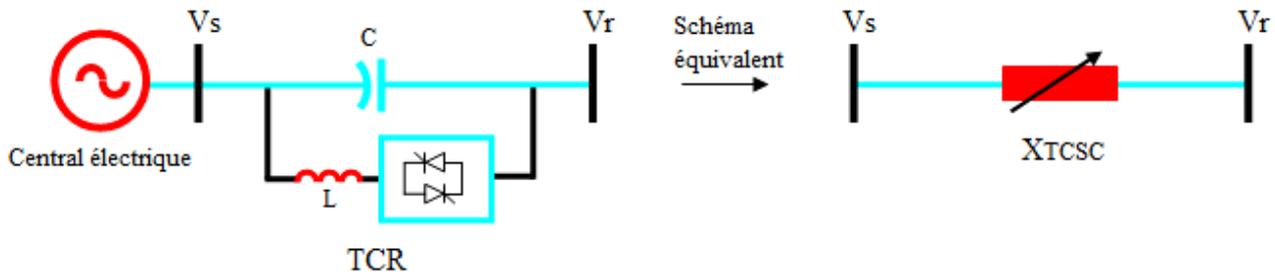


Figure 2.6 Structure d'un TCSC avec schéma équivalent.

Le TCSC permet un contrôle rapide de l'impédance de la ligne de transmission [1]. Et si placé en série dans une ligne de transport il permet de contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes montré par l'équation (2.5) en agissant sur la réactance X_{TCSC} qui varie selon l'angle de d'amorçage α des thyristors donné par l'équation (2.6) [14].

$$P_t = \frac{|V_s||V_r|}{X_{TCSC}} \sin(\theta_s - \theta_r) \quad (2.5)$$

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jLw}{\frac{\pi}{2}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - LCw^2} \quad (2.6)$$

Le TCSC offre plusieurs modes de fonctionnement (bloquée, by-pass, inductif, capacitif) selon le contrôle des gâchettes des thyristors [1]. On donne un facteur $K_{TCSC} = \frac{X_{TCSC}}{X_c}$, qui représente le rapport de la réactance effective du TCSC sur la réactance du banc des condensateurs [20].

2.7.2.2. SSSC (compensateur statique synchrone série)

2.7.2.2.1. Définition

Selon IEEE : c'est un générateur synchrone statique qui fonctionne sans source d'énergie extérieur en tant que compensateur série dont la tension de sortie est en quadrature et indépendamment contrôlée avec le courant de ligne dans le but d'augmenter ou diminuer la chute de tension réactive à travers la ligne et par conséquent contrôler l'énergie électrique transportée [19].

2.7.2.2.2. Structure de base et description

Le concept de base du SSSC a été proposé par Gyugyi en 1989 [14]. Le SSSC ne diffère pas dans sa structure de base de celle du STATCOM seulement il est connecté en série avec la ligne de transport. Il consiste alors en un onduleur de tension avec une source de tension continue et l'ensemble connectée à la ligne de transport en série à travers un transformateur de couplage [15]. Comme il est représenté sur la figure (Figure 2.7.0) suivant :

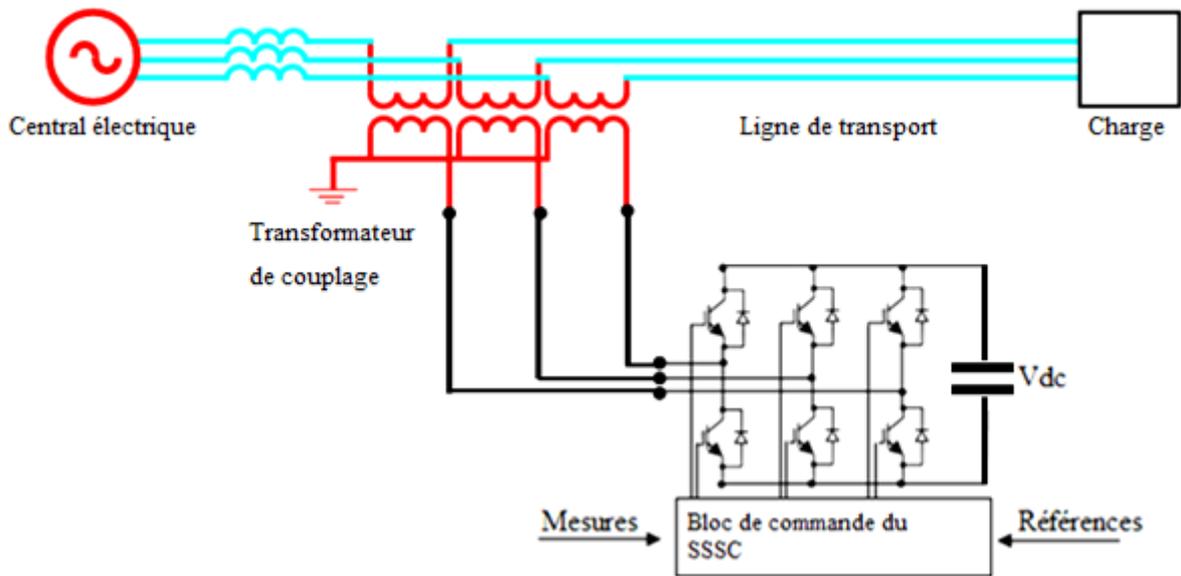


Figure 2.7.0 Structure de base d'un SSSC.

2.7.2.2.3. Principe de Fonctionnement

Un SSSC il opère comme une source de tension en série à la ligne [1]. Son principe de fonctionnement peut être expliqué par la figure (Figure 2.8) suivant [14,15]:

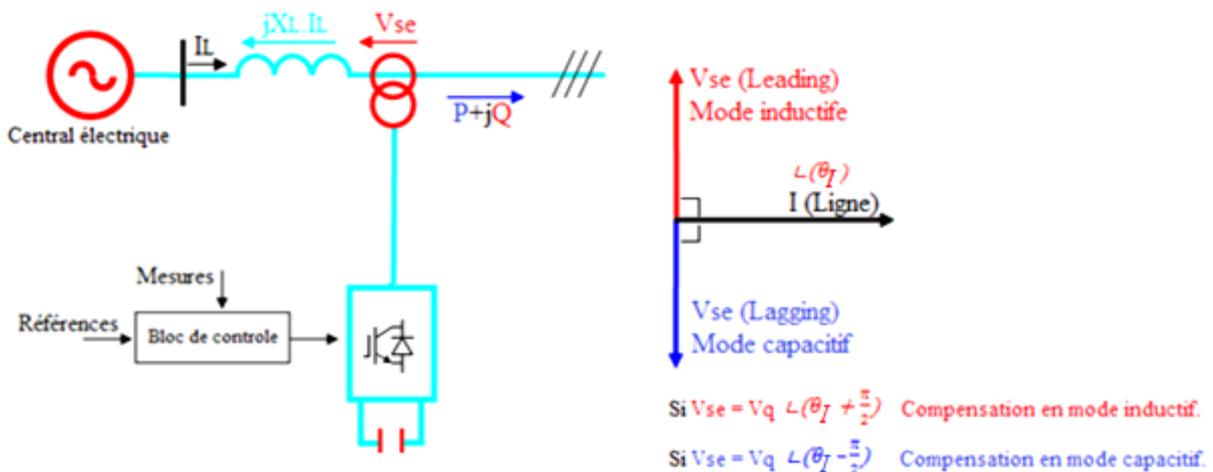


Figure 2.8 Principe de fonctionnement d'un SSSC.

Le SSSC génère une tension à la fréquence du réseau, en quadrature ($\pm \frac{\pi}{2}$) avec le courant de la ligne I_L , et contrôlée séparément du courant qui passe à travers la ligne dont le but d'augmenter ou de diminuer la tension injecté en série dans la ligne, selon le mode capacitif ou inductif respectivement (Figure 2.8) [1,15]. Et par conséquent contrôler le flux des puissances transmissibles correspondantes qui passe à travers la ligne [19]. Idéalement la tension V_{se} est à ($\pm \frac{\pi}{2}$) du courant de la ligne I_L ce qui fait qu'aucun échange de la puissance active entre le SSSC et le réseau. Pratiquement il y a une petite composante de tension V_{sed} en phase avec le courant I_L qui une petite quantité de puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes de convertisseur [15].

On peut expliquer les différents modes de fonctionnements, en ce référant aux diagrammes vectoriels de figure (Figure 2.5.3), qui suit l'admet d'un schéma équivalent du SSSC connecté à une ligne de transport représenté par la figure (Figure 2.9) suivant [21,22] :

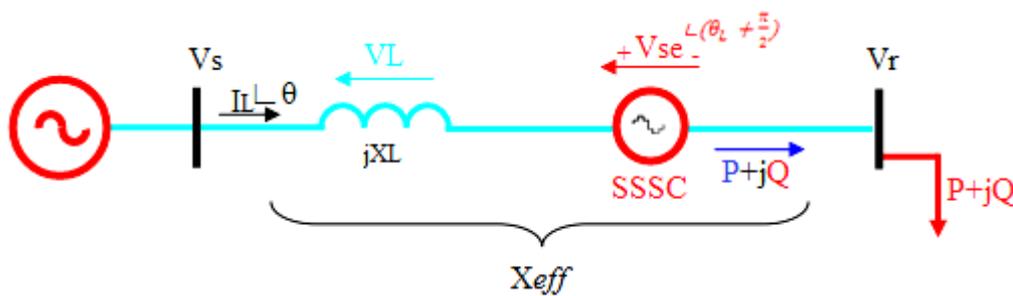


Figure 2.9 schéma équivalent d'un SSSC dans un réseau.

- La figure (Figure 2.10.a) représente l'état de fonctionnement normal du réseau (mode isolé) la tension effective V_{xeff} est égale la tension aux bornes de ligne de transport V_l .
- La figure (Figure 2.10.b) représente le mode de fonctionnement inductif, chaque augmentation de V_{se} injectée en série et par-phase entraîne une diminution dans V_l pour maintenir V_s et V_r avec δ constants et par conséquent dans le courant I_l de ligne [1,15].
- La figure (Figure 2.10.c) représente le mode de fonctionnement capacitif, l'augmentation d'amplitude de la tension V_{se} injectée en série et contre-phase avec la tension V_l contrôle directement la tension à travers l'inductance X_l de la ligne, qui en la augmentant résulte en une augmentation dans la valeur du courant I_L et de V_l pour maintenir V_s et V_r avec δ constants et par conséquent une augmentation dans la puissance transmissible P_s à travers la ligne [1,15].

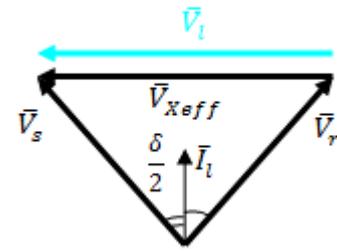
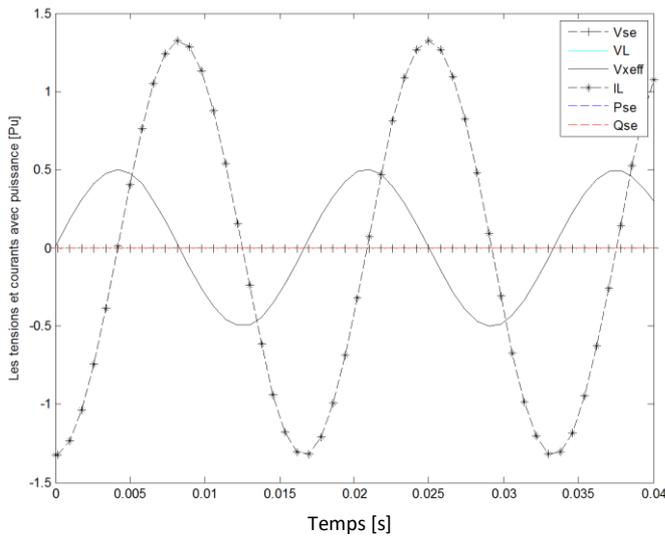


Figure 2.10.a Les tensions, courant, puissances, phaseur de fonctionnement en mode isolé.

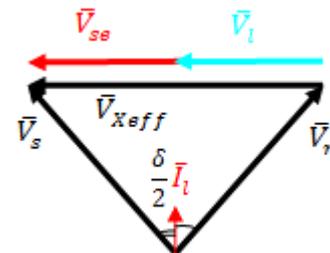
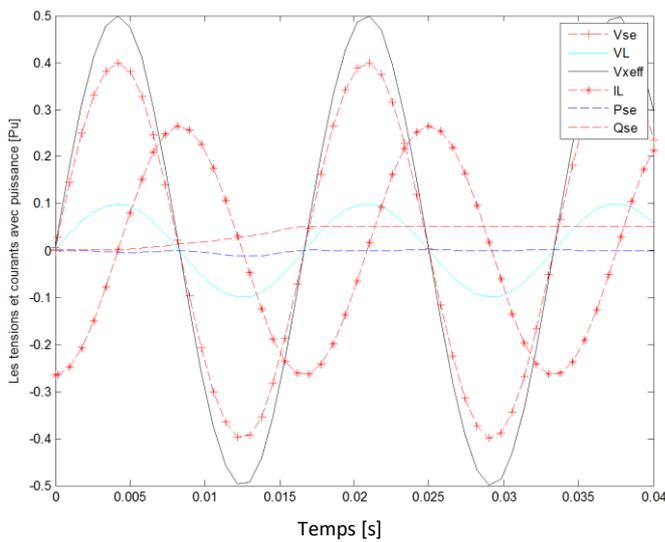


Figure 2.10.b Les tensions, courant, puissances, phaseur de fonctionnement en mode inductif.

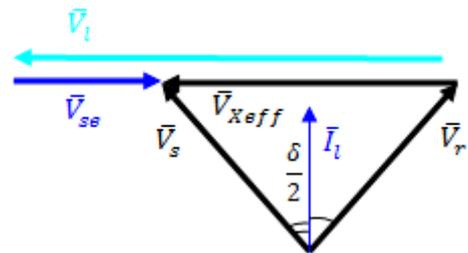
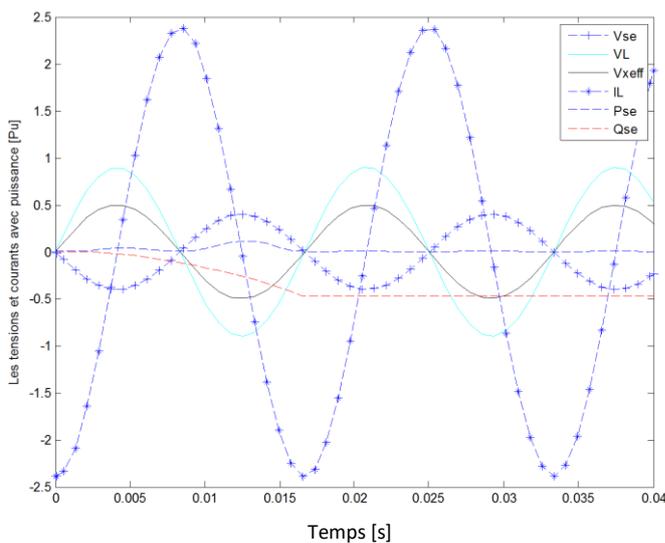


Figure 2.10.c Les tensions, courant, puissances, phaseur de fonctionnement en mode capacitif.

Dans la compensation série avec SSSC, et si en considérant le schéma équivalent du SSSC connecté au réseau ceci sur la figure (Figure 2.9), le courant dans la ligne est donné par l'équation (2.7) :

$$\bar{I}_l = \bar{I}_{se} = \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se}}{jX_l} \quad (2.7)$$

Si la ligne est sans pertes, les puissances injectées par le SSSC est donné par de l'équation (2.8) :

$$\bar{S}_{SSSC} = \bar{V}_{se} \bar{I}_{se}^* = (\bar{V}_s - \bar{V}_r) \frac{-(\bar{V}_s^* - \bar{V}_r^*) + \bar{V}_{se}^*}{jX_l} = \frac{V_{se}^2 - (\bar{V}_s - \bar{V}_r) \bar{V}_{se}^*}{jX_l} = P_{SSSC} + jQ_{SSSC} \quad (2.8)$$

$$\text{Alors : } \begin{cases} P_{SSSC} = \frac{V_{se}(V_r \sin(\theta_r - \alpha_{se}) - V_s \sin(\theta_s - \alpha_{se}))}{X_l} \\ Q_{SSSC} = \frac{-V_s(V_s - V_{se} \cos(\theta_s - \alpha_{se})) + V_r(V_r + V_{se} \cos(\theta_r - \alpha_{se})) - 2V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r)}{X_l} \end{cases} \quad (2.9) [15].$$

Pour que ce dispositif (SSSC) n'échange aucune puissance active avec le réseau, il doit satisfaire la condition $P_{SSSC} = 0$, et d'après l'équation (2.9) donc $V_r \sin(\theta_r - \alpha_{se}) - V_s \sin(\theta_s - \alpha_{se}) = 0$, d'où la condition, la tension série injectée doit être toujours *orthogonale* au courant de la ligne pour assurer une pure compensation réactive [13,21].

2.7.2.2.4. Effet de fonctionnement d'un SSSC sur le réseau électrique

L'effet de SSSC sur une ligne de transport électrique peut être investigué facilement si en supposant les tensions $V_s = V_r = V$ et V_{se} en Pu, avec son schéma phaseur ceci donné par la figure précédent (Figure 2.5.3), on constate que l'angle de phase du courant de ligne est $\frac{\delta}{2}$. L'équation de courant (2.7) devient (2.10) suivant :

$$I_l = \frac{(V \sin \delta + V_{se} \cos \frac{\delta}{2}) + j(V + V \cos \delta + V_{se} \sin \frac{\delta}{2})}{X_l} \quad (2.10) [15].$$

D'où, les équations (1.1) et (1.2), de flux des puissances active et réactive transmissible dans une ligne non-compensée décrites au chapitre précédent, et si en prenant V_r comme référence des phases, Les équations de flux des puissances transit par la ligne compensée devienne :

$$P_s = \frac{V^2}{X_l} \sin \delta + \frac{V V_{se}}{X_l} \cos \left(\frac{\delta}{2} \right) = (P_{old} + \Delta P) \quad (2.11) [21].$$

$$Q_s = \frac{V^2}{X_l} - \frac{V^2}{X_l} \cos \delta + \frac{V V_{se}}{X_l} \sin \left(\frac{\delta}{2} \right) = (Q_{old} + \Delta Q) \quad (2.12) [21].$$

La figure (Figure 2.11.Left), illustre l'effet de SSSC sur la puissance P_s et Q_s transmissible. Aussi l'effet sur la puissance réactive transmise en traçant les courbes de celle-ci en fonction de puissance active transporté avec différents valeurs de V_{se} en Pu qui injectée (Figure 2.11.Right).

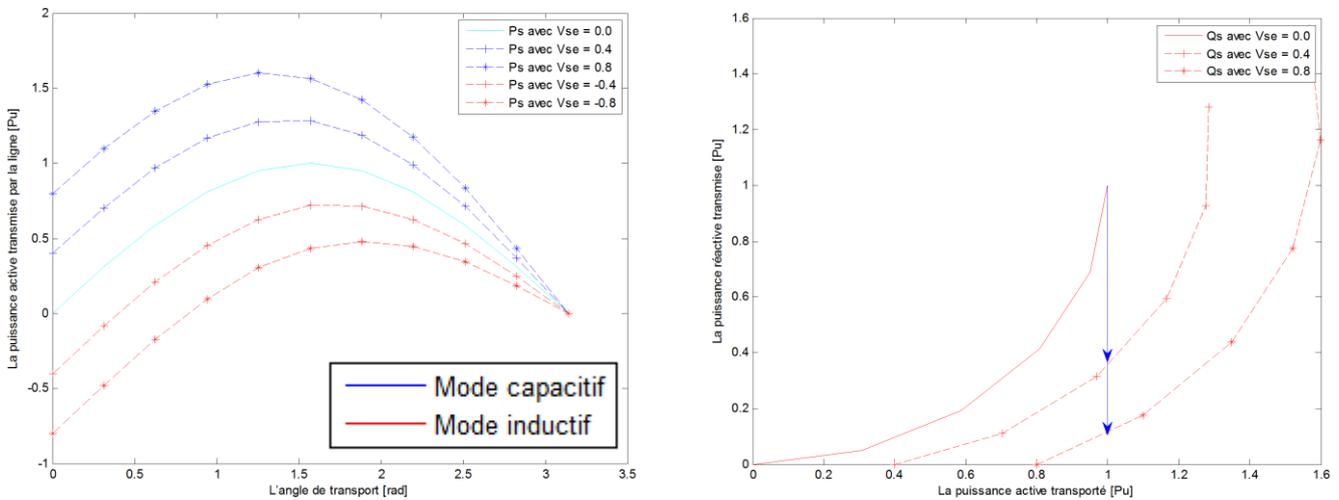


Figure 2.11 La puissance active transporté P_s en fonction de δ avec différent valeurs de V_{se} (Left), avec la puissance réactive Q_s en fonction de P_s pour différents valeurs de V_{se} (Right).

Selon les courbes de la figure (Figure 2.11.Left), L'SSSC destiné au contrôle du flux de puissance dans les lignes électriques, son objectif à augmenter ou diminuer ce puissance de manière plus dynamique et très rapidement et avec le même degré si simplement en inversant la polarité de la tension V_{se} injectée. Selon les courbes de la figure (Figure 2.11.Right), par l'injection d'une tension V_{se} plus élevée fait diminuer Q_s pour une même valeur de puissance active P_s transmise.

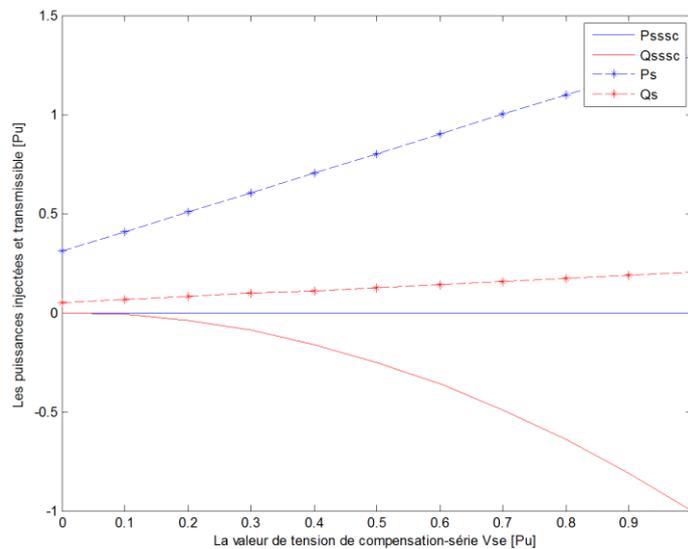


Figure 2.12 Les puissances P_{SSSC} , Q_{SSSC} , P_s , Q_s en fonction de V_{se} .

La figure (Figure 2.12), prouve qu'on injectant une tension série V_{se} en quadrature avec le courant de la ligne I_L aucun échange de puissance active P_{SSSC} n'aura lieu entre l'SSSC et le réseau

électrique et que l'augmentation de l'amplitude de la tension série V_{se} injectée par l'SSSC influe beaucoup plus sur la puissance active P_s transmissible que sur la puissance réactive Q_s transit.

Alors, de ces résultats des figures (Figure 2.11.Left) et (Figure 2.11.Right) avec (Figure 2.12) et les observations précédents, qu'il prouve que L'SSSC peut faire l'augmentation de la capacité et l'efficacité de transport par compensation série en mode capacitif et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie électrique de ces lignes existantes, par la modification virtuellement et rapidement dans les impédances de ces lignes, qui fait aussi améliorer l'exploitation et la GDRE plus dynamique mieux que les moyens conventionnel vus aux chapitre précédent. Et par l'injection d'une tension série contre-phase (mode capacitive) plus élevée diminuée la puissance réactive transportée pour une même valeur de puissance active transmise, qui fait diminué considérablement les pertes des lignes et valide l'objectif et complète l'intérêt de ce contribution à l'optimisation dynamique du transit d'énergie dans les réseaux électriques par dispositifs FACTS (SSSC).

2.7.3. Dispositifs shunt-série

2.7.3.1 UPFC (contrôleur de puissance unifié)

Le premier concept a été présenté par Gyugyi en 1999. L'UPFC est une combinaison d'un STATCOM et un SSSC, couplés par une ligne DC commune, et possédant un système de commande unifié, pour permettre un flux bidirectionnel de la puissance active entre la sortie série du SSSC et la sortie shunte du STATCOM, comme représenté dans la figure suivante (Figure 2.13) suivante :

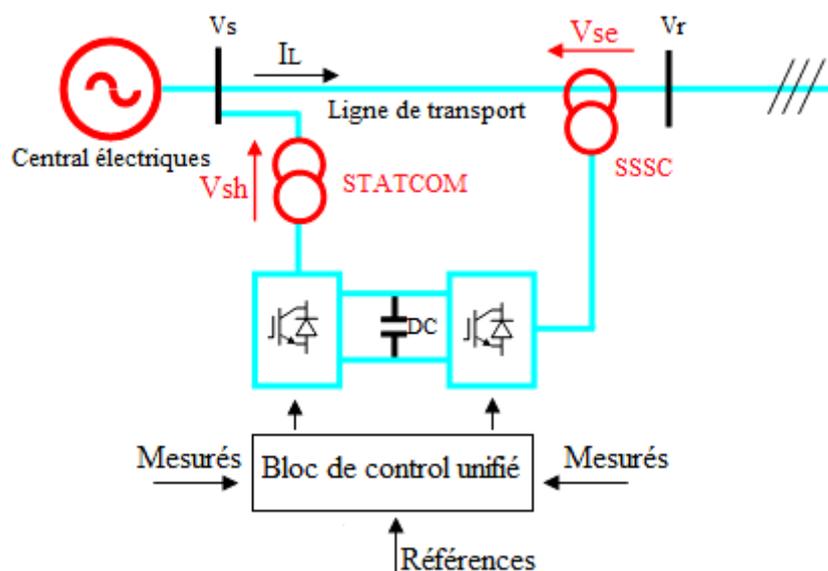


Figure 2.13 Structure de base d'un UPFC.

Il est contrôlé pour fournir une compensation série d'énergie active et réactive sans avoir besoin d'une source d'énergie électrique externe [14]. L'UPFC est capable d'assurer un contrôle de la tension, impédance et l'angle de ligne ainsi qu'assurer une compensation shunt en énergie réactive. Ceci rend l'UPFC un des éléments FACTS clé dans l'exploitation moderne des réseaux électriques [1].

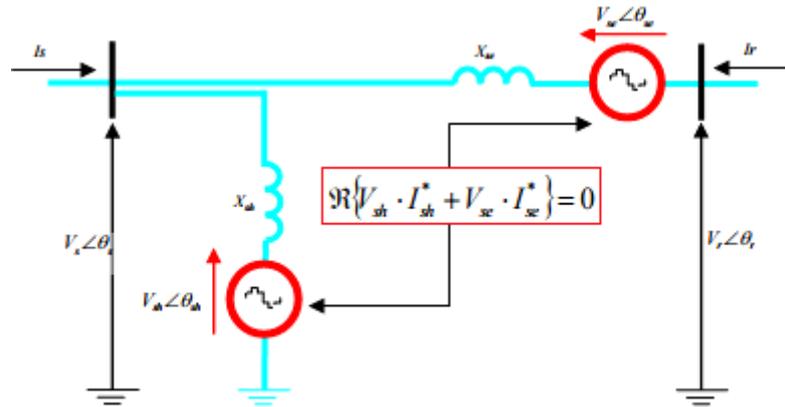


Figure 2.14 Schéma équivalent de L'UPFC connecté au réseau.

2.8. Conclusion

La théorie de contrôle et l'optimisation dynamique du transit énergie dans les réseaux électriques par dispositif FACFS à base des semi-conducteurs de haute technologie (GTO, IGBT) afin d'augmentation de la capacité avec une flexibilité de transfert d'énergie des lignes de transport à été présentée dans ce chapitre.

Une présentation détaillée sur l'effet de compensateur SSSC sur le contrôle de flux de puissance active et réactive dans le système d'énergie électrique. Ainsi nous avons essayez de démontrer les bénéfices de la compensation de la puissance réactive à été également introduites.

Les avantages de tels dispositifs FACTS dans le contrôle des réseaux électriques et GDRE plus dynamique par rapport aux autres types conventionnels traités dans le chapitre précédent sont démontrés.

Simulation avec SSSC et discussion des résultats

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous intéressés à valider l'étude théorique présenté dans le chapitre précédent par une simulation d'un dispositif FACTS (SSSC) introduit dans un linge de transport d'énergie électrique test. Cette simulation est basée sur une model simplifié sur une seule phase (Phase A) qui développée et performée dans l'environnement Matlab/Simulink et le fonctionnement de L'SSSC dans une ligne de transport d'énergie électrique sera validé dans les deux modes de compensation capacitive et inductive.

3.2. Description du réseau test étudié

Le schéma unifilaire du réseau test simple de transport d'énergie électrique utilisé pour valider les résultats théorique du fonctionnement de L'SSSC obtenu dans le chapitre précédent dans les deux modes de compensation capacitive et inductive est représenté sur la figure (Figure 3.1) suivant :

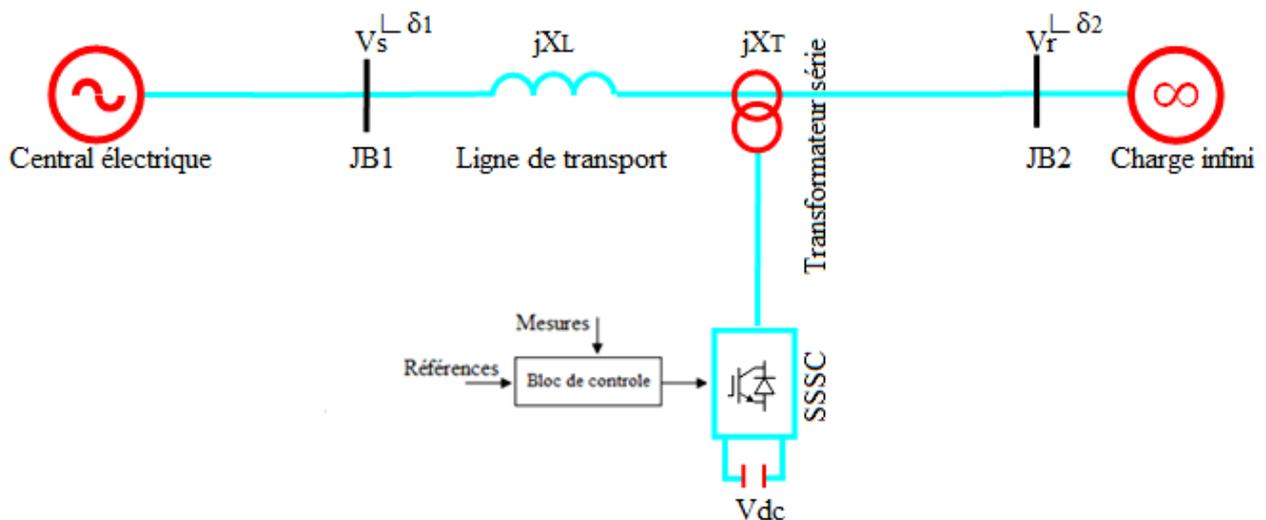


Figure 3.1 Schéma unifilaire du réseau test étudié.

Le réseau test est composé de d'un alternateur alimente une jeu de barre de départ JB1 à 60 KV avec une puissance nominale de 100MVA et d'une ligne de transport électrique de longueur 80KM modélisée par schéma équivalent en π qui alimente une charge infini au jeu de barre JB2. Le transformateur série est sert à élaver la tension 10KV des convertisseurs à 60KV (tension de réseau).

Pour simplifier le schéma de réseaux test (Figure 3.1) par un schéma équivalent, nous avons fait les calculs des paramètres en grandeurs réduites (Pu), et en considérant les bases du système énergétique comme suit :

$$U_{base} = 60 \text{ KV} \quad (3.1)$$

$$S_{base} = 100 \text{ MVA} \quad (3.2)$$

Par conséquent les autres paramètres de base et donné comme suivante :

$$Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = 36 \Omega \quad (3.3)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}U_{base}} = 962.25 \text{ A} \quad (3.4)$$

Le schéma équivalent de réseau énergétique test de la figure (Figure 3.1) y compris le contrôleur série (SSSC) est représenté sur la figure suivante (Figure 3.2), avec des paramètres en grandeurs réduites qui devient comme suivant :

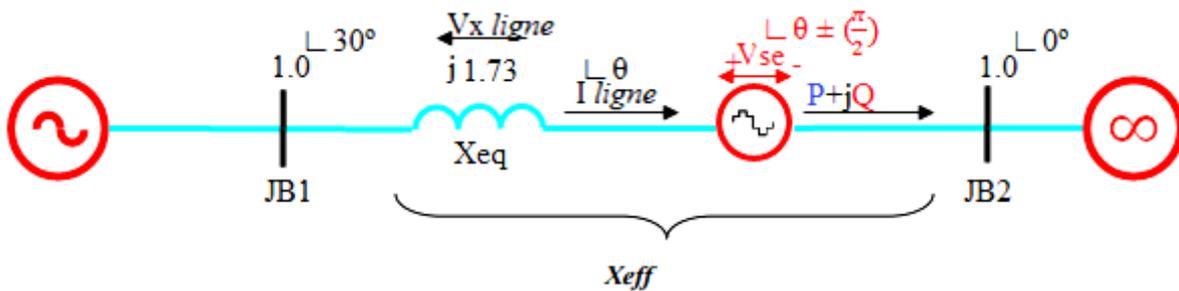


Figure 3.2 Schéma équivalent de réseau test étudié.

Dont la résistance est négligé ($R \ll X$), devant la réactance équivalent X_{eq} de ligne qui est la somme de la réactance de la ligne X_L avec celle du transformateur en série de couplage X_T en unité réduite (Pu).

3.3. Essais de simulation et résultats (test 1)

La simulation de L'SSSC introduit dans le réseau test précédent est présentée dans cette partie, on prendre les paramètres de jeu de barre JB2 comme référence suit l'admet que la tension au jeu de barre charge infini est maintenue égale à la tension du jeu de barre de départ JB1 et la ligne sans

compensation transporte une puissance maximale $P_{t_{max}} = \frac{V^2}{X_{eff}} \sin(\delta)$ pour un angle de transport donné $\delta = 30^\circ$ et sous sa limite thermique admissible. La figure (Figure 3.3) suivant est une représentation vectorielle des différents paramètres du réseau test étudié.

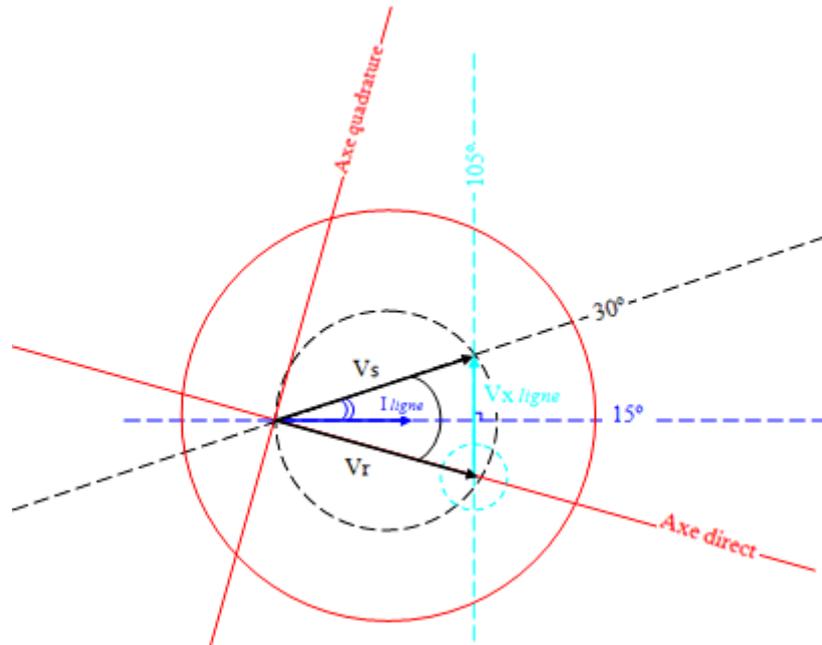


Figure 3.3 Schéma phaseurs du réseau test étudié.

La simulation complète est dans intervalle de temps court de $t_s = 1.0$ second, pour essai aussi à examinée le temps de repose et la performance dynamique de ce dispositif. La figure suivant (Figure 3.4) représente le model simulink de réseau test développée sur Matlab/Simulink.

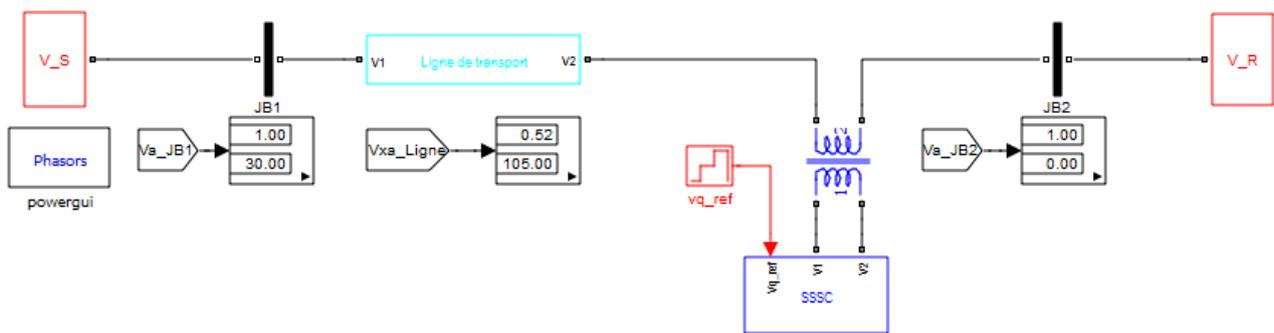


Figure 3.4 Le model simulink de réseau test étudié.

Les résultats de simulation sont présentés dans des graphes avec les légendes. Les courbes illustrée dans la figure suivant (Figure 3.5) est représentée le résultat des différents paramètres de ligne sans compensation obtient dans le régime permanent (steady state).

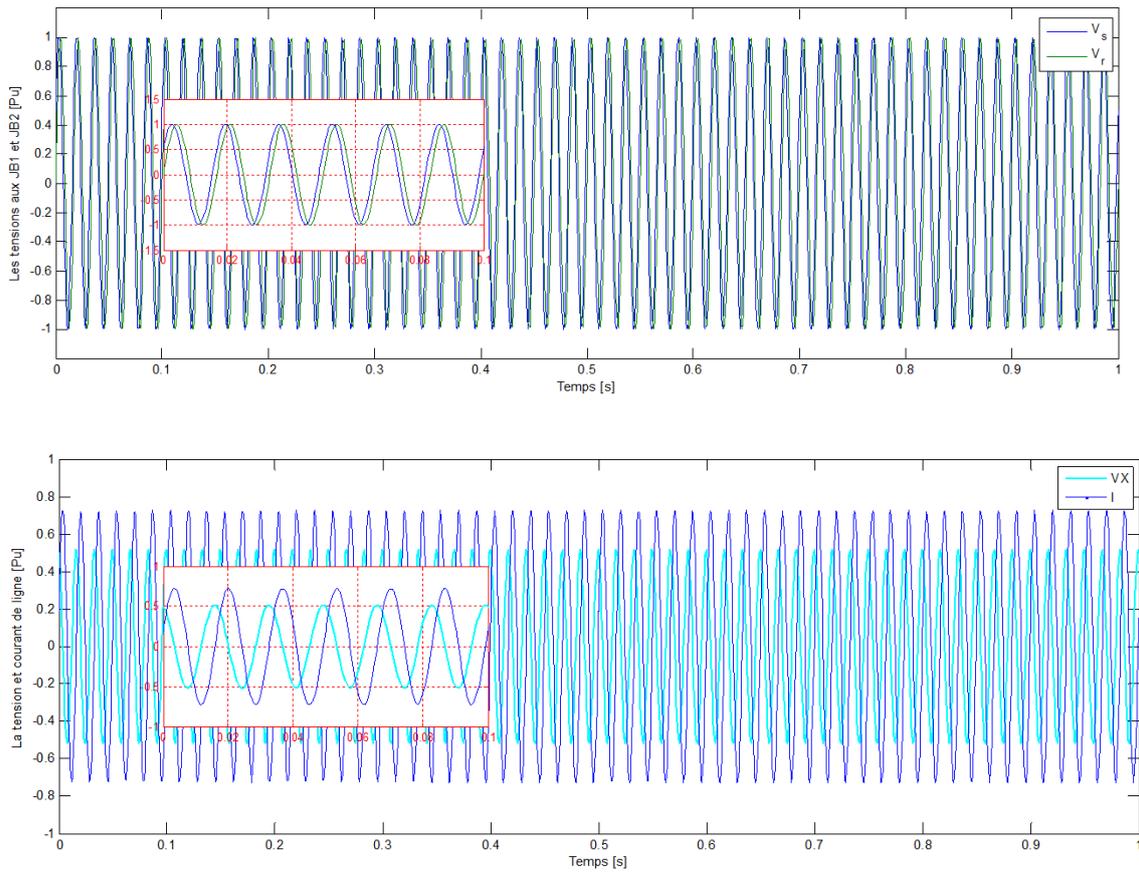


Figure 3.5 Les différents tensions avec courant du ligne non-compensée.

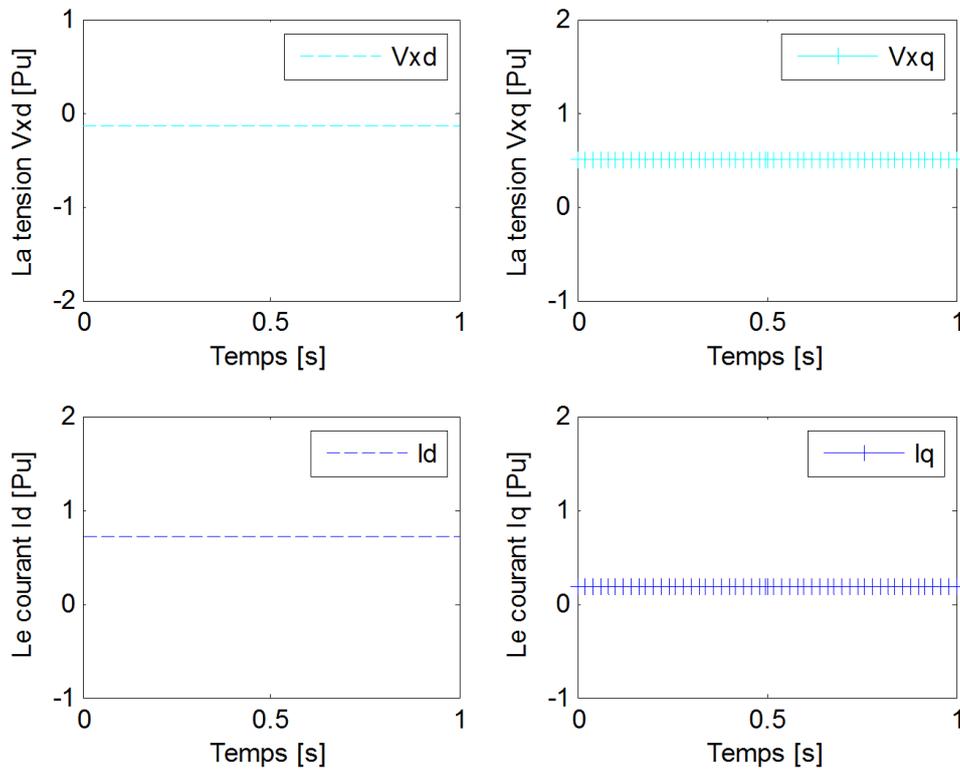


Figure 3.6 La tension V_x avec courant I non-compensée dans le repère d-q.

Apartir des résultats du simulation de la ligne test non-compensée de figure (Figure 3.5) et dans le régime permanent, la ligne transport une puissance active maximal $P_{max} = 0.287$ Pu (Figure 3.7) très limité et inférieure à la puissance disponible d'ordre $P_g = 1.0$ Pu par l'alternateur à cause de la réactance de ligne qui très important de valeur $X_{eq} = 1.73$ Pu et par consiquance sous une tension V_x aux borne de la réactance X_{eq} égale à $V_x = 0.52$ Pu (Figure 3.5).

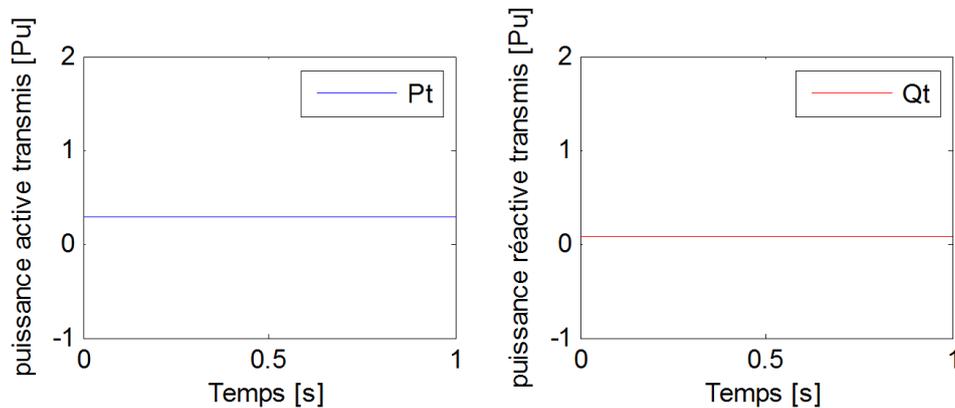


Figure 3.7 Les puissances transmissible sans-compensation.

Et a partir des courbes de la figure (3.2.1) aussi en quadrature à courant de ligne I qui atteindre un valeur de $I = 0.72$ Pu inférieure à courant admissible par les conducteurs et sous la limite thermique de la ligne. C'est donc à partir de cette condition la que nous avons commencé la compensation série avec L'SSSC pour contrôler le transit de l'énergie et augmenter la capacité de transfert de ces lignes existantes.

De la figure (Figure 3.5), la tension V_x aux borne de la réactance X_{eq} du ligne atteindre un valeur de $V_x = 0.52$ Pu de ceci, la compensation série est doit être avec en tension $|V_{q_inj}| \leq V_x$ qui doit aussi injecté en quadrature ($\theta \pm \frac{\pi}{2}$) à courant de ligne I pour L'SSSC échange selment une puissance réactive de compensation avec la ligne comme présenté par l'étude théorique dans le chapitre précédemment, et par consiquance en sérié avec la tension V_x du ligne (ligne réactive permanent).

La tension dans ce cas est choisie $|V_{q_inj}| = 0.25$ Pu, et ramenée synchrone au repère (d-q) et représentée dans les différentes séquences de cette simulation par la figure (Figure 3.8). A l'instant $t = 0.2$ s, on procède pour une compensation mode inductive, la tension injectée V_{q_inj} doit ($\theta_l + \frac{\pi}{2} = 105^\circ$) leading par rapport au courant I , donc la réactance équivalent de la ligne X_{eq} sera accrue par une valeur $X_q = \frac{V_{q_inj}}{I_{se}}$ est devient une nouvelle réactance effective ($X_{eff} = X_{eq} + X_q$).

A l'instant $t=0.5$ s on procède pour une compensation en mode capacitive, cela la tension injectée Vq_inj est avec un angle de $(\theta_I - \frac{\pi}{2} = -75^\circ)$ lagging et en quadrature par rapport au courant I de la ligne, afin de réduire la réactance équivalent X_{eq} de ligne avec X_q et avec un niveau de compensation $K = \frac{X_q}{X_{eq}}$ on revient à l'instant $t=0.8$ s à l'état normal de fonctionnement sans compensation.

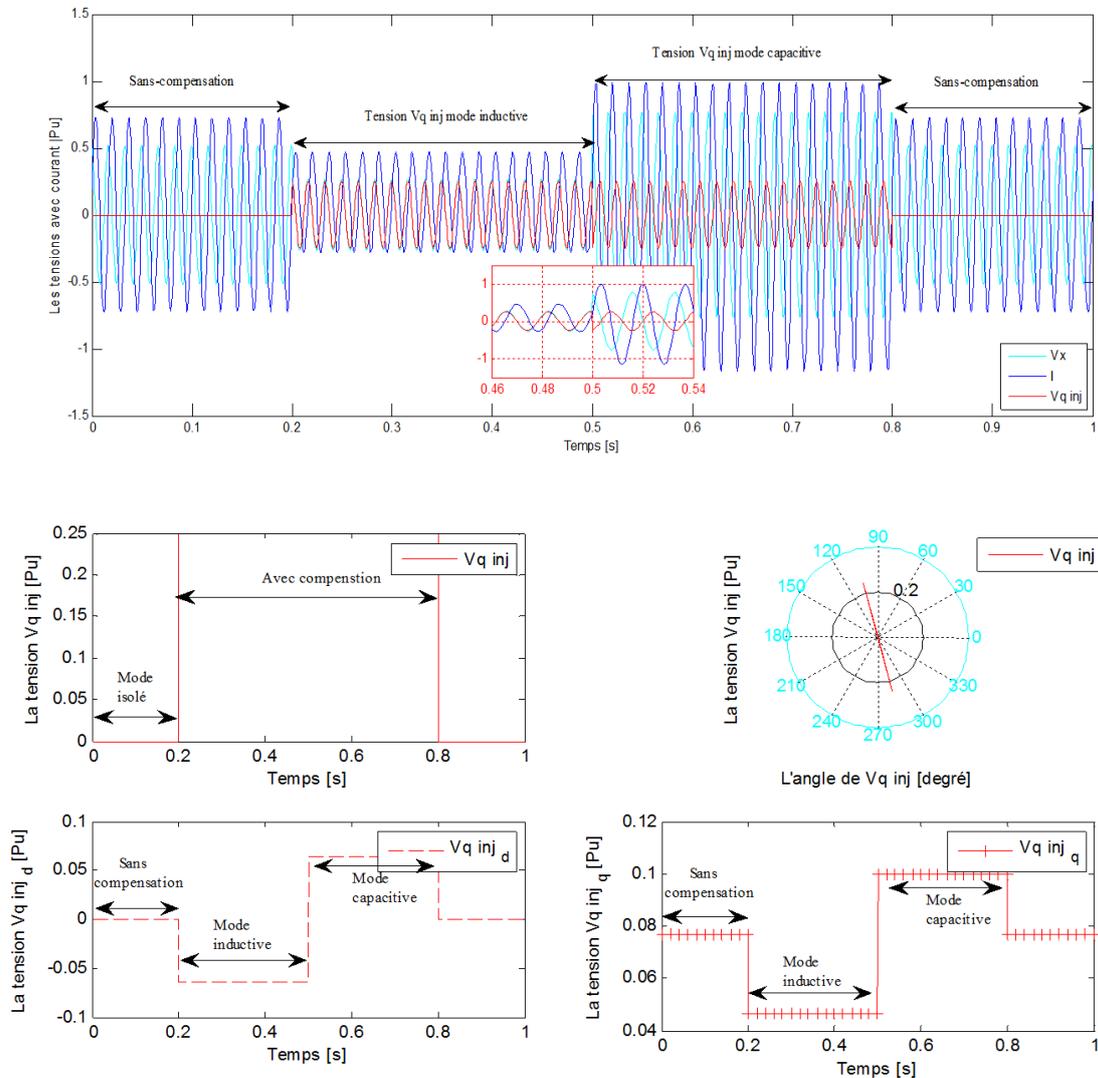


Figure 3.8 La tension série Vq_inj injecté par L'SSSC.

A partir des résultats des courbes des figures (Figure 3.9) et (Figure 3.10), dans la phase de la compensation avec L'SSSC en mode inductive limité dans l'intervalle de temps 0.2 s jusqu'à 0.5 s, la réactance effective de la ligne augmente virtuellement et en temps réelle de sa valeur de 1.73 Pu à 2.8 Pu, est par conséquent en limitant le courant I dans la ligne de transport test de 0.70 Pu à 0.36 Pu dans le but de contrôler le transit de puissance et en limitons l'échaumement de sur charge qui diminué les pertes d'énergie dans la ligne.

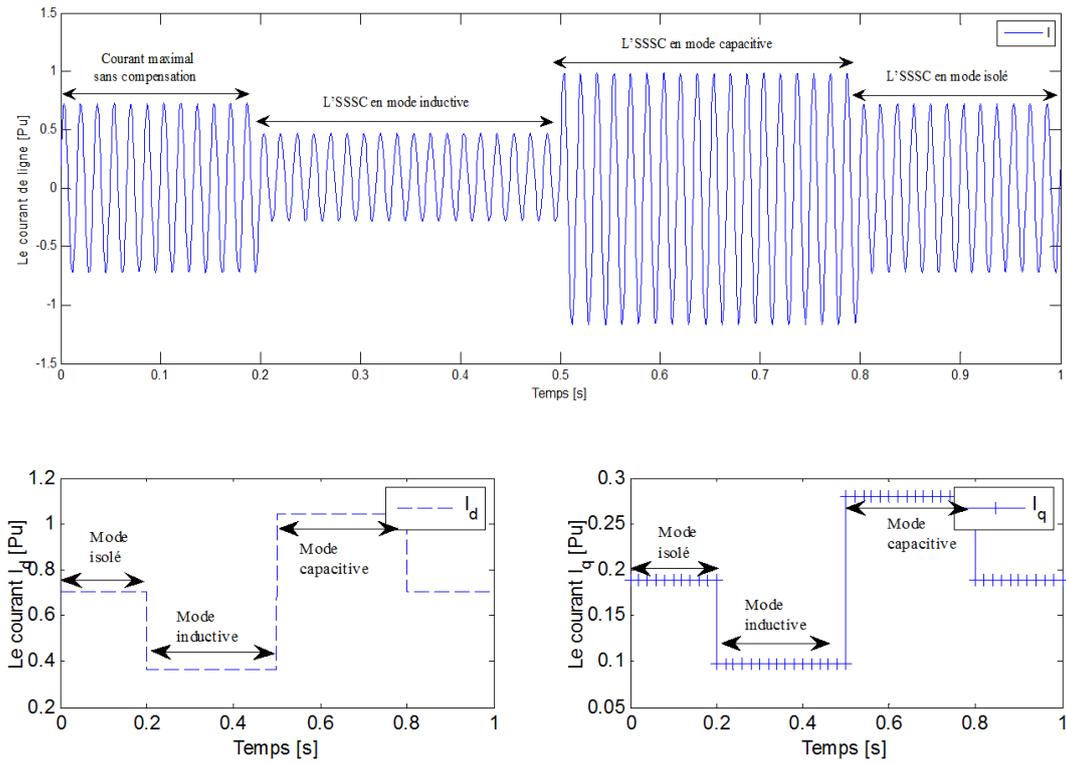


Figure 3.9 Le courant I dans la ligne de transport test.

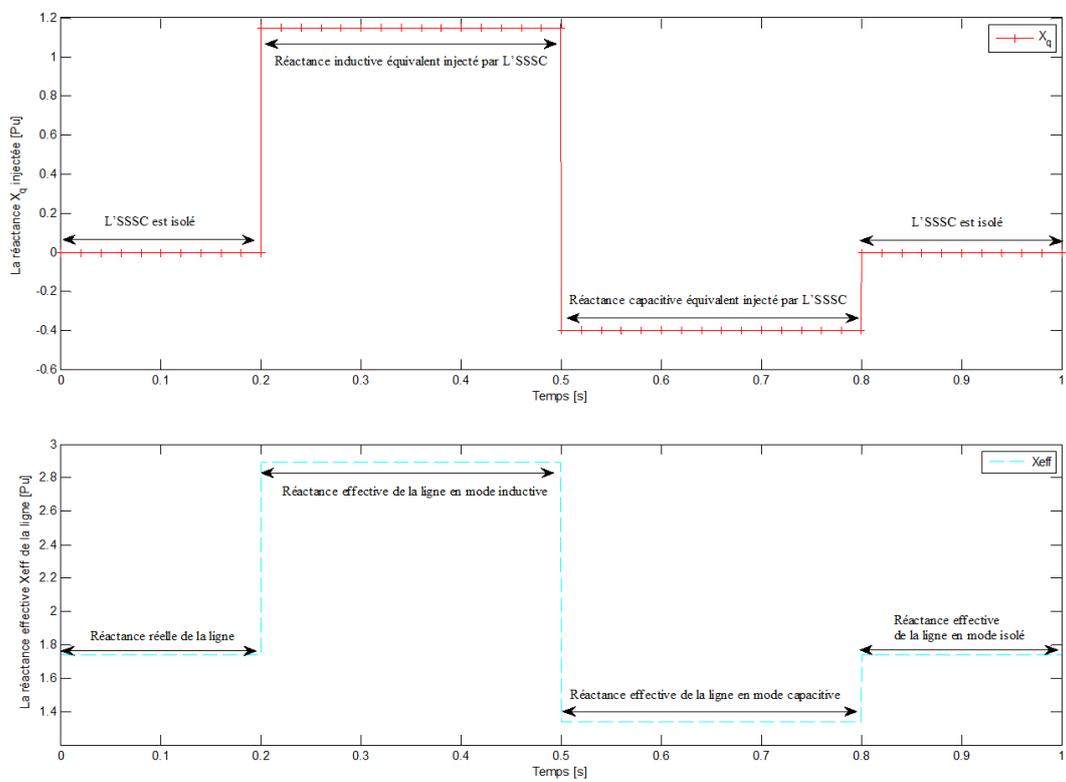


Figure 3.10 La réactance injecté X_q et effective X_{eff} de la ligne test.

Dans la phase de la compensation avec L'SSSC en mode capacitive limité dans l'intervalle de temps 0.5 s jusqu'à 0.8 s, la réactance de la ligne est réduite virtuellement de sa valeur réelle 1.73 Pu jusqu'à 1.30 Pu ($\approx 25\%$), par l'injection d'une tension $Vq_{inj} = 0.25$ Pu contre-phase comme représenté précédemment (Figure 3.8), qui en résulte de ce faite une augmentation du courant dans la ligne de transport test de 0.70 Pu à 1.04 Pu ($\approx 20\%$) et de cela nous avons éliminé la réactance inductive de ligne à l'objectif du augment la capacité de transfert et optimisé le transit d'énergie qui peut atteindre une valeur maximale proche à la limite thermique de ces lignes.

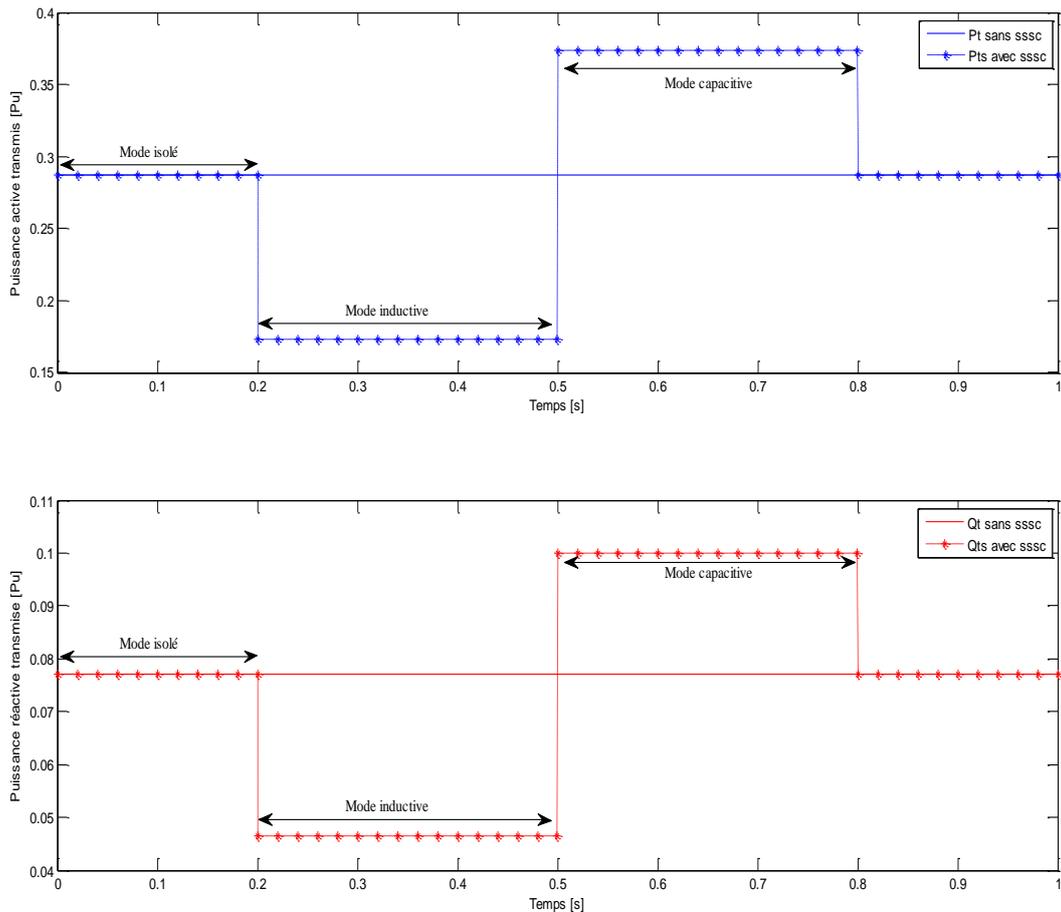


Figure 3.11 Les puissances active réactive transportée par la ligne test.

A partir les résultats des courbes de la figure au-dessus (Figure 3.11), nous observons clairement l'effet de la L'SSSC sur le transit de la puissance active et réactive dans une ligne de transport d'énergie électrique test étudié. Dans le cas d'une compensation en mode inductive à partir de l'instant 0.2 s à 0.5 s, le transit d'énergie peut être commandé à diminué de 0.28 Pu à 0.17 Pu instantanément comme représentée sur les courbes de la figure précédent (Figure 3.11). Et la miss à l'instant 0.5 s à 0.8 s de L'SSSC à l'opération en mode capacitif augmente considérablement et instantanément les quantités des puissances active et réactive maximale transportées par la ligne test en fonction de l'abaissement avec un contrôle rapide opéré sur la réactance effective X_{eff} de la ligne.

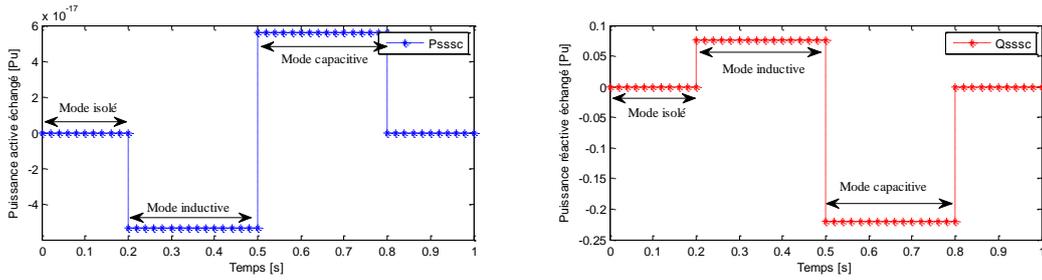


Figure 3.12 Les puissances échangées entre le réseau et L’SSSC.

Les résultats de la figure (Figure 3.12) à été soulevée afin d'observer les puissances active et réactive échangées entre le dispositif SSSC et le réseau électrique test. De ces courbes nous avons observé clairement que l'échange d'énergie est totalement réactif avec une petite quantité active qui est négligeable dans l'ordre de compenser les pertes des interrupteurs du convertisseur.

3.4. L’optimisation dynamique vis-à-vis des centrales électriques avec turbine à vapeur

Un générateur connecté à un jeu de barres infini représente un des cas d’exploitation des réseaux électriques. Les phénomènes d’oscillation de puissance sont rencontrés en grande partie entre des grandes régions interconnectées [1]. Dans cette section, on présentera un réseau test 2 avec des machines synchrones turbine à vapeur, et une simulation avec un élément FACTS (SSSC) inséré entre les deux régions dans la ligne L1. Les performances du SSSC en termes d’amortissement des oscillations locales et interrégionales seront vérifiées dans les sections suivantes.

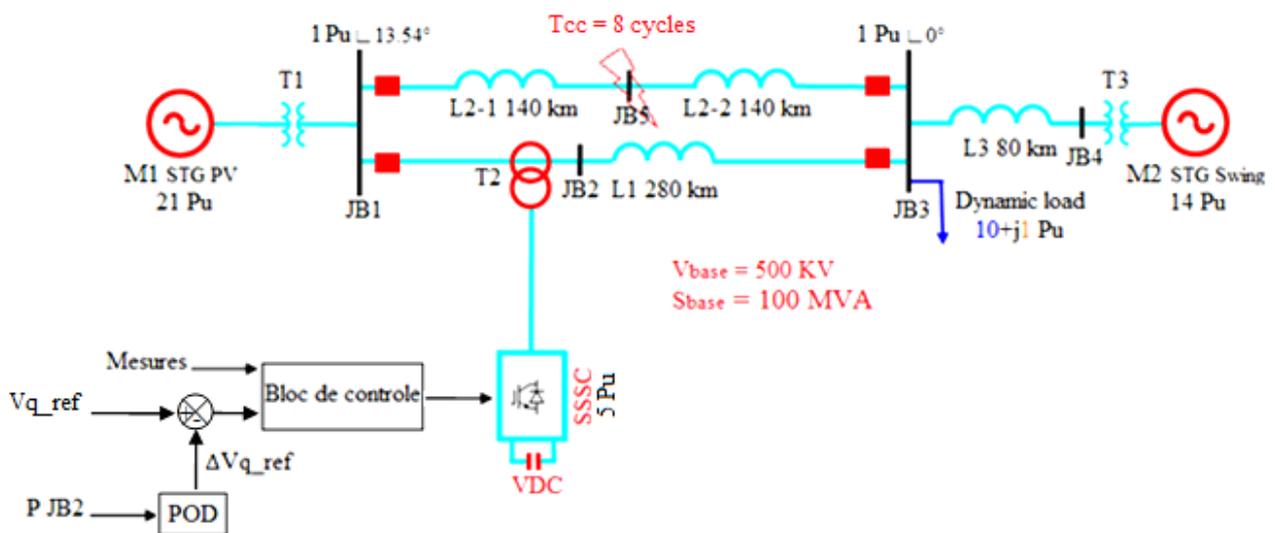


Figure 3.13 Schéma unifilaire du réseau test 2 étudié.

Dans le fonctionnement normal les alternateurs sont synchronisés entre eux. L'angle de déphasage des tensions entre alternateur M1 et celui de référence M2, avec les paramètres d'initialisation est défini par l'écoulement de puissance dans état de fonctionnement permanent (Annexe C), et le réaux test 2 par la figure suivant (Figure 3.13). L'angle entre deux machines ne doit pas atteindre $\pi \text{ rad}$, si c'est le cas, le synchronisme est perdu [1]. Un court-circuit très-phrasée dans la ligne L2 de 8/60 s, à $t=30$ s, est pris en considération aux JB5 peut engendrer des oscillations croissantes des puissances dans les lignes et de l'angle de charge jusqu'à atteindre l'angle critique. Un amortissement des oscillations des puissances est donc très nécessaire. L'SSSC offrent un bon dispositif dans ce cas la, on examine dans cette section l'effet d'intégration des dispositifs FACTS (SSSC) dans le réseau test 2 étudié, équipé avec un contrôleur (POD) (Figure 3.14), à l'objectif d'amortir les oscillations de puissance en cas des perturbations prévisible (cas de la compensation sérié pour la variation rapide de l'impédance des lignes) et imprévisible (cas des court-circuites, perde une central et la variation dans les courbes des charges) et aussi pour améliorée et assurée en GDRE plus dynamiques.

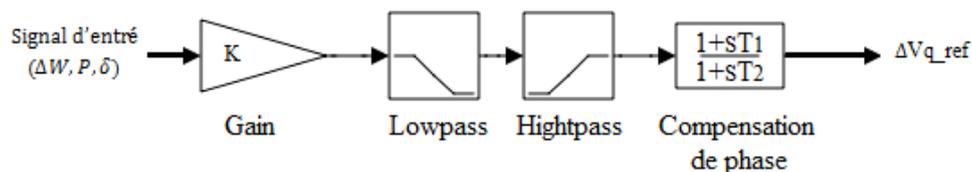


Figure 3.14 Principe de contrôleur POD.

3.5. Essais de simulation et résultats (test 2)

3.5.1. Réponse dynamique cas de compensation

Dans le régime permanent (steady state), le central électrique M1 PV génère la puissance active total d'ordre $P_g = 10 \text{ Pu}$ de la charge aux JB3 qui va transport de JB1 à JB3 par les lignes L1 et L2 d'impédance équivalente de même valeur 5 Pu sur chacun. Pour cela, on procède à $5 \leq t < 10 \text{ s}$ pour une compensation inductive avec $V_{q_{inj}} = -2.5 \text{ Pu}$, et à $10 < t \leq 15 \text{ s}$ pour en compensation capacitive avec $V_{q_{inj}} = +2.5 \text{ Pu}$, sans contrôleur (SC) et avec contrôleur (POD) (Figure 3.15) A partir les résultats des courbes des puissances des figures ci-dessous (Figure 3.16) et (Figure 3.17), nous observons clairement la réponse dynamique de L'SSSC pour contrôler et optimisation le transit d'énergie dans ces lignes. L'utilisation d'un dispositif FACTS (SSSC dans ce cas) équipé avec un contrôleur (POD) permet à optimisé et améliorer la stabilité du réseau en amortissant les oscillations de puissance locale, en injectant une tension modulée par le contrôleur POD qui apparaît plus efficace qu'un SSSC sans contrôleur (SC).

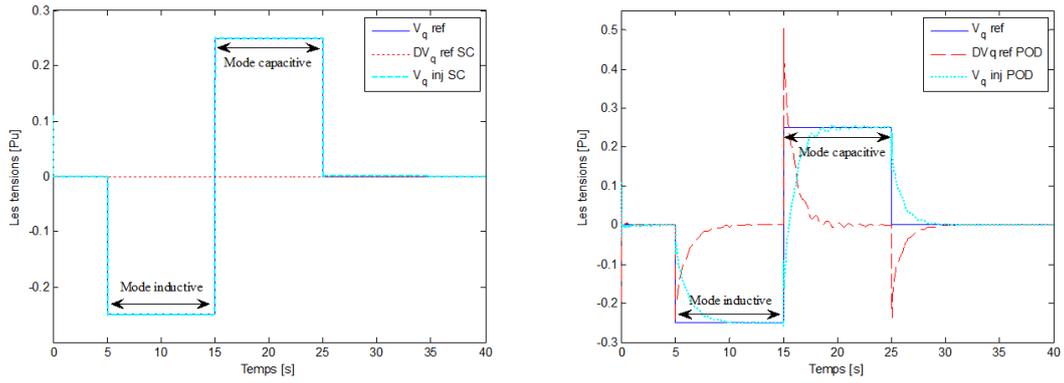


Figure 3.15 Les tensions références et injectées sans et avec contrôleur.

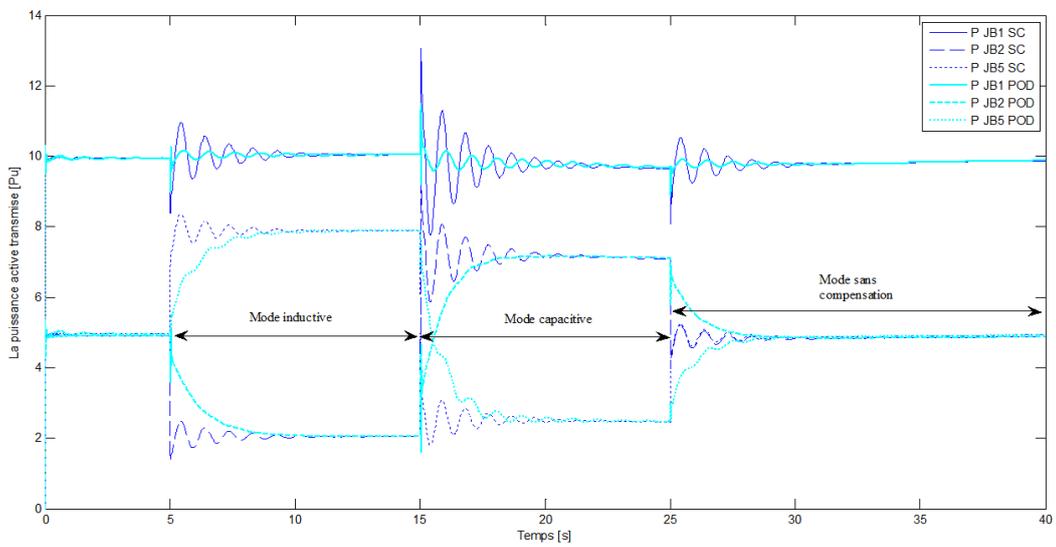


Figure 3.16 La puissance active transmise sans et avec contrôleur.

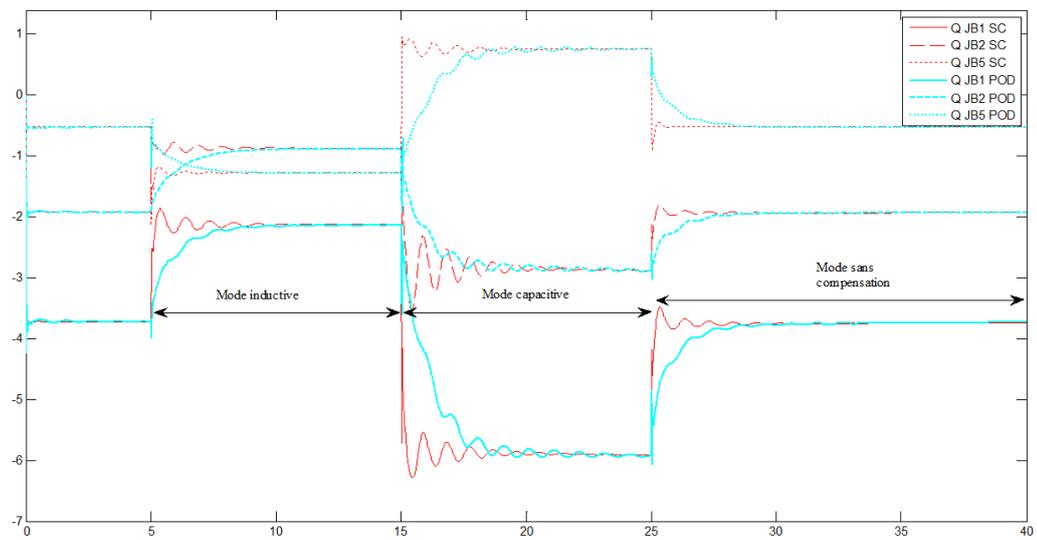


Figure 3.17 La puissance réactive transmise sans et avec contrôleur.

3.5.2. Réponse dynamique cas des perturbations

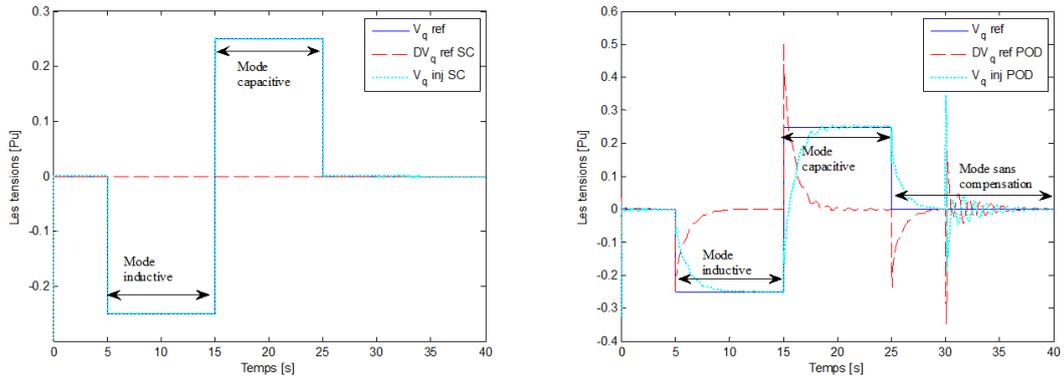


Figure 3.18 Les tensions références et injectées sans et avec contrôleur.

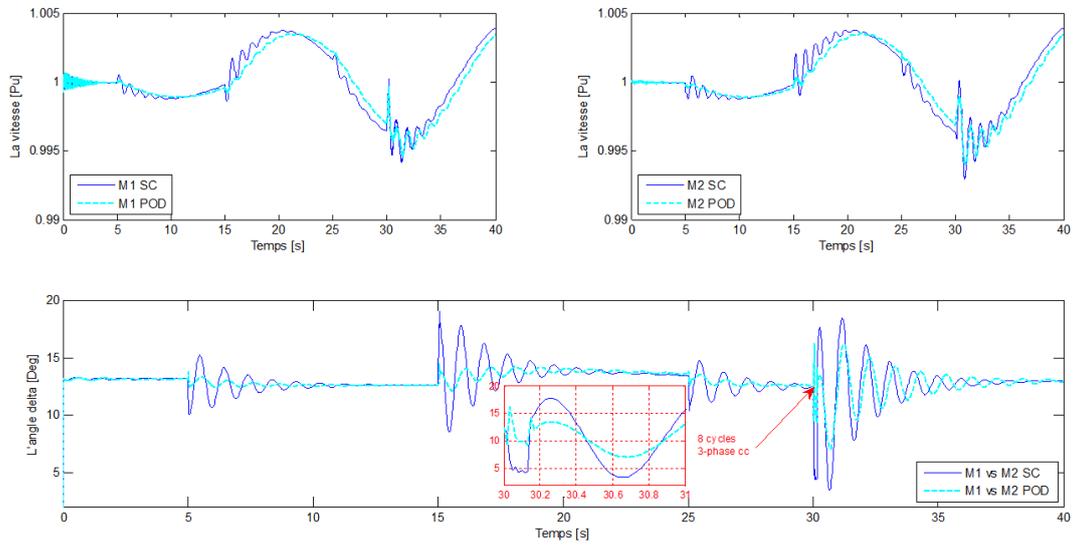


Figure 3.19 La vitesse et l'angle de transport sans et avec contrôleur.

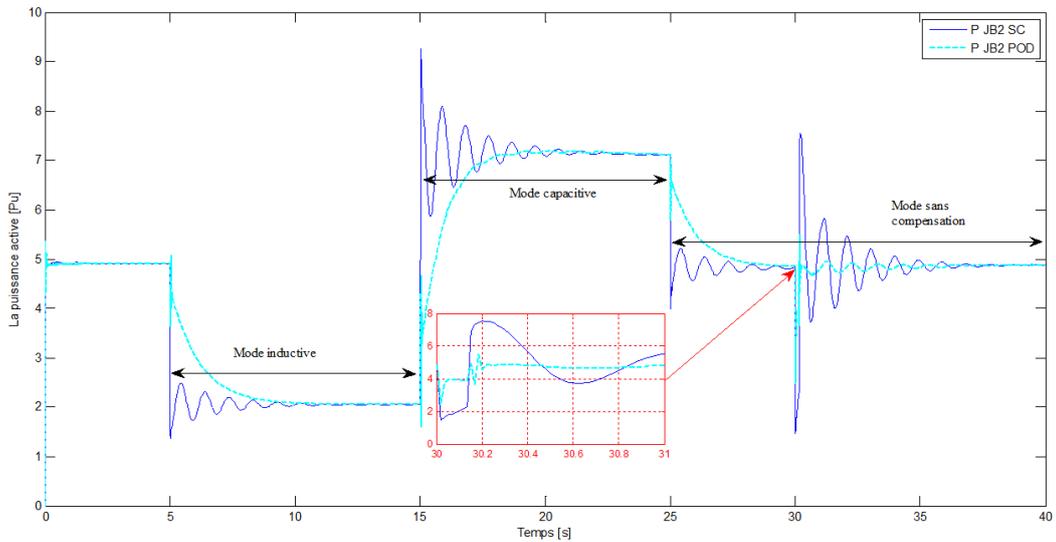


Figure 3.20 La puissance active transmise sans et avec contrôleur.

A partir les résultats des courbes des figures ci-dessous (Figure 3.18) et (Figure 3.19) avec (Figure 3.20). On observe que l'intégration du L'SSSC avec un contrôleur POD, permet de rendre le réseau plus stable et lui permet de retrouver à son point de fonctionnement initial après l'élimination du défaut plus rapidement.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le réseau de transport d'énergie test à simuler, un réseau à un jeu de barres infini communément utilisé dans l'exploitation des réseaux électriques a été considéré dans lequel nous avons introduit le dispositif FACTS (SSSC). Pour cela nous avons développé un model de simulation simplifié sur l'environnement Matlab/Simulink et réécrit les paramètres de l'ensemble en grandeurs réduites pour mieux d'observation puis nous effectuer les essais de simulation et observer l'effet de L'SSSC sur le fonctionnement et le transit d'énergie dans les modes de fonctionnement envisagé (inductif et capacitif) dans une ligne de transport électrique.

Dans la deuxième section, on introduit la contribution de L'SSSC équipé avec un contrôleur POD à l'amélioration de la stabilité du réseau en amortissant les oscillations de puissance locale et l'angle de charge, en injectant une tension modulée par le contrôleur POD qui apparait plus efficace qu'un SSSC sans contrôleur. De plus, ces dispositifs éliminent totalement le problème de SSR, car n'échange pas d'énergie active avec le réseau et leur compensation n'est pas faite par des condensateurs connectée directement au réseau.

Les résultats de simulation obtenus à prouvé des résultats satisfaisants montrent que le dispositif L'SSSC et très efficace pour le contrôle avancé des réseaux avec une GDRE dynamique et plus adéquate afin d'augmenter les capacités avec une flexibilité de transferts des ces lignes existants dans l'objectif principale à contrôle et l'optimisation dynamique du transit d'énergie dans les réaux électrique.

Conclusion Générale

Le développement récent dans l'électronique de puissance à permet d'améliorer la GDRE. En introduisant un nouveau concept des systèmes des transmissions d'énergie électrique flexible à courant alternatif appelée « FACTS ». Avec lequel, le contrôle du flux de puissance active et/ou réactive ainsi que l'augmentation dans la capacité de transfert de ces lignes existants, peut atteints et performés plus dynamiquement et très rapidement, par l'injection des tensions et/ou des courants par des convertisseurs conçus avec des interrupteur statiques très rapide et modernes commandées en ouverture et en fermeture, qui concernant une nouvelle génération des FACTS.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte, sur le contrôle dynamique du flux de puissance et l'augmentation de la capacité maximale de charge des lignes en utilisant un dispositif L'SSSC. Afin d'atteindre cet objectif principal, dans le premier chapitre nous avons commencé par une brève présentation sur la problématique de fonctionnent et GDRE avec l'étude sur les lois de transport d'énergie en exposant la problématique de la limite de puissance transportable en fonction des paramètres des réseaux et les techniques conventionnels utilisés avec une représentations rapide sur leurs différents principes de fonctionnement et la nécessité d'une manière plus adéquate de contrôle et d'optimisation du transit d'énergie dans le réseau électrique plus dynamique FACTS.

La contribution des principaux systèmes FACTS sont introduits et détaillés dans le deuxième chapitre avec leurs différents types, caractéristiques et sont influences sur les différents paramètres des réseaux, à l'objectif d'une étude plus en détaille sur L'SSSC, son principe de fonctionnement et son action compensative sur un réseau de transport électrique, avec la démonstration de son apport considérable dans le contrôle dynamique et l'augmentation de la capacité maximale avec un flexibilité de transfert d'énergie de ces lignes de transport électriques.

Comme toute étude structurée, pour valider cette étude théorique, le troisième chapitre à était consacré à effectué plusieurs essais de simulations sur L'SSSC avec et sans contrôleur POD insérés dans une ligne de transport d'énergie électrique test dans l'environnement Matlab/Simulink, et interpréter les résultats obtenus.

Les résultats de simulations ont bien vérifié l'efficacité de L'SSSC souhaitée et envisagé en termes de l'augmentation de la capacité maximale de transfert des lignes et on à même vérifié l'effet d'un SSSC équipé avec contrôleur POD sur l'amortissement d'oscillations de puissance et

l'angle de charge locale et entre régionale et par conséquence l'amélioration de la stabilité du réseau pendant des perturbations.

Enfin, de cette étude nous à permis de juger que ce dispositif (L'SSSC) ont plusieurs avantages pour une GDRE plus dynamique qui démontrant une flexibilité dans le contrôle rapide de la majorité des paramètres du réseau basée sur la commande des convertisseurs statique qui représente l'élément constitutif de basse de ce dispositif. L'augmentation des capacités de transport d'énergie électrique aux limites thermiques des lignes représente une solution précieuse au problème de reconstitution des nouvelles lignes électriques confronté par des contraintes écologique, économique et environnementale.

Dans le même axe de recherche, la recherche dans le domaine de contrôle intelligent des réseaux électriques s'évolue à une vitesse incroyable. Le contrôle de ces systèmes FACTS par l'utilisation des techniques d'intelligences artificielles peut améliorer au maximum le contrôle des réseaux. Une telle étude peut être un autre champ de recherche qui complètera au futur ce travail.

Références Bibliographiques

- [1] Y. TOUAFEK, "Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS " mémoire de magister, université ferhat abbas sétif, 2012.
- [2] H. Kouara , "Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension" mémoire de magister, université de Batna, 2006.
- [3] E. CATZ, "Evolution technique du système de transport et de distribution électricité" J3EA. vol. 5 – Hors série 1, pp. 1-7, 2006.
- [4] J.M. Escane, "Réseaux d'énergie électrique – Modélisation : Lignes, Câbles, Eyrolles", Paris 1997.
- [5] RTE Gestionnaire du réseau de transport d'électricité, "mémento de la sureté du système électrique", EDF France, Paris Tiempo, 2004, 271p, ISBN 2-912440-13-0 (Br.)
- [6] P. BORNARD, M. PAVARD "Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement" , Techniques de l'Ingénieur D 4090, 1993.
- [7] Electric Power Research Institute, "Transmission line reference book 345 kV and above"; Second edition: The red book, 1982.
- [8] IEEE National Electrical Safety Code (NESC) C2 – 2007.
- [9] P. Kundur, J.Paserba, V. Ajjarapu, G.Andersson, A. Bose, C.Canizares, N. Hatziaargyriou, D. Hill, A.Stankovic T. Van Cutsem, V.Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.19, no.3, pp. 1387- 1401, August 2004.
- [10] M. Thakur, "Unified power flow controller (UPFC) development of mathematical framework and design of a transient model", Thèse de magistère de l'université de Manitoba – Canada, février 2003.
- [11] P. Hurlet, J-C. Riboud, J. Margoloff, A.Tanguy, "French Experience in Phase-Shifting Transformers ", CIGRÉ SC A2-204, Session August 2006.

- [12] D. Lachenal, D. Daniel, " Nouveaux matériels pour réguler les flux de puissance: transformateur déphaseur et moyens de compensation série", RTE, 2002.
- [13] Xia Jiang, "Operating Modes and Their Regulations of Voltage-sourced Converters Based FACTS Controllers", these de doctorat de L'institut Polytechnique Troy New York, mars 2007.
- [14] Xiao-Ping Zhang, et al., "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.
- [15] A. Alibi "Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS : Flexible AC Transmission Systèmes" mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [16] K.R.Padiyar "Investigation on strong resonance in multi machine power systems with STATCOM supplementary modulation controller", *IEEE, transaction on power systems*, vol.21, N°2, May 2006.
- [17] N. Buyant "Etude et commande généralisées des filtres actifs parallèles", thèse de doctorat, Ecole des Sciences pour l'ingénieur de LANPES 1999.
- [18] C. Dheeman and G. Arindam, "Improvement of transient stability of power systems with STATCOM controller using trajectory sensitivité," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, p. 531–539, 2011.
- [19] A.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.
- [20] K. R. Padiyar, "FACTS controllers In Powertransmission And Distribution"; New Age International, 2007.
- [21] J. C. Hawley, "The Modeling and Simulation of a Cascaded Three-Level Converter-Based SSSC", Thèse de magister de l'université Blacksburg, Virginia USA, 19 juillet 2004.
- [22]] C.I. Terek, "A new static synchronous series compensator for real power control on ac transmission lines", Thèse de magister, Université de Western Ontario, London Mai 1999.

Annexe

Annexe A- Puissance active et réactive transmissible par une ligne.

La figure suivante (Figure A.1) représente une ligne de transmission d'impédance Z avec une source de tension V_s , alimente une charge.

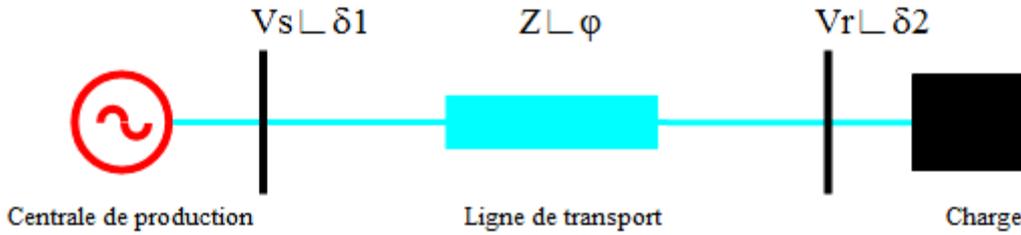


Figure A.1 Schéma unifilaire d'une ligne.

L'équation de courant I_{12} de ligne est donnée par :

$$I_{12} = \frac{|V_s| \angle \delta_1 - |V_r| \angle \delta_2}{|Z| \angle \varphi} \quad (\text{A.1})$$

L'équation (1.1) peut écrire comme :

$$I_{12} = \frac{|V_s| \angle \delta_1 - \varphi}{|Z|} - \frac{|V_r| \angle \delta_2 - \varphi}{|Z|} \quad (\text{A.2})$$

L'équation de la puissance apparente S_{12} transit et aussi donné par :

$$\bar{S}_{12} = \bar{V}_s \bar{I}_{12}^* \quad (\text{A.3})$$

Par la substitute de l'équation (A.1) dans (A.3), l'équation (A.3) dévient :

$$\bar{S}_{12} = \frac{|V_s| |V_s| \angle \delta_1 - \delta_1 + \varphi}{|Z|} - \frac{|V_s| |V_r| \angle \delta_1 - \delta_2 + \varphi}{|Z|} = (P + jQ) \quad (\text{A.4})$$

Alor :

$$\begin{cases} P = \frac{|V_s|^2 \cos(\varphi)}{|Z|} - \frac{|V_s| |V_r| \cos(\delta_1 - \delta_2 + \varphi)}{|Z|} \\ Q = \frac{|V_s|^2 \sin(\varphi)}{|Z|} - \frac{|V_s| |V_r| \sin(\delta_1 - \delta_2 + \varphi)}{|Z|} \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Si ($R \ll X$), Finalement, les puissances active et réactive transmises de la source vers la charge sont :

$$P = \frac{|V_s||V_r|}{|X|} \sin(\delta) \quad (\text{A.5.1})$$

$$Q = \frac{|V_s|^2}{|X|} - \frac{|V_s||V_r|}{|X|} \cos(\delta) \quad (\text{A.5.2})$$

Annexe B- Chute de tension dans une ligne.

La figure (Figure B.1) représente un circuit équivalent d'une ligne HT, du 3^{ème} ordre ($G' \approx 0$).

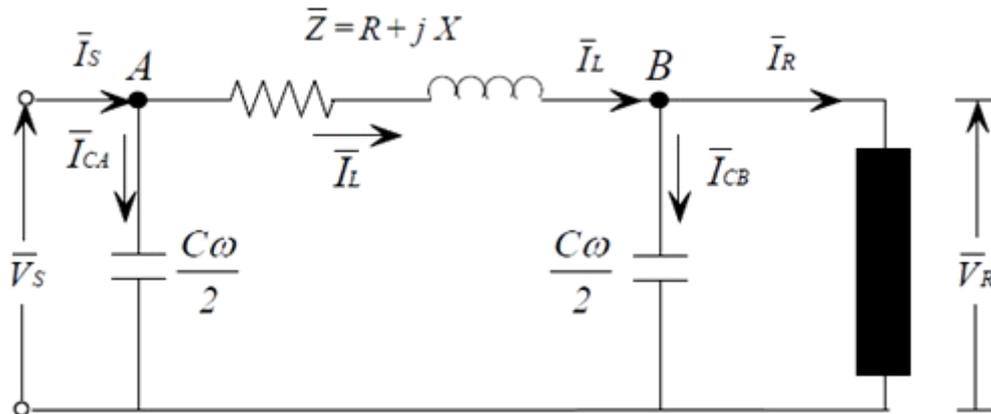


Figure B.1 Schéma unifilaire d'une ligne HT.

Aussi le diagramme vectoriel de cette ligne est représenté sur la figure (Figure B.1).

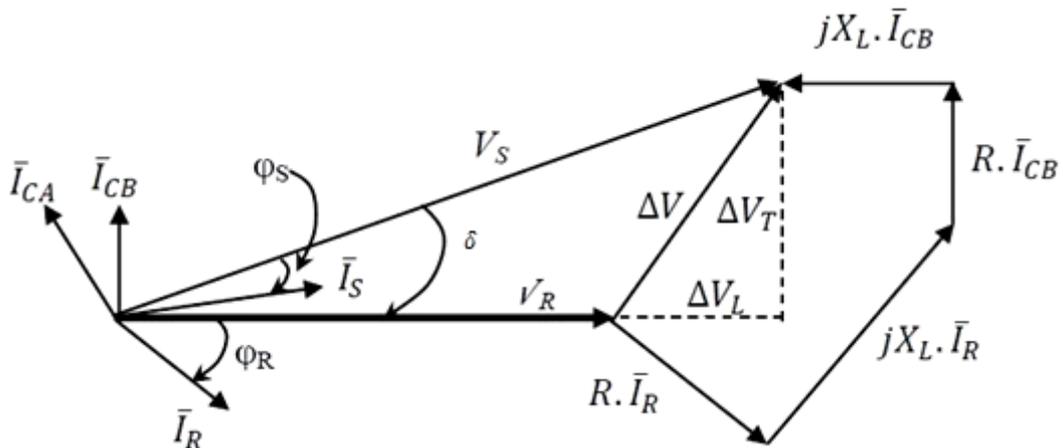


Figure B.1 Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne HT.

De la figure (Figure B.1) la développons de l'équation générale est comme suit :

$$\bar{V}_s = \bar{V}_R + \bar{Z}\bar{I}_L = \bar{V}_R + \bar{Z}(\bar{I}_R + \bar{I}_{CB}) = \bar{V}_R + \bar{Z}\bar{I}_R + \bar{Z}\bar{I}_{CB} \quad (\text{B.1})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \bar{I}_{CB} = j \frac{C_W}{2} \bar{V}_R \\ \bar{I}_{CA} = j \frac{C_W}{2} \bar{V}_S \\ \bar{Z} = R + j L_W \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_R + \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CB} \quad (\text{B.3})$$

Par la projection sur l'axe des réels, l'expression de la chute de tension longitudinale est donnée comme suit :

$$\Delta V_L = R I_R \cos \varphi_R + X_L I_R \sin \varphi_R - X_L I_{CB} \quad (\text{B.4})$$

Par le remplacement de I_{CB} par son expression et multipliant de part et d'autre l'égalité par $(\frac{\sqrt{3}U_R}{U_R})$, et sachant que $(Q_{CB} = C_W U^2)$, l'équation (B.4) devient :

$$\Delta U_L = \frac{R P_R + X_L (Q_R \frac{Q_{CB}}{2})}{U_R} \quad (\text{B.5})$$

De la même manière, en faisant la projection sur l'axe des imaginaires, l'expression de la chute de tension transversale est donnée comme suit :

$$\Delta V_T = X_L I_R \cos \varphi_R - R I_R \sin \varphi_R + R I_{CB} \quad (\text{B.6})$$

Par suivant les mêmes étapes que précédemment, l'équation (B.4) devient :

$$\Delta U_T = \frac{X_L P_R - R (Q_R \frac{Q_{CB}}{2})}{U_R} \quad (\text{B.7})$$

$$\text{Alor :} \quad \Delta U = \Delta U_L + \Delta U_T \quad (\text{B.8})$$

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

$$\Delta U = U_s - U_r = \left(\frac{XQ}{U_r} \right) \quad (\text{B.9})$$

La tension à la source est alors donnée par :

$$U_s = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad (\text{B.10})$$

La régulation de la tension est donnée comme suit :

$$\text{Régulation \%} = \frac{U_s - U_R}{U_R} 100 \quad (\text{B.11})$$

Annexe C- Machine Load Flow solution.

SimPowerSystems Report. Generated by powergui, 2021.

[3] Machine Load Flow solution:

```
Machine:      M1 PV 2100 MVA
Nominal:     2100 MVA   13.8 kV rms
Bus Type:    P & V generator
Uan phase:   13.54°
Uab:        13800 Vrms [1 pu] 43.54°
Ubc:        13800 Vrms [1 pu] -76.46°
Uca:        13800 Vrms [1 pu] 163.54°
Ia:         43705 Arms [0.4975 pu] 30.36°
Ib:         43705 Arms [0.4975 pu] -89.64°
Ic:         43705 Arms [0.4975 pu] 150.36°
P:          1e+009 W   [0.4762 pu]
Q:          -3.0219e+008 Vars [-0.1439 pu]
Pmec:       1.0015e+009 W [0.4769 pu]
Torque:     8.5008e+007 N.m [0.4769 pu]
Vf:         0.93714 pu
```

```
Machine:      M2 Swing 1400 MVA
Nominal:     1400 MVA   13.8 kV rms
Bus Type:    Swing bus
Uan phase:   0.00°
Uab:        13800 Vrms [1 pu] 30.00°
Ubc:        13800 Vrms [1 pu] -90.00°
Uca:        13800 Vrms [1 pu] 150.00°
Ia:         6354.1 Arms [0.1085 pu] 81.21°
Ib:         6354.1 Arms [0.1085 pu] -38.79°
Ic:         6354.1 Arms [0.1085 pu] -158.79°
P:          2.3208e+007 W   [0.01658 pu]
Q:          -1.5009e+008 Vars [-0.1072 pu]
Pmec:       2.3255e+007 W   [0.01661 pu]
Torque:     1.9739e+006 N.m [0.01661 pu]
Vf:         0.8603 pu
```

```
Machine:      Three-Phase Dynamic Load
Nominal:     500 kV rms
Bus Type:    P & Q load
Uan phase:   29.70°
Uab:        5.123e+005 Vrms [1.025 pu] 59.70°
Ubc:        5.123e+005 Vrms [1.025 pu] -60.30°
Uca:        5.123e+005 Vrms [1.025 pu] 179.70°
Ia:         1132.6 Arms 23.99°
Ib:         1132.6 Arms -96.01°
Ic:         1132.6 Arms 143.99°
P:          1e+009 W
Q:          9.9995e+007 Vars
```


ملخص:

تساهم هذه المذكرة في دراسة إدخال أجهزة FACTS على نظام نقل الطاقة الكهربائية، لتحكم ديناميكي بكفاءة أفضل وزيادة القدرة على نقل الطاقة. في هذه المذكرة، عرض موجز للمشاكل الشائعة المتعلقة بوظائف وأساليب الكلاسيكية المستعملة الإدارة الطاقة في نظام الطاقة الكهربائية، مع دراسة القوانين الأساسية والعوامل المؤثرة على نقل الطاقة في الخطوط الكهربائية من خلال الكشف عن مشكلة حدود الطاقة المنقولة وفقاً لهذه المعلمات للشبكات الكهربائية تم إنجازها. تم دراسة وحدة التحكم FACTS (SSSC) المرتكزة على أساس العاكس الإلكتروني للطاقة الثابتة ودمجها في خط النقل الكهربائي من أجل التحكم في تدفق طاقة الخط وتقليل تفاعل الخط افتراضياً و بأكثر ديناميكية من أجل القدرة نقل الطاقة أكثر وأفضل استخدام للخطوط الكهربائية الموجودة. أكثر على ذلك، تم تصميم جهاز تحكم التخميد التذبذب للطاقة على أساس مبدأ تعويض الطور وإدراجه مع وحدة التحكم في جهاز SSSC لتحسين استقرار نظام نقل الطاقة الكهربائية عند تعرضه لاضطراب.

كلمات مفتاحية : التعويض متزامن الديناميكي، محول مصدر الطاقة، زيادة قدرة نقل الطاقة ، تقليل فقد الطاقة، التخميد التذبذب للطاقة، خط النقل الكهربائي المرن FACTS.

Abstract:

This thesis contributes to study the integration of FACTS devices in power transmission system, for better efficient dynamic control, and power transfer capability enhancement. In this thesis, brief presentation on the common problems of functioning and conventional energy management methods in power electrical system, with the study of the fundamental laws and factors influencing the transmission of this energy in electrical lines by exposing the problem of the limit of transportable power according to these parameters of the electrical networks have been done. FACTS series controller (SSSC) based on static power electronic inverter have been study and integrated to electrical transmission line in order to control the line power flow, and virtually and dynamically as well decrease in line reactance for power transfer capability enhancement and better energy optimization and usability of existing lines. Further, a power oscillation damping controller based on phase compensation principle was designed and embedded to the SSSC device control unit to improve the power electrical system stability when subjected to a given disturbance.

Key-words : Series dynamic compensation, Voltage source converter, Power transfer enhancement, Power losses reduction, Power oscillation damping, Flexible transmission line FACTS.

Résumé:

Ce mémoire contribue à étudier l'intégration des dispositifs FACTS dans le réseau de transport d'énergie électrique, pour un meilleur contrôle adéquate et plus dynamique, et l'augmentation de la capacité avec flexibilité de transfert d'énergie électrique. Dans ce mémoire, brève présentation sur les problèmes courants de fonctionnement et les méthodes conventionnelles de gestion d'énergie dans les réseaux électriques, avec l'étude sur les lois fondamentales et les facteurs affectant la transmission d'énergie dans les lignes électriques en exposant le problème de la limite de puissance transportable en fonction de ces paramètres des réseaux électriques ont été fait. Un contrôleur série FACTS (SSSC) basé sur un onduleur statique d'électronique de puissance ont été étudiés et intégré à une ligne de transmission électrique afin de contrôler le flux de puissance, et réduire virtuellement et dynamiquement la réactance de ligne afin d'augmenté la capacité de transfert d'énergie électrique et par conséquence l'optimisation du transi pour bien d'utilisation du ces lignes existantes. De plus, un contrôleur d'amortissement des oscillations de puissance basé sur le principe de la compensation de phase a été conçu et intégré avec l'unité de contrôle du dispositif SSSC pour améliorer la stabilité du système électrique lorsqu'il est soumis à une perturbation donnée.

Mots-clés : Compensation série dynamique, Convertisseur de source de tension, Augmentation du transfert d'énergie, Réduction des pertes d'énergies, Amortissement les oscillations des puissances, Ligne de transmission flexible FACTS.