

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE BATNA
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'Electrotechnique



MEMOIRE de MAGISTER

Présenté Pour l'Obtention de Diplôme de

Magister

en Electrotechnique

Option : Electricité industrielle

Par

Abdelaàli ALIBI

Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de Batna

Thème

**Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes
FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)**

Soutenu publiquement le **13 /06/2009** devant le **jury** composé de:

<i>Farid Nasri</i>	Professeur, Univ Batna	Président
<i>Cherif Fetha</i>	Maître de Conférences, Univ. Batna	Rapporteur
<i>M.Lokmane Bendaas</i>	Maître de Conférences, Univ. Batna	Co-Rapporteur
<i>Khaled Chikhi</i>	Maître de Conférences, Univ. Batna	Examineur
<i>Djamel Labed</i>	Maître de Conférences, Univ. Constantine	Examineur
<i>Saïd Benaggoune</i>	Maître de Conférences, Univ. Batna	Examineur

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à:

*Mes chers parents,
Mes frères et sœurs,
Ma femme et à mes enfants.*

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, je voudrais exprimer mes sincères remerciements à Monsieur ***Cherif Fetha*** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire, pour ces précieux conseils et encouragements tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur ***M.Lokmane Bendaas*** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna pour avoir accepté de co-diriger ce mémoire, pour son appui et son orientation.

Je suis très reconnaissant à Monsieur ***Khaled Chikhi*** Maître de conférence au département d'électrotechnique de l'Université de Batna pour son aide, sa disponibilité, aussi pour la confiance et la compréhension qu'il m'a manifesté.

Je tiens à remercier également Monsieur ***Farid Nasri*** professeur de l'enseignement supérieur au département d'électrotechnique de l'Université de Batna qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

J'adresse mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce mémoire en lui apportant de l'intérêt, Monsieur ***Djamel Labeled*** Maître de Conférences à l'Université de Constantine et Monsieur ***Saïd Benaggoune*** Maître de Conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna.

Je veux aussi exprimer ma vive reconnaissance à Monsieur ***Ahmed Bendhifallah*** Professeur au département d'électronique de l'université de Batna et Monsieur ***Abdelaàli Boughaba*** Professeur au département d'hygiène et de sécurité de l'université de Batna, pour leur aide fraternelle et précieuse durant la préparation au concours de magister, à mon beau-frère ***Abdelhakim Berkani*** pour sa patience et sa compréhension, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude.

Liste des Symboles et Abréviations

<i>FACTS</i>	Flexible alternatif curant transmission systems.
<i>IGBT</i>	Insulated Gate Bipolar Transistors
<i>IGCT</i>	Insulated Gate Commutated Thyristors
<i>SPS</i>	Static Phase Shifter
<i>STATCOM</i>	Static Synchronous Compensator
<i>SSSC</i>	Static Synchronous Series Compensator
<i>DVR</i>	Dynamic Voltage Restorer
<i>UPFC</i>	Unified Power Flow Controller
<i>VSC</i>	Voltage Source Converter
<i>MLI</i>	Modulation par largeur d'impulsion
<i>PI</i>	Proportionnel Intégral (régulateur)
<i>V_s</i>	Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).
<i>V_r</i>	Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).
<i>P_s</i>	Puissance active fournie par la source
<i>Q_s</i>	Puissance réactive fournie par la source
<i>P_r</i>	Puissance active demandée par la charge
<i>Q_r</i>	Puissance réactive demandée par la charge
<i>P_l</i>	Puissance active transportée par la ligne
<i>Q_l</i>	Puissance réactive transportée par la ligne
<i>δ</i>	Angle de charge entre V _s et V _r
<i>R</i>	Résistance de la ligne de transport
<i>X</i>	réactance de la ligne de transport
<i>θ</i>	Déphasage du courant de al ligne
<i>V_{sh}</i>	Tension (shunt) injectée par le STATCOM
<i>I_{sh}</i>	Courant (shunt) injecté par le STATCOM
<i>R_{sh}</i>	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
<i>X_{sh}</i>	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
<i>P_{sh}</i>	Puissance active délivrée par le STATCOM
<i>Q_{sh}</i>	Puissance réactive délivrée par le STATCOM

<i>V_{se}</i>	Tension (série) injecté par le SSSC.
<i>I_{se}</i>	Courant (série) injecté par le STATCOM
<i>R_{se}</i>	Résistance du transformateur de couplage série de l'SSSC
<i>X_{se}</i>	Réactance du transformateur de couplage série de l'SSSC
<i>P_{se}</i>	Puissance active délivrée par le SSSC
<i>Q_{se}</i>	Puissance réactive délivrée par le SSSC
<i>U_{dc}</i>	Tension continu aux bornes du condensateur
<i>I_{dc}</i>	Courant dans le circuit continu
<i>d (indice)</i>	la composante sur l'axe d du repère d-q
<i>q (indice)</i>	la composante sur l'axe q du repère d-q
<i>pu (indice)</i>	la grandeur en unité relative (grandeur réduite)

TABLE DES MATIERES

<i>Dédicace</i>	i
<i>Remerciement</i>	ii
<i>Liste des symboles et abréviations</i>	iii

<i>Introduction générale</i>	8
<i>Chapitre I: Etat de l'art "Fonctionnement du Réseaux Electrique, Systèmes FACTS"</i>	
<i>I. Fonctionnement du Réseaux Electrique et compensation réactive</i>	13
I.1 Introduction	13
I.2 Puissance transmise par une ligne électrique	13
I.3 Chute de Tension et Compensation Réactive	15
I.4 Ligne Electrique Non Compensée	17
I.4.1 Equation des tensions et courants d'une ligne électrique	18
I.4.2 ligne électrique non compensée ave charge	14
I.5 Compensation réactive dans une ligne électrique	19
I.5.1 Compensateur shunt	19
I.5.2 Compensation série	21
<i>II. Les Systèmes FACTS</i>	23
II.1 Introduction	23
II.2 Concept Générale et Définition	23
II.3 Différentes Catégories des FACTS	24
II.4 Apports et Avantages des FACTS	25
II.5 Applications Pratiques des Dispositifs FACTS	26
II.6 Structure des Principaux Dispositifs FACTS	27
II.6.1 contrôleurs parallèles	27
a) SVC (Static Var Compensator)	27
b) STATCOM (STATic COMpensator)	27
II.6.2 contrôleurs séries	29
a) TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)	29
b) SSSC (Static Synchronous Series Compensator)	29

II.6.3	Contrôleurs hybrides série shunt.....	31
a)	SPS (Static Phase Shifter).....	31
b)	UPFC (unified power flow controller).....	32
III. Conclusion.....		33
 Chapitre II: Structure et Principe de Fonctionnement du STATCOM et de l'SSSC		
I. Introduction.....		35
I.2	L'onduleur de tension (VSC) dans un réseau électrique.....	35
II. Compensateur Statique Synchron (STATCOM).....		37
II.1	Description.....	37
II.2	Principe de Fonctionnement.....	38
II.3	Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique.....	41
III. Compensateur Statique Série Synchron (SSSC).....		44
III.1	Description.....	44
III.2	Principe de fonctionnement.....	45
III.3	Effet de la compensation série (SSSC) sur le réseau électrique.....	48
III. Conclusion.....		51
 Chapitre III: Modélisation et Commande du STATCOM et de l' SSSC		
I. Introduction.....		53
II. Modélisation et Commande du STATCOM.....		54
II.I	Modélisation du STATCOM.....	54
II.1.1	Modèle Mathématique Simplifié.....	54
II.1.2	Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC.....	56
II.2	Contrôle du STATCOM.....	57
II.2.1	Détermination des Références.....	58
II.2.2	La Méthode Watt Var découplée.....	59
II.2.3	Régulateur PI avec compensation de pôles.....	61
II.2.4	Régulation de la tension continue U_{dc}	62
III. Modélisation et Commande de l'SSSC.....		64
III.1	Modélisation de l'SSS.....	64
III.1.1	Modèle Mathématique Simplifié.....	64
III.1.2	Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC.....	65

III.2 Contrôle de l'SSSC.....	66
III.2.1 La méthode Watt-Var découplée.....	66
III.2.2 Détermination des Références.....	67
III.2.3 Calcul des Régulateurs PI.....	69
III.2.4 Régulation de la tension continue U_{dc}	69
III.2.5 Commande de l'Onduleur.....	69
IV. Conclusion.....	70

Chapitre IV: Simulations et Résultats

I. Introduction.....	72
II. Simulation du STATCOM.....	72
II.1 Description du réseau étudié.....	72
II.2 Equation du STATCOM en grandeurs réduites.....	73
II.3 Essais de simulation et résultats.....	74
III. Simulation de l'SSSC.....	80
II.1 Description du réseau étudié.....	80
II.2 Equation de l'SSSC en grandeurs réduites.....	81
II.3 Essais de simulation et résultats.....	82
IV. Conclusion.....	86

Conclusion Générale et Futur Travail

Conclusion générale.....	89
---------------------------------	-----------

BIBLIOGRAPHIE.....	92
---------------------------	-----------

Annexes

Annexe A.....	96
Annexe B.....	98

Introduction Générale

Introduction Générale

La consommation de l'énergie électrique est en hausse progressive et cette tendance augmente avec l'industrialisation et la croissance de la population. De plus en vie aujourd'hui dans l'ère de l'électronique et de l'informatique et toute les charges sont très sensible aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations: une perte d'alimentation peut causer l'interruption des différents processus de production; et devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et de meilleur qualité, les entreprises de production de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement régulier de cette demande, et sans interruption, à travers un réseau maillé et interconnecté afin de prouver une fiabilité dans leurs service.

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

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement: malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs).

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

L'apport de cette technologie FACTS pour les compagnies de l'électricité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour contrôler le flux de puissance dans les réseaux

et d'augmenter les capacités utilisées des lignes existantes semblables à des extensions dans ces dernières. Ces apports résultent de l'habilité de ces contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres interdépendants qui gouvernent l'opération de transport de l'énergie électrique y compris l'impédance série, impédance shunt, courant, tension, angle de phase... etc.

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

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier les fonctions de contrôle offertes par le STATCOM dans la compensation de la puissance réactive aussi que le maintien de la tension et le SSSC dans le contrôle du flux de puissance active et l'amélioration de la capacité de charge des lignes de transport électriques. Cette étude qui est organisée en quatre chapitres:

Le premier chapitre a donné une brève revue sur l'opération de transport de l'énergie électrique ainsi que le besoin du maintien de la tension et les bénéfices de la compensation shunt. Les techniques traditionnelles de compensation shunt et série sont exposées. Dans la deuxième partie de ce chapitre une exploration rapide dans l'historique des systèmes FACTS et de brèves définitions des célèbres dispositifs FACTS sont données.

Le deuxième chapitre est consacré à la description de la structure de ces deux dispositifs (STATCOM et SSSC), une explication en détail des principes de leurs fonctionnements et puis la contribution de ces derniers et leurs effets dans le contrôle des réseaux électriques est montré.

La modélisation de ces dispositifs a fait l'objectif du troisième chapitre et différents modèles mathématiques de chaque circuit sont développés séparément. La stratégie de commande Watt-Var découplé adoptée pour le contrôle des courants actifs et réactifs de ces dispositifs est expliqué ainsi que le calcul de tous les régulateurs proportionnels intégraux de chaque circuit est démontré.

Afin de valider la théorie et les modèles exposés dans les chapitres précédents une simulation structurée est exécutée dans l'environnement Matlab-Simulink des ces contrôleurs intégrés séparément dans un réseau simple de transport de l'énergie

électriques. Les courbes de la majorité des paramètres du réseau dans plusieurs cas de simulation sont présentées et interprétées dans ce quatrième chapitre.

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

Chapitre I:

Etat de l'art: Fonctionnement du Réseaux Electrique - Systèmes FACTS

I. Fonctionnement du Réseaux Electrique et compensation réactive:

I.1 Introduction

Le stockage massif de l'énergie électrique sous une forme immédiatement disponible n'est, actuellement, pas possible. Le problème majeur des exploitant est donc de maintenir en permanence l'équilibre entre l'offre disponible et les demande potentielle, étant entendu que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production-transport-consommation, appelé souvent système électrique plutôt que réseau.

Pour des raisons économiques et techniques les unités de production sont souvent géographiquement concentrées. Par contre la consommation est beaucoup plus dispersée. Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent l'acheminement de l'énergie depuis ces unités vers les lieux de consommation à travers des lignes électriques (aériennes/ou souterraine).

I.2 Puissance transmise par une ligne électrique

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de l'angle de charge δ . Les puissances transmises par une électrique radiale sont données par les formule qui suivent: [10]

Considérant la figure fig.I.1 qui représente une ligne électrique alimentant une charge ($P + jQ$) en admettant que la résistance de la ligne est très faible vis-à-vis sa la réactance l'impédance donc: $Z_s = jX_s$.

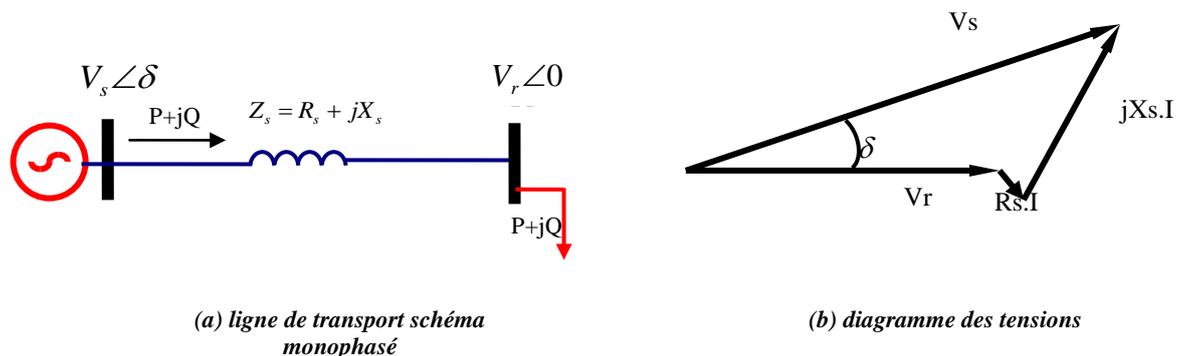


Fig. I.1 ligne électrique alimentant une charge

En prenant la tension au borne de la charge comme référence des phases fig.I.1.b et en négligeant la résistance R_s , le courant sera en phase avec V_r , La puissance demandé par la charge sera donnée par les équations qui suivent:

$$S_r = P + jQ = V_r I_r^* ; \text{ Avec } I_r = \frac{V_s - V_r}{Z_s}$$

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X_s} \sin \delta \quad (1.1)$$

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

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 I.1 appelée ligne de charge du système qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par V_s et de pente $-Z_s$:

$$V_s - V_r = Z_s * I \Rightarrow V_r = -Z_s * I + V_s$$

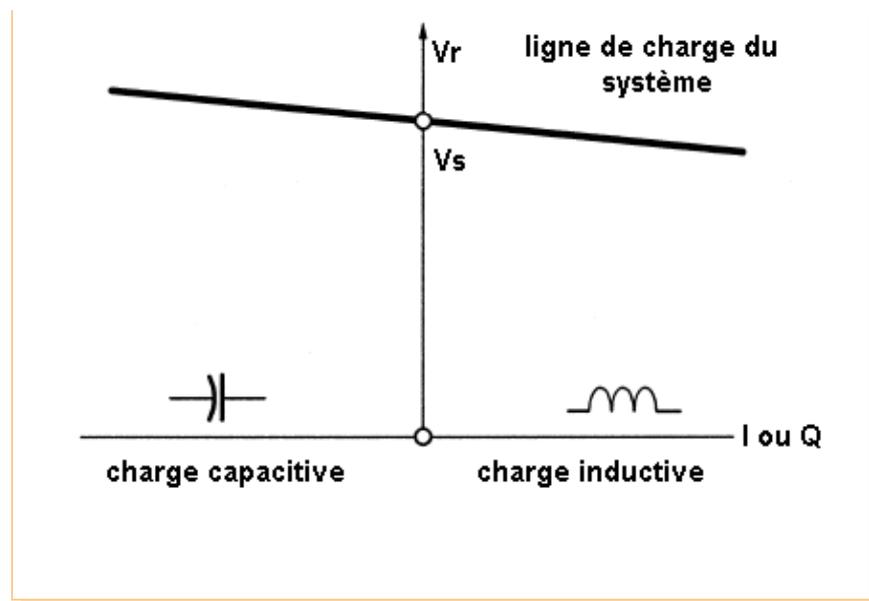


Fig. I.2 ligne de charge du système

On peut démontrer facilement *le besoin du maintien de la tension* aux bornes de la charge pour permettre un maximum de puissance à transmettre:

Si la charge varie et aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension V_r égale à V_s alors depuis le diagramme de phase de la figure fig.I.1 (b) :

$$V_r = V_s \cos \delta$$

En remplaçant dans (1.1) en aura :

$$P = \frac{V_s^2}{X_s} \sin \delta \cdot \cos \delta = \frac{V_s^2}{2X_s} \sin 2\delta$$

Dans ce cas on ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle $\delta = 45^\circ$

égale à: $P_{\max} = \frac{V_s^2}{2X_s}$.

Dans le cas où on maintient la tension V_r égale à V_s on peut avoir, depuis l'équation

(1.1), une puissance maximale: $P_{\max} = \frac{V_s^2}{X_s}$.

1.3 Chute de Tension et Compensation Réactive

En considérant la ligne électrique de la figure I.3 sans tenir en compte le compensateur, la représentation du diagramme des tensions est donnée sur la figure Fig I.3 (b). Lorsque la charge appelle un courant I à partir de la source V_s , la tension V_r chute au dessous de la valeur V_s . [2]

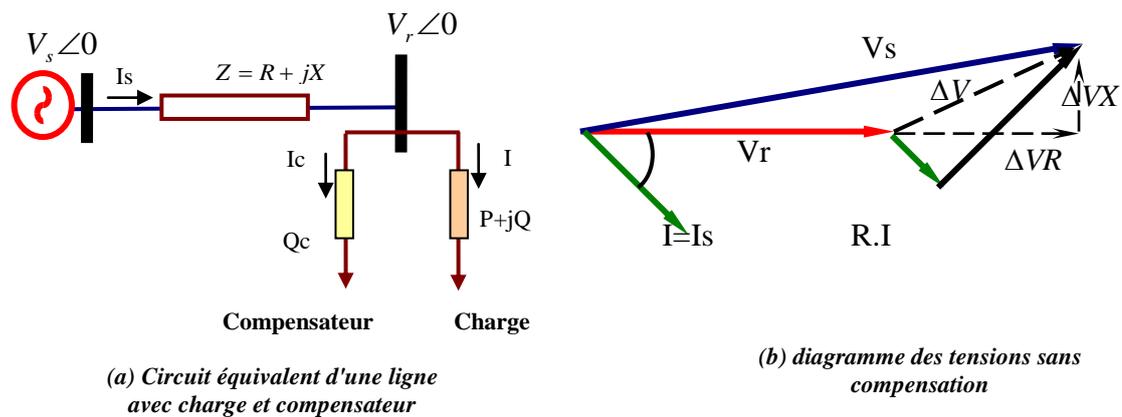


Fig. I.3 ligne électrique avec compensateur

La chute de tension ΔV , à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure I.3 (b) est donnée par la formulation qui suit:

$$\Delta V = V_s - V_r = Z_s * I \tag{1.3}$$

Avec I le courant de charge il est donnée en fonction des puissances P et Q de la charge

par l'équation :

$$I = \frac{P - jQ}{V_r} \tag{1.4}$$

En tenant la tension V_r comme référence des phases donc $\bar{V}_r = V_r + j0$, on peut écrire alors:

$$\Delta V = (R_s + jX_s) \left(\frac{P - jQ}{V_r} \right) = \frac{R_s \cdot P + X_s \cdot Q}{V_r} + j \frac{X_s \cdot P - R_s \cdot Q}{V_r} = \Delta VR + j\Delta VX \quad (1.5)$$

La chute de tension possède donc deux composantes ΔVR en phase avec la tension V_r et une composante ΔVX en quadrature avec V_r . D'après l'équation (1.5) la chute ΔV dépend de la puissance active et réactive de la charge.

En connectant un compensateur de puissance réactive en parallèle avec la charge, il sera possible de maintenir la tension V_r égale en module à la tension V_s . La puissance réactive totale connectée au jeu de barre de charge sera remplacée par $Q_s = Q + Q_\delta$, où Q_δ est la puissance réactive injectée par le compensateur et qui sera ajustée pour faire tourner le vecteur ΔV jusqu'à ce que la tension $|V_r|$ sera égale à la tension $|V_s|$ comme le montre la figure I.4.

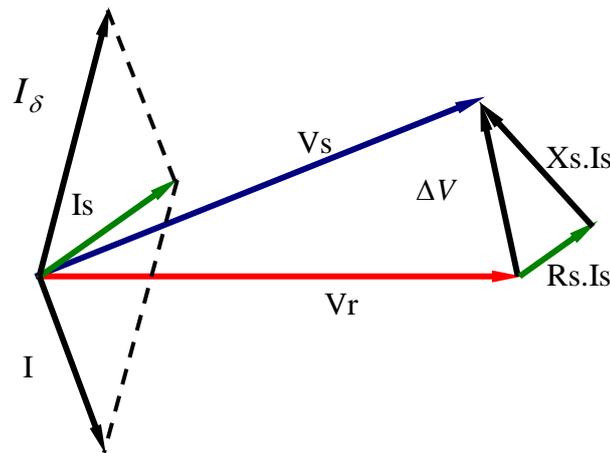


Fig. I.4 diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante)

A partir des équations (3) et (5) nous avons:

$$|V_s|^2 = \left[V_r + \frac{R_s \cdot P + X_s \cdot Q}{V_r} \right]^2 + \left[\frac{X_s \cdot P - R_s \cdot Q}{V_r} \right]^2 \quad (1.6)$$

La valeur de Q_δ nécessaire pour maintenir la tension V_r constante. Est obtenue en résolvant l'équation (1.6) pour Q_s en considérant $V_r = |V_s|$, puis $Q_\delta = Q_s - Q$. Pratiquement cette valeur est obtenue automatiquement par une boucle de contrôle fermée de $V_r = V_{ref} = V_s$. [2]

✓ **Remarque importante:**

Si on veut par la compensation réactive améliorer le facteur de puissance ($\cos\phi = 1$), c.à.d. que :

$$Q_s = 0, \text{ donc ce cas } Q_s = Q.$$

Alors:
$$\Delta V = \frac{R_s \cdot P + jX_s \cdot P}{V_r} = (R_s + jX_s) \cdot \frac{P}{V_r}$$

Cette équation est indépendante de Q donc elle n'est plus sous contrôle du compensateur, et par conséquent on perd le contrôle de la tension. [2][5].

1.4 Ligne Electrique Non Compensée

1.4.1 Equation des tensions et courants d'une ligne électrique:

La figure I.5 représente une ligne de transport électrique d'une inductance et capacité régulièrement distribuées le long de la ligne de longueur 'a'. La tension et le courant, en un point distant de 'x' de la source E_s , obéissent à l'équation différentielle de propagation suivante:[2][3]

$$\begin{cases} \frac{d^2 V}{dx^2} = \Gamma^2 V \\ \frac{d^2 I}{dx^2} = \Gamma^2 I \end{cases} \quad (1.7)$$

Avec $\Gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)}$

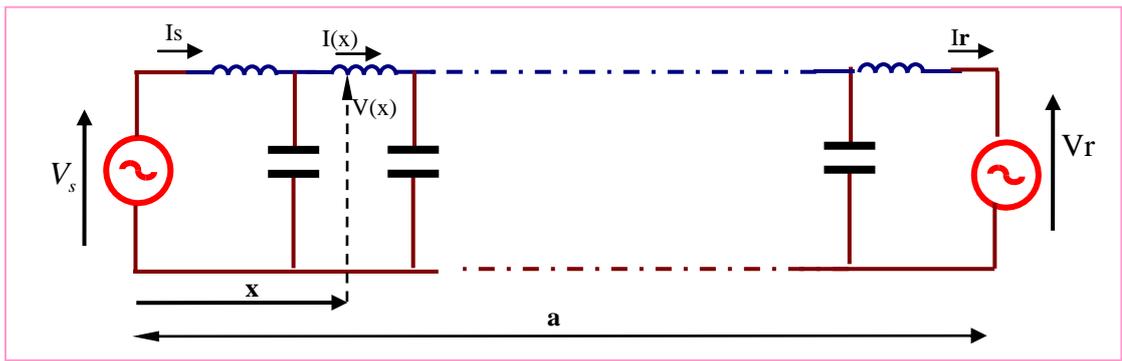


Fig. I.5 ligne électrique avec inductance série et capacité shunt distribuées

R: la résistance de la ligne par unité de longueur ohm/m; L:son inductance en serie avec R; G la conductance shunt de ligne.

Si R et G son très petits et négligeable, alors: $\Gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$

La solution des équations (1.7) pour une ligne sans pertes est :

$$\begin{cases} V(x) = V_r \cos \beta(a-x) + ZI_r \sin \beta(a-x) \\ I(x) = j \frac{V_r}{Z} \sin \beta(a-x) + I_r \cos \beta(a-x) \end{cases} \quad (1.8)$$

$Z = \sqrt{L/C}$ Est l'impédance caractéristique de charge de la ligne en [ohm].

$\theta = \beta.a$ (Pour $x=0$), représente l'angle électrique de la ligne.

1.4.2 ligne électrique non compensée ave charge:

Soit la ligne électrique de la figure I.1 alimentant une charge quelconque $L=P+jQ$; le courant absorbé par cette charge est donné par la relation suivante:

$$I_r = \frac{P - jQ}{V_r^*} \quad (1.9)$$

Les tensions des extrémités de la ligne sont reliées par l'équation (1.10) qui suit, en injectant l'équation (9) dans (8):

$$V_s = V_r \cos \theta + Z \left(\frac{P - jQ}{V_r^*} \right) \sin \theta \quad (1.10)$$

La solution de cette équation pour V_r , représentée dans la figure I.6 montre la variation de la tension V_r en fonction de la charge P , et pour des différentes valeurs du facteur de puissance, en considérant la tension de départ constante.

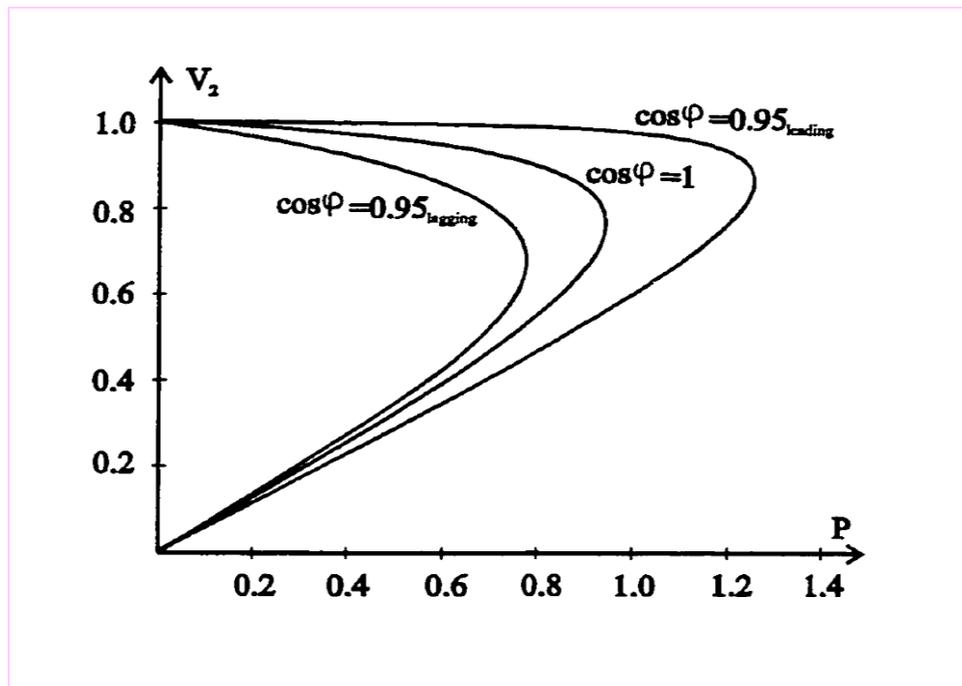


Fig. I.6: variation de V_r en fonction de P avec plusieurs facteur de puissance

Pour toute valeur de $P < P_{\max}$ nous avons deux solutions pour V_r , puisque l'équation (1.10) est quadratique, le point de fonctionnement normale est pour les grandes valeurs de V_r autour de 1 pu.

Le facteur de puissance de la charge à une grande influence sur la tension V_r à l'extrémité réceptrice de la ligne; les charges ayant un facteur de puissance en retard (inductive) tendent à réduire V_r , par contre ceux qui sont en avance (capacitive) augmente de la valeur de la tension V_r . [2]

1.5 Compensation réactive dans une ligne électrique

La compensation réactive représente l'application de tous les dispositifs de puissance réactive dans un réseau électrique pour:

- maintenir le profil du plan de la tension pour les différents niveaux des puissances transportées.
- Pour améliorer la stabilité du système par augmentation de la puissance maximale transmissible.
- Et/ou pour couvrir le besoin en puissance réactive sur la majorité des plans économiques.

Idéalement la compensation réactive doit modifier l'impédance de charge en agissant sur la capacité et/ou l'inductance de la ligne pour obtenir une impédance de charge virtuelle s'adaptant aux valeurs de la puissance actuelle transportée par la ligne. [2][6]

1.5.1 Compensateur shunt au point milieu

Considérant un réseau électrique simple avec un compensateur shunt idéal connecté au point milieu de la ligne de transport donné sur la figure I.7.

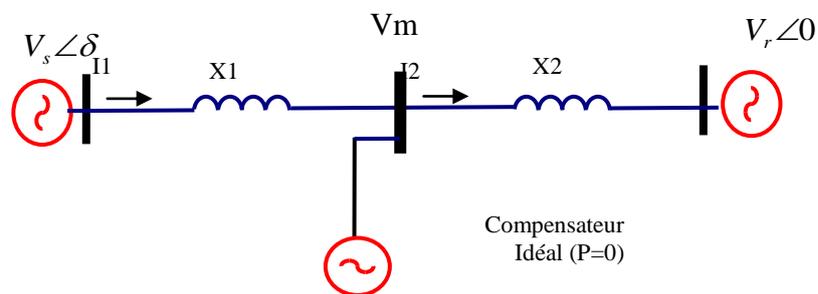


Fig. I.7 ligne de transmission avec compensateur à point milieu

Le compensateur est représenté par une source de tension sinusoïdal (en considère uniquement la composante de fréquence fondamentale) en phase avec la tension V_m du point milieu de la ligne; le compensateur échange uniquement la puissance réactive avec

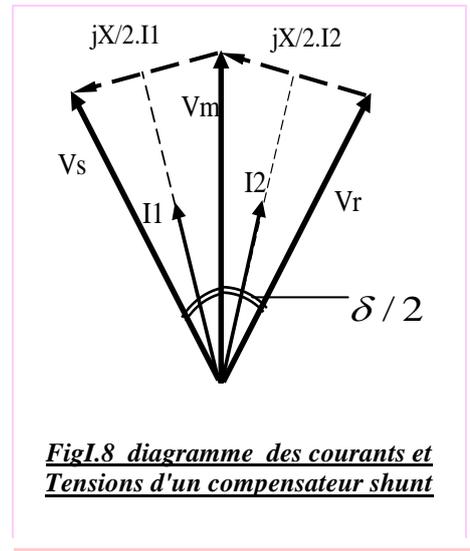
le réseau. Ce compensateur découpe la ligne en deux segments égales d'impédance $X/2$, le premier segment transporte la puissance depuis la source V_s au point milieu, quant au deuxième transfert cette puissance du point milieu au jeu de barre de réception. [6]

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 I.8

Les puissances active et réactive transportées par une ligne électrique donnée par les équations (1.1) et (1.2) seront modifier, en ajoutant le compensateur shunt au point milieu, et données par les équations (1.11) et (1.12) suivantes:

$$P_c = \frac{2V_s V_r \sin(\delta/2)}{X} \quad (1.11)$$

$$Q_c = \frac{4V_r (V_s \cos(\delta/2) - V_r)}{X} \quad (1.12)$$



La variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de charge δ est représentée par la figure I.9 et comparer avec les puissances de la ligne non compensée.

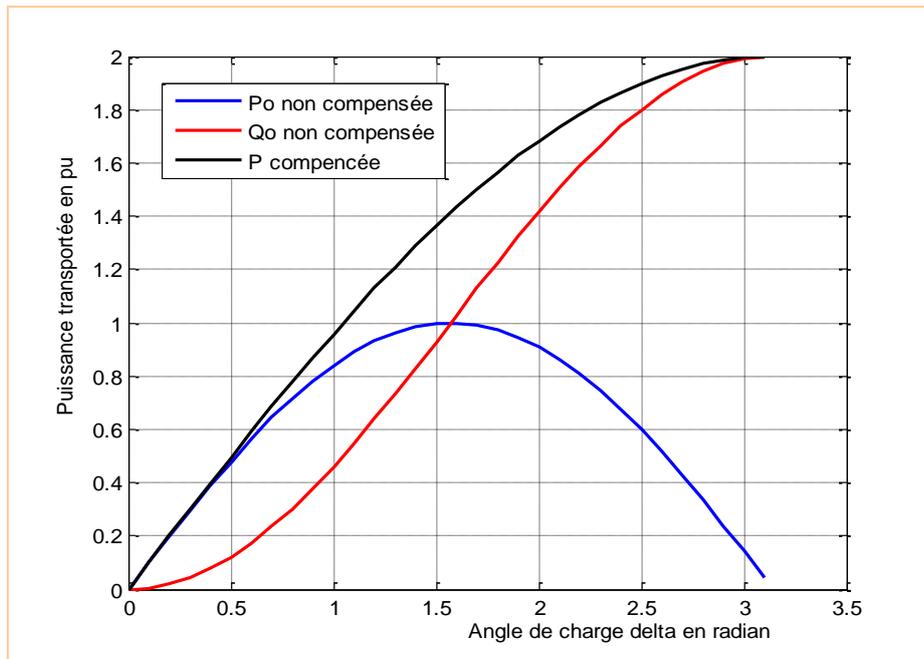


Fig. I.9 Puissance active te réactive en fonction de δ

On peut simplement observer a partir de la courbe que le compensateur shunt, au point milieu, à l'habilité d'augmente d'une manière significative la puissance maximale transmissible d'une ligne électrique jusqu'au double (pour la valeur $\delta = \pi$).

1.5.2 Compensation série

La compensation série est basée sur le principe de réduire la réactance effective d'une ligne de transport électrique. Conventionnellement c'est la réactance du compensateur série capacitif qui élimine une quantité de la réactance de la ligne 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 en injectant une tension alternative, de même fréquence que le réseau, en série dans la ligne et qui est en quadrature (90°) avec le courant de celle-ci. [6][7]

Le simple composant ou dispositif pour achever une compensation série dans une ligne est l'insertion des condensateurs en série dans cette dernière comme dans la figure ci-dessous (Fig.I.10) :

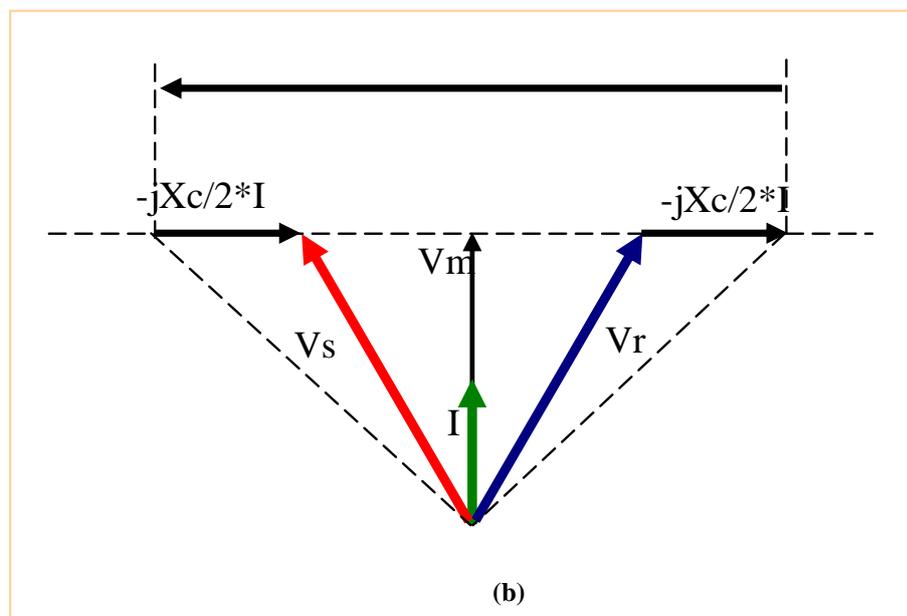
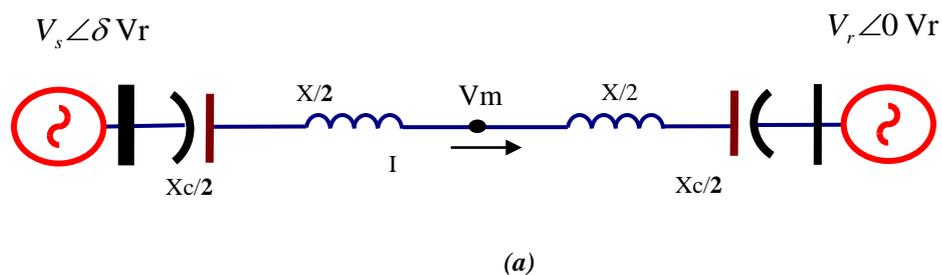


Fig. I.10 Ligne électrique avec compensation série

La relation entre les différentes tensions et courants, dans l'ensemble ligne électrique et compensateur série, est expliquée par le diagramme de la figure I.10 (b).

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

$$X_{eff} = X - X_c = X(1 - k).$$

Avec $K = X/X_c$ est défini comme le coefficient de Compensation série.

La puissance transportée par une telle ligne est donnée par l'équation (1.13) et varie selon la valeur du degré de compensation K comme le montre la figure Fig.I.11.

$$P_c = \frac{V_s \cdot V_r \sin \delta}{X(1 - K)} \quad (1.13)$$

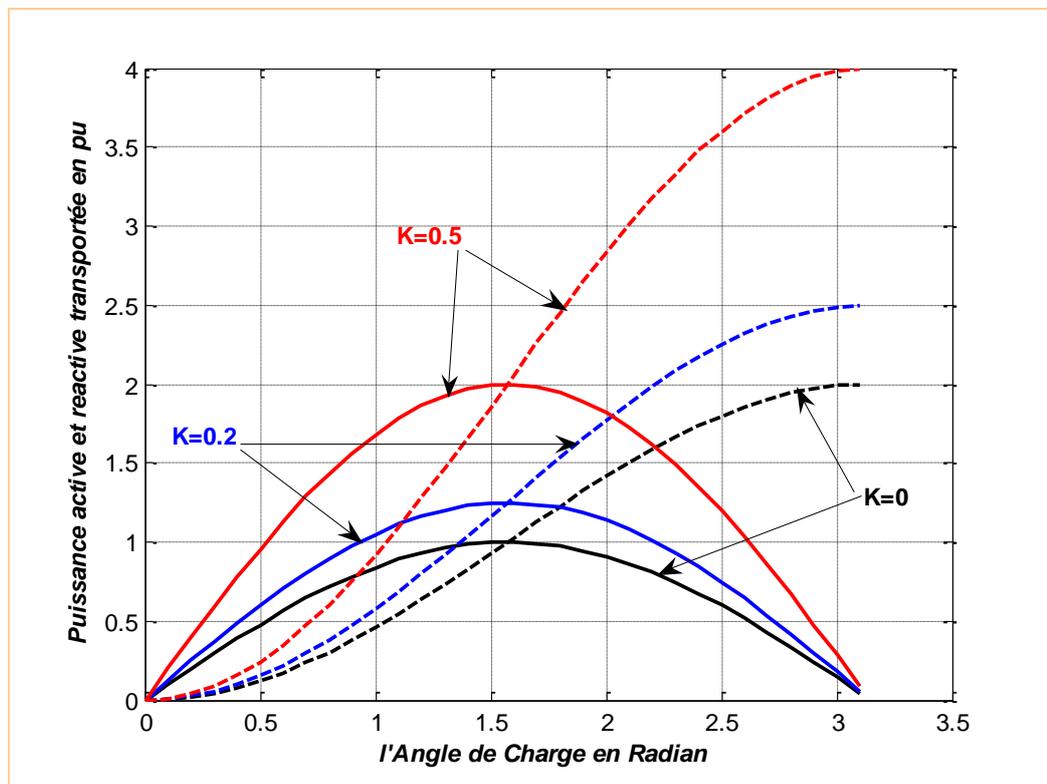


Fig. I.12 les puissances transportées par une ligne pour différentes valeur de K

Il est facile d'observer à partir des courbes de la figure I.12 que la compensation série peut augmenter significativement la capacité de transport de la puissance à travers une ligne électrique. [6][7]

II. Les Systèmes FACTS

II.1 Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limité à cause des limites thermique des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées. Face à ce problème et devant les contraintes environnementale, écologique et économique de reconstructions de nouvelles lignes, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques et d'augmenter leurs capacités de transfert.

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

II.2 Concept Générale et Définition :

D'après IEEE, FACTS qui est l'abréviation de «*Flexible AC Transmission Systems*» est défini 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. [1]

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

Flexibilité de Transmission de l'énergie: l'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire. [1][8]

II.3 Différentes Catégories des FACTS [1]

Le tableau de la figure 1.1 représente te les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base R L C et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécanique. Les dispositifs FACTS continents également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

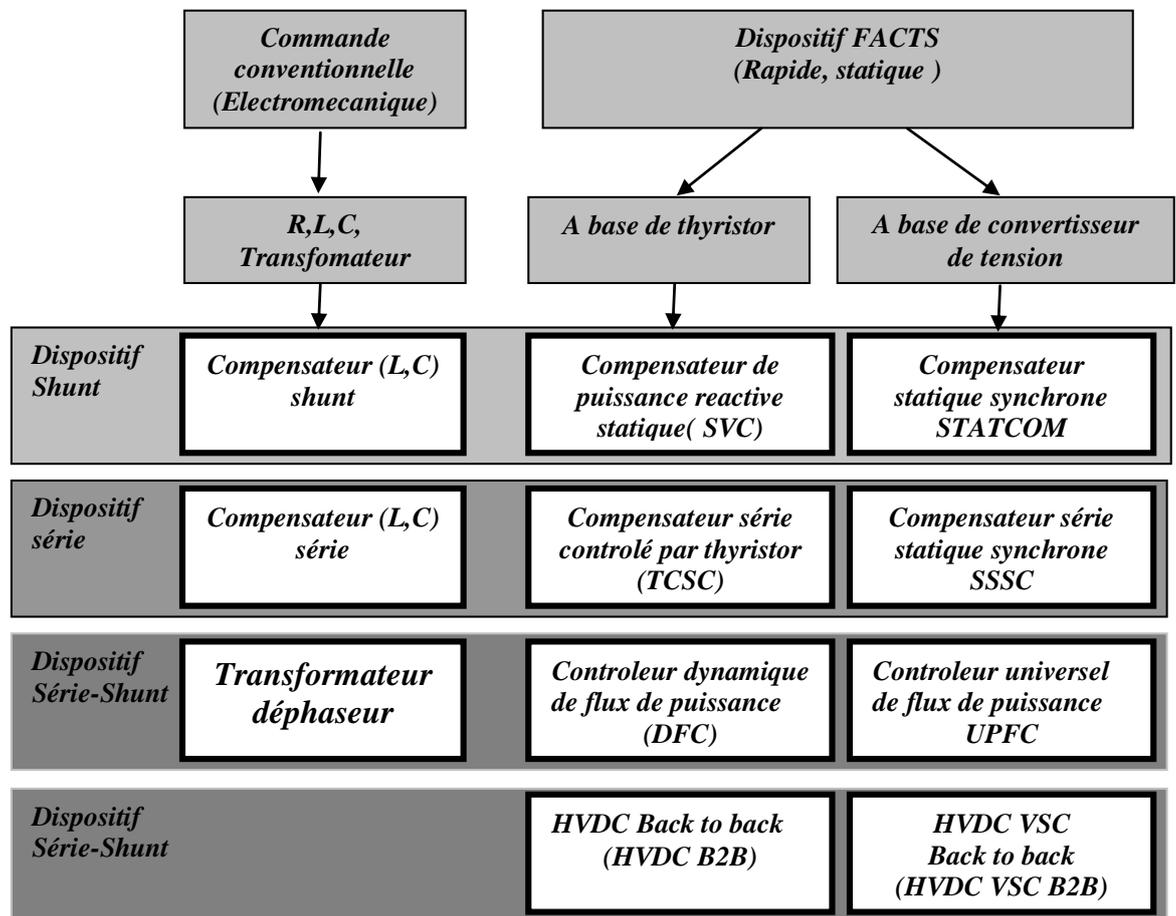


Fig. 1.1 Principaux Dispositifs FACTS [1]

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis

plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI 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 devisé en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries:** ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission. [1][8]
- **Compensateurs shunts:** Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquence contrôler de tension des noeuds. [1]
- **Compensateurs hybrides série-shunt:** c'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

II.4 Apports et Avantages des FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résultes par l'habilité des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équation (1.1) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que les impédances séries, impédances shunts, courant , tension angle de phase.

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

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

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

II.5 Applications Pratiques des Dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau de la figure 1.2 montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées. [1]

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

Fig. 1.2 Dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales

II.6 Structure des Principaux Dispositifs FACTS

II.6.1 contrôleurs parallèles

a) **SVC (Static Var Compensator):** [1][8] la structure de base de ce contrôleur est l'association des dispositifs TCR et TSC en parallèles connectés au réseau à travers un transformateur de couplage figure 1.3 :

- TCR (thyristor controlled reactor): c'est une réactance en série avec un gradateur, sa valeur est continuellement variable selon l'angle d'amorçage des thyristors.
- TSC (thyristor swithed capacitor): des capacités commandées par thyristors fonctionnant en pleine onde.

Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud.

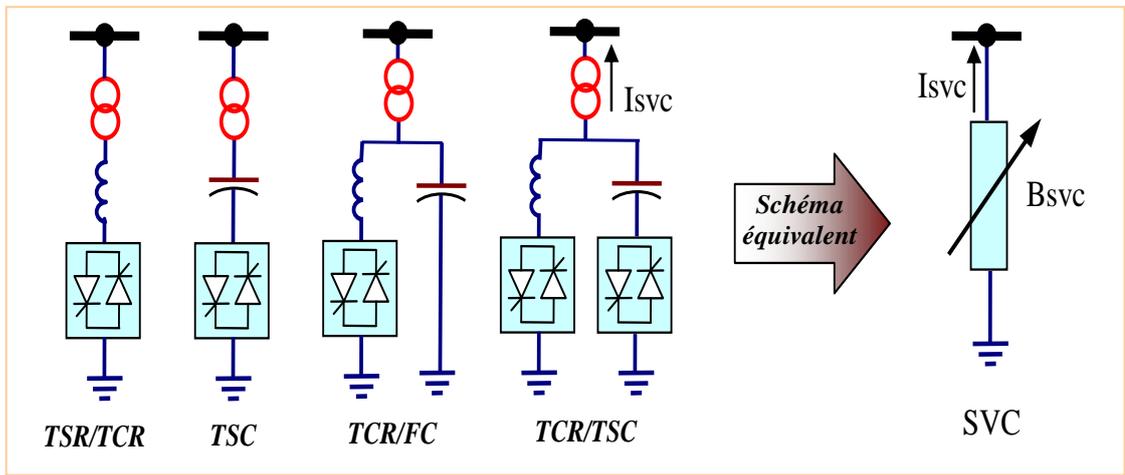


Fig1.3 structure d'un SVC, schéma équivalent

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

$$P_l = 0$$

$$Q_l = -|V_l|^2 B_{SVC}$$

b) **STATCOM (STATIC COMPensator):** C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage Fig1.3-a. Ce dispositif est l'analogue d'un

compensateur synchrone; et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques tel que sa dynamique rapide et son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones. [1][8]

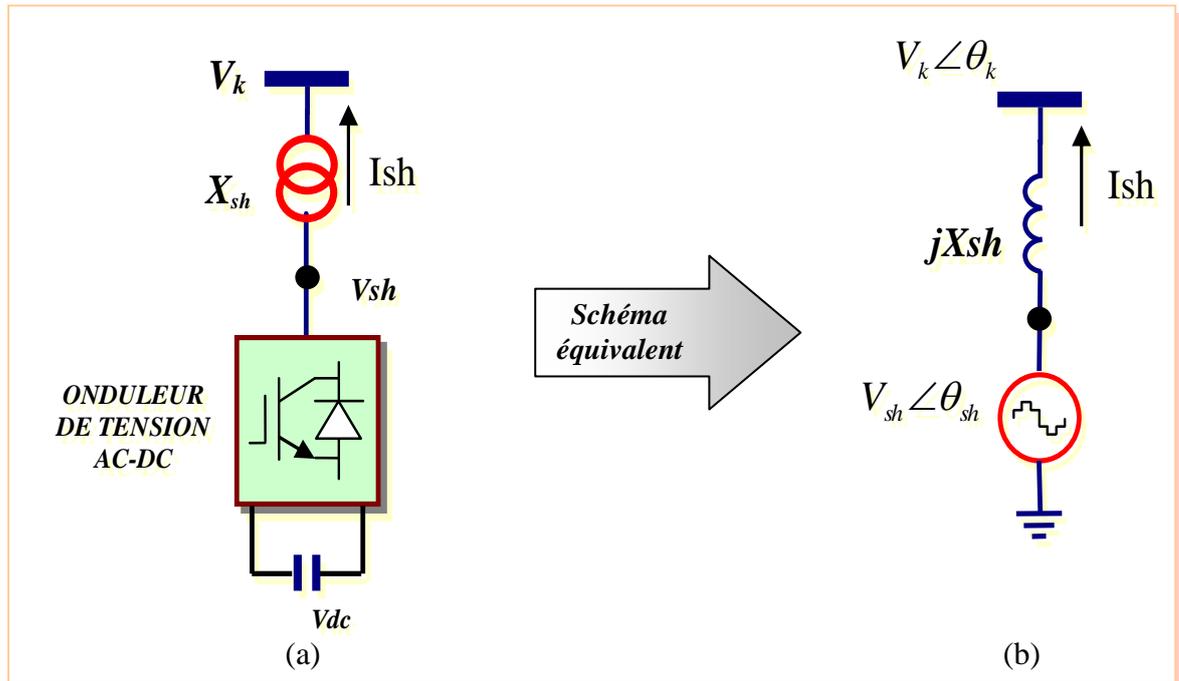


Fig15 (a) structure d'un STATCOM (b) schéma équivalent (d) caractéristique tension/courant

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation de la puissance réactive (1.14) suivante décrit le transfert de cette dernière avec le réseau électrique. [1][2].

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \quad (1.14).$$

- Si $|V_k| > |V_{sh}|$, alors Q_{sh} devient positive et le STATCOM absorbe de la puissance réactive.
- Si $|V_k| < |V_{sh}|$, alors Q_{sh} devient négative et le STATCOM fournit de la puissance réactive.

II.6.2 contrôleurs séries

a) **TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)**: il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité Fig.1.6. Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance X_{TCSC} qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné par la formule (1.15). [1][8]

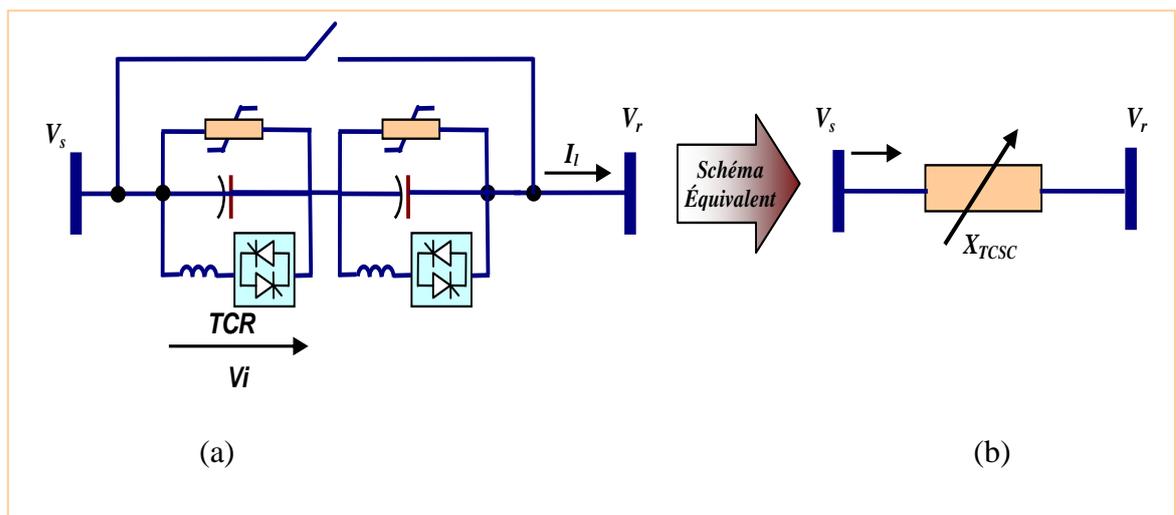


Fig1.6 (a) structure d'un TCSC, (b) Représentation par une susceptance variable

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - LC\omega^2} \quad (1.15)$$

En supposant que le TCSC est installé en série dans une ligne entre les deux jeux de barre l et m de la figure 1.6.b, la puissance qui transite entre ces deux jeu de barres est régit par l'équation (1.16) suivante:

$$P_{sr} = \frac{|V_s||V_r|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r) \quad (1.6)$$

b) **SSSC (Static Synchronous Series Compensator)** c'est l'un des plus important dispositifs FACTS; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure1.7. Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de

distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants. [1][8]

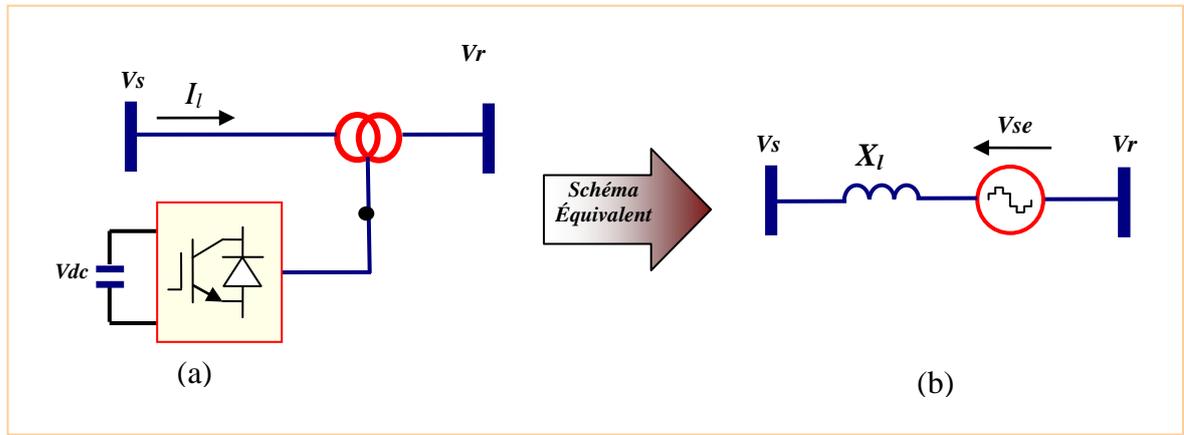


Fig1.7 (a) structure d'un SSSC, (b) schéma équivalent d'un SSSC

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (static phase shifter) ou d'une impédance série variable de compensation : il injecte une tension en quadrature avec une tension des extrémités de la ligne pour contrôler le flux de puissance active. Et comme se système ne consomme pas du réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockées dans les batteries de condensateur il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive. Sa caractéristique statique est donnée sur la figure1.8 suivante:

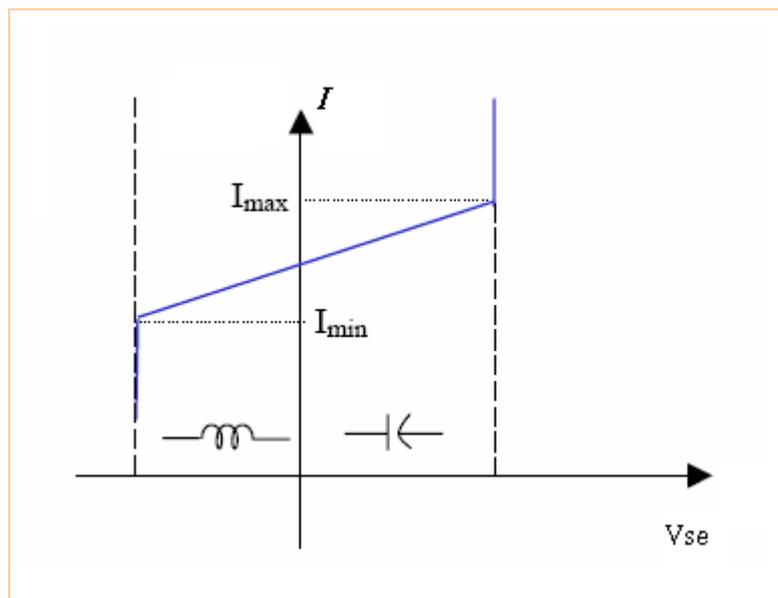


Fig1.8 caractéristique statique du SSSC

Dans le model adopté pour ce dispositif la valeur de la source de tension connectée en série et donnée par la formule (1.17):

$$V_{se} = |V_{se}|(\cos\delta_{se} + j \sin\delta_{se}) \quad (1.17)$$

L'amplitude et la phase de ce modèle V_{se} et δ_{se} sont ajustés en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire les puissances active et réactive spécifique qui transitent ce dispositif.

II.6.3 Contrôleurs hybrides série shunt

a) *SPS (Static Phase Shifter)*: le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les ancien transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle, la figure 1.9 donne un schéma de principe de ce dispositif et son schéma équivalent. [2][8]

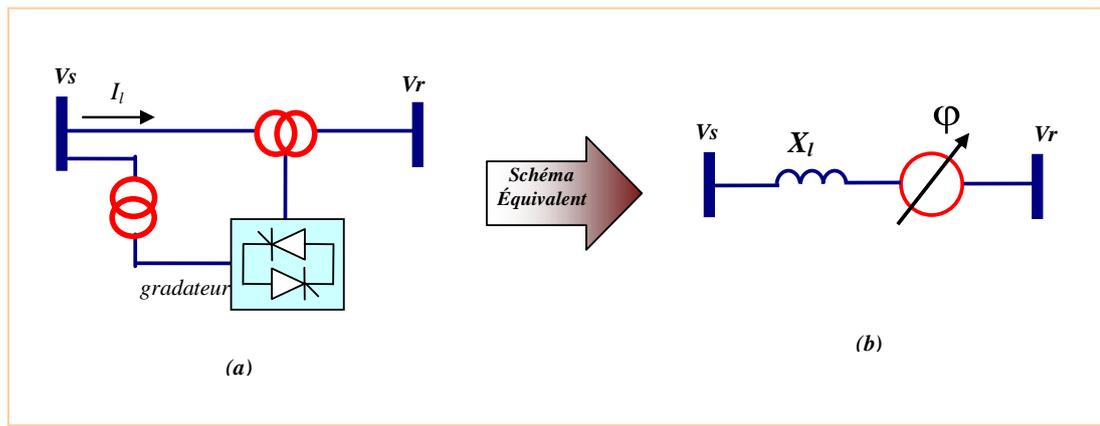


Fig 1.9 (a) structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS

Ce dispositif varie l'angle de phase de la tension aux extrémités de la ligne; son principe est basé sur l'injection d'une tension en quadrature avec la tension de l'extrémité de la ligne à déphaser. Cet équipement permet aussi un contrôle rapide du flux de la puissance active. La variable de contrôle de ce dispositif est l'angle de phase de la tension injectée " ϕ " qui est ajusté en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire un flux de puissance active spécifié. [2]

La puissance active qui transite dans cette ligne à travers le SPS est donnée par la formule suivante:

$$P_{sr}^{reg} = \frac{|V_s| \cdot |V_r|}{X_l} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r - \phi) \quad (1.18)$$

Un ajustement approprié de l'angle de phase φ permet un contrôle précis du flux de puissance active a travers le SPS.

b) **UPFC (unified power flow controller)**: L'UPFC est composé de deux convertisseurs de tension (onduleur) qui partagent le même condensateur dans leurs cotés continus et possédant un système de commande unifié, la figure 1.9 donne son schéma de principe et son schéma équivalent. [2]

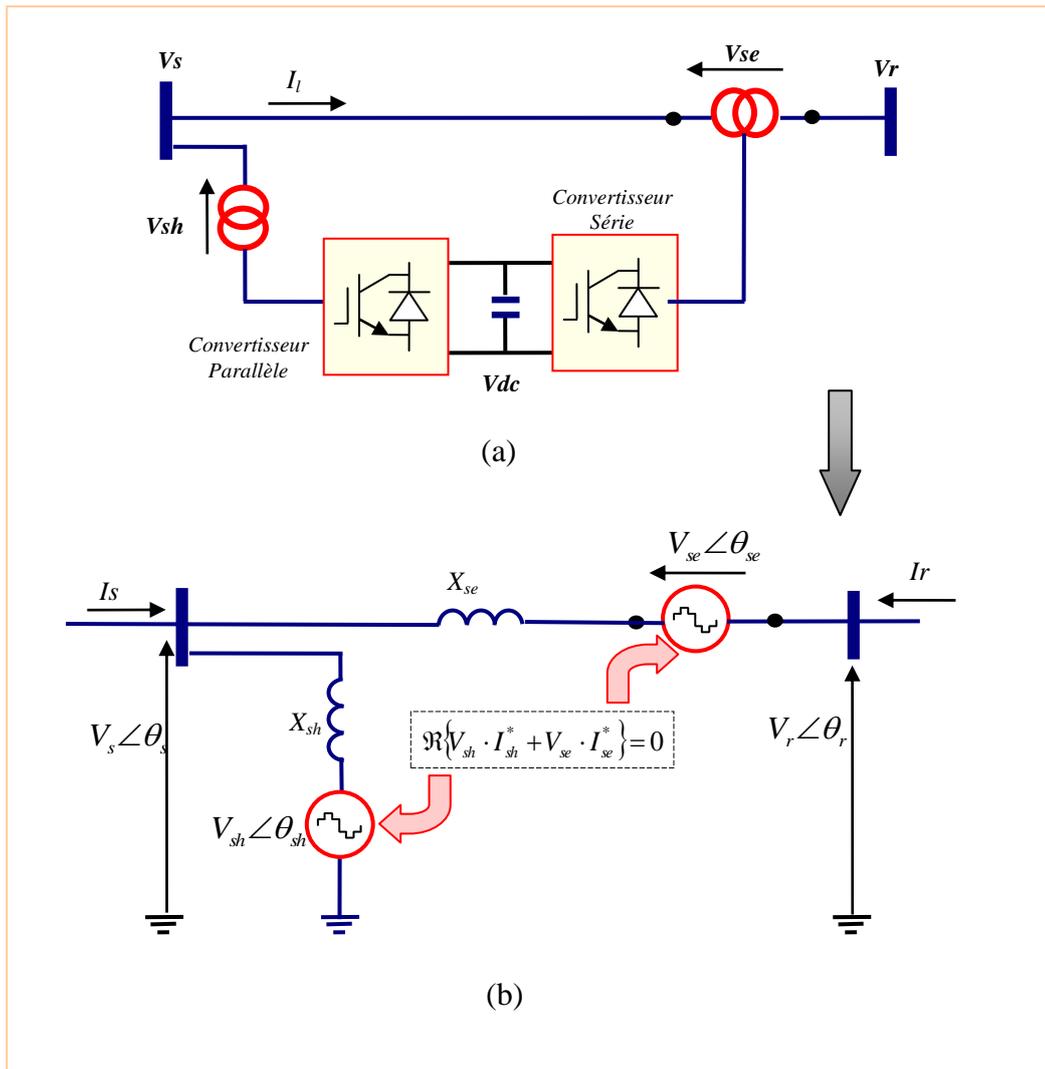


Fig1.9 (a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC

Le premier concept a été présenté par Gyugyi en 1999. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler simultanément la puissance active, la puissance réactive, les tensions aux extrémités de la ligne. Ces possibilités sont acquises par l'échange d'énergie entre les deux convertisseurs: la puissance active demandée par le convertisseur série est tirée du réseau par le convertisseur shunt à travers la partie continue

DC pour l'acheminée au jeu de barre "R". La tension de sortie du convertisseur série V_{se} est ajoutée à la tension du jeu de barre de départ "S" pour soutenir la tension du jeu de barre "R". De ce fait l'amplitude de la tension injectée V_{se} permet une régulation de la tension et la phase θ_{se} détermine le mode de contrôle du flux de puissance. [1][2][8]

III Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux types de compensation shunt et série appliquées au contrôle des réseaux électriques: contrôle de la chute de tension par la compensation de la puissance réactive et le contrôle du flux de puissance active et réactive en utilisant les compensateurs séries.

Aussi ce chapitre était une vue globale (overview) sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS d'une structure principalement à base d'onduleurs conçus avec les interrupteurs IGBT/GTO de technologie très avancée caractérisés par un temps de réaction très court qui permet une flexibilité du courant transité et par conséquence l'habilité de ces dispositifs de performer le fonctionnement du système énergétique et d'améliorer sa stabilité.

Chapitre II:

STATCOM et SSSC: Structure et Principe de Fonctionnement

I.1 Introduction

La plus significative différence entre la nouvelle approche des systèmes FACTS et la première génération de ces systèmes dits conventionnels est qu'on n'utilise plus des condensateurs et des réacteurs discrets pour la compensation série ou shunt, mais on conçoit des systèmes à base de convertisseurs statiques DC-AC (onduleur de tension ou de courant) pour réaliser l'échange de la puissance active ou réactive avec le réseau électrique. [11]

Il est à noter que ces convertisseurs statiques sont des onduleurs réversibles qui transforment l'énergie électrique de sa forme alternative en continue et vice versa (DC-AC et AC-DC), donc pour leurs applications dans les systèmes FACTS le transfert de la puissance s'effectue également du côté DC vers le côté AC et du côté AC vers le côté DC, selon la fonction pour laquelle ils sont installés.

I.2 L'onduleur de tension (VSC) dans un réseau électrique:

L'action d'un onduleur de tension dans un réseau électrique peut être expliquée, le plus simplement, en considérant une source de tension connectée à travers une réactance pure ($Z_t = X_t; R_t = 0$) comme présentée dans la figure II.1. L'idée de base est fondée sur le contrôle de l'amplitude et de la phase de la chute de tension aux bornes de la réactance définissant la quantité et la direction de la puissance active et réactive qui circule à travers cette réactance. [8].

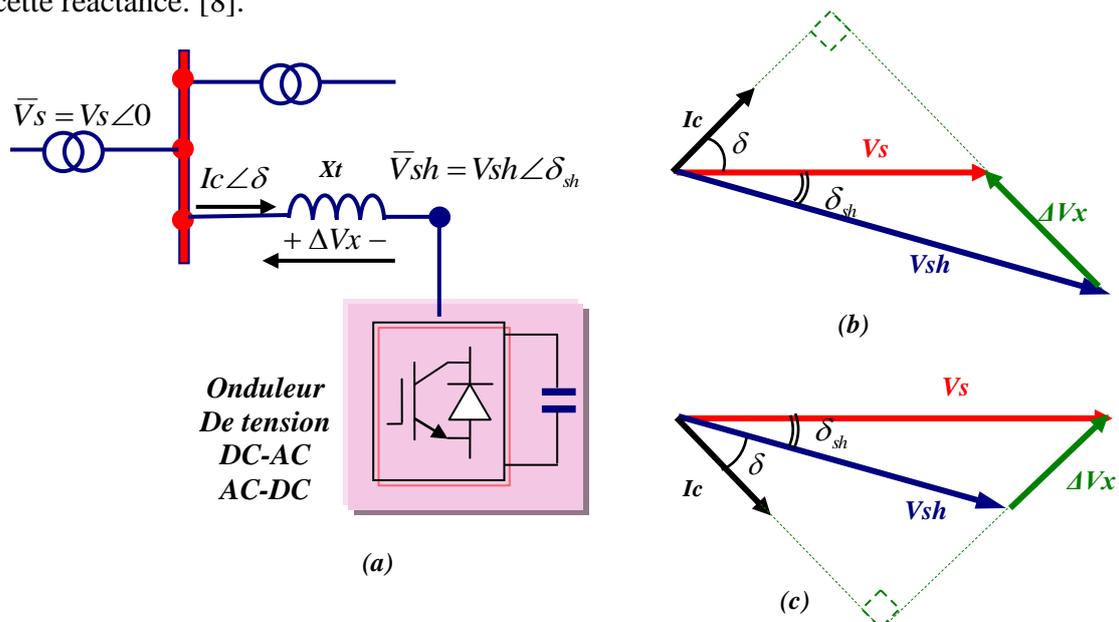


Fig. II.1 Onduleur de tension connecté à un réseau

En posant la tension au point de connexion $\bar{V}_s = V_s \angle 0$ comme référence des phases et la composante fondamentale de la tension de l'onduleur de tension (VSC) soit $\bar{V}_{sh} = V_{sh} \angle \delta_{sh}$. Les diagrammes vectoriels des figures II.1 (a) et (b) représentent la séquence positive de la fondamentale \bar{V}_{sh} en avance et en arrière respectivement ; les puissances active et réactive échangées avec le réseau sont données par les équations :

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{V_s V_{sh}}{X_t} \sin \delta_{sh} \\ Q &= \frac{V_s^2}{X_t} - \frac{V_s V_{sh}}{X_t} \cos \delta_{sh} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Discussion:

En se référant aux équations ci-dessus (II.1) et à la figure II.1 on peut tirer ces observations :

- La tension du VSC (voltage source converter) \bar{V}_{sh} est décalée d'un angle δ_{sh} par rapport à la tension \bar{V}_s , et le courant injecté est décalé par $\frac{\pi}{2}$ de la chute de tension ΔV_x au borne de la réactance.
- L'écoulement de la puissance active entre le réseau et le convertisseur VSC est commandé par l'angle de déphasage δ_{sh} : échange de la puissance active est du réseau vers le convertisseur si $\delta_{sh} > 0$, et depuis le convertisseur vers le réseau si $\delta_{sh} < 0$
- L'échange de la puissance réactive est déterminé principalement par l'amplitude de la tension du réseau \bar{V}_s et celle de la tension de sortie du convertisseur \bar{V}_{sh} : pour $\bar{V}_{sh} > \bar{V}_s$, l'onduleur génère la puissance réactive et l'injecte dans le réseau; et si $\bar{V}_{sh} < \bar{V}_s$ il consomme la puissance réactive du réseau.

Plusieurs dispositifs FACTS sont constitués dans leurs structures de base par des convertisseurs de tension et selon les fonctions pour lesquelles ils sont destinés ils doivent être connectés et prennent des topologies spécifiques; parmi ces topologies le convertisseur connecté en série en parallèle ou hybride (série-parallèle).

Dans ce mémoire on s'intéressera à deux dispositifs de la famille des FACTS, destinées à la compensation et au contrôle des réseaux électriques, à base d'onduleurs de tension connectés au réseau électrique: *en parallèle* est connu sous l'appellation

STATCOM et en série dits SSSC pour lesquels on essayera d'étudier les principes de fonctionnements et leurs rôles dans contrôle des réseaux électriques.

II. Static Synchronous Compensator (STATCOM)

II.1 Description

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

- le STATCOM de $\pm 80\text{MVAR}$ appliqués à un réseau de transport de 154KV à Inuyama au Japon et à été commercialisé depuis 1991 par Kansai Electric Power Corporation et Mitsubishi 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 la version des SVC composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme représenté dans la figure II.2. [1][11]

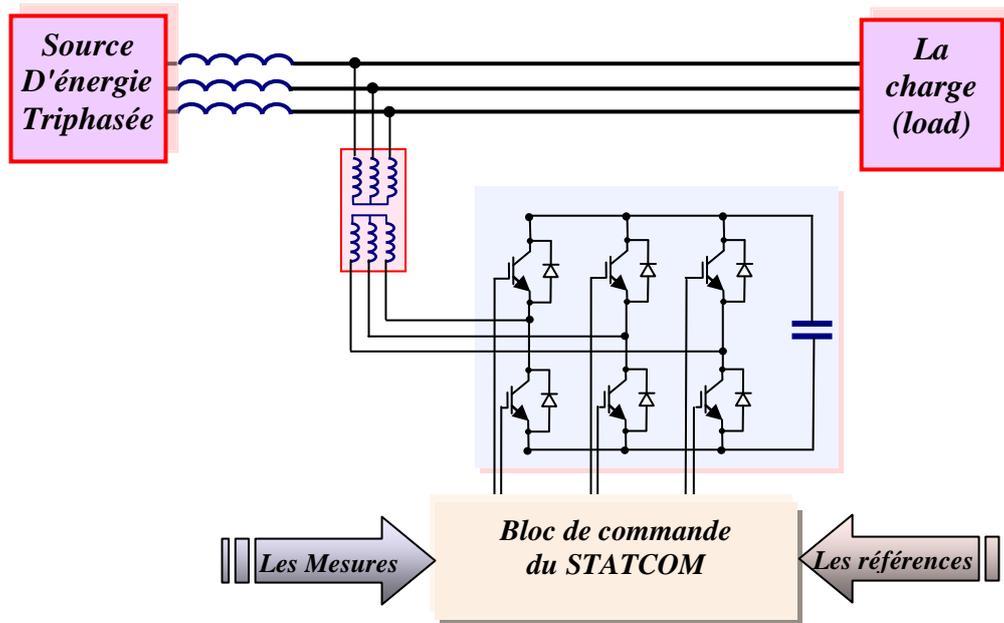


Fig II.2 : structure de base d'un STATCOM couplé au réseau

La définition du STATCOM selon IEEE est:

STATCOM: est un générateur synchrone statique fonctionnant comme un SVC (Static Var Compensator) connecté en parallèle dont le courant de sortie (capacitif ou inductif) peut être contrôlé indépendamment de la tension AC du réseau.[11]

II.2 Principe de Fonctionnement

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

En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM comme le résume la figure II.3. [11]

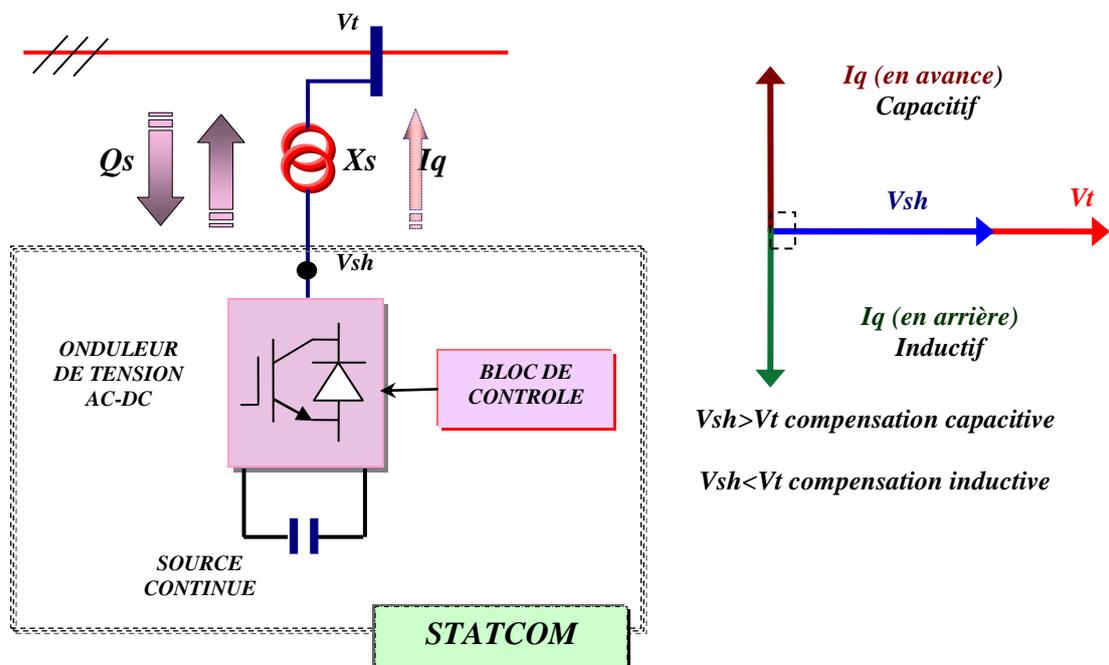


Fig. II.3 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

Considérant le STATCOM de la figure II.2, le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source de tension, ligne et charge) est donné par la figure II.4.

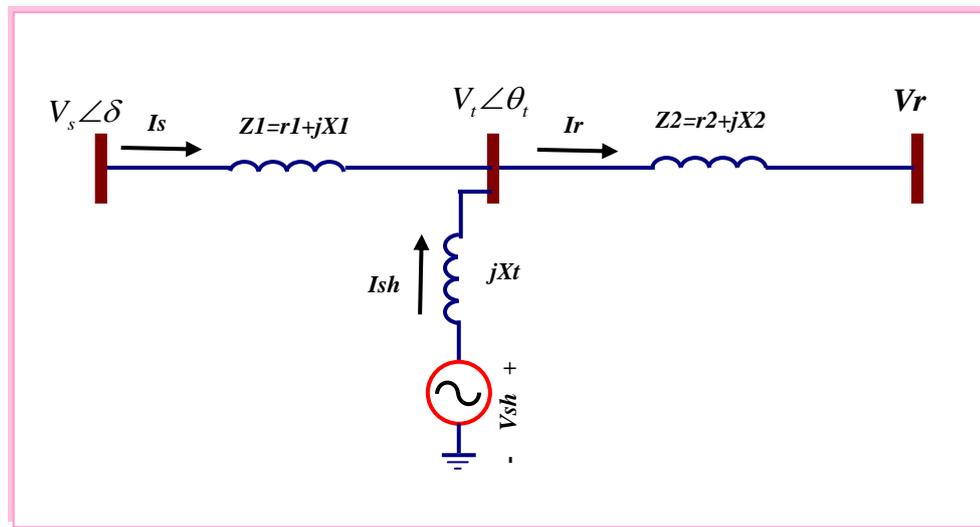


Fig.II.4 schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \quad (2.2)$$

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

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_t (\bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_{sh}^* - V_t^2}{-jX_t} \quad (2.3)$$

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

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad (2.3-a)$$

$$Q_{sh} = V_t (V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad (2.3-b)$$

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

$$\text{Donc: } P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0$$

$$\text{D'où la condition } \theta_t - \theta_{sh} = 0. \Rightarrow \theta_{sh} = \theta_t$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM \bar{V}_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement. [7][11]

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante.

Comme les tensions V_{sh} et V_t (Fig. II.4) sont en phase le courant I_{sh} du STATCOM, en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations suivantes:

En admettant que la tension V_{sh} est sur l'axe d (comme référence des phases) :

$$V_{shd} = V_{sh} ; V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{shq} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (2.4)$$

$$Q_{sh} = V_{sh} \cdot I_{shq} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \quad (2.5)$$

A partir de l'équation (2.5) il paraît claire que si le module de la tension du STATCOM V_{sh} égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{sh} > V_t$, donc $Q_{sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau. Fig. II.5 (a), et si $V_{sh} < V_t$ alors $Q_{sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif Fig.II.5 (b).

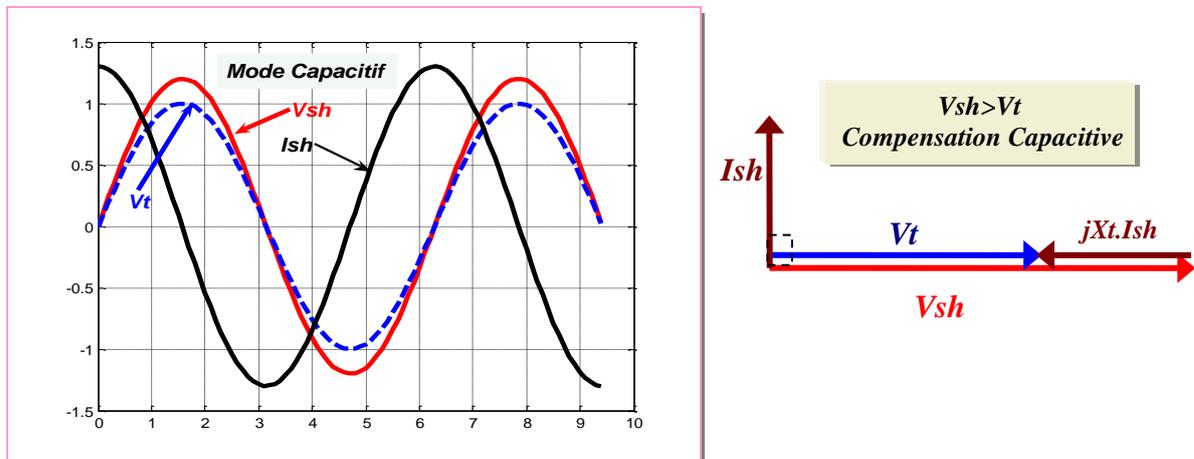


Fig. II.5.a courbes simulées du courant et tensions en mode capacitif

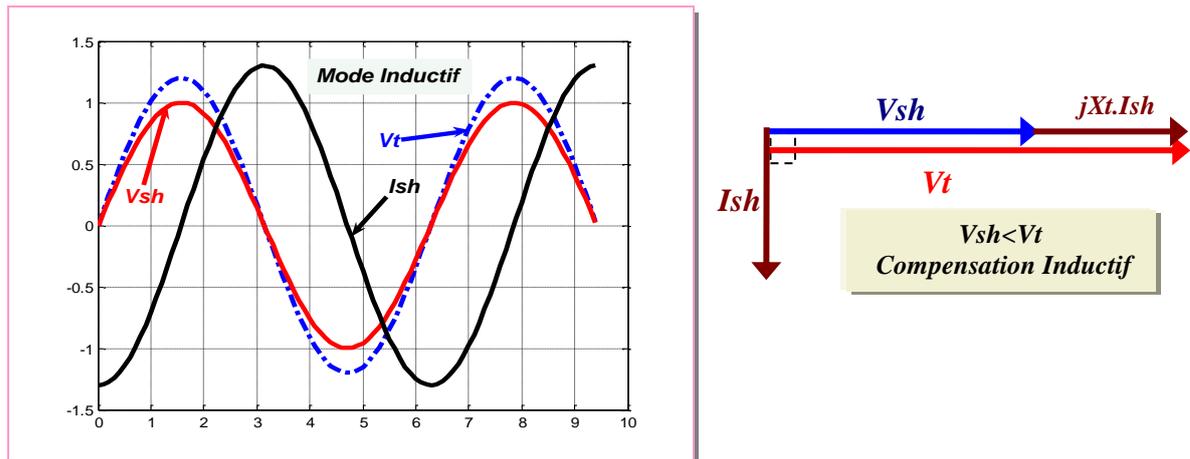


Fig.II.5. (b) courbes simulées du courant et tensions en mode inductif

NB: La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif.

II.3 Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la figure II.4 qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un STATCOM installé dans une ligne de transport. Les équations des courants I_s , I_{sh} et I_r sont les suivants:

$$\begin{aligned} \bar{I}_s &= \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \\ \bar{I}_{sh} &= \frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \\ \bar{I}_r &= \frac{jX_t + \bar{Z}_1\bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + jX_t)\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

$$P_s = \text{Re}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Re} \left[\bar{V}_s \times \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.7-a)$$

$$Q_s = \text{Im}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Im} \left[\bar{V}_s \times \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.7-b)$$

En visualisant sur la courbe de la figure II.6 les puissances actives et réactives (Q_s en fonction P_s) délivrées par la source pour de différentes valeurs de la tension V_{sh} injectée par le STATCOM, on voit que la puissance réactive Q_s diminue (*compensée*) ce qui explique l'augmentation du réactive injectée par le compensateur shunt dans le réseau. [7][12]

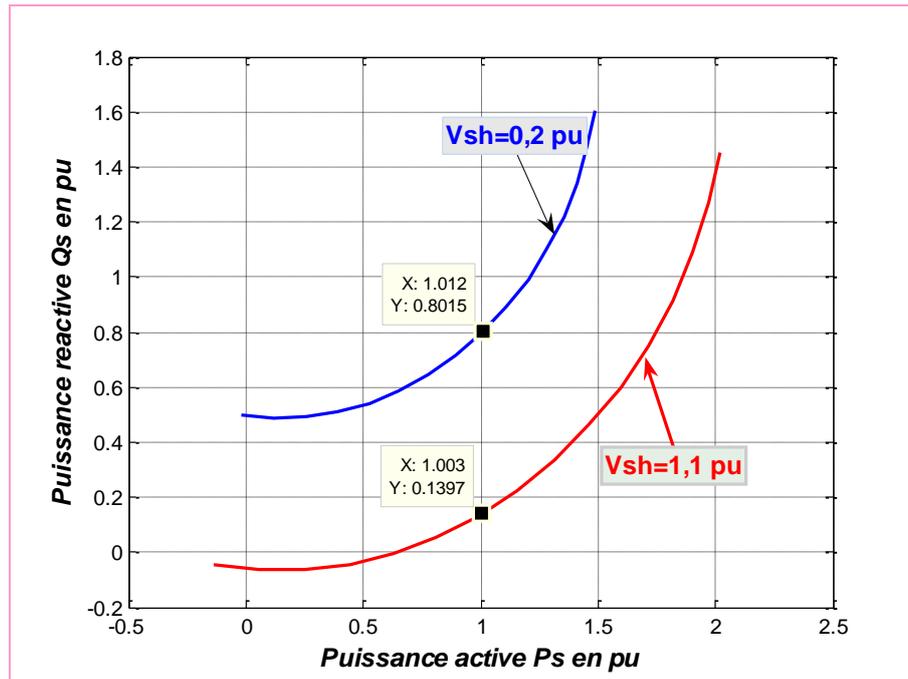


Fig.II.6. Q_s en fonction de P_s pour différentes valeurs de V_{sh}

Par exemple, sur la même courbe de la figure II.6, afin de transmettre une puissance active P_s égale 1.0 pu, la puissance réactive Q_s doit être égale à 0.8 pu si la tension à la sortie de l'onduleur V_{sh} est égale à 0.2 pu. Par contre Q_s diminue jusqu'à 0.13 pu si la tension injectée $V_{sh}=1.1$ pu pour transmettre la même quantité de la puissance active P_s .

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations 2.8 (a) et (b) sont représentées sur la figure II.7.

$$P_{sh} = \text{Re}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Re} \left[\bar{V}_{sh} \times \left(\frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.8-a)$$

$$Q_{sh} = \text{Im}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Im} \left[\bar{V}_{sh} \times \left(\frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.8-b)$$

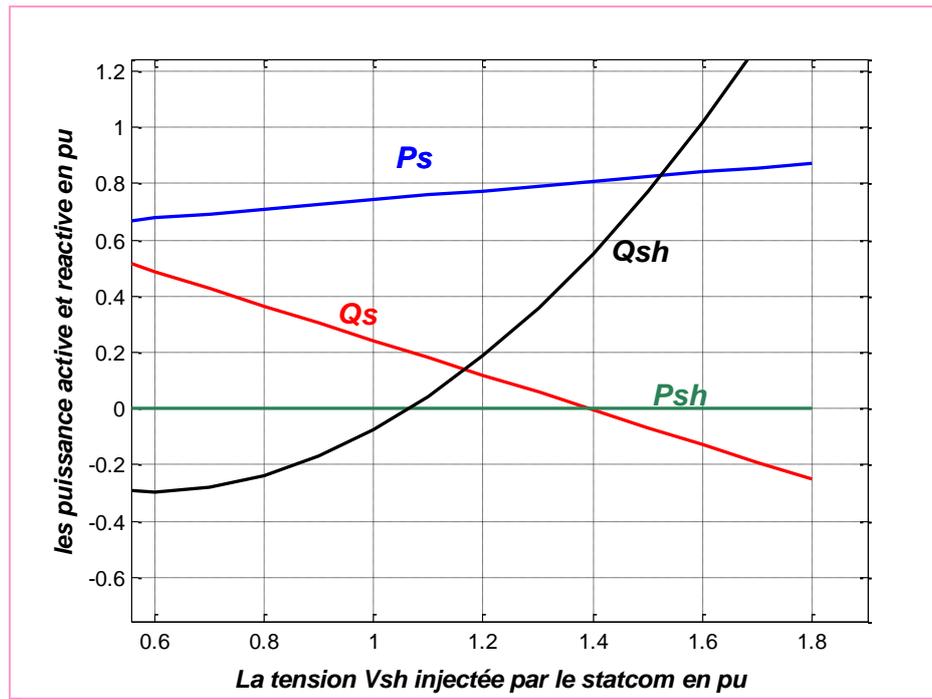


Fig.II.7. P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}

Sur la caractéristique de la figure II.7 qui représente la variation des puissances active et réactive P_s et Q_s transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive injectées par le STATCOM P_{sh} et Q_{sh} , en fonction des variations de l'amplitude de la tension V_{sh} il paraît clair que l'influence de la tension V_{sh} sur la puissance réactive Q_s est plus grand que sur la puissance P_s . Et on voit qu'en augmentant la tension V_{sh} la puissance réactive injectée par le STATCOM augmente et par conséquent la puissance réactive injectée au réseau par le générateur diminue.

Nous pouvons constater aussi que la capacité de transit de la puissance active est améliorée. Celle-ci était occupée par la puissance réactive. [11][12]

III. Compensateur Static Serie Synchronne (SSSC)

III.1 Description

Le dispositif FACTS à base d'onduleur de tension connectée en série au réseaux électrique et appelé Static Synchronous Série Compensator (SSSC) à été propose par Gyugyi en 1989; et jusqu'au récent progrès qu'a connus les semi-conducteurs de puissance, le SSSC n'est pas utilisée dans la majorité des cas de besoins de compensation série à cause de son prix très accru. Il est généralement combine avec un STATCOM et fonctionne en tant qu'un UPFC [13] [19]

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 (condensateur) et l'ensemble lié à la ligne de transport en série à travers un transformateur de couplage comme représente la figure II.8.

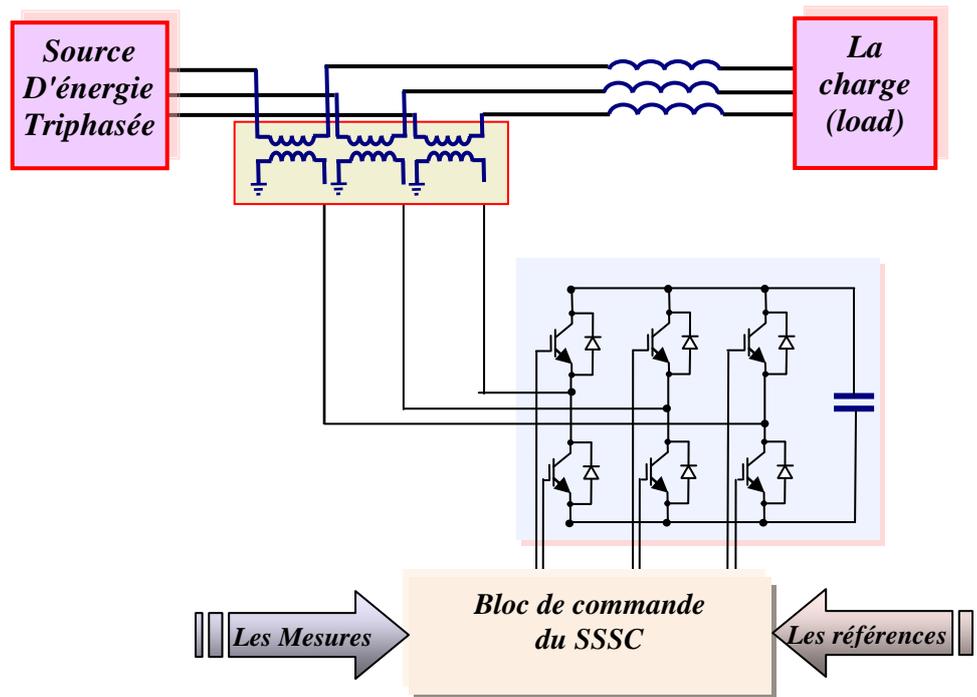


Fig. II.8 Structure de base d'un SSSC couplé au réseau

Selon IEEE:

Le SSSC: 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. [11]

III.2 Principe de fonctionnement

Le SSSC est un générateur statique synchrone de la famille des compensateurs série fonctionnant sans source d'énergie extérieure. Son principe de fonctionnement peut être expliqué en ce referant au schéma et au phaseur la figure II.9

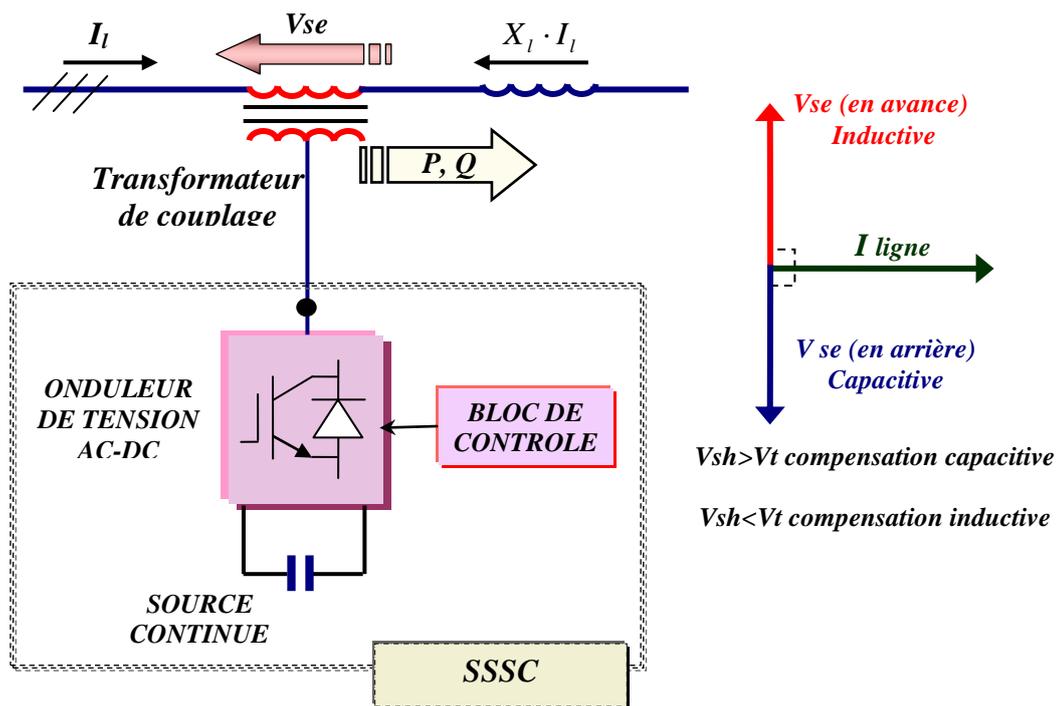


Fig. II.9 SSSC (static synchronous serie compensator)

Le SSSC délivre une tension triphasée V_{se} , à la fréquence du réseau, en quadrature ($\pm 90^\circ$) avec le courant de la ligne et contrôlable afin d'augmenter ou diminuer la tension à travers la ligne représentée par sa réactance X_l selon le mode de compensation capacitif ou inductif respectivement (Fig. II.10), mais comme la réactance de la ligne ne varie pas réellement, c'est le courant dans la ligne qui sera affecté par cette variation et par conséquent les puissances correspondantes. [8][11]

Idéalement la tension V_{se} est à $\pm 90^\circ$ du courant de la ligne ce qui fait qu'aucun échange de la puissance active est entre le réseau et le SSSC. Pratiquement il y a toujours une petite composante de cette tension $V_{se,d}$ en phase avec le courant I_l qui génère une petite quantité de la puissance active pour couvrir les pertes dans le convertisseur.

On peut expliquer les différents modes de compensation capacitive et inductive en ce référant aux diagrammes vectoriels de la figure II.11 qui suit en admettant le schéma équivalent d'un SSSC installé dans un réseau électrique simple représenté sur la figure (Fig.II.10). [13][15]

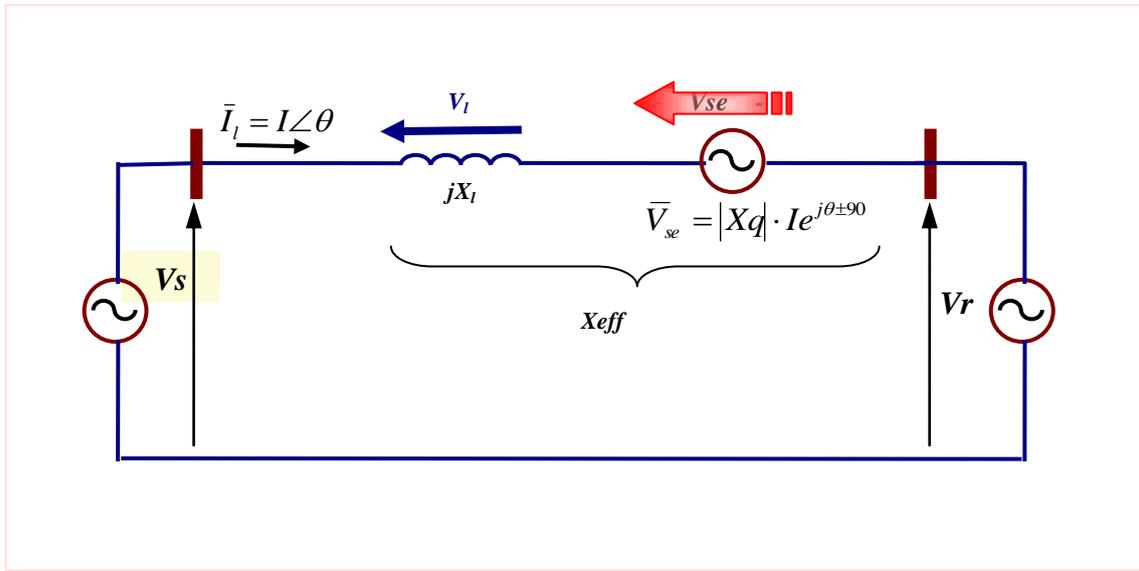


Fig. II.10 schéma équivalent d'un SSSC dans un réseau simple

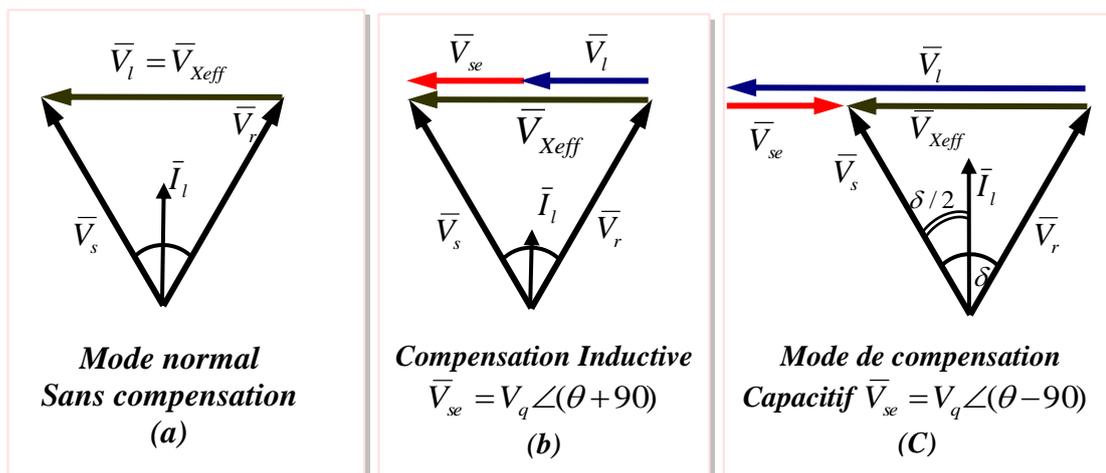


Fig. II.11 Diagrammes de phase des différents modes de fonctionnement de l'SSSC

- Le diagramme de la figure (a) présente l'état de fonctionnement normal du réseau (état d'équilibre), la tension au borne de la réactance effective V_{Xeff} est égale à la

tension aux bornes de la ligne de transport sans compensation la où le degré de compensation K est nul. $K = \% \text{ compensation} = \frac{X_q}{X_l} \times 100$ avec $X_q = \frac{V_q}{I_l}$.

- Dans le mode de compensation inductif, le courant de la ligne I_l diminue en augmentant le degré de compensation K de 0% à 100%. Du diagramme (b) on voit que pour maintenir V_s, V_r et δ constants la variation dans l'amplitude de V_{se} se répercute directement sur la tension V_l et chaque augmentation dans V_{se} entraîne une diminution dans V_l et par conséquent dans le courant I_l .
- En mode capacitif le courant dans la ligne augmente avec l'augmentation du niveau de compensation; la tension V_{se} injectée en anti-phase avec la tension V_l (-90° en arrière du courant I_l) force la tension V_l à augmenter pour garder l'angle de charge constant ainsi que les tensions aux extrémités de la ligne Fig.II.11(c).

Dans la compensation série en considérant le schéma équivalent de la figure II.10 le courant dans la ligne est donné par l'équation 2.10:

$$\bar{I}_l = \bar{I}_{se} = \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se}}{jX_l} \quad (2.9)$$

Dan l'hypothèse d'une ligne sans perte la puissance injectée dans cette dernière par le SSSC est :

$$S_{SSSC} = (\bar{V}_r - \bar{V}_s) \cdot \bar{I}_{se}^* = \frac{|\bar{V}_s - \bar{V}_r|^2 - (\bar{V}_s - \bar{V}_r) \cdot \bar{V}_{se}^*}{jX_l} = P_{SSSC} + jQ_{SSSC} \quad (2.10)$$

D'où on peut tirer les formules des puissances active et réactive injectées par le SSSC dans la ligne:

$$P_{SSSC} = \frac{V_{se} (V_r \sin(\theta_r - \alpha) - V_s \sin(\theta_s - \alpha))}{X_l} \quad (2.11-a)$$

$$Q_{SSSC} = \frac{-V_s (V_s - V_{se} \cos(\theta_s - \alpha)) + V_r (V_r + V_{se} \cos(\theta_r - \alpha)) - 2 \cdot V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r)}{X_l} \quad (2.11-b)$$

Où V_s et θ_s sont le module et la phase de la tension \bar{V}_s , V_r et θ_r sont le module et la phase de la tension \bar{V}_r et V_{se} et α sont le module et la phase de la tension \bar{V}_{se} respectivement.

Pour que ce dispositif (le SSSC) n'échange aucune puissance active avec le réseau il doit satisfaire la condition $P_{SSSC} = 0$. et donc d'après l'équation 2.11 (a):

$$V_r \sin(\theta_r - \alpha) - V_s \sin(\theta_s - \alpha) = 0 \quad (2.12)$$

L'équation 2.12 est une condition sur la phase α de la tension de l'SSSC, la tension série injectée doit être toujours orthogonale au courant de la ligne pour assurer une pure compensation réactive. [7][13]

III.3 Effet de la compensation série (SSSC) sur le réseau électrique

L'effet de la compensation série sur une ligne de transport électrique peut être investiguer analytiquement en supposant la tension $|\bar{V}_s| = |\bar{V}_r| = V$. Les équations régissant le flux de puissance active et réactive, dans une ligne non compensée, décrites au chapitre I devienne :

$$P_s = \frac{V^2}{X_l} \sin \delta$$

$$Q_s = \frac{V^2}{X_l} (1 - \cos \delta)$$

Le diagramme vectoriel des tensions de la ligne de transport, lorsque $|\bar{V}_s| = |\bar{V}_r| = V$ et V_{se} en quadrature avec le courant de la ligne, est donné par la figure II.11 sur laquelle on constate que l'angle de phase du courant de la ligne est $\delta/2$; l'expression du courant sera:

$$I_l = \frac{[V \sin(\delta) + V_{se} \cos(\delta/2)] + j[V + V \cos(\delta) + V_{se} \sin(\delta/2)]}{X_l} \quad (2.13)$$

D'où on peut exprimer la puissance transportée par cette ligne par les équations suivantes, en prenant V_r comme référence des phases:

$$P_s = \frac{V^2}{X_l} \sin(\delta) + \frac{V \cdot V_{se} \cos(\delta/2)}{X_l} = P_{old} + \Delta P \quad (2.14)$$

$$Q_s = -\frac{V^2}{X_l} (1 - \cos(\delta)) - \frac{V \cdot V_{se} \sin(\delta/2)}{X_l} = Q_{old} + \Delta Q \quad (2.15)$$

On comparant ces équations avec ceux d'une ligne sans compensation on trouve que les puissances active et réactive transmises sont augmentées par les termes $(\frac{V \cdot V_{se} \cos(\delta/2)}{X})$

et $\left(\frac{V \cdot V_{SE} \sin(\delta/2)}{X}\right)$; ces puissances additionnelles sont fonction de l'amplitude de la tension série V_{se} injectée par l'SSSC. [12][13]

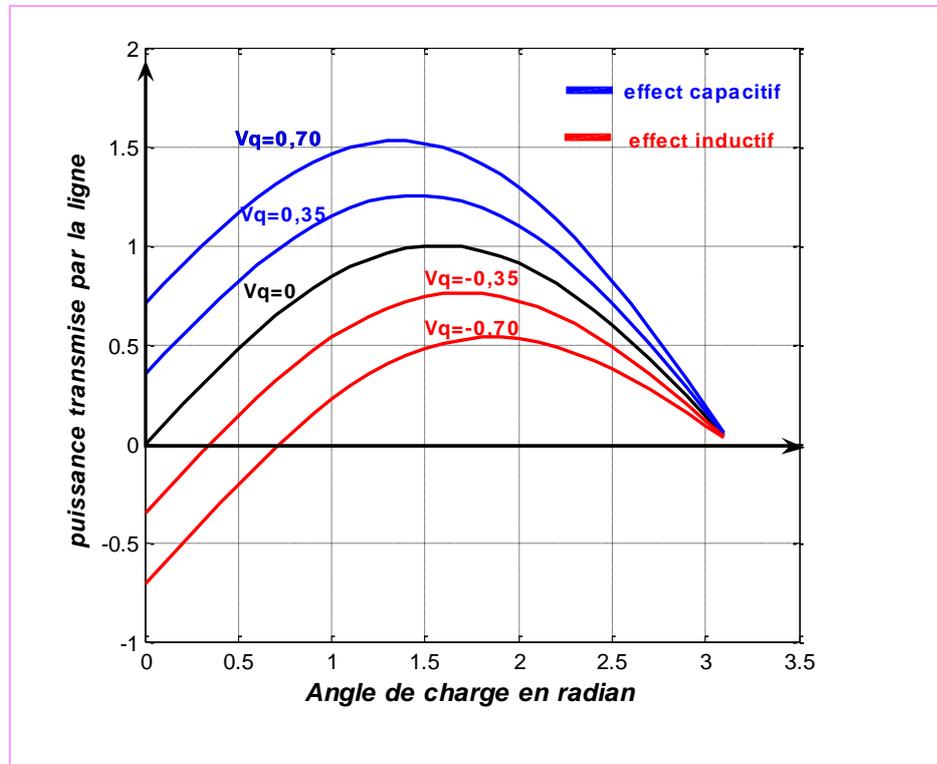


Fig. II.12 la puissance transportée fonction de la compensation série

Selon les courbes de la figure II.12 qui représentent la variation de la puissance active en fonction de l'angle de charge pour différentes valeurs de la tension injectée V_{se} et conformément à l'équation (2.14), on constate qu'un SSSC destiné au contrôle du flux de puissance dans une ligne électrique peut augmenter ou diminuer ce dernier avec le même degré simplement en inversant la polarité de la tension V_{se} injectée. Aussi il paraît clair, d'après ces courbes, l'augmentation de la capacité de transport de la ligne par une compensation capacitive. [12][13]

Aussi on peut voir l'effet de la compensation série sur le flux de puissance réactive en traçant la courbe de celle-ci en fonction de la puissance active pour plusieurs valeurs de la tension série injectée, voir la figure II.13

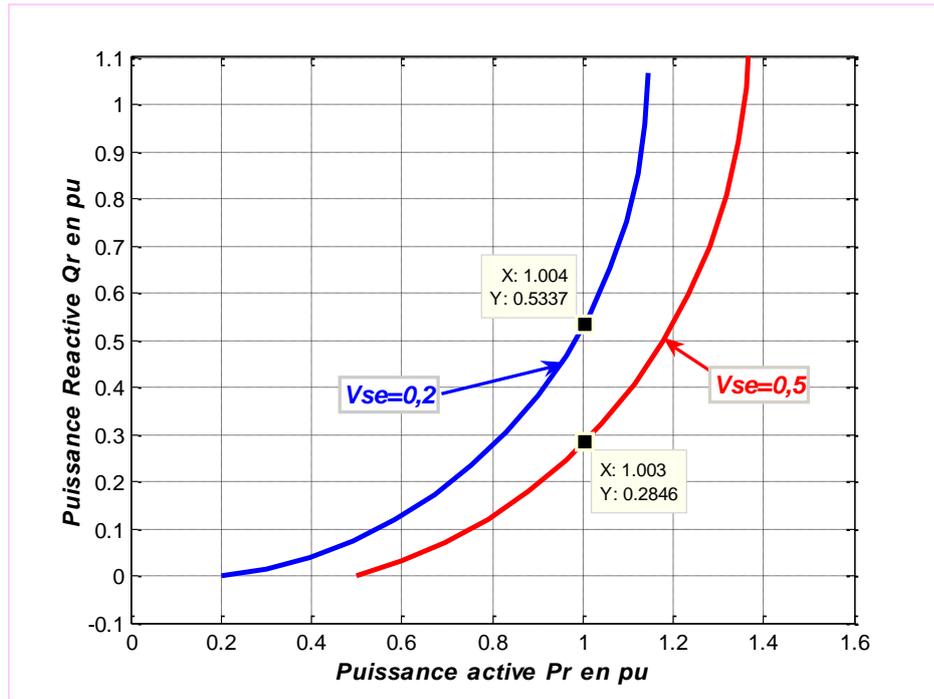


Fig. II.13 Q_r en fonction de P_r pour différentes valeurs de V_{se}

L'injection d'une tension série plus élevée fait diminuer la puissance réactive à transportée pour le même flux de puissance active:

Pour transporter donc une puissance active de UN pu par une ligne électrique avec une tension série de l'SSSC $V_{se}=0,2$ pu on doit une puissance réactive $Q_s=0,53$ pu, par contre si la tension série sera $V_{se}=0,5$ pu la puissance réactive à transmettre diminue jusqu'à 0,28 pu en transportant la même valeur (un pu) de la puissance active $P_s=1$ pu.

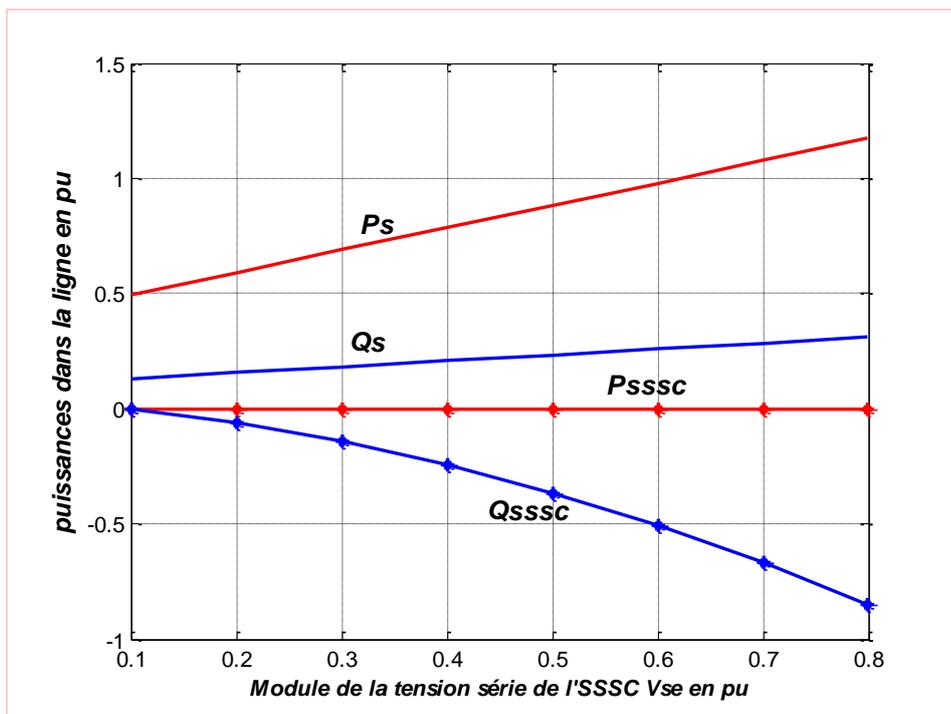


Fig. II.13 $P_s, Q_s, P_{sssc}, Q_{sssc}$ en fonction de $|V_{se}|$

De même on peut voir clairement les variations des puissances dans cette ligne électrique à partir de la figure ci-dessus "Fig. II.13" qui prouve qu'on injectant une tension série en quadrature avec le courant de la ligne aucun échange de puissance active n'aura lieu entre le SSSC et le réseau électrique, et que l'augmentation de l'amplitude de la tension série injectée de l'SSSC influe beaucoup plus sur la puissance active que sur la puissance réactive à transportée.

IV Conclusion

La théorie de la compensation série et parallèle avec une source de tension à base des semi-conducteurs de haute technologie (GTO, IGBT) a été présentée dans ce chapitre.

Ainsi nous avons essayez de démontrer les bénéfices de la compensation de la puissance réactive dans un réseau électrique et présenter l'effet des compensateurs STATCOM et SSSC sur le flux de puissance active et réactive et leurs contrôle dans le système électrique.

Les avantages de tels compensateurs dans le contrôle des réseaux électriques par rapport aux autres types de compensateurs traditionnels sont démontrés.

Chapitre III:

Modélisation et Commande du STATCOM et du SSSC

I. Introduction

Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électriques, série ou parallèle, sont très utiles sinon obligatoire pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande des dispositifs (FACTS) à base de ces convertisseurs.

La description mathématique est basée sur la transformation du système tri phase à un système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par les transformation de CONCORDIA et PARK respectivement afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d,q) (Annexe B). Pour cette modélisation nous avons opté pour les hypothèses suivantes:

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que le fondamentale.
- L'inductance de fuite du transformateur de couplage Parallèle du STATCOM est représentée par l'inductance L_p .
- L'inductance de la ligne plus l'inductance de fuite du transformateur de couplage série de l' SSSC sont représentées par l'inductance L_s .
- Pour simplification du modèle mathématique le système d'unité relative est adopté où les grandeurs I_B et U_B sont des grandeurs de base:

Donc:

$$I_{pu} = \frac{I}{I_B} ; \quad U_{pu} = \frac{U}{U_B} ; \quad Z_{pu} = \frac{U_B}{I_B}$$

$$L_{pu} = \frac{X_{pu}}{\omega_B} ; \quad R_{pu} = \frac{R}{Z_B} ; \quad C_{pu} = \frac{1}{\omega_B C Z_B}$$

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

II. 1 Modélisation du STATCOM

II.1.1 Modèle Mathématique Simplifié:

Le STATCOM, comme il était déjà décrit dans le chapitre précédent, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure III.1 en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecte ce dispositif:

Pour le modèle simplifié du STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage ; le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur. [16][17]

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on a:

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (3.1)$$

Où les grandeurs sont en triphasé:

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ Et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix}.$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe (α, β) on multipliant l'équation (3.10) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

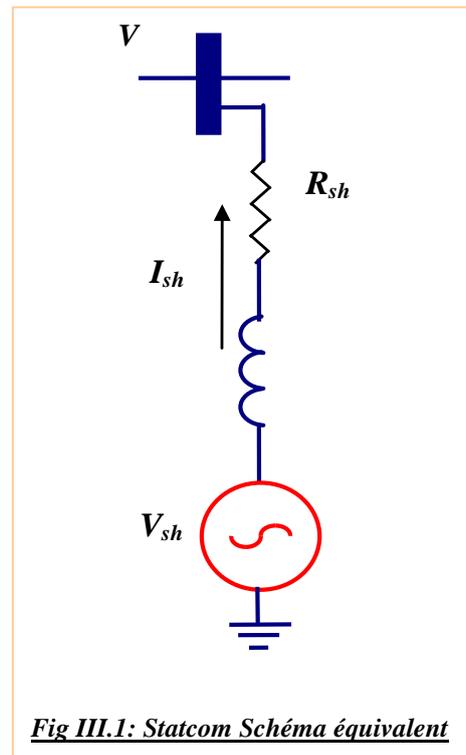


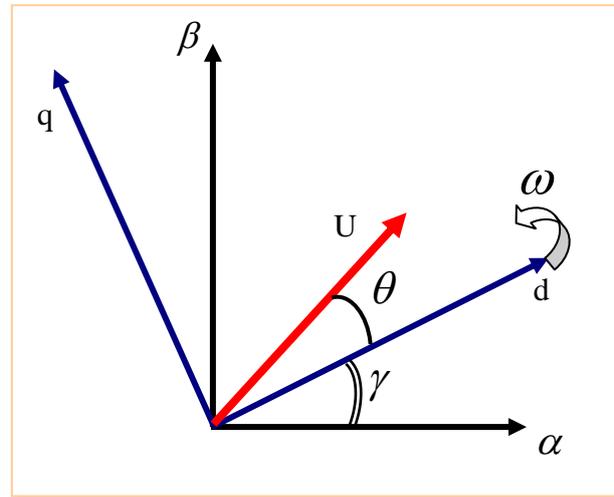
Fig III.1: Statcom Schéma équivalent

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, en multipliant tout les grandeurs par le phaseur $e^{-j\gamma}$ avec $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$ la pulsation des grandeurs en question voir la figure III.2 (Annexe B).

Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \text{ et inversement}$$

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}$$



En appliquant cette écriture sur l'équation (3.1) on aura:

Fig. III.2 passage du repère α, β vers le repère d, q

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \cdot \frac{d}{dt} (\bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}) \quad (3.2)$$

Après simplification de calcul en aboutit aux équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d,q) suivante:

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shq} \quad (3.3a)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shd} \quad (3.3b)$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande du système.

II.1.2 Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petites échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC. Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu. [16][18]

Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continue Figure III.3 [17] [19].

On suppose que :

$$\bar{V}_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + jV_{shq} = v \cos \theta + jv \sin \theta \quad (3.4)$$

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

$$v = m * U_{dc} \quad (3.5)$$

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

En substituant les équations (3.4) et (3.5) dans les équations (3.3-a) et (3.3-b) on aboutit aux équations:

$$V_d - m U_{dc} \cos \theta = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shq} \quad (3.6-a)$$

$$V_q - m U_{dc} \sin \theta = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shd} \quad (3.6b)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (3.7) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (3.8):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (3.7)$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (3.8)$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif " i_c " et le courant résistif " i_{rc} " dans la branche de la résistance R_{dc} .

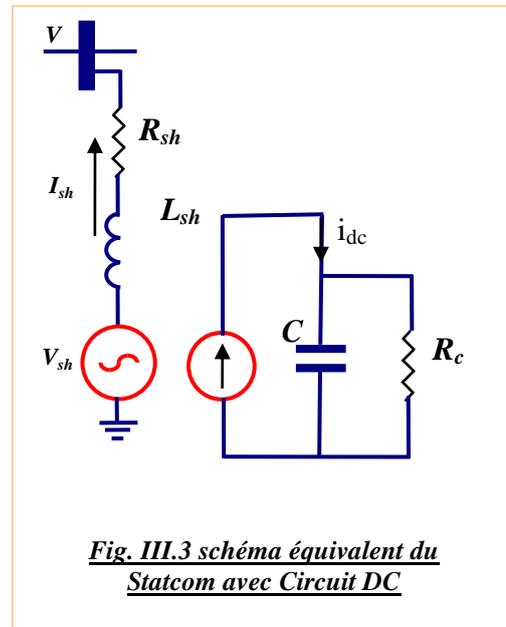


Fig. III.3 schéma équivalent du Statcom avec Circuit DC

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (3.9)$$

De ces équations (3.4-5-8-9) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos \theta - I_{shq} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (3.10)$$

Les équations (3.6a-3.6b et 3.10) forme le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos \theta & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} \sin \theta & -\frac{1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment. Ce système qu'on doit linéariser autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante [16] [17]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos \theta_0 & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} (I_{shd} \sin \theta_0 + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

.Le courant réactive est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue U_{dc} constante. [16][20].

II.2 Contrôle du STATCOM

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquence

maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant I_{sh}^* , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants (I_{shd}^*, I_{shq}^*) sont donc les grandeurs de références du STATOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.

II.2.1 Détermination des Références:

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{sh}^* calculée en fonction de la chute de tension à partir de l'équation (1.6) décrite au premier chapitre et la puissance active $P_{sh}^* \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur. [12][21]

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

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Où les tensions V_d et V_q sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure III.4 suivante:

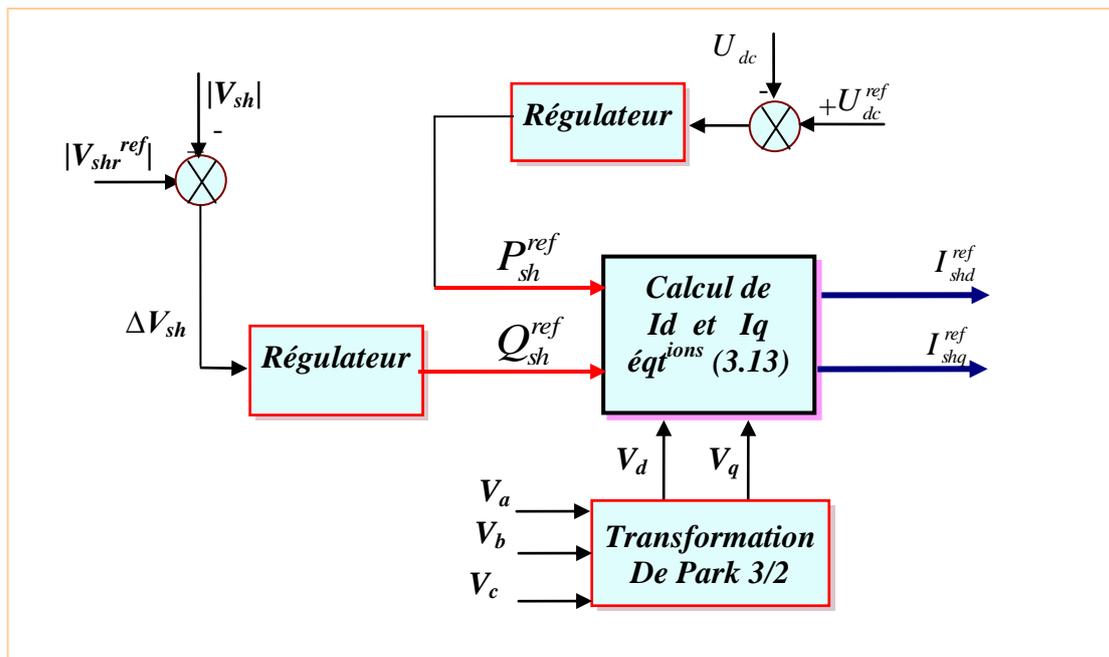


Fig. III.4 Identification des Courants de Référence

II.2.2 La Méthode Watt Var découplée:[12] [17] [21]

Considérant le modelé simplifié représenté par le système d'équation (3.4) précédent:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$$

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Avec $X_1 = \frac{1}{L_{sh}}(V_d - V_{shd})$ et $X_2 = \frac{1}{L_{sh}}(V_q - V_{shq})$ les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système (3.4) on aura:

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega \cdot I_{shq} + X_1$$

On appliquant la transformation de Laplace sur cette équation on obtient:

$$(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}})I_{shd} = +\omega \cdot I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1$$

D'où on arrive au transfert I_{shd} en fonction de \tilde{X}_1 suivant:

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (3.15)$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = \omega \cdot I_{shq} + X_1$, on doit ajouter donc le terme $\omega \cdot I_{shq}$ Pour retrouver \tilde{X}_1 à l'entré de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure III.5 suivante:

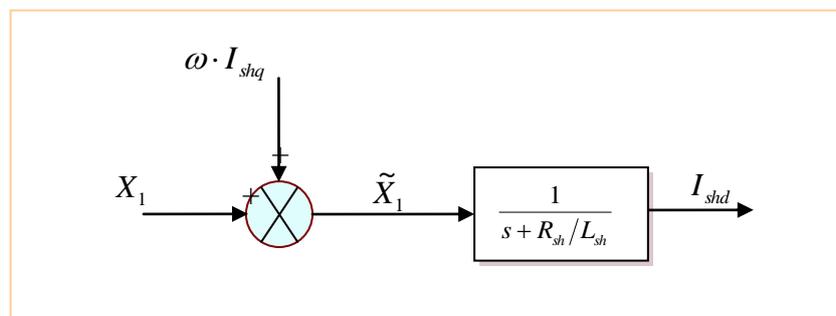


Fig. III.5 le transfert I_{shd} en fonction de X_1

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert I_{shq} en fonction de \tilde{X}_2 qui suit:

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (3.16)$$

Avec $\tilde{X}_2 = -\omega \cdot I_{shd} + X_2$.

Le schéma suivant résume ce transfert:

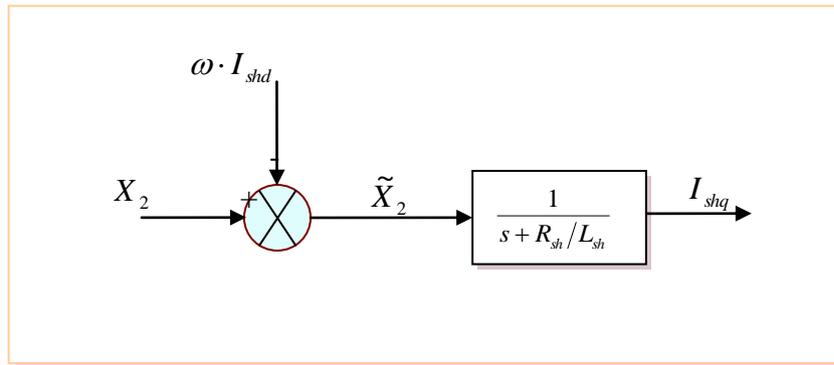


Fig. III.6 le transfert I_{shq} en fonction de X_2

De ce qu'on vient de voir on constate qu'il y a un couplage naturel dans les transferts des courants I_{shd} et I_{shq} ; pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et les faire suivre leurs consignes I_{shd}^* et I_{shq}^* comme le représente le schéma bloc de la figure III.7

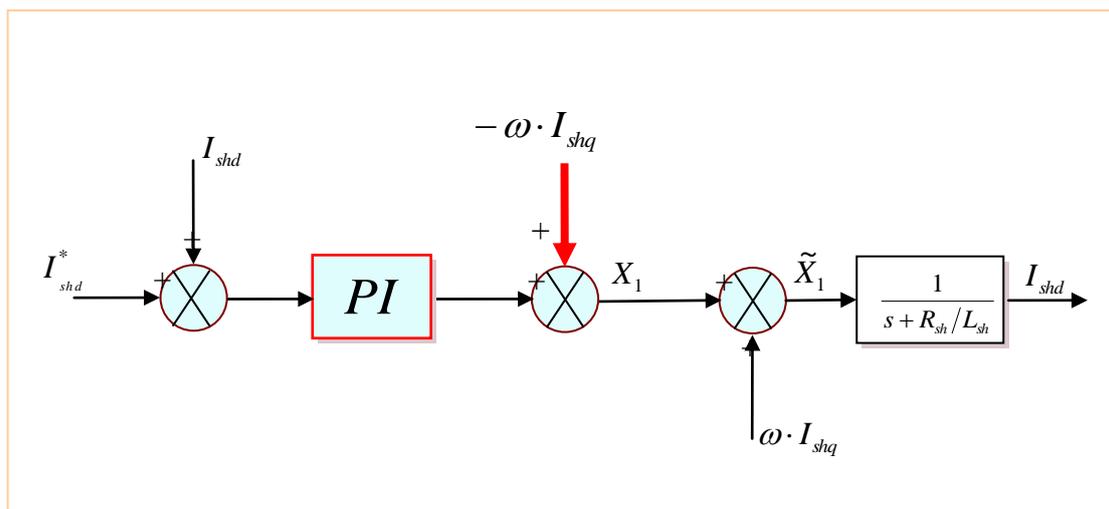


Fig. III.7 Régulation et découplage de I_{shd}

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante $\omega \cdot I_{shd}$ et finalement arriver au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la figure III.8 suivante:

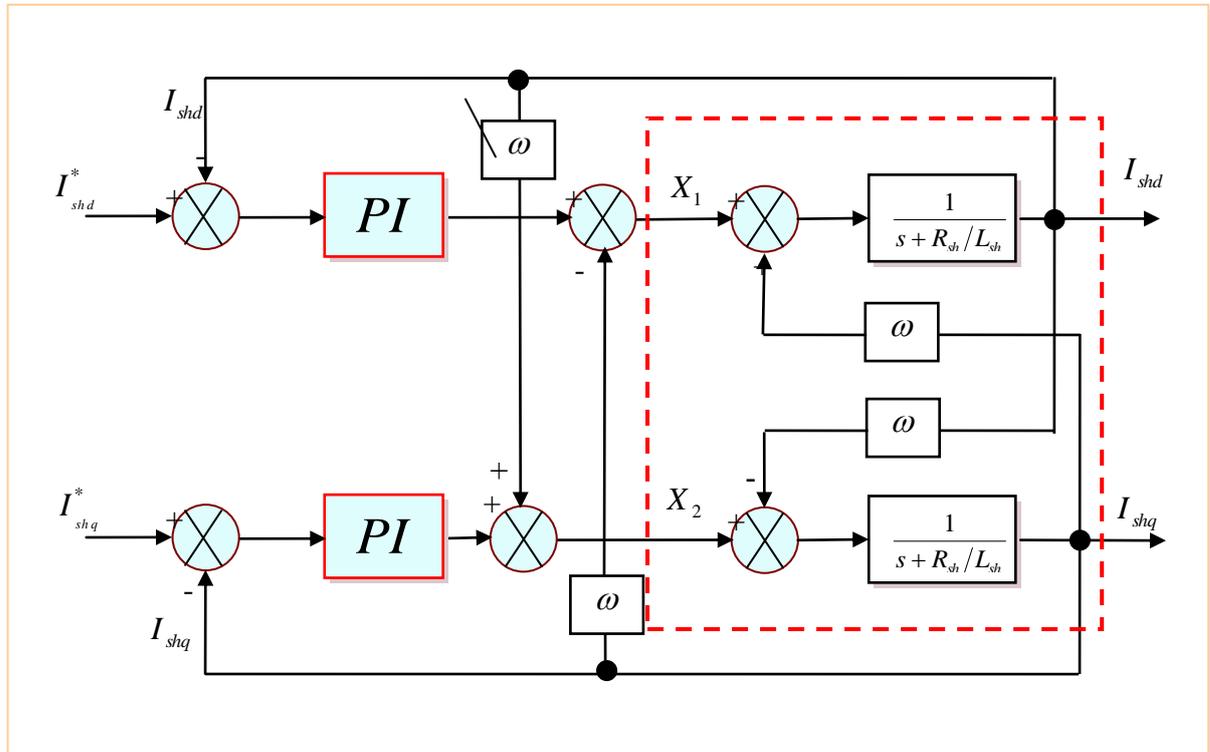


Fig. III.8 schéma de Régulation du Statcom (Watt-Var découplée)

II.2.3 Régulateur PI avec compensation de pôles:

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure suivante (Fig. III.9) :

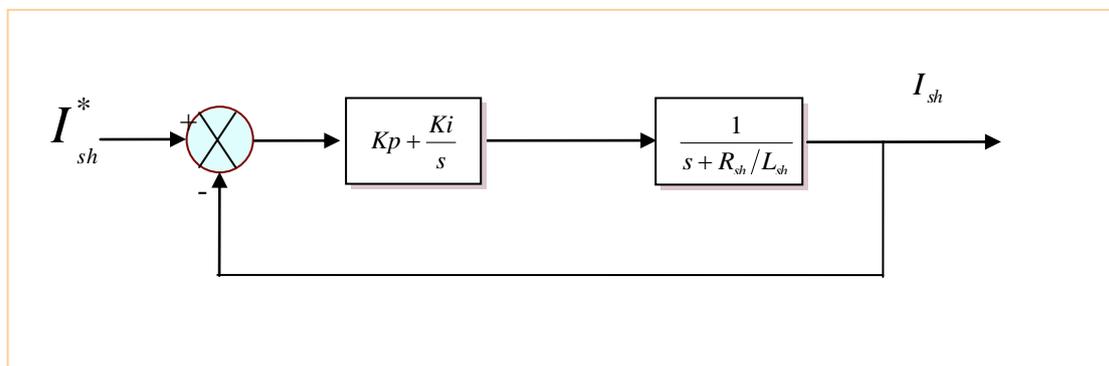


Fig. III.9 Schéma bloc de la Régulation PI des courants du Statcom

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

$$G(s) = \left(Kp + \frac{Ki}{s}\right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}}\right) = Kp \left(\frac{s + \frac{Ki}{Kp}}{s}\right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}}\right)$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (3.17)$$

Et G(s) devient: $G(s) = Kp \left(\frac{1}{s}\right)$

T_{BO} Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{Kp}{s + Kp} = \frac{1}{T_{BF}s + 1}$$

$$T_{BF} = \frac{1}{Kp} \quad (3.18)$$

Avec T_{BF} est la constante de temps de la régulation en boucle fermée.

En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (3.17et18) les gains du contrôleur PI.

$$Kp = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{Et} \quad Ki = Kp * \frac{R_{sh}}{L_{sh}}$$

II.2.4 Régulation de la tension continue U_{dc} :

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante:[12] [17] [21]

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 * P_{sh}}{C} \quad (3.19)$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C * s} \quad (3.20)$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique [12]

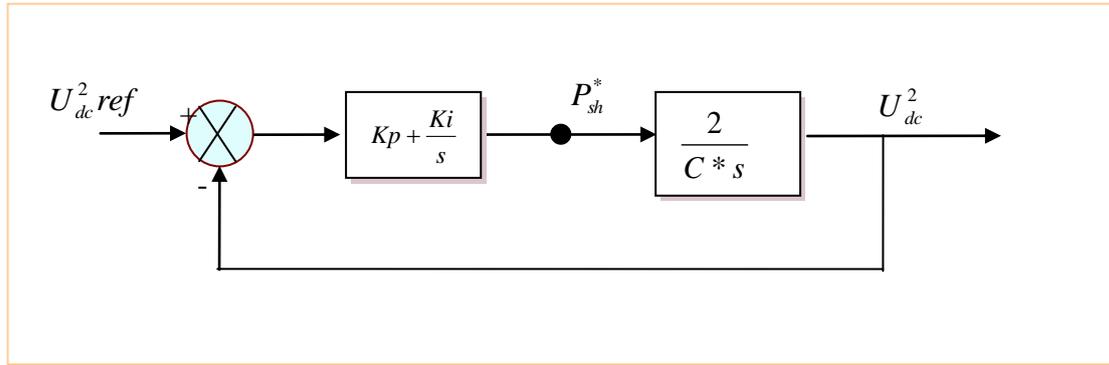


Fig III.10 Régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc-ref}^2} = \frac{\frac{2Kp}{C} s + \frac{2Ki}{C}}{s^2 + \frac{2Kp}{C} s + \frac{2Ki}{C}}$$

Avec :

$$\omega_n^2 = \frac{2 \cdot Ki}{C}$$

$$\xi = Kp \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot C \cdot Ki}} \quad (3.21)$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi $\xi = 0.7$.

Et afin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir $\omega_n = \frac{2\pi \times 300}{10}$ rad/sec, et finalement on détermine à partir des équations (3.21) les valeurs des gains Kp et Ki .

III.1 Modélisation de l'SSS

III.1.1 Modèle Mathématique Simplifié

Le convertisseur de tension est maintenant connecté en série avec la ligne de transmission. Son schéma équivalent consiste donc en une source de tension en série avec l'impédance de la ligne ainsi que l'impédance du transformateur de couplage comme le présente le schéma de la figure III.11.

L'équation du circuit continu est omise pour le modèle simplifié de ce dispositif dans l'hypothèse de condensateur de grande capacité ayant l'habilité de tenir la tension continue U_{dc} constante. [16][19]

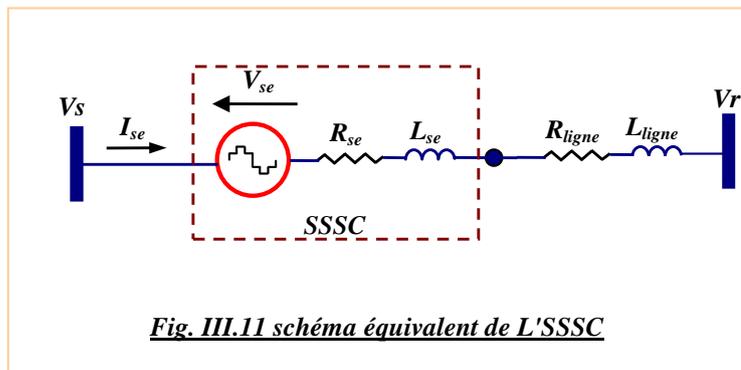


Fig. III.11 schéma équivalent de L'SSSC

Le courant dans la ligne dépend en premier de la différence du potentiel des deux extrémités de la ligne et en second de la tension série injectée, L'équation régissant ce circuit donc est :

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = (R_{se} + R_{ligne})\bar{I}_{se} + (L_{se} + L_{ligne})\frac{d\bar{I}_{se}}{dt} \quad (3.22)$$

Avec : R_{se} , L_{se} sont la résistance représentant les pertes des interrupteurs de l'onduleur et dans le transformateur de couplage, et l'inductance du transformateur série respectivement.

$$(3.22) \Leftrightarrow \bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = R\bar{I}_{se} + L\frac{d\bar{I}_{se}}{dt} \quad ; R=R_{se}+R_{ligne} \quad ; L=L_{se}+L_{ligne}.$$

En passant au référentiel (d,q) avec la transformation de Park l'équation (3.22) devient:

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = R\bar{I}_{se} + L\frac{d\bar{I}_{se}}{dt} + jL\omega I_{se}$$

Et sous forme matricielle dans le repère d,q:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{rd} - V_{sed} \\ V_{sq} - V_{rq} - V_{seq} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Le système d'équations différentielles (3.23) représente le modèle d'état simplifié de l' SSSC dans le référentiel synchrone (d, q) qui présente un couplage entre les deux grandeurs I_{sed} et I_{seq} par le terme w .

III.1.2 Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC :

Dans le cas où il n'y a pas de source d'énergie extérieure sur le côté continu de ce dispositif ou bien le condensateur est relativement petit, la dynamique du circuit continu représentée par ce condensateur doit être prise en considération dans le modèle mathématique. Comme nous l'avons déjà fait avec le STATCOM on peut réécrire la tension V_{se} de la forme suivante:[16]

$$\bar{V}_{se}^{(d,q)} = V_{sed} + jV_{seq} = V \cos\varphi + jV \sin\varphi \quad (3.24)$$

V : étant le module de la tension injectée

$$V = m \cdot U_{dc} \quad (3.25)$$

m : est l'indice de modulation de l'onduleur.

En remplaçant (3.25) dans (3.24) nous aurons:

$$\begin{cases} V_{sed} = m \cdot U_{dc} \cdot \cos\varphi \\ V_{seq} = m \cdot U_{dc} \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (3.26)$$

La dynamique du circuit continu est décrite par l'équation qui suit:

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (3.27)$$

La puissance active échangée avec le circuit continu est exprimée par les équations suivantes:

$$P_{se} = \frac{3}{2} (V_{sed} I_{sed} + V_{seq} I_{seq}) \quad (3.28)$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{sed} I_{sed} + V_{seq} I_{seq}) \quad (3.29)$$

On remplace (3.26) dans (3.29) pour avoir l'équation du circuit continu la suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{sed} \cos\varphi - I_{seq} \sin\varphi) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (3.30)$$

En injectant cette équation (3.30) dans le modèle précédant ainsi que les équations (3.26) et après réorganisation des équations nous arrivons au système d'équation d'état du modèle de l'SSSC en tenant compte du circuit continu suivant:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & \omega & \frac{-m}{L} \cos \varphi \\ -\omega & \frac{-R}{L} & \frac{m}{L} \sin \varphi \\ \frac{3m}{2C} \cos \varphi & -\frac{3m}{2C} \sin \varphi & -\frac{1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{rq} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

La linéarisation de ce système autour d'un point de fonctionnement φ_0 nous donne:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & \omega & \frac{-m}{L} \cos \varphi_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L} & \frac{m}{L} \sin \varphi_0 \\ \frac{3m}{2C} \cos \varphi_0 & -\frac{3m}{2C} \sin \varphi_0 & -\frac{1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \frac{m}{L} U_{dc} \sin \varphi_0 \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{m}{L} U_{dc} \cos \varphi_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3m}{2C} (I_{sed} \sin \varphi_0 + I_{seq} \cos \varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{rq} \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

On constate que la matrice d'application de la commande présente un couplage entre les grandeurs de ce système. Pour cela on doit procéder par une commande pour éliminer ce couplage et commander ces paramètres indépendamment. [16][21]

III.2 Contrôle de l'SSSC

III.2.1 la méthode Watt-Var découplée

Comme nous l'avons déjà expliquée dans le contrôle du STATCOM, cette méthode consiste à contrôler la puissance active et réactive séparément l'une de l'autre. On considérant les équations du système (3.23) nous pouvons appliquer une commande par découplage des courants I_{sed} et I_{seq} de la manière suivante: [12] [20]

$$\text{On pose : } X1 = \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{rd} - V_{sed}) \text{ et } X2 = \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{rq} - V_{seq}) \quad (3.33)$$

$$X1 = (Kp + \frac{Ki}{s})(I_{sed}^* - I_{sed}) - \omega \cdot I_{seq} \quad (3.34)$$

$$X2 = (Kp + \frac{Ki}{s})(I_{seq}^* - I_{seq}) + \omega \cdot I_{sed} \quad (3.35)$$

$X1$, $X2$ sont les sortie des deux régulateur PI des courants I_{sed} et I_{seq} complétés par les termes de compensation $(-\omega \cdot I_{seq})$ et $(\omega \cdot I_{sed})$ respectivement. On substituant les

équations (3.33), (3.34) et (3.35) dans le système d'équations (3.23) on aboutit à un système de deux équations découplées avec les fonctions de transfert en boucle fermée suivantes:

$$F(s) = \frac{I_{sed}(s)}{I_{sed}^*(s)} = \frac{I_{seq}(s)}{I_{seq}^*(s)} = \frac{Ki + Kp \cdot s}{Ki + (\frac{R}{L} + Kp) \cdot s + s^2} \quad (3.36)$$

Le schéma bloc de ce système Watt-Var découplé est représenté sur la figure III.12 suivante:

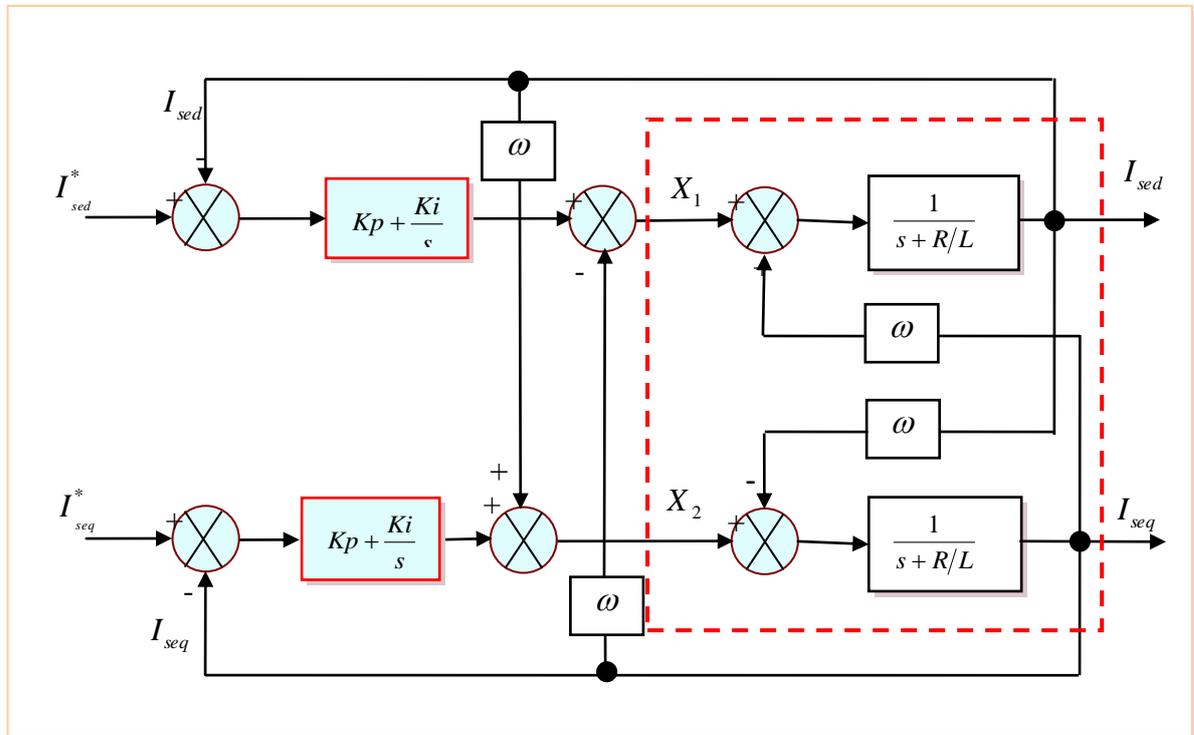


Fig. III.12 *Modèle de Régulation de l'SSSC (Watt-Var découplée)*

III.2.2 Détermination des Références

Le SSSC est installé en série pour le contrôle du flux de puissance dans la ligne de transport, en d'autre terme afin d'obtenir la puissance active et réactive désirées au jeu de barre de réception. [12][16][21]

Ces puissances dans l'hypothèse de la superposition de la composante V_{rq} sur l'axe q du référentiel synchrone (d, q) ($V_{rq}=0$ et $V_{rd}=V_r$) sont exprimées par les équations suivantes:

$$P_r = \frac{3}{2} V_{rd} * I_{sed} \quad Q_r = \frac{3}{2} V_{rd} * I_{seq} \quad (3.37)$$

Les grandeurs d'entrée de cette méthode de régulation, expliquée ci-dessus, étant les courants de l'SSSC qui sont également les courants de la ligne. Il est possible de calculer leurs valeurs de référence dans le repère (d, q) à partir des équations suivantes:

$$I_{sed}^* = \frac{2 P_r^*}{3 V_{rd}} \quad \text{Et} \quad I_{seq}^* = \frac{2 Q_r^*}{3 V_{rd}} \quad (3.38)$$

Avec P_r^* , Q_r^* les puissances désirées transporter par la ligne.

Les variables X1 et X2 associées au schéma de contrôle de la figure Fig.III.12 sont utilisées pour déterminer les composantes de la tension série du convertisseur V_{sed} et V_{seq} en s'appuyant sur les équations (3.33) comme suit:

$$V_{sed} = (V_{sd} - V_{rd}) - L \cdot X1 \quad , \quad V_{seq} = (V_{sq} - V_{rq}) - L \cdot X2$$

Le schéma bloc de cette méthode de régulation est donné par la figure III.13 suivante:

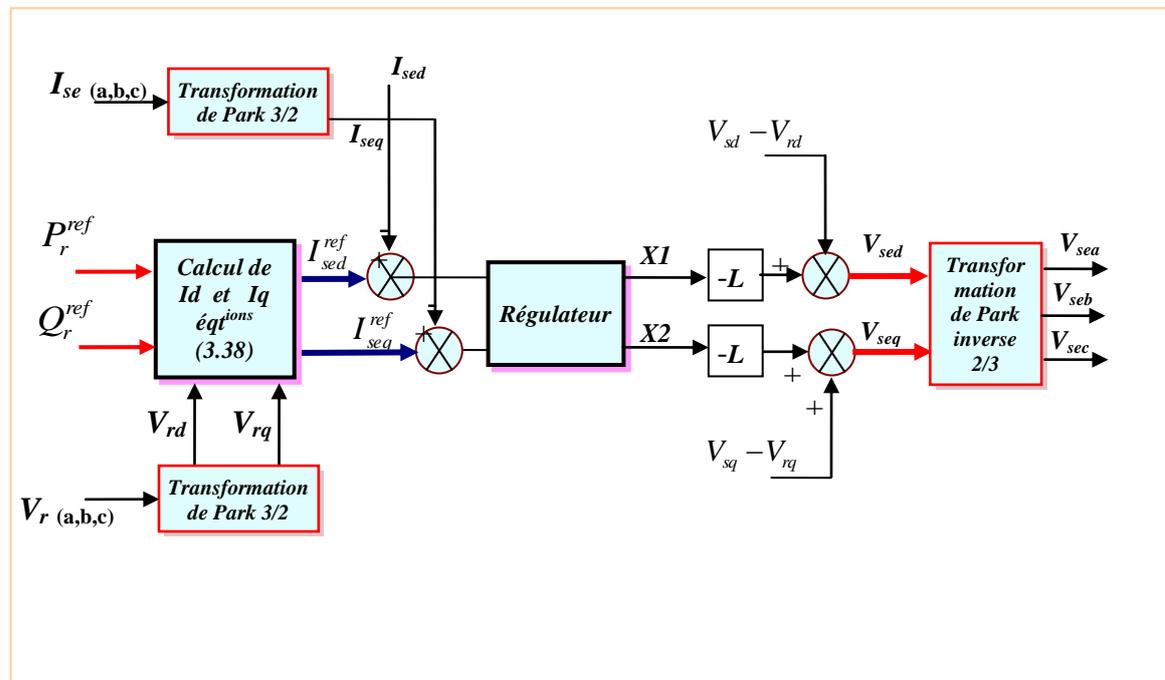


Fig. III.13 Schéma globale de contrôle l'SSSC par la méthode Watt-Var découplée

III.2.3 Calcul des Régulateurs PI:

La régulation proportionnelle intégrale utilisée dans le modèle de la figure III.12 assure un contrôle optimal par rapport au critère quadratique de l'erreur dynamique si les gains sont maximaux donc:[20]

$$Kp = Kp_{\max} \text{ Et } Ki = Ki_{\max}$$

De même que pour les régulateurs du STATCOM, et sans refaire tout le détail de la méthode, en introduisant la condition (3.17) liant les paramètres du régulateur nous

aurons ce qui suit: $\frac{Ki}{Kp} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}}$

$$Ki = \frac{R_{se} + R_{ligne}}{L_{se} + L_{ligne}} \cdot Kp \quad (3.39)$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera:

$$F(s) = \frac{Kp}{s + Kp} \quad (3.40)$$

Avec $\frac{1}{Kp} = Tse_{BF}$ est la constante de temps en boucle fermée.

On faisant un choix convenable de la valeur de Tse_{BF} les gains Kp et Ki seront obtenus comme suit:

$$Kp = \frac{1}{Tse_{BF}} ; \quad Ki = \frac{R}{L} \cdot Kp \quad (3.41)$$

Où $R = R_{se} + R_{ligne}$ et $L = L_{se} + L_{ligne}$

III.2.4 Régulation de la tension continue U_{dc} :

Le contrôle de la tension continue dans ce dispositif est obtenu de la même façon que dans le dispositif parallèle (STATCOM), ainsi pour éviter la répétition le lecteur peut ce référer au paragraphe II.2.4 de ce mémoire.

III.2.5 Commande de l'Onduleur

La technique de commande appliquée sur l'onduleur de tension dans les deux dispositifs STATCOM et SSSC a pour but de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs afin que la tension donnée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence, pour cela nous avons utilisé la méthode basée sur la MLI

(modulation de largeur d'impulsion). Cette technique consiste à comparer la tension de référence de l'onduleur "Modulatrice" avec un signal en dent de scie à fréquence élevée "Porteuse", la sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme le montre le schéma de principe de la figure Fig.III.14. [12][21]

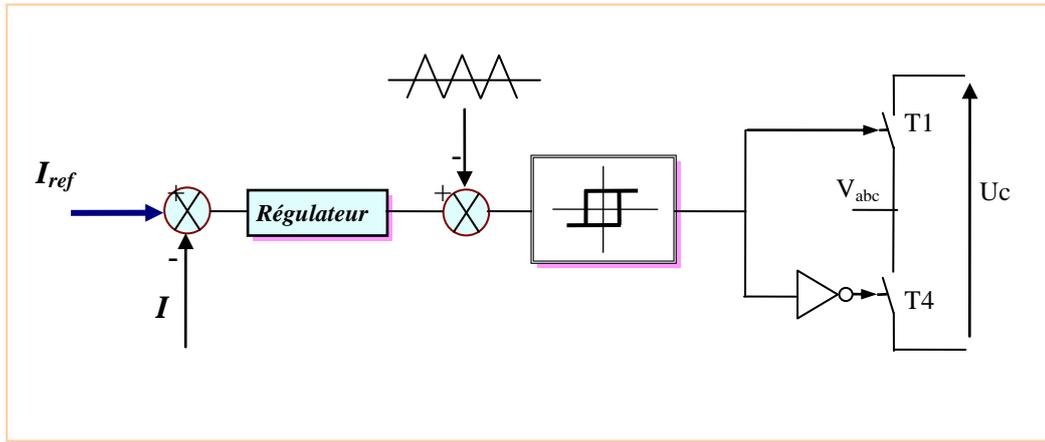


Fig. III.14 Contrôle des Onduleur par MLI

IV. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des deux contrôleurs de la famille FACTS "STATCOM et SSSC" dans certaines fonctions de contrôle: la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive pour le STATCOM et le contrôle du flux de puissance active et réactive concernant le SSSC.

Nous avons présenté dans ce chapitre des modèles simples pour lesquels nous avons identifié les références de leurs systèmes de commande des deux dispositifs STATCOM et SSSC.

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

Chapitre IV: ***Simulations et Résultats***

I. Introduction

Une complète simulation des deux dispositifs, Statcom et SSSC introduits dans un réseau test simple sera présentée dans ce chapitre. Cette simulation été performée dans l'environnement Matlab-Simulink et basée sur les lois de fonctionnement et de commande développées dans les chapitres I et II précédents. Le fonctionnement de ces deux dispositifs dans une ligne de transport d'énergie électrique sera validé dans les deux modes de compensation capacitive et inductive.

II. Simulation du STATCOM

II. 1 Description du réseau étudié

Le schéma unifilaire du réseau simple de transport d'énergie électrique utilisé pour valider le fonctionnement du Statcom est représenté par la figure IV.1

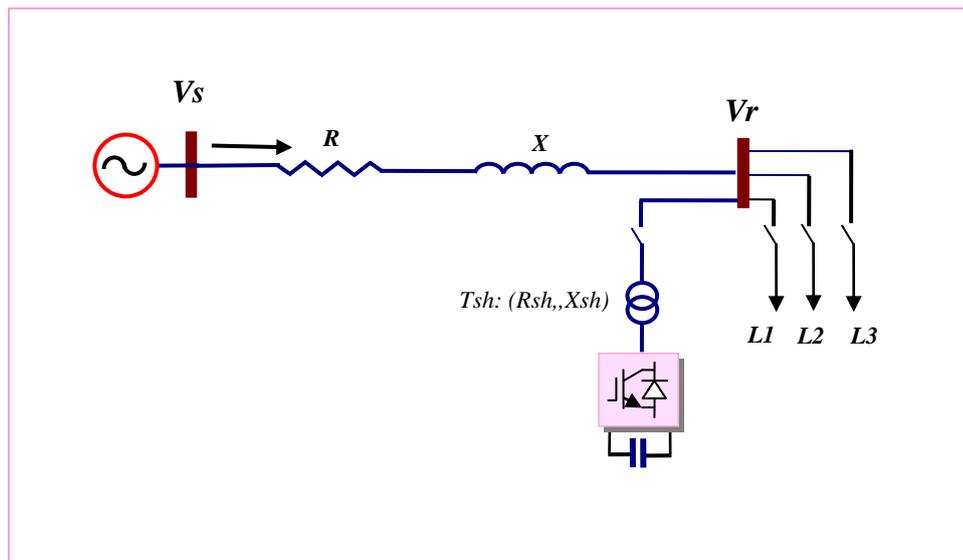


Fig. IV.1 Schéma unifilaire du réseau étudié

Le réseau est composé de d'un générateur de 400 KV avec une puissance nominale de 1000 MVA et d'une ligne de transport de 500 Km modélisée en π pour chaque 100 Km, le transformateur Tsh sert à baisser la tension de 400 KV (tension du réseau) à 20 KV (tension d'entrée des convertisseurs), la ligne alimente une charge (L1, L2, L3) au jeu de barre 'R'.

En grandeurs réduites le réseau précédent est représenté par la figure IV.2.

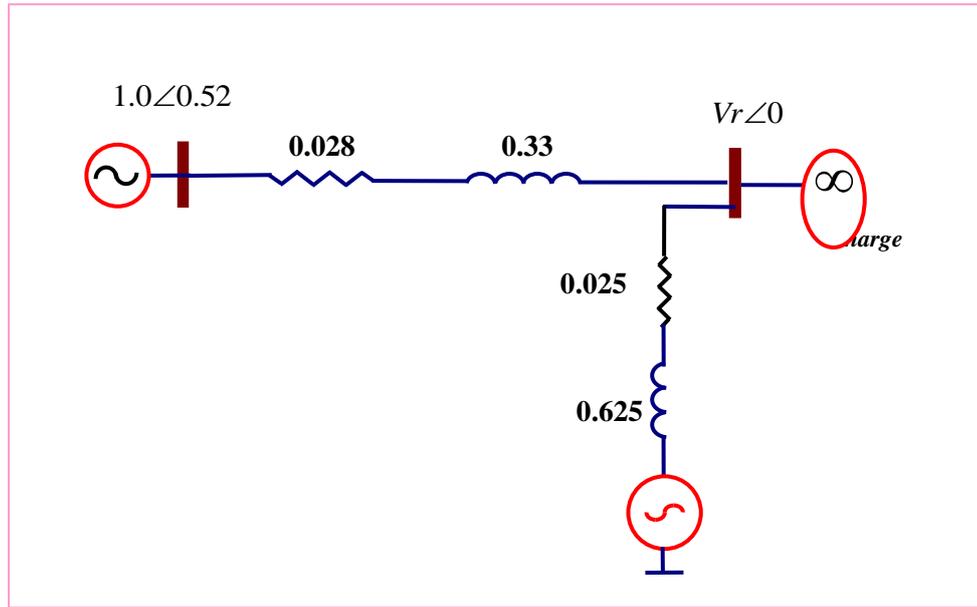


Fig. IV.2 Schéma unifilaire du réseau étudié en pu

II. 2 Equation du STATCOM en grandeurs réduites:

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

$$S_{base} = 1000MVA \quad U_{base} = 400MVA$$

Par conséquent les autres bases seront données par les équations suivantes:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}U_{base}} = 1443A .$$

$$Z_{base} = \frac{U_{base}}{S_{base}} = 160.A$$

Le système d'équation (3.4) représentant le modèle du STATCOM devient en grandeurs réduites le suivant:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd}^{pu} \\ I_{shq}^{pu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}^{pu}}{X_{sh}^{pu}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{\omega}{X_{sh}^{pu}} \begin{bmatrix} V_d^{pu} - V_{shd}^{pu} \\ V_q^{pu} - V_{shq}^{pu} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

La fonction de transfert des courants avec un régulateur PI sera de celle de l'équation suivante:

$$F(s) = \frac{I_d^{pu}}{I_d^{ref}} = \frac{I_q^{pu}}{I_q^{ref}} = \left(Kp + \frac{Ki}{s} \right) * \frac{1}{\left(s + \frac{R_{sh}^{pu} \cdot \omega}{X_{sh}^{pu}} \right)} \quad (4.2)$$

Les coefficients des régulateurs calculés avec compensation des pôles et en prenant le temps de réponse en boucle fermée $T_{BF} = 1/3 * T_{BO}$ seront donnés comme suit:

$$Ki = \frac{R_{sh}^{pu} * \omega}{X_{sh}^{pu}} * Kp$$

$$Kp = 37.6991 \quad Ki = 473.7410$$

II. 3. Essais de simulation

Initialement le condensateur du STATCOM est chargé et la tension à ces bornes est de 1.0 pu. La tension du jeu de barre de génération $V_s = 1.0$ pu, et le système énergétique débite sur une charge inductive de L1:(P=1.0 pu ; Q1=0.4) dans un état d'équilibre.

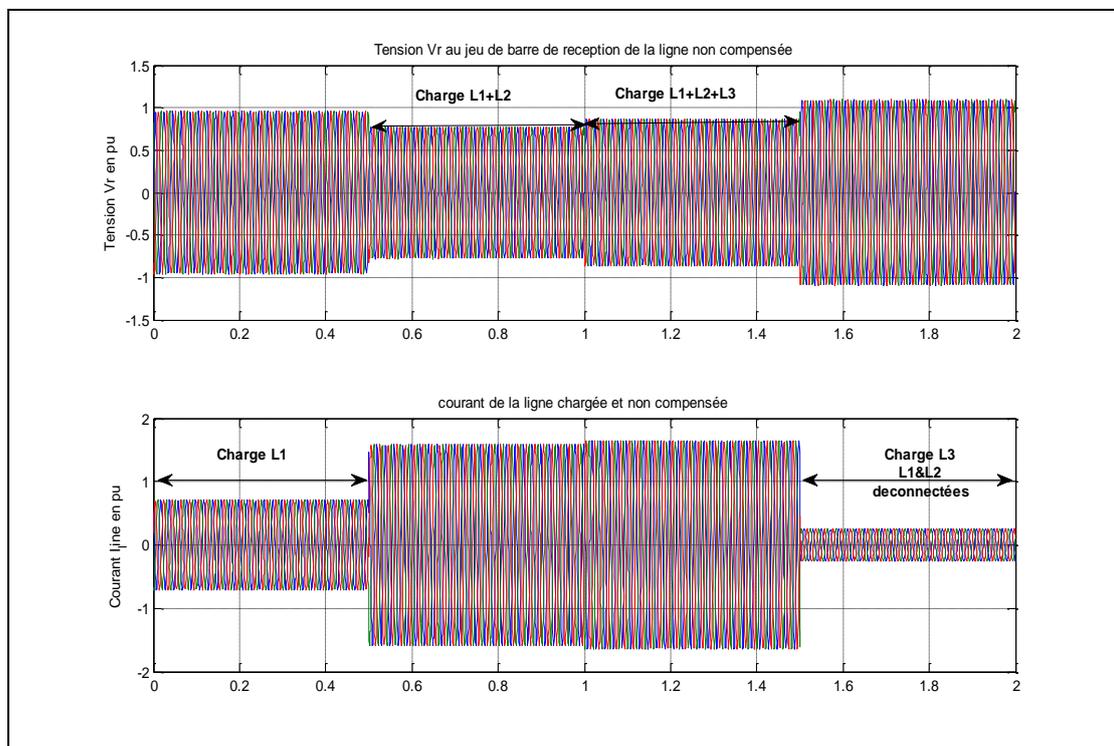


Fig. IV.3 tension et courant dans ligne chargée sans STATCOM

Dans nos essais on va ajouter à l'instant ($t=0.5$ s) une charge inductive L2:($P2=1.0$ pu ; $Q2=0.7$ pu) et à l'instant ($t=1$ s) on charge de plus la ligne par une autre charge capacitive L3:($P3=0.3$; $Qc=0.35$; $Ql=0.08$) et finalement à l'instant ($t=1.5$) on va déconnecter toutes les charges et on ne laisse que la charge capacitive L3.

La figure IV.3 montre la chute de tension provoquée par la charge inductive L2 à l'instant $t=0.5$ s, cette chute qui sera amortie naturellement par la connexion de la charge capacitive L3.

La déconnexion des charges inductives dans la dernière transition et e débit sur la charge capacitive à entraîner une surtension importante dans la tension du jeu de barre de charge Vr. (fig.IV.3)

En reprenant ces essais, avec les mêmes charges, sur ce réseau associé à un contrôleur FACTS (parallèle) le STATCOM au jeu de barre de réception (de charge) on constate ce qui vient:

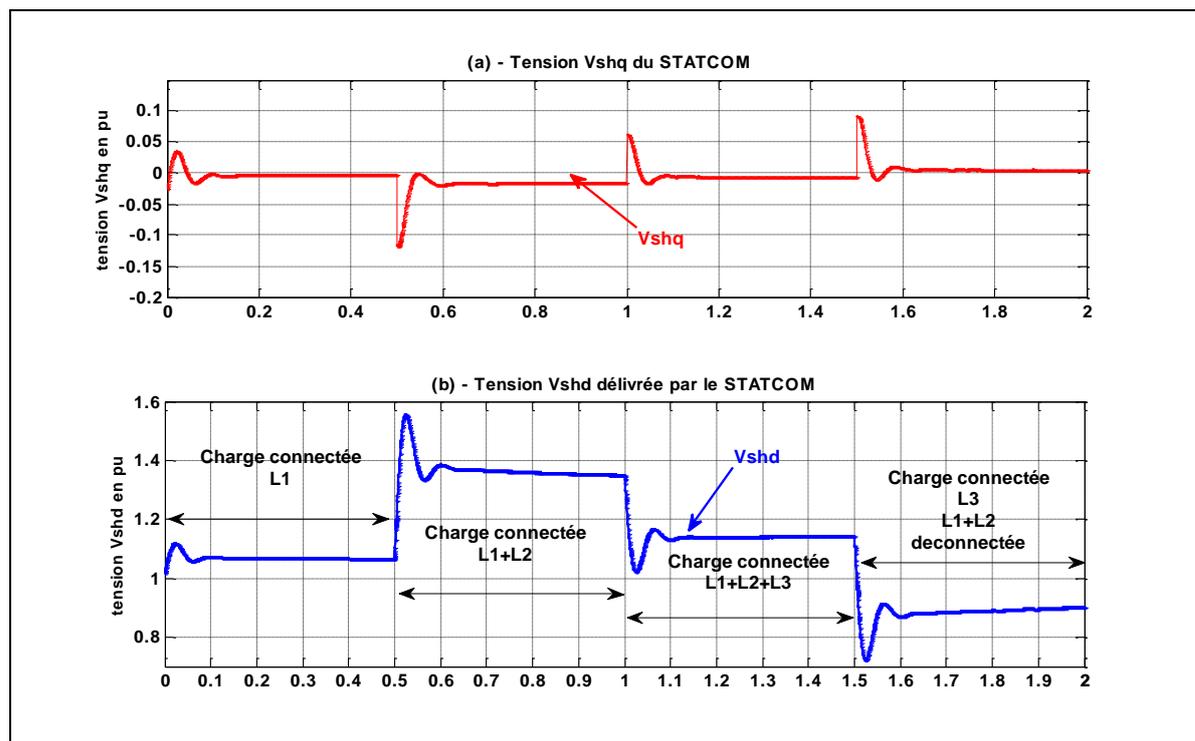


Fig. IV.4 Les tensions du STATCOM Vshd et Vshq

Le STATCOM injecte une tension V_{shd} ($V_{shq} \approx 0$) en phase avec la tension V_r ($V_r = V_{rd}$, $V_{rq} = 0$) qui augmente en chargeant de plus en plus la ligne avec des charge inductives $L1+L2$ Fig.IV.4.

Cette tension V_{sh} qui est en mode inductive supérieur à la tension V_r détermine le sens du courant réactif I_{shq} injecté par le STATCOM au réseau: positif en mode inductif indiquant que le compensateur délivre une puissance réactive vert le réseau, et négatif dans la phase de charge capacitive pour montrer l'absorption du réactif depuis le réseau par le STATCOM Fig.IV.5

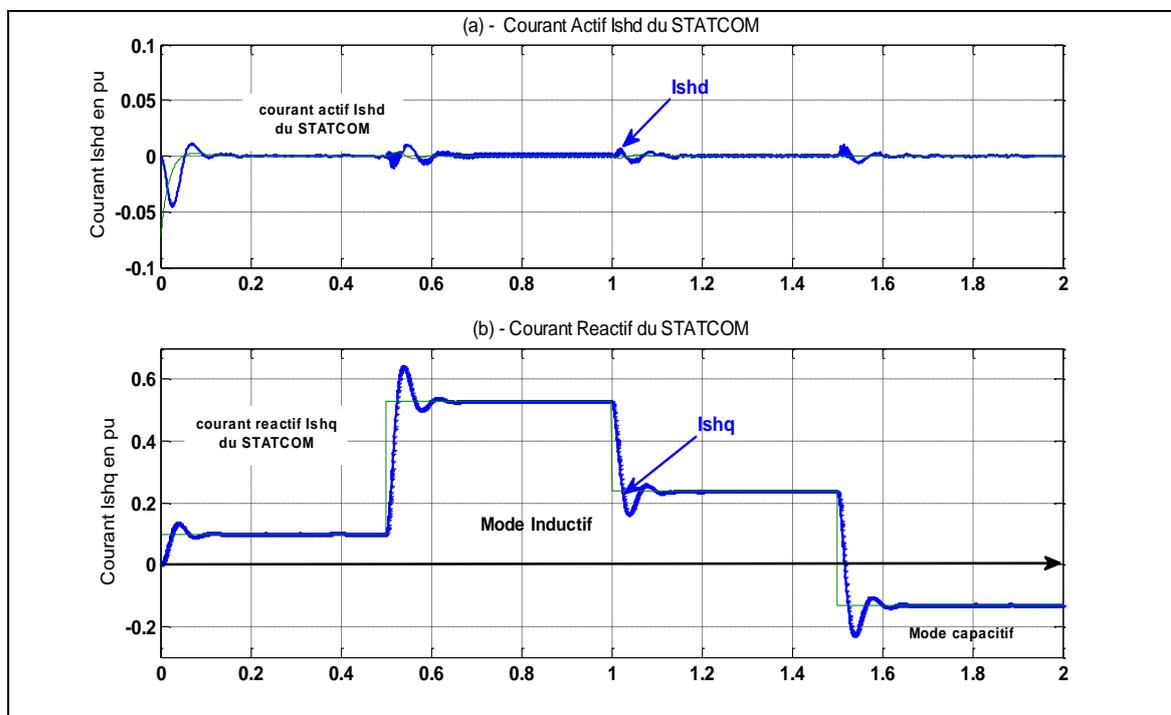


Fig.IV.4 Les courants du STATCOM I_{shd} et I_{shq}

Les courants dans ce dispositif, STATCOM, I_{shd} et I_{shq} suivent leurs grandeurs de références (qui sont calculés à partir des puissances de références et nécessaire à compenser la puissance réactive dans la ligne et maintenir la tension du jeu de barre V_r) ce qui valide le bon fonctionnement des régulateurs proportionnel intégral "PI" placés dans le modèle Watt-Var découplé utilisé.

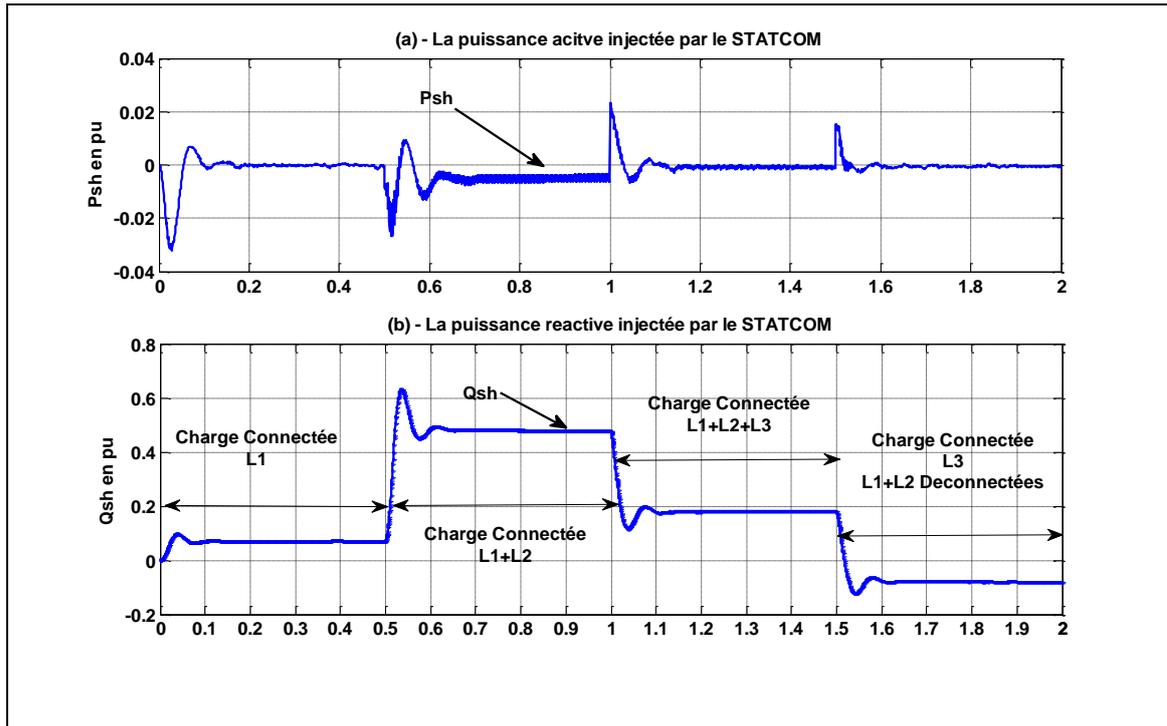


Fig.IV.5 Puissances P_{sh} et Q_{sh} du STATCOM

Avant $t=0.5$ s le STATCOM injecte une petite quantité de puissance réactive Q_{sh} de l'ordre de $Q_{sh} \approx 0.08$ pu pour soulever la tension V_r à 1.0 pu. Mais après la mise en service de la charge $L1+L2$ à ($t=1$ s), plus de puissance réactive est nécessaire pour la compensation et le STATCOM dans un mode capacitif injecte environ $Q_{sh} \approx 0.7$ pu, comme nous l'observons sur la figure IV.5-(b). Une petite quantité de la puissance active est absorbée dans cette phase pour maintenir la tension au borne du condensateur constante.fig.IV.5-(a).

En connectant la charge capacitive à $t=1.5$ s l'énergie réactive fournie par le STATCOM décroît à cause de l'effet capacitif de cette charge sur la ligne de transport.

Dans la dernière étape la charge capacitive connectée à la ligne provoque une surtension au jeu de barre de charge V_r et fait que le STATCOM opère en mode inductif et absorbe l'énergie réactive depuis le réseau pour maintenir le profil de la tension V_r , on constate de ce fait que la tension V_{sh} devient inférieur à, la tension V_r ce qui démontre la théorie exposé dans le chapitre II.

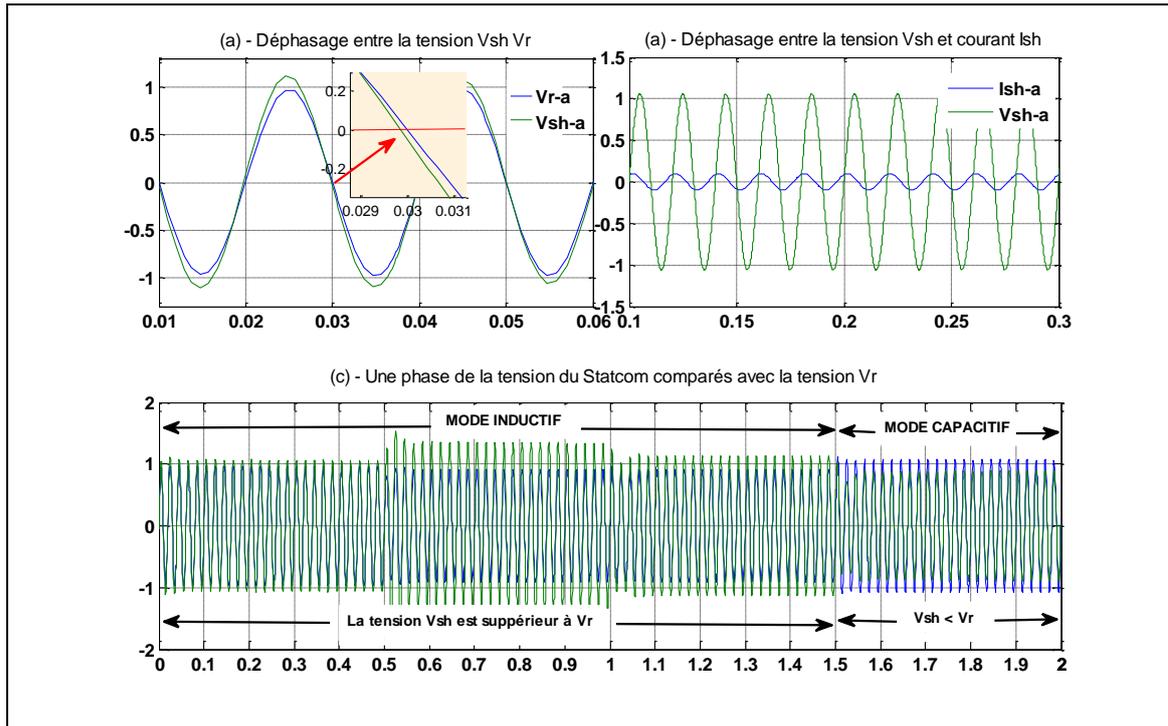


Fig.IV.6 Tension et courant du STATCOM (Déphasage)

Toujours afin de valider les lois et hypothèses étudiées dans les chapitres précédents La figure IV.6 a été relevée pour observer le déphasage entre les tensions Vsh et Vr qui est presque nul (en phase), le petit décalage qu'on voit sur la figure.IV.6-(a) permet le transit d'une petite quantité de la puissance active pour compenser les pertes dans les interrupteurs du convertisseur (onduleur).

Sur la figure Fig.IV.6-(c) on observe la variation dans l'amplitude de ces deux tensions inspirant le mode de fonctionnement capacitif pour $V_r < V_{sh}$ et inductif pour le contraire.

Le courant Ish étant en quadrature avec la tension Vsh, Fig.IV.6-(b), donc l'énergie échangée avec ce dispositif est purement réactif.

Depuis la courbe de la figure ci-dessous (Fig.IV.7) il parait très clair que le bloc de régulation de la tension continue à prouver son efficacité au maintien constante de la tension au borne du condensateur $U_{dc}=1.0$ pu.

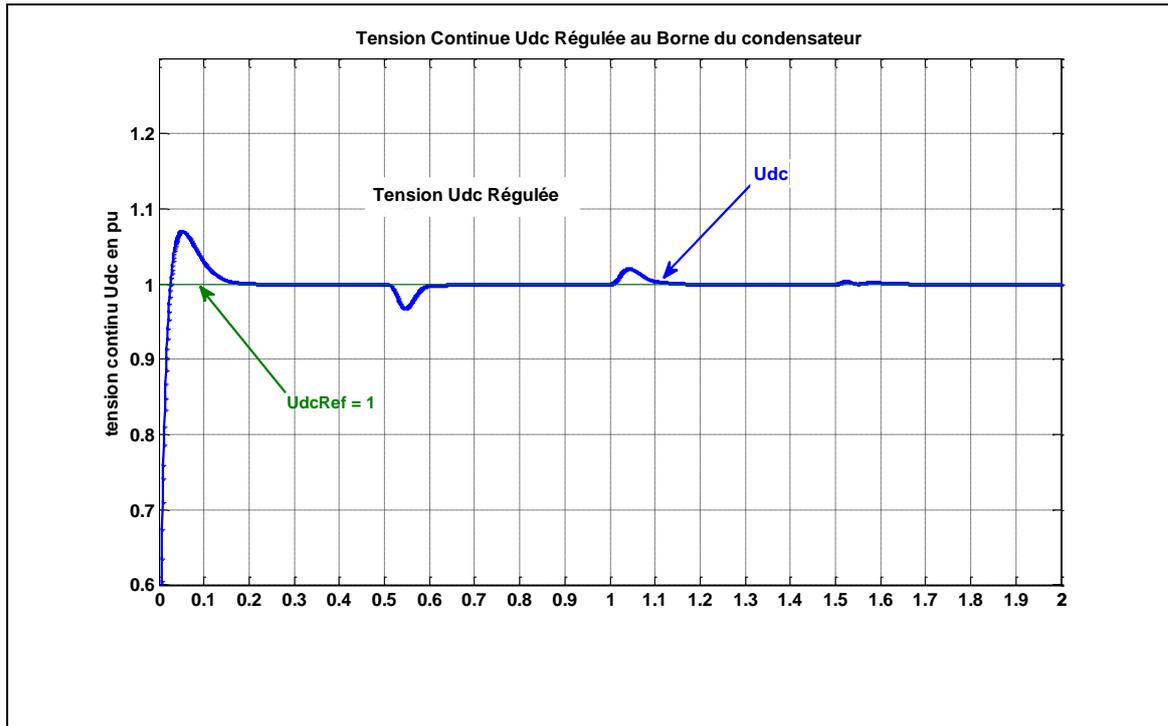


Fig.IV.7 Régulation de la tension continu Udc

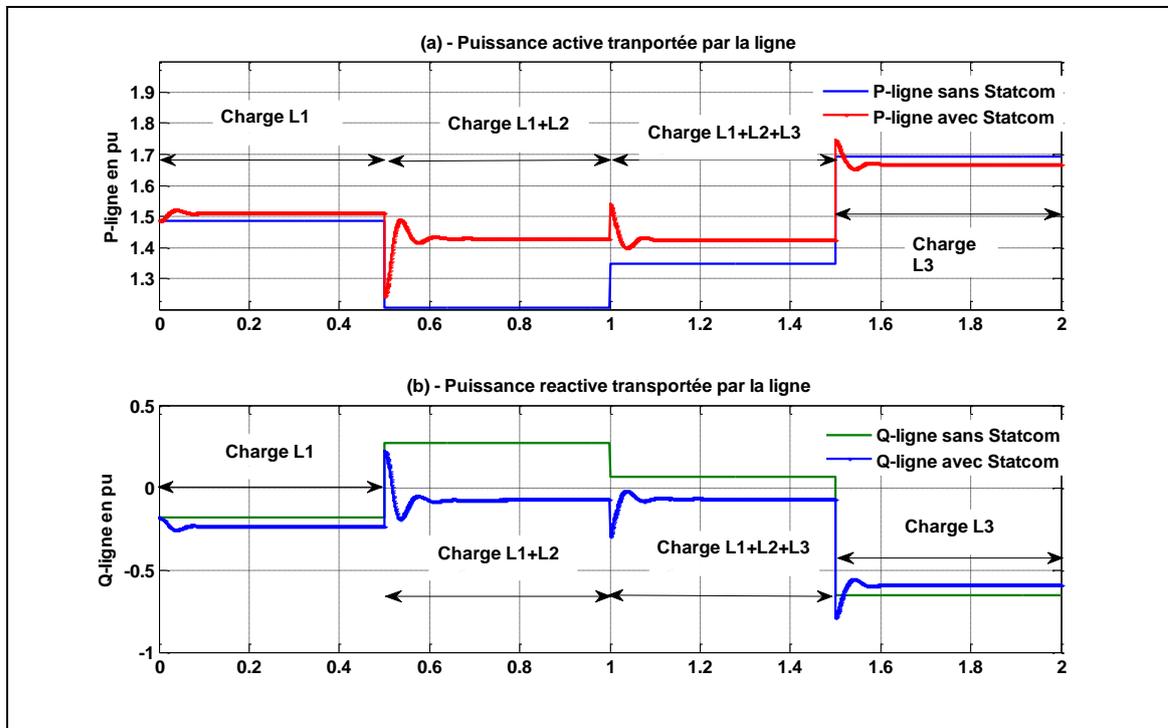


Fig.IV.8 Les Puissances transportées par la ligne

L'effet de la compensation de l'énergie réactive se répercute directement sur le transit de la puissance active dans la ligne illustré par la figure IV.8 ci-dessus; la fourniture de l'énergie réactive au point de consommation permet un transit plus important de la puissance active en minimisant le flux de puissance réactive dans la ligne de transport.

La tension du jeu de barre ou ce dispositif est connecté est réglée à la valeur de la tension de départ $V_r \approx 1.0$ pu. L'erreur statique entre cette tension V_r réglée et la tension référence $V=1.0$ pu est due aux simplifications effectuées dans l'expression de la puissance réactive de référence $Q_{sh}^{ref} = \frac{V_s * \Delta V}{X}$ demandée à injecter par le contrôleur STATCOM figure.IV.9.

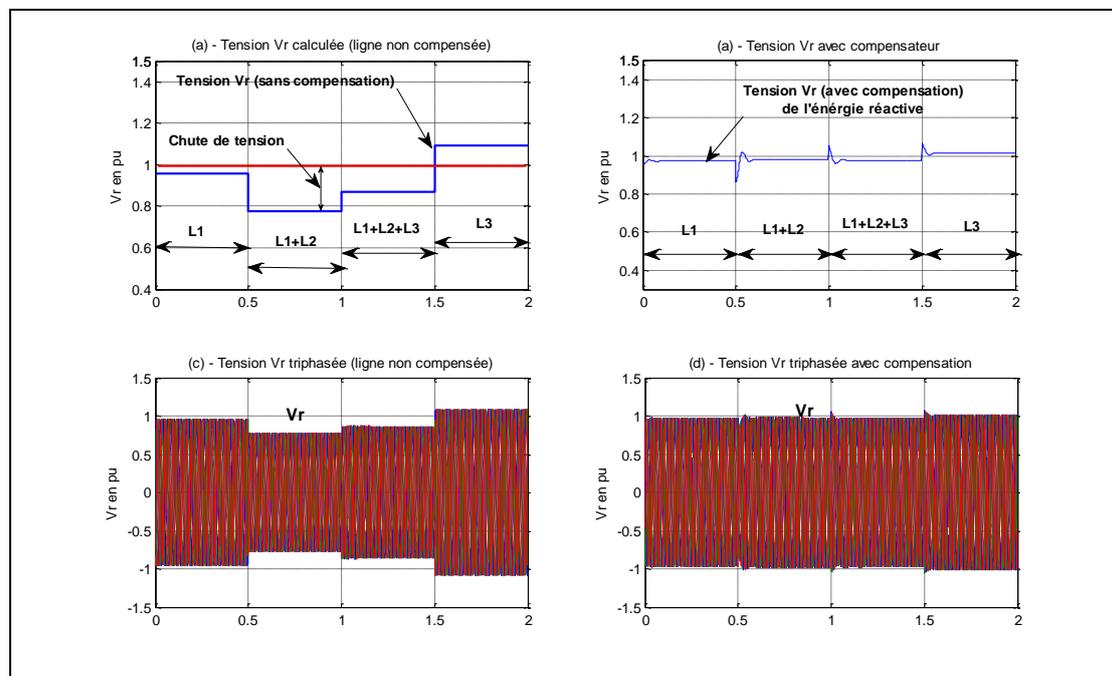


Fig.IV.9 Tension Vr avant et après compensation

III. Simulation de l'SSSC

III. 1 Description du réseau étudié

La figure VI.10 représente le schéma unifilaire du réseau test utilisé pour valider les résultats théorique du fonctionnement de l'SSSC obtenu dans les chapitres précédent. Le réseau est celui décrit dans la partie précédente (STATCOM) mais dans

ce cas le contrôleur FACTS est connecté en série à travers un transformateur série Tse et avec une seule charge L1.

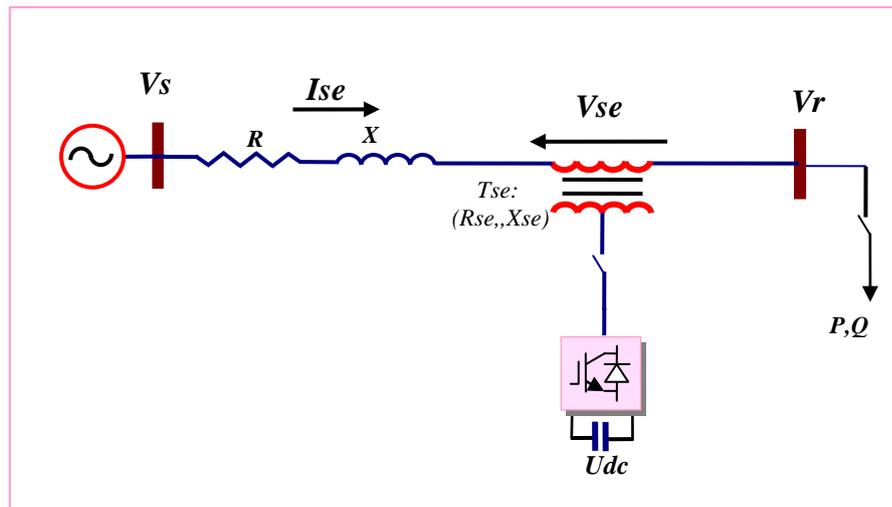


Fig. IV.10 Schéma unifilaire du réseau étudié

III. 2 Equation de l'SSSC en grandeurs réduites:

En grandeurs réduites on va garder les même bases du système énergétique utilisé dans la simulation du STATCOM c'est à dire:

$$S_{base} = 1000MVA \quad U_{base} = 400MVA$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}U_{base}} = 1443A .$$

$$Z_{base} = \frac{U_{base}}{S_{base}} = 160.A$$

Le système d'équation (3.23) représentant le modèle de l'SSSC devient en grandeurs réduites le suivant:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed}^{pu} \\ I_{seq}^{pu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R^{pu} \omega}{X^{pu}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R^{pu} \omega}{X^{pu}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sed}^{pu} \\ I_{seq}^{pu} \end{bmatrix} + \frac{\omega}{X^{pu}} \begin{bmatrix} V_{sd}^{pu} - V_{rd}^{pu} - V_{sed}^{pu} \\ V_{sq}^{pu} - V_{rq}^{pu} - V_{seq}^{pu} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Dont la résistance R^{pu} est la somme de la résistance de la ligne en unité réduite avec celle du transformateur de couplage, et la réactance X^{pu} est aussi la somme des réactances de la ligne et du transformateur de couplage en unité réduite.

Le schéma équivalent du réseau y compris le contrôleur série 'SSSC' en unité réduite est donné par la figure suivante:

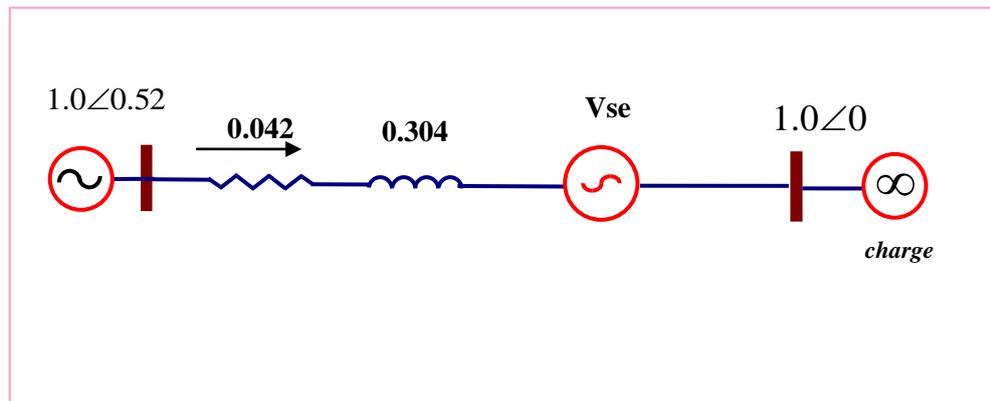


Fig. IV.11 Schéma équivalent du réseau étudié en pu

Les coefficients des régulateurs, calculés avec compensation des pôles, utilisés dans le modèle Watt-Var découplé de l'SSSC sont les suivants:

$$K_i = \frac{R^{pu} * \omega}{X^{pu}} * K_p$$

$$K_p = 43.403 \quad K_i = 1.8839e+003$$

III. 3. Essais de simulation et résultats

Une complète simulation de l'SSSC, introduit dans le réseau simple précédent, est présentée dans cette partie afin de valider le fonctionnement de ce dispositif dans les deux modes de compensation capacitive et inductive.

Dans ce qui suit nous admettons que la tension au jeu de barre de réception (de charge) V_r est maintenue égale à la tension du jeu de barre de génération V_s , et la ligne

transporte la puissance maximale $P = \frac{V^2}{X} \sin \delta$ pour un angle de charge donnée $\delta = 30^\circ$.

A l'instant $t=0.6$ s on injecte une tension V_{se} en série et en quadrature en retard par rapport au courant de la ligne ($\theta_{se} = -90^\circ$) afin de réduire la réactance de la ligne avec

$$X_q = \frac{V_{se}}{I_{se}} \text{ et donc avec un niveau de compensation } K = \frac{X_q}{X_{ligne}}.$$

A l'instant $t=1.3$ s on procède pour une compensation inductive là où la tension injectée devient en avance de 90° par rapport au courant I_{se} , la réactance de la ligne sera donc accrue par la valeur Xq .

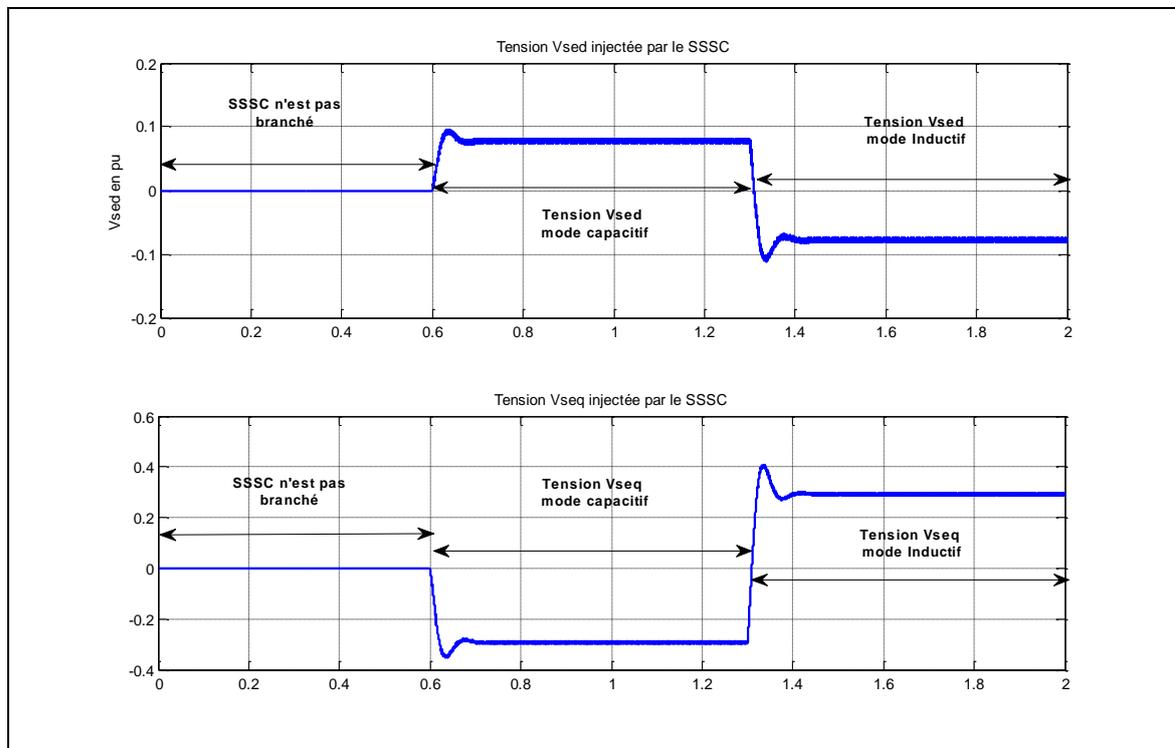


Fig. IV.12 Tension série Vse injectée par le SSSC

La tension V_{se} ramenée au repère synchrone (d, q) est représentée dans les différentes séquences de cette simulation dans la figure IV.12 ci-dessus.

Dans le mode de compensation capacitif la réactance de la ligne est réduite de la valeur $X=0.3$ pu jusqu'à $X=0.16$ pu et cela en injectant une tension $|V_{se}| = 0.25$ pu comme le représente la figure IV.14. Il en résulte de ce fait une amplification du courant dans la ligne et ce dernier peut attendre des valeurs proche de la limite thermique de la ligne figure IV.13.

Dans la phase de compensation inductive, limitée dans l'intervalle de temps 1.3 s jusqu'à 2.0 s, la réactance de la ligne augmente en limitant le courant I_{se} à 0.5 pu dans la but de contrôler le transit de la puissance dans la ligne figure IV.13.

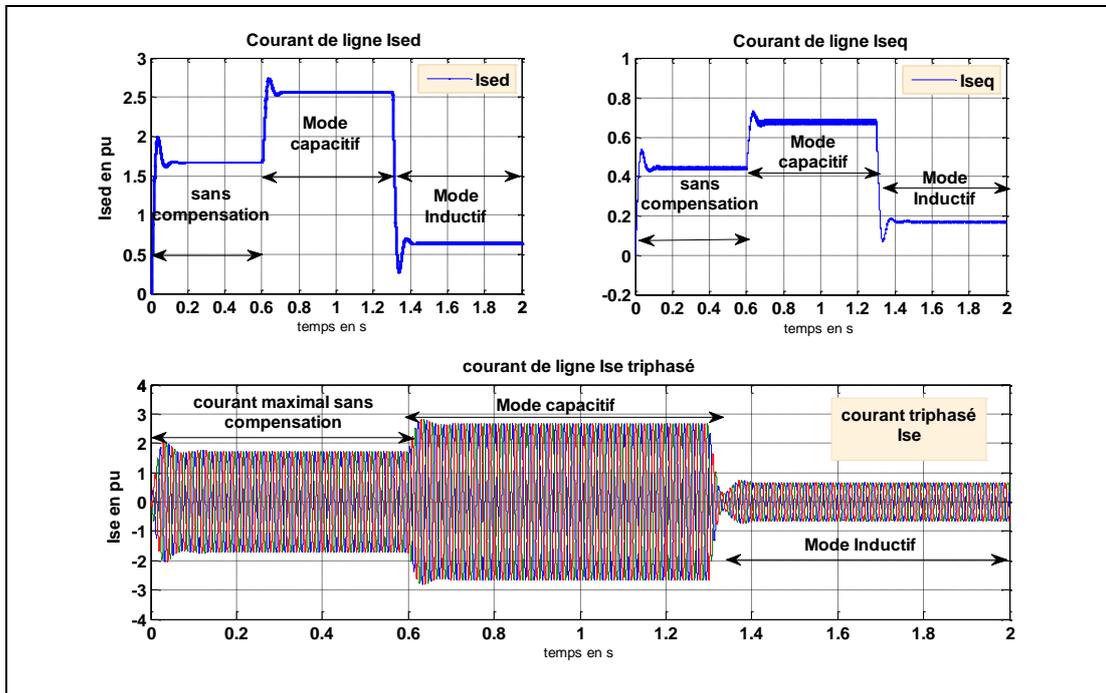


Fig. IV.13 Courant dans la ligne Ise

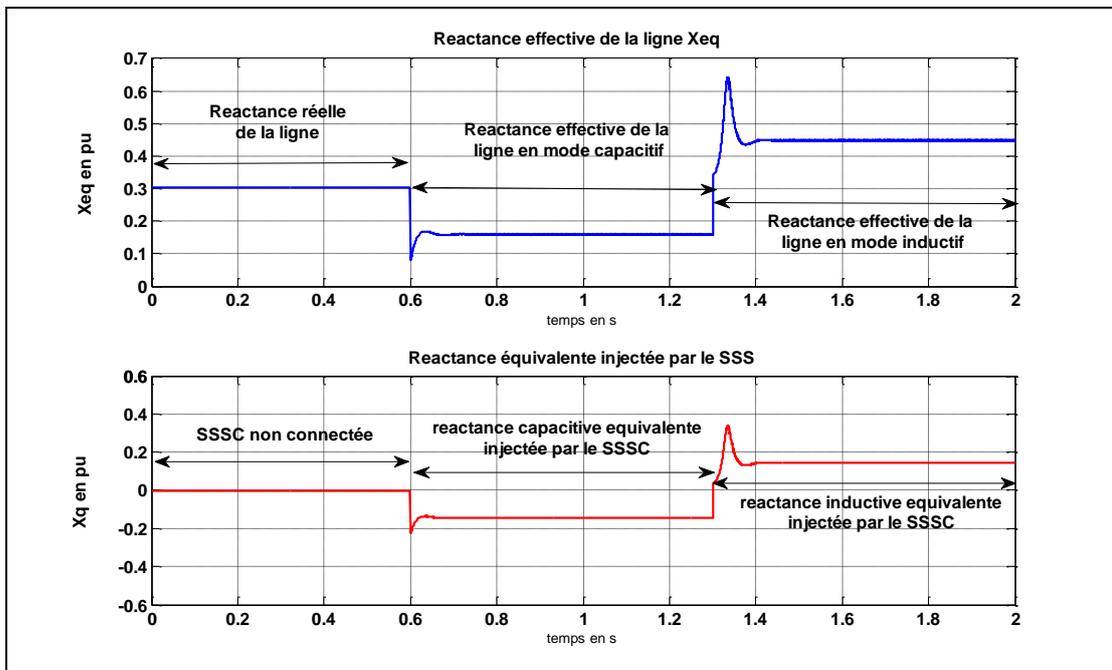


Fig. IV.14 Réactance équivalente de la ligne

A partir des courbes de la figure IV.15 ci-dessous nous observons clairement l'effet de la compensation série, avec une source de tension alternative, sur le transit de la puissance active et réactive dans une ligne de transport d'énergie électrique :

A l'instant $t=1.6$ s de mise en opération de l'SSSC en mode capacitif les quantités de puissance active et réactive maximale transportées par la ligne s'élèvent considérablement en fonction de l'abaissement opéré sur la réactance effective de la ligne électrique.

Dans le cas d'une compensation inductive à partir de l'instant $t=1.3$ s là où la tension V_{se} injectée est en avance du courant de la ligne, le transit de l'énergie peut être commandé et diminuer jusqu'à des valeurs très faible représentées sur la figure IV.15 dans le dernier intervalle [1.3 – 2 s].

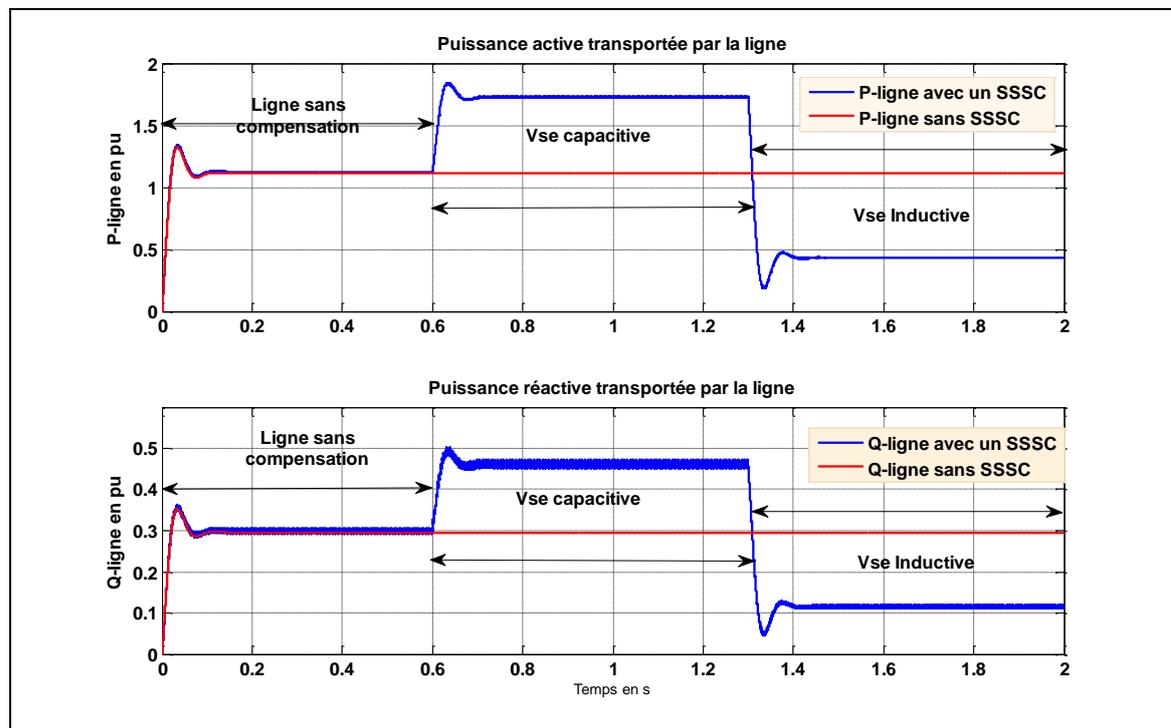


Fig. IV.15 puissances transportées par la ligne

La figure IV.16 a été relevée afin d'observer l'échange de puissance active et réactive entre ce dispositif (SSSC) et le réseau électrique. Nous avons observé que le l'échange de ce dispositif en énergie active avec le réseau est négligeable et que la petite quantité de cette puissance est consommée dans l'ordre de compenser les pertes dans le transformateur de couplage et des interrupteurs de l'onduleur.

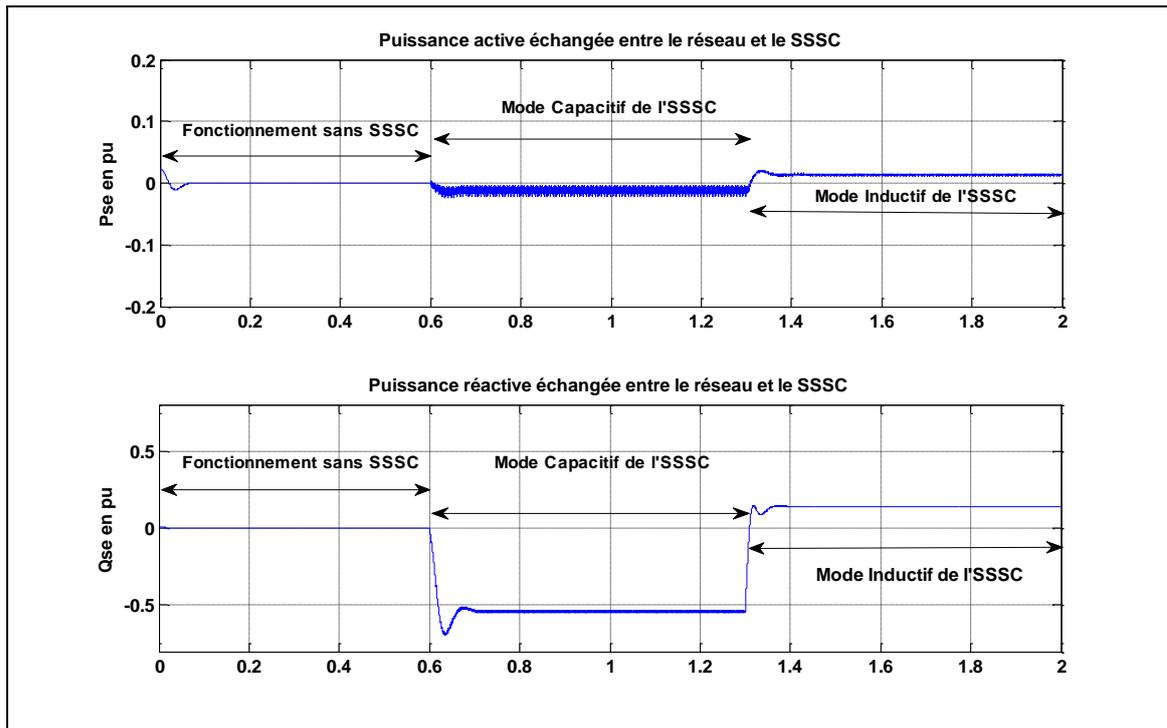


Fig. IV.16 Puissances échangées entre le SSSC et la ligne

IV. conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le réseau à simuler dans lequel nous avons introduit le contrôleur FACTS parallèle STATCOM afin de compenser la puissance réactive et maintenir la tension du jeu de barre où il est connecté. Pour cela nous avons réécrit les équations du modèle du STATCOM ainsi que ceux du réseau en grandeurs réduites puis effectuer les essais de simulation et observer le comportement de ce contrôleur dans deux cas de fonctionnement envisagé inductif et capacitif.

D'après les résultats de simulation nous avons vu le potentiel de la méthode Watt-Var découplée dans la régulation de la puissance active est réactive a travers le contrôle

des courants active et réactive correspondants. Le contrôle de ces derniers par des régulateurs proportionnel intégral a prouvé des résultats satisfaisants.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible appelée FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge des lignes, sont atteints et performés par l'injection des tensions (ou courants) des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes commandés en ouverture et en fermeture tels que les GTO, IGBT concernant la nouvelle génération de ces systèmes FACTS.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte sur le contrôle de la tension par compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif FACTS à base d'onduleur de tension STATCOM et le contrôle du flux de puissance et l'augmentation de la capacité de charge d'une ligne électrique en utilisant un compensateur FACTS série le SSSC.

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

D'abord nous avons commencé par une brève étude des lois de transport de l'énergie électrique en exposant la problématique de limite de puissance transportable en fonction des paramètres des réseaux ainsi que la chute de tension produite par le déséquilibre des charges. Nous avons aussi discuté rapidement les définitions et principes de fonctionnements des principaux dispositifs FACTS.

Le deuxième chapitre a fait l'objet d'une étude plus en détail sur le compensateur shunt STATCOM, sa structure, son principe de fonctionnement et son action compensative sur un réseau de transport électrique. De la même manière nous avons étudié la connexion série avec le compensateur synchrone statique le SSSC et démontré son apport considérable dans l'augmentation de la capacité de charge de la ligne de transport.

Comme toute étude structurée, le troisième chapitre était consacré à l'implémentation des modèles mathématiques dans le repère synchrone d-q de ces dispositifs, objets de cette étude, afin de mieux analyser et observer le comportement de ces derniers. La méthode de Watt-Var découplés a été adoptée comme stratégie de commande également pour le STATCOM et le SSSC.

Pour valider cette étude théorique, dans le dernier chapitre, nous avons effectué plusieurs essais de simulations sur un STATCOM insérés dans une ligne de transmission puis avec d'autres essais pour SSSC dans l'environnement Matlab-Simulink, et visualiser ainsi commenter les résultats obtenus.

Les résultats de simulations ont vérifié l'efficacité de la stratégie de commande adoptée qui a permis un contrôle indépendant et découplé des puissances active et réactive de ces dispositifs en minimisant l'effet d'interaction entre ces puissances.

Les régulateurs Proportionnel Intégral utilisés pour la régulation des grandeurs de ces dispositifs nous ont apportés des résultats très satisfaisants en matière de temps de réponse et l'amortissement des dépassements.

Enfin cette étude nous a permis de juger ces dispositifs très avantageux pour les réseaux électriques en démontrant une flexibilité, dans le contrôle de la majorité des paramètres du réseau, basée sur la commande à MLI des convertisseurs qui représente l'élément constitutif de base de ces dispositifs.

L'augmentation des capacités de transport de l'énergie électrique aux limites thermiques des lignes représente une solution précieuse au problème de reconstitution de nouvelles lignes électriques confronté par des contraintes environnementales, écologiques et économiques.

De plus que ces dispositifs n'échangent pas d'énergie active avec le réseau, leur compensation n'est pas faite par des condensateurs connectés directement au réseau ce qui élimine totalement le problème de résonance synchrone qui nuit au transport électrique.

Dans certaines applications, la tension ou le courant dans la ligne de transport sont déformés et contiennent des harmoniques de hautes fréquences, par conséquent un filtrage approprié de la tension et du courant sera nécessaire pour assurer le bon fonctionnement de ces dispositifs, une telle étude peut être un autre champ de recherche qui complètera au futur ce travail.

Cette étude peut être continuée aussi par une recherche concernant la contribution des systèmes FACTS (en particulier le STATCOM, le SSSC et l'UPFC) dans l'amélioration de la stabilité des systèmes énergétiques surtout dans les conditions de fonctionnement critiques et inattendues tels que les courts-circuits.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.
- [2] E.Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, "Power electronic control in electrical systems", Newnes 2002.
- [3] C.L.Wadhwa, "Electrical Power systems", Wiley Eastern Limited 1983.
- [4] Olle I.Elgerd, "Electrical Energy Systems Theory", McGraw-Hill Book Company, 1982.
- [5] Michel Grappe, "Commande et Régulation des Réseaux Electriques", Lavoisier, 2003.
- [6] Manish 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.
- [7] Xia Jiang, "Operating Modes and Their Regulations of Voltage-sourced Converters Based FACTS Controllers", thèse de Doctorat de L'institut Polytechnique Troy New York, mars 2007.
- [8] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho, "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [9] Pierre Johannet, "Ligne aériennes: chutes de tension", Technique de l'ingénieur traite génie électrique D 4438.
- [10] Pierre Bornard, Michel Pavard, "Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement", Technique de l'ingénieur traité génie électrique D 4090.
- [11] Amir H. Norouzi, " Flexible AC Transmission Systems: Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC", Thèse de magister de l'université de New Brunswick, 2003.
- [12] Eskandar Gholipour Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy 2003.
- [13] Joshua 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.

- [14] Siriroj Sirisukprasert, "The Modeling and Control of a Cascaded-Multilevel Converter-Based STATCOM", Thèse de doctorat , université de Blacksburg, Virginia, USA 2004.
- [15] Cristina I. Terek, "A new static synchronous series compensator for real power control on ac transmission lines", Thèse de magister, Université de Western Ontario, London Mai1999.
- [16] I. Papiê, "Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part1: mathematical models", electric power systems research, Elsevier science 56 (2000) 139-148.
- [17] Nitus Voraphonpiput et Somchai Chatratana, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.
- [18] Pranesh Rao, M.L.Crow, "STATCOM control for power system voltage control application", IEEE Transaction on power system, vol 15,no 4, October 2000.
- [19] Kalyan K. Sen, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Application", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998
- [20] Allaoui Tayeb, "réglage robuste de L'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissance dans un réseau électrique", mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran – 04/2002.
- [21] Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Jian Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller", publication IEEE 2005.
- [22] X.-P.Zhang, E. Handschin, M.Yao,"Multi-control functional static synchronous compensator (STATCOM) in power system steady-state operations", Electric power systems research, Elsevier science 72 (2004) 269-278.
- [23] P.Petitclair, Y.Besanger, S.Bacha, N.Hadjsaid, "FACTS modelling and control: application to the insertion of STATCOM on power system"IEEE – 1997.
- [24] S.Kannan, S. Jayaram, M.M.A. Salama," Real and Reactive Power Coordination for a Unified Power Flow Controller", IEEE transactions on power systems, Vol.19, No. 3, august 2004.
- [25] M.S. El-Moursi, A.M. Sharaf, "Novel reactive power controllers for the STATCOM and SSSC", Electric power systems research, Elsevier science 76 (2006) 228-241.

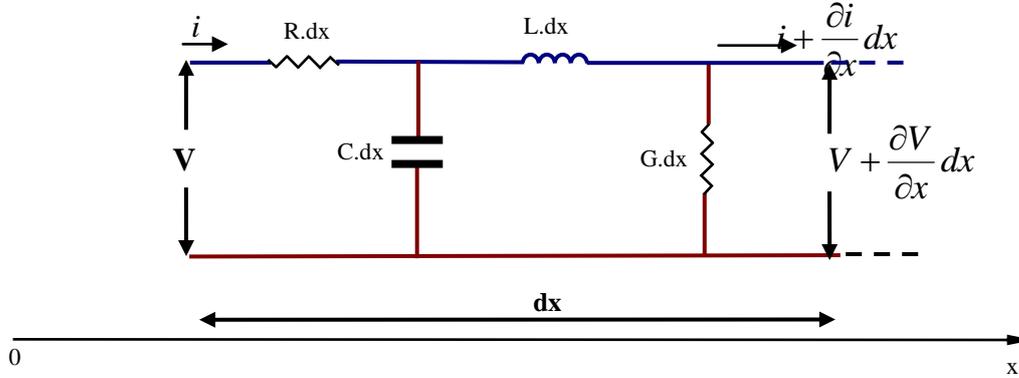
- [26] S.A. Al-Mawsawi, "Comparing and evaluating the regulation of a UPFC and STATCOM", *Electric power systems research*, Elsevier science 25 (2003) 735-740.
- [27] M. El-Moursi, A.M. Sharaf, K. El-Arroudi, "Optimal control schemes for SSSC for dynamic series compensation", *Electric power systems research*, Elsevier science 78 (2008) 646-656.
- [28] Pengcheng Zhu, Liming Liu, Xiaoyuan Liu, Yong Kang and Jian Chen, "A Novel Control Scheme for a Unified Power Flow Controller", *IEEE transaction* 2006.

ANNEXES

Annexe A

EQUATIONS D'UNE LIGNE ELECTRIQUE

Soit un élément de longueur dx d'une ligne électrique représentée sur la figure ci-dessous:



$$\begin{cases} V - (V + \frac{\partial V}{\partial x} dx) = (R.dx).i + (L.dx).\frac{\partial i}{\partial t} \\ i - (i + \frac{\partial i}{\partial x} dx) = (G.dx).V + (C.dx).\frac{\partial V}{\partial t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -\frac{\partial V}{\partial x} = R.i + L.\frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G.V + C.\frac{\partial V}{\partial t} \end{cases} \quad (A.1)$$

C'est une équation de propagation d'une onde

Pour une ligne en régime permanent avec des courants et tension sinusoïdales nous avons:

$$V = V(x).e^{j\omega t} \text{ Et } i = i(x).e^{j\omega t}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V(x)}{\partial x}.e^{j\omega t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial i(x)}{\partial x}.e^{j\omega t} \end{cases} \quad (A.2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} = j\omega.V(x).e^{j\omega t} \\ \frac{\partial i}{\partial t} = j\omega.i(x).e^{j\omega t} \end{cases} \quad (A.3)$$

En remplaçant (A.2) et (A.3) dans (A.1) et après tout calcul on obtient:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = (R + jL\omega)(G + jC\omega).V(x) \\ \frac{\partial^2 i(x)}{\partial x^2} = (R + jL\omega)(G + jC\omega).i(x) \end{cases} \quad (A.4)$$

On définit: - L'impédance caractéristique de la ligne par $Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$

- Et la constante de propagation $\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)}$

L'équation (A.8) devient:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 \cdot V(x) \\ \frac{\partial^2 i(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 \cdot i(x) \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

La solution de cette équation différentielle (A.5) est de la forme:

$$\begin{cases} V(x) = a \cdot \cosh(\gamma(x)) + b \cdot \sinh(\gamma(x)) \\ i(x) = c \cdot \cosh(\gamma(x)) + d \cdot \sinh(\gamma(x)) \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Avec a, b, c, et d sont des constantes à déterminer à partir des conditions initiales(0) et I(0):

(A.6) devient:

$$\begin{cases} V(x) = V(0) \cdot \cosh(\gamma(x)) - Z_c \cdot i(0) \cdot \sinh(\gamma(x)) \\ i(x) = i(0) \cdot \cosh(\gamma(x)) - \frac{V(0)}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma(x)) \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Pour le cas particulier R=G=0.

$$\gamma = j \sqrt{\frac{X_L}{X_C}} ; X_L = L\omega \text{ et } X_C = 1/C\omega$$

$$\text{Aussi nous avons: } \cosh(jB) = \frac{e^{jB} + e^{-jB}}{2} = \cos(B)$$

$$\sinh(jB) = \frac{e^{jB} - e^{-jB}}{2} = j \sin(B)$$

Et (A.7) sera comme suit:

$$\begin{cases} V(x) = V(0) \cdot \cos(\gamma(x)) - j \cdot Z_c \cdot \sin(\gamma(x)) \cdot i(0) \\ i(x) = -j \frac{V(0)}{Z_c} \cdot \sin(\gamma(x)) + \cos(\gamma(x)) \cdot i(0) \end{cases}$$

Annexe B

TRANSFORMATION DE PARK

B.1 Transformation de CONCORDIA

Cette transformation permet le passage d'un système triphasé équilibré à un système biphasé selon la figure suivante:

Soit les trois grandeurs d'un réseau électrique (tension par exemple V_s) équilibrées:

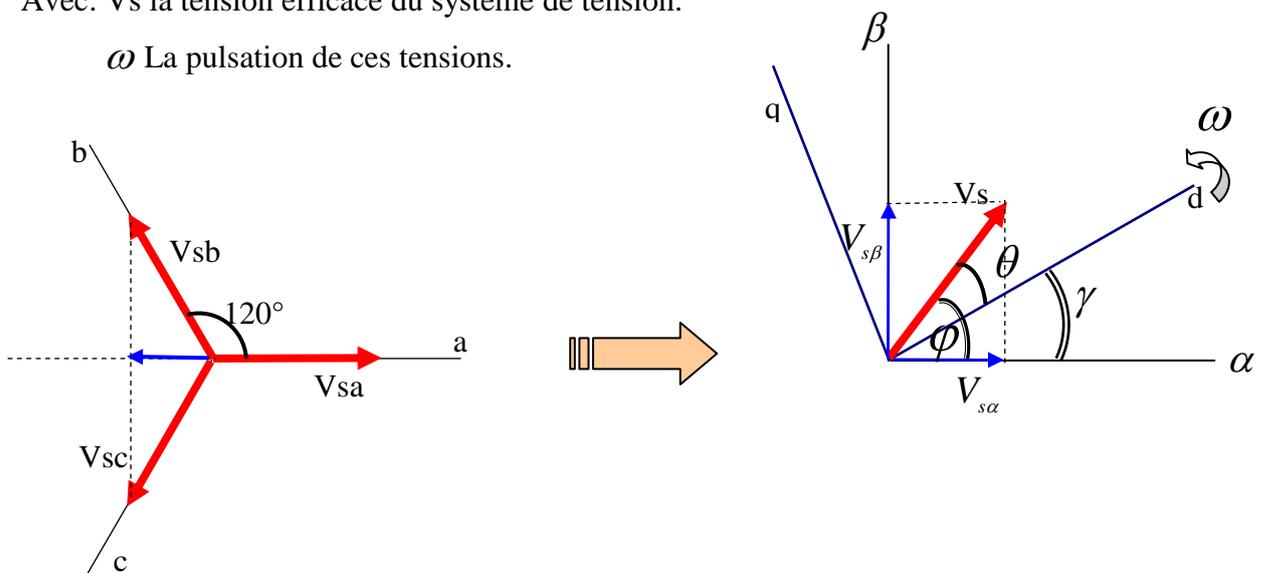
$$V_{sa} = V_s \cdot \sin(\omega.t)$$

$$V_{sb} = V_s \cdot \sin(\omega.t + 2\pi/3)$$

$$V_{sc} = V_s \cdot \sin(\omega.t + 4\pi/3)$$

Avec: V_s la tension efficace du système de tension.

ω La pulsation de ces tensions.



$$\begin{cases} V_{s\alpha} = K \cdot (1 \cdot V_{sa} - \frac{1}{2} \cdot V_{sb} - \frac{1}{2} \cdot V_{sc}) \\ V_{s\beta} = K \cdot (0 \cdot V_{sa} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{sc}) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = 2/3 \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

Avec le coefficient de normalisation de Concordia $K=2/3$

B.1 passage du repère fixe (α, β) au repère synchrone $(d-q)$

Le vecteur V_s dans le repère (α, β) s'écrit: $V_s^{\alpha,\beta} = V_s \cdot e^{j\varphi}$

Ce même vecteur s'écrit encore dans le repère (d-q) $V_s^{d,q} = V_s \cdot e^{j\theta}$

Le rapport de ces deux tensions est $\frac{V_s^{d,q}}{V_s^{\alpha,\beta}} = e^{-j\gamma}$ avec $\gamma = \frac{d\omega}{dt}$

D'ou $V_s^{d,q} = V_s^{\alpha,\beta} \cdot e^{-j\gamma}$

$$\begin{cases} V_{sd} = \cos(\gamma) \cdot V_{s\alpha} + \sin(\gamma) \cdot V_{s\beta} \\ V_{sq} = -\sin(\gamma) \cdot V_{s\alpha} + \cos(\gamma) \cdot V_{s\beta} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Le passage direct du triphasé au repère synchrone d-q se fait par le produit des deux matrices précédentes qui donne la matrice de Park généralisée suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\gamma) & -\sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma) & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$