

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**O USO DE CONTROLADORES *FACTS* NOS
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO**

Autor: Thialei Phillip Caldeira de Oliveira

Orientador: Luís F. J. Fernandes

Brasília, DF

2016



THIALEI PHILLIP CALDEIRA DE OLIVEIRA

**O USO DE CONTROLADORES *FACTS* NOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E
DISTRIBUIÇÃO**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel Engenharia de Energia.

Orientador: Luís F. J. Fernandes

Brasília, DF

2016

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Oliveira, Thialei.

O uso de controladores *FACTS* nos sistemas de transmissão e distribuição / Thialei Phillip Caldeira de Oliveira. Brasília: UnB, 2016. 48 p.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Luís F. J. Fernandes.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Sistemas de transmissão AC. 3. *FACTS*. 4. *TCSC*. 5. Simulação computacional. I. Fernandes, Luís F. J. II. O uso de controladores *FACTS* nos sistemas de transmissão e distribuição.

CDU Classificação



REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA

Thialei Philip Caldeira de Oliveria

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, apresentada e aprovada em 05/12/2016 pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. (Doutor): Luís Filomeno de Jesus Fernandes, UnB/ FGA

Orientador

Prof. (Mestre): Lélío Ribeiro Soares Junior, ENE-UnB

Membro Convidado

Prof. (Mestre): Kenneth Roosevelt Sampaio Mendonça, Eletronorte

Membro Convidado

Brasília, DF
2016

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento é em primeiro lugar ao meu Deus, que ao longo dessa jornada acadêmica tem dado-me graça em abundância para que a concretização do curso seja alcançada.

Aos meus pais e demais familiares, que sempre estiveram presentes em todas as etapas importantes da minha vida, instruindo-me e orientando-me no caminho certo, para que os meus projetos de vida sejam realizados.

Ao meu professor e orientador Luís Filomeno de Jesus Fernandes, que disponibilizou tempo e ensinamentos ao me orientar, sempre estando presente no passo a passo do desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Aos professores da Faculdade UnB – Gama, e em particular aos do curso de Engenharia de Energia, que se empenharam com seus esforços e dedicação durante a vigência do curso, em transmitir seus ensinamentos e vivência para a formação dos estudantes, e minha em particular, nas matérias por eles ministradas, fazendo com que o aprendizado adquirido seja o de melhor qualidade.

Finalmente, meus agradecimentos aos meus amigos de graduação, com os quais participei de trabalhos de grupo, partilhei horas de estudos, numa troca mútua de conhecimento no processo de aprendizado.

Thialei Phillip Caldeira de Oliveira

RESUMO

O presente trabalho aborda o uso de controladores *FACTS* nos sistemas de transmissão e distribuição expondo os problemas existentes nos sistemas elétricos que justificam o uso dos mesmos. São apresentados os diferentes tipos de compensação que podem ser feitas nas linhas de transmissão *AC*, ou seja, a compensação série, paralela e série-paralela utilizando-se os dispositivos *FACTS*. Apresentam-se os esquemas, as modelagens, os princípios de funcionamento e os efeitos dos mesmos no sistema. O foco desse trabalho é a compensação série mediante o uso do *TCSC*, que reduz a impedância da linha, sendo essa última o principal fator que limita a transmissão de potência ativa nos sistemas elétricos. A inclusão do *TCSC* resulta na diminuição da impedância da linha, e como efeito ocorre o aumento da potência transferida para valores próximos à capacidade térmica suportada pelos condutores. Mostra-se também os tipos de configurações de compensação série. Finalmente os modos de operação e a modelagem deste dispositivo *TCSC* é apresentada. A etapa final desse trabalho corresponde à simulações computacionais para todos os casos de aplicação de compensação série através do *TCSC*, por meio do software *MatLab*, onde são abordados dois tipos de sistemas: um de 5 barras e outro de 30 barras, para a validação dos programas e obtenção dos resultados finais.

Palavras-chave: Sistemas elétricos de potência, sistemas de transmissão *AC*, *FACTS*, *TCSC* e simulação computacional.

ABSTRACT

The present work deals with the use of FACTS controllers in the transmission and distribution systems exposing the existing problems in the electrical systems that justify their use. The different types of compensation that can be made in the AC transmission lines are presented, that is, the serial, parallel and serial-parallel compensation using the FACTS devices. The schematics, the modeling, the operating principles and the effects of the same are presented in the system. The focus of this work is the series compensation by using the TCSC, which reduces line impedance, the latter being the main factor that limits the transmission of active power in electrical systems. The inclusion of TCSC results in a decrease in line impedance, and as effect occurs the increase of power transferred to values close to the thermal capacity supported by the conductors. The types of serial compensation settings are also shown. Finally the modes of operation and modeling of this TCSC device is presented. The final step of this work corresponds to the computational simulations for all the cases of application of series compensation through the TCSC, through the software MatLab, where it is approached three types of systems: one of small size to test the programs, and two systems, being One medium-sized and one large, to validate the programs and obtain the final results.

Keywords: Electrical power systems, AC transmission systems, FACTS, TCSC and Computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de energia elétrico radial com três níveis de tensão. [5]	21
Figura 2 - Estrutura física de uma fase de um capacitor em série controlado por tiristores (<i>TCSC</i>) e a sua representação com reatância variável. [20].....	28
Figura 3 - Circuito equivalente do <i>SVC</i> . [4].....	30
Figura 4 - <i>SVC</i> conectado ao equivalente de Thévenin. [4]	30
Figura 5 - Representação de um <i>SVC</i> com capacitores fixos e <i>TCR</i> , e a sua representação com susceptância variável. [20].....	31
Figura 6 - Estrutura formada por um transformador série, um transformador de excitação, uma rede de tiristores e a representação do ângulo de fase variável. [20] ...	32
Figura 7 - Um <i>STATCOM</i> , como um <i>SVC</i> conectado a uma rede <i>AC</i> através de um transformador <i>shunt</i> conectado a uma fonte de tensão estática. [20].....	33
Figura 8 - <i>TSC</i> em série com o reator. [4]	35
Figura 9 - Diagrama esquemático do <i>SVC</i> e <i>TCSC</i> . [25]	36
Figura 10 - Diagrama dos modelos do <i>TSSC</i> e <i>TCSC</i> . [4]	38
Figura 11 - Circuito equivalente de um <i>TCSC</i> . [4]	38
Figura 12 - Circuito equivalente de um <i>TCSC</i> a) capacitivo e b) indutivo. [4].....	39
Figura 13 - Diagrama unifilar de um <i>TCSC</i> no modo bloqueado. [4].....	40
Figura 14 - Diagrama unifilar de um <i>TCSC</i> no modo contornado (<i>bypass</i>). [4].....	41
Figura 15 - Diagrama unifilar de um <i>TCSC</i> no modo de fase controlada. [4]	41
Figura 16 - O circuito de um <i>TCSC</i> . [4]	42
Figura 17 - Formas de ondas da corrente e tensão no circuito de um <i>TCSC</i> . [4].....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Cronograma de atividades a serem desenvolvidas.**Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE SÍMBOLOS

B_{SVC} - Susceptância variável do SVC

\tilde{E}_{SVC} - Tensão de alimentação do SVC

G_{SVC} - Resistência elétrica do SVC

\hat{I}_L - Corrente na linha de transmissão

I_l - Corrente no nó l

I_m - Corrente no nó m

$i_s(t)$ - Corrente de linha num TCSC

\hat{I}_{SVC} - Corrente no SVC

$i_T(t)$ - Corrente no reator

\hat{I}_{TCR} - Corrente no TCR

P - Potência ativa

P_l - Potência ativa no nó l

P_{lm} - Potência ativa Transferida Entre os nós l e m

P_{lm}^{reg} - Potência ativa transferida entre os nós l e m controlada pelo TCSC

Q - Potência reativa

Q_l - Potência reativa no nó l

Q_{vR} - Potência reativa entre o STATCOM e a rede AC

R_{lm} - Resistência elétrica entre os nós l e m

T_I - Variável complexa relacionada aos taps variáveis

T_V - Variável complexa relacionada aos taps variáveis

$v(t)$ - Tensão de alimentação

$v_c(t)$ - Tensão no capacitor

V_{c0} - Tensão residual sobre o capacitor

V_{c1} - Componente de frequência fundamental

V_E - Tensão na fonte emissora

\hat{V}_{eq} - Tensão Equivalente

$|V_l|$ - Magnitude da tensão no nó l

$|V_m|$ - Magnitude da tensão no nó m

V_R - Tensão na fonte receptora

$|V_{vR}|$ - Magnitude da tensão entre o *STATCOM* e a rede *AC*

X - Reatância série da linha

X_C - Reatância capacitiva

X_L - Reatância indutiva do *TCR* na frequência fundamental

X_l - Variável complexa relacionada aos *taps* variáveis

X_{lm} - Reatância entre os nós l e m

X_{SVC} - Reatância do *SVC*

X_{TCR} - Reatância do *TCR*

X_{TCSC} - Reatância do *TCSC*

X_v - Reatância controlável do *TCR* e do *SVC*

X_{vR} - Reatância entre o *STATCOM* e a rede *AC*

Z_{eq} - Impedância equivalente

Z - Impedância da linha de transmissão

Z_{TCSC} - Impedância do *TCSC*

α - Ângulo de atraso

β - Ângulo de avanço

θ_E - Ângulo de fase da tensão emissora

θ_l - Ângulo de fase da tensão no nó l

θ_m - Ângulo de fase da tensão no nó m

θ_R - Ângulo de fase da tensão receptora

θ_{vR} - Ângulo de fase da tensão entre o *STATCOM* e a rede AC

σ - Ângulo de condução

Φ - Ângulo de fase

ωt - Frequência angular

LISTA DE ABREVIATURAS

AC – *Alternate current* (corrente alternada)

FACTS – *Flexible alternate current transmission system* (Sistema flexível de transmissão em corrente alternada)

IEE – *Institute of electrical engineers* (Instituto de engenheiros elétricos)

IEEE – *Institute of electrical and electronics engineers* (Instituto de engenheiros elétricos e eletrônicos)

SPS – *Static Phase Shifter* (Deslocador estático de fase)

STATCOM – *Static compensator* (Compensador estático)

SVC – *Static var compensator* (Compensador estático de reativo)

TCR – *Thyristor controlled reactor* (Reator controlado por tiristor)

TCSC – *Thyristor controlled series capacitor* (Capacitor em série controlado por tiristor)

TSC – *Thyristor switched capacitor* (Capacitor comutado por tiristor)

TSSC – *Thyristor switched series capacitor* (Capacitor em série comutado por tiristor)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.2	OBJETIVO GERAL	17
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICO	17
1.4	METODOLOGIA.....	18
2	SISTEMAS DE TRANSMISSÃO AC	19
2.1	LIMITAÇÕES DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO AC.....	21
2.2	O USO DE DISPOSITIVOS <i>FACTS</i> NA COMPENSAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO	22
2.3	CONCLUSÃO.....	24
3	CONCEITO DE <i>FACTS</i>, ORIGEM, TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES	25
3.1	TIPOS DE DISPOSITIVOS <i>FACTS</i>	27
3.2	COMPENSAÇÃO SÉRIE	27
3.2.1	<i>TCSC</i>	28
3.3	COMPENSAÇÃO PARALELA.....	29
3.3.1	<i>SVC</i>	29
3.3.2	<i>SPS</i>	31
3.3.3	<i>STATCOM</i>	33
3.3.4	<i>TSC</i>	34
3.4	COMPENSAÇÃO SÉRIE-PARALELA.....	35
3.4.1	Combinação do <i>SVC</i> e <i>TCSC</i> usada na compensação série-paralela..	36
3.5	CONCLUSÃO.....	37
4	COMPENSAÇÃO SÉRIE MEDIANTE CONTROLE POR TIRISTORES	37
4.1	TIPOS DE CONFIGURAÇÕES SÉRIE	38
4.2	MODOS DE OPERAÇÃO DO <i>TCSC</i>	40
4.2.1	Tiristor no modo bloqueado	40
4.2.2	Tiristor no modo contornado (<i>bypass</i>)	40
4.2.3	Tiristor no modo de fase controlada	41
4.3	CÁLCULO DA REATÂNCIA DO <i>TCSC</i> (X_{TCSC}).....	42
4.4	CONCLUSÃO.....	45
5	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	45
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência conceitualmente são constituídos por unidades geradoras e seus equipamentos de controle, estações elevadoras/abaixadoras de tensão e linhas de transmissão. Nas condições atuais, em que ocorre a escassez cíclica dos recursos hídricos, a transmissão eficiente de energia dos centros geradores aos centros consumidores tem se tornado uma exigência da operação dos sistemas elétricos. Além disso, muitos centros consumidores localizam-se distantes da geração o que acarreta perdas significativas de potência e em alguns casos pode comprometer a estabilidade dos sistemas, pois nessas condições os sistemas tornam-se mais suscetíveis a faltas.

Nos sistemas de energia atuais, apesar das suas complexidades e do funcionamento nos seus limites físicos, deseja-se que os mesmos sejam robustos e que suportem todo o tipo de adversidades de falhas e que possam garantir o intercâmbio de energia entre as partes desses sistemas. Uma das premissas do bom funcionamento de um sistema elétrico é que o mesmo seja estável, garanta o fornecimento ininterrupto de energia e tenha grande capacidade de recuperar-se de faltas de diversas naturezas. Para tal, os sistemas de energia elétrica devem ser providos de sistemas de controle e de proteção.

Na operação dos sistemas, sempre deseja-se que a potência através das linhas de transmissão e/ou cabos elétricos seja sempre máxima, respeitando-se os limites de estabilidade e de segurança do sistema. Alguns fatores térmicos nos cabos, nas linhas de transmissão curtas, transformadores e geradores influenciam nos limites de potência elétrica transmitida; contudo nas linhas mais extensas a variação da tensão e garantia da estabilidade estão entre os fatores que mais influenciam na potência elétrica. Desta maneira, o perfil de tensão e a estabilidade de linhas de transmissão longas podem ser melhorados usando a compensação de potência reativa. Até aos anos 70 do século passado, a compensação de potência reativa era feita por reatores e capacitores fixos, geralmente equipamentos de controle mecânico. Posteriormente na compensação

variável de potência reativa usaram-se os condensadores síncronos e geradores de grande potência.

A partir de 1970 equipamentos concebidos a partir da eletrônica de potência têm sido desenvolvidos e aplicados para várias áreas de controle dos sistemas de transmissão. Na operação de sistemas de transmissão de corrente alternada dois fundamentos principais devem ser respeitados: a estabilidade (sincronismo) e o perfil de tensão. Por sincronismo, entende-se como sendo a capacidade do sistema continuar em operação estável em casos de ocorrência de faltas, perdas de equipamentos, etc. Por sua vez o perfil de tensão está relacionado a uma faixa estreita de níveis de tensão, valores máximos e mínimos de tensão nos quais os sistemas devem sempre operar.

Nas últimas duas décadas do século, foram concebidos os dispositivos *FACTS* [1], que usam tecnologia da eletrônica de potência [2]. Esses dispositivos quando instalados nos sistemas elétricos permitem a redução das perdas de potência, melhoram o fluxo de potência nas linhas de transmissão e contribuem para a melhoria da estabilidade dos sistemas no geral. Assim, os dispositivos *FACTS* [1] vem sendo usados entre as extremidades dos sistemas elétricos para compensação de potência reativa, em períodos de operação de minutos até algumas horas dependendo das condições de carregamento do sistema. Ao controlar o reativo nos sistemas elétricos, os *FACTS* controlam a estabilidade e a tensão do sistema.

Atualmente, devido às restrições ambientais que impedem a expansão e construção de novas linhas de transmissão, a alocação de dispositivos *FACTS* nos sistemas de transmissão tem sido bastante utilizada. Assim, pela importância desses equipamentos nos sistemas elétricos, esse trabalho visa apresentar uma revisão bibliográfica destes, apresentam-se as características e diagramas funcionais de cada tipo, locais de instalação e suas contribuições na melhoria de fluxo de carga nas linhas, ou no controle da tensão e/ou controle de estabilidade transitória/tensão dos sistemas.

As justificativas para o uso dos dispositivos *FACTS* nos sistemas de transmissão apresentam-se no sub-tópico 2.2.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Necessidade da melhoria no fornecimento de energia elétrica nos sistemas elétricos de potência apesar destes operarem nos seus limites físicos. A inclusão da compensação visa primordialmente aumentar o fluxo de potência e ao mesmo tempo melhorar a robustez do sistema. Sistemas robustos que suportem alguns tipos de falhas, continuando em operação e garantindo o intercâmbio de energia entre as partes desses sistemas. Uma das premissas para o bom funcionamento de um sistema elétrico é que o mesmo seja estável, preservando o fornecimento máximo de energia e que tenha a capacidade de recuperar-se de faltas acometidas no sistema, isso é uma particularidade da compensação.

1.2 OBJETIVO GERAL

Demonstrar que a utilização de controladores *FACTS* nos sistemas de transmissão e distribuição permite o aumento da capacidade de transferência de energia, de modo direto, e indiretamente contribuem na melhoria do perfil de tensão das barras do sistema. Ademais outras vantagens do uso dos *FACTS* resultam na melhoria do controle do sistema, contribuindo para o amortecimento dos modos dominantes dos sistemas. Nessa monografia dar-se-á ênfase ao aumento da capacidade de transmissão e a melhoria do perfil de tensão nas barras próximas em que foram instalados esses dispositivos. Para tal, mostram-se os esquemas de dois tipos de compensação série, a modelagem, o princípio de funcionamento de controladores *FACTS* do tipo *TCSC*.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

Mostrar através da compensação série mediante o uso do *TCSC*, que ocorre um aumento na potência transferida para valores próximos à capacidade térmica suportada pelos condutores, pois o mesmo reduz a impedância da linha, que é o principal fator que limita a transmissão de potência ativa nos sistemas elétricos. Apresentam-se igualmente os tipos de configurações série, os modos de operação e a modelagem do *TCSC*. Através de simulações computacionais por meio do software *MatLab* serão comprovados o aumento do fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão *AC* e a melhoria no perfil de tensão das barras, mediante o uso do *TCSC*.

1.4 METODOLOGIA

Este trabalho mostra os benefícios do uso de um tipo de controlador *FACTS* nos sistemas de transmissão e distribuição, apresentando-se o esquema, a modelagem e o princípio de funcionamento. Os efeitos desse tipo de *FACTS*, ou seja, do *TCSC* mostrar-se-ão após a obtenção dos resultados dos sistemas, que serão objeto de estudo.

A metodologia adotada nessa monografia pode ser resumida da seguinte forma: revisão bibliografia sobre os controladores *FACTS*. A escolha do tipo de controlador que melhor se adapta a reduzir a impedância da linha de transmissão visando maximizar o fluxo de potência. A apresentação dos modelos físico-matemáticos dos diferentes tipos de *FACTS*. Finalmente é apresentada a modelagem matemática do *TCSC*.

A modelagem desse último será usada em conjunto com os sistemas de geração de energia para a escrita dos programas na linguagem *MatLab*. Em posse dos programas computacionais serão estudados os dois tipos de sistemas para a obtenção dos resultados, que provem o uso deste tipo de controlador para alcançar os objetivos propostos, ou seja, a transferência máxima de energia e a melhora do perfil de tensão.

2 SISTEMAS DE TRANSMISSÃO AC

Um sistema de transmissão AC pode ser definido como a interligação das fontes geradoras e cargas do cliente através de uma rede de linhas de transmissão, transformadores e equipamentos auxiliares. Sua estrutura tem muitas variações que são o resultado da coesão da economia, da política, da engenharia e das decisões ambientais. Com base na sua estrutura, o sistema pode ser classificado de acordo com as regiões de instalação, em sistemas de malha e sistemas longitudinais [2]. Segundo [2] sistemas de malha podem ser encontrados em regiões com uma elevada densidade populacional, onde é possível construir estações para atender a demanda de carga nesses centros populacionais. Sistemas longitudinais são encontrados em regiões onde grandes quantidades de energia precisam ser transmitidas a longas distâncias a partir de estações de energia para os centros de carga [2].

Em qualquer estrutura de um sistema de transmissão, a energia flui por toda a rede. O equipamento primordial para que ocorra transferência de energia nos sistemas elétricos é a linha de transmissão. Do ponto de vista de modelagem, as linhas podem ser apresentadas no modelo Pi ou T. Independentemente do tipo de modelo usado para representar uma linha de transmissão, a potência ativa (elétrica) é inversamente proporcional a impedância. Assim, para diferentes tipos de linha a impedância influenciará a potência que nela flui de modos diferentes. As linhas de transmissão apresentam baixas impedâncias, quando comparadas com as linhas de distribuição. Por exemplo, uma linha de transmissão com baixa impedância permite maior fluxo de potência através dela, contrariamente a uma linha de transmissão com alta impedância.

A potência ativa em uma linha de transmissão conectada a uma estação de geração e a um centro de carga é dada por (assumindo que a linha seja sem perdas e ignorando o carregamento da mesma) [4]:

$$P = \frac{V_E V_R}{X} \sin(\theta_E - \theta_R) \quad (2.1)$$

Onde X é a reatância série da linha. Assume-se V_E e V_R constantes (através de reguladores de tensão nas duas extremidades) [4]. Define-se V_E e V_R , como sendo as tensões na parte emissora e receptora do sistema, respectivamente, e $(\theta_E - \theta_R)$ a diferença angular entre as tensões.

O transporte da energia é realizado em diversos níveis de tensão num sistema de transmissão, para uma mesma potência e para níveis de tensão diferentes, a impedância série da linha limitará a quantidade de energia que cada um dos sistemas transportará. Um sistema elétrico com alguns níveis de tensão diferentes apresenta-se na Figura 1. Na respectiva figura, um sistema elétrico constituído por transmissão, subtransmissão (média tensão) e distribuição é apresentado para fins elucidativos. A descrição do tipo de linha do sistema é dada abaixo [5, 6]:

Linhas de transmissão – são linhas que operam com as tensões mais elevadas do sistema (alta, extra e ultra-alta tensão) e seu objetivo principal é o transporte de energia do centro gerador a uma estação final abaixadora de um subsistema. As tensões padronizadas de alta tensão são 230 e 345 KV. As extra-altas tensões são 500 e 765 KV. Estão sendo feitas pesquisas em linhas para níveis de ultra-altas tensões (UAT) de 1000 a 1500 KV.

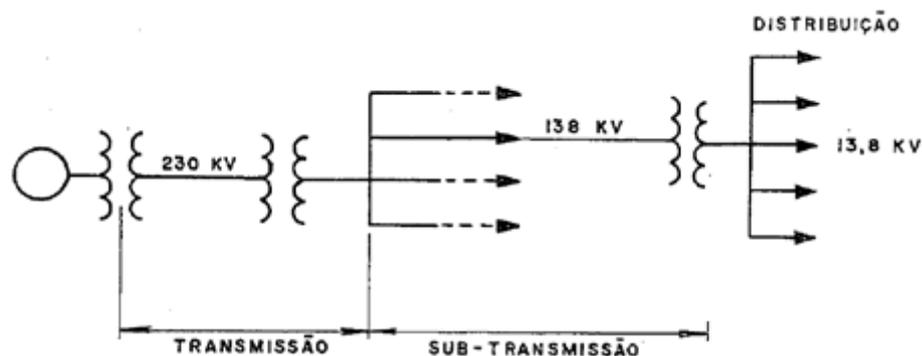


Figura 1 - Sistema de energia elétrico radial com três níveis de tensão. [5]

Linhas de subtransmissão – são linhas que operam ao nível de tensão da transmissão ou inferior, geralmente a tensão desse subnível é proveniente de uma subestação mantenedora ou redutora. A faixa de valores desse subsistema é de 34,5 a 138 KV.

Linhas de distribuição – são linhas que operam as tensões baixas para energizarem outras subestações, e/ou circuitos de pequenas fábricas, iluminação pública, e áreas residenciais, funcionando no nível de tensão de 13,8 kV a 380/220 V. Outros circuitos de distribuição funcionam nos subníveis de tensão de 480/277 V e 208/120 V.

2.1 LIMITAÇÕES DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO AC

Os sistemas de transmissão atuais são complexos, pois envolvem vários centros de geração, sistemas de transmissão extensos e distantes dos centros consumidores. Nessas condições, linhas de transmissão aéreas tornam-se suscetíveis a falhas causadas por raios, descargas atmosféricas e diminuição das distâncias de isolamento devido à vegetação rasteira.

Na operação normal de um sistema elétrico, as cargas de um sistema de energia podem variar de acordo com a hora do dia, pequenas variações randômicas de cargas, em geral, elas também estão sujeitas a variações provocadas pela temperatura ambiente bem como outros fatores imprevisíveis. Assim, o fluxo de potência em uma linha de transmissão pode variar, mesmo em regime permanente.

O fluxo de potência numa linha de transmissão AC é determinado pela primeira lei de Kirchhoff para injeções de potência (tanto ativa quanto reativa) em vários nós [4]. Na ocorrência de uma contingência (por exemplo, a abertura/remoção de uma linha, saída de um gerador) pode resultar em aumento/diminuição do fluxo de potência. Isto resulta em sobrecargas de algumas linhas e conseqüentemente uma ameaça para a estabilidade do sistema.

O aumento ou a diminuição de fluxo de energia numa linha em decorrência de algum tipo de falta originam fenômenos relacionados à estabilidade angular e de tensão, o que geralmente, requerem a ação de relés de proteção [4] para normalizar a operação do sistema. Os estudos da estabilidade angular e de tensão estão fora do escopo desse trabalho. Interessa-nos o estudo da capacidade máxima de transferência de fluxo nas linhas de transmissão sem que isso acarrete danos as linhas de transmissão e equipamentos elétricos. Com o objetivo de melhorar o desempenho das linhas de transmissão em termos de capacidade de escoamento de energia, e eliminar as limitações de transferência de energia, propõe-se nesse trabalho o uso de dispositivos *FACTS* nas linhas de transmissão.

A adição de novas instalações aos sistemas de transmissão e geração, segundo [2], permitem diminuir problemas do perfil de tensão, aumentar o fluxo de potência e melhorar a estabilidade tanto angular quanto de tensão.

2.2 O USO DE DISPOSITIVOS *FACTS* NA COMPENSAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

Em termos gerais, por compensação de reativo significa a injeção/remoção de reativo mediante equipamentos do tipo *FACTS*. Dois métodos de compensação mais usados são a compensação por impedância (*surge-impedance*) e a compensação por comprimento de linha. A compensação por comprimento de linha está associada a instalação de capacitores série ao longo da linha de transmissão. Um terceiro método de compensação denominado compensação por seccionamento, no qual é atingido pela instalação de compensadores em intervalos constantes ao longo da linha de transmissão.

Por qualquer dos métodos anteriormente descritos, com a compensação de linhas de transmissão deseja-se:

- 1) melhorar o perfil de tensão em todos os níveis do sistema de transmissão;
- 2) melhorar a estabilidade através do aumento da potência máxima transmitida;
- 3) fornecer potência reativa de modo mais econômico.

Os *FACTS* são dispositivos compensadores baseados em eletrônica de potência, que visam alcançar maior capacidade de transferência de potência e aumentar a controlabilidade de um sistema existente [1, 7-9]. Em geral, esses dispositivos controlam o sistema de energia através do fornecimento ou absorção da potência reativa dinamicamente. Num sistema de potência a potência ativa e reativa que fluem nesse sistema são dependentes dos níveis de tensão no terminal emissor V_E e no receptor V_R , do ângulo de fase entre esses terminais, e da impedância entre esses sistemas, segundo (2.1). Adota-se o modelo da linha de transmissão Π , ignorando-se a impedância *shunt* e a resistência série da linha de transmissão, considera-se apenas a reatância indutiva da impedância em série da linha de transmissão, em que ocorrerá a passagem do fluxo de potência ativa, como descrito em (2.1). Assim, o fluxo de potência reativa numa linha de transmissão é descrito com [9]:

$$Q = \frac{V_E^2 - V_E V_R \cos(\theta_E - \theta_R)}{X} \quad (2.2)$$

Onde X é a reatância série da linha. Define-se V_E e V_R , como sendo as tensões na parte emissora e receptora do sistema, respectivamente, e $(\theta_E - \theta_R)$ a diferença angular entre as tensões.

O controle da potência reativa usando *FACTS* não necessita de outros equipamentos de comutação estática. Em [9] refere-se que um dos benefícios da conexão série dos dispositivos *FACTS* é controlar a transferência de potência em regime permanente. A compensação série é usada para encurtar o comprimento elétrico das linhas, permitindo assim o aumento de fluxo que nela circula. Para

melhorar a capacidade de controle dos sistemas de transmissão, os *FACTS* são introduzidos por oferecer uma boa relação custo-benefício para a compensação da rede e um controle eficiente. O uso desse tipo de compensação melhora as condições de carga e de tensão do sistema [2]. Contudo, o uso da compensação série deve ser evitada em condições de operação de carga mínima, pois aumenta a produção de reativo na linha e isso pode originar sobretensões na linha de transmissão, pois haverá potência reativa em excesso no sistema.

Embora existam muitas vantagens do uso de equipamentos de compensação, o número de instalações que fazem uso destes, ainda são reduzidos quando comparados com os equipamentos de compensação fixa [9]. A justificativa adotada para usar os *FACTS* que são de natureza eletrônica em detrimento de equipamentos mecânicos e de transformadores defasadores baseia-se nos custos de manutenção mecânica dos *taps* comutadores de carga. Os dispositivos *FACTS* controlam o fluxo de potência ativa mediante o fornecimento ou absorção da potência reativa de forma dinâmica. Não utilizam-se componentes mecânicos na fabricação dos dispositivos *FACTS*, ou seja, são apenas de natureza eletrônica, eles são capazes de atuarem em curtos intervalos de tempo, geralmente na faixa dos 25 milissegundos (ms), que é relativamente rápido quando comparados com os transformadores defasadores [8]. Ao atuarem dessa maneira, a compensação série pode melhorar tanto a estabilidade de tensão, bem como a estabilidade de ângulo, que são dois principais problemas dos sistemas de potência [7]. O estudo de alocação de dispositivos *FACTS* está relacionado primeiramente com a melhoria da estabilidade de tensão, ou seja, a garantia de limites de tensão e assim aumentar a capacidade de transferência da linha de transmissão.

De modo geral, a alocação da compensação série, envolve várias áreas dos sistemas elétricos de potência, tais como o fluxo de carga, o controle das tensões nas barras em que existem compensação e o controle do ângulo das máquinas.

2.3 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentado o comportamento dos sistemas elétricos não compensados e compensados. Os fundamentos teóricos sobre a operação em geral, considerando-se apenas o requerimento da potência reativa, o perfil de tensão e a estabilidade foram revistos. Foi feita a abordagem de um sistema de transmissão AC, bem como foi justificado o uso de compensação série na melhoria dos sistemas de transmissão atuais. Foram apresentados os diferentes métodos para melhorar o desempenho dos sistemas de transmissão, incluindo a compensação série e *shunt*, e a compensação fixa.

3 CONCEITO DE FACTS, ORIGEM, TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES

Os *FACTS* são definidos como equipamentos que utilizam a eletrônica de potência e que permitem maior flexibilidade no controle dos sistemas elétricos. Neste caso, entende-se flexibilidade como a capacidade rápida e contínua de alteração dos parâmetros (nível de tensão, impedância de transferência e ângulo de transmissão) que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema elétrico [7, 8].

O aumento da carga nos centros consumidores associado com as restrições ambientais e econômicas impostas para a construção de novas linhas de transmissão e centros de geração exige a necessidade de melhorar os sistemas já existentes.

Assim, uma tendência para a otimização da capacidade de transmissão é a utilização de dispositivos baseados em eletrônica de potência, conhecidos como

FACTS. Estes permitem uma maior flexibilidade na operação e controle de sistemas de potência, diminuindo a restrição da transmissão e aumentando sua capacidade de transferência [9].

Os *FACTS* começaram a ser implementados no final da década de 60 do século passado, contudo a nomenclatura *FACTS* deve-se a Hingorani [1] no seu artigo seminal “*Power Eletronics in Eletric Utilies/Role of Power Eletronics in Future Power System*”. A ideia desse trabalho é o uso extensivo da eletrônica de potência para o monitoramento e controle dos sistemas de potência. Esse conceito é hoje utilizado desde a transmissão até aos sistemas de distribuição. Inicialmente, os dispositivos *FACTS* foram baseados no uso de tiristores de potência [7-9], bem como no uso e desenvolvimento de novos dispositivos semicondutores autocomutados.

Do ponto de vista tecnológico os dispositivos *FACTS* são concebidos utilizando tiristores e/ou comutadores. Esses dispositivos eletrônicos podem ser estruturados num arranjo em série ou *shunt*. Essa abordagem será feita mais adiante.

O uso dos *FACTS* permite que os seguintes objetivos sejam alcançados: permitir a importação e a exportação de potência entre diferentes áreas, melhorar o fluxo de potência nas linhas de transmissão, aumento no limite de operação dos sistemas [4, 7], melhorar a estabilidade transitória dinâmica e o controle de tensão nos sistemas [2]. A inclusão dos dispositivos *FACTS* altera fisicamente a topologia dos sistemas, e isso repercute diretamente na quantidade do fluxo de potência que passa pelo sistema.

Os dispositivos *FACTS* são controladores de diversa natureza, devido ao fato de poderem ser usados em série ou em paralelo [2, 4], de modo individual ou em conjunto com outros equipamentos. Esses dispositivos permitem alterar a impedância série e/ou *shunt* dos sistemas. Eles interferem na operação dos sistemas através de variáveis elétricas como a corrente [20], tensão, ângulo de fase e a oscilação de frequência. Como controladores, os *FACTS* são usados para análise de estabilidade dinâmica [2], estudo de estabilidade transitória [10, 11], controle de potência ativa e reativa [18], controle de tensão [19], etc.

3.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS *FACTS*

No nosso conhecimento, não existe uma classificação unânime dos tipos de dispositivos *FACTS*, regulamentada por uma força tarefa do *IEEE*, ou *IEE* ou organismo similar. Na literatura, os dispositivos *FACTS* são classificados segundo o ponto de vista do autor da referência, da tecnologia utilizada [1], do tipo de compensação, ou seja, do modo como são instalados nos sistemas.

Segundo bibliografia [2, 4], os dispositivos *FACTS* são classificados em: compensação série, compensação paralela e compensação série-paralela. A seguir, apresentam-se os diferentes tipos de *FACTS* de acordo com a classificação anterior. Nesse trabalho será enfatizado apenas o uso da compensação série nos sistemas de transmissão.

3.2 COMPENSAÇÃO SÉRIE

A impedância da linha de transmissão é o principal fator que limita a transmissão de potência ativa nos sistemas elétricos. A compensação série objetiva reduzir a impedância da linha [4], resultando conseqüentemente no aumento da potência transferida para valores próximos à capacidade térmica suportada pelos condutores. Nesse tipo de compensação o *TSSC* e o *TCSC* são usados [7-12]. A compensação série pode fornecer as seguintes melhorias para as redes de transmissão em longa distância [2]: diminui a queda de tensão nas linhas, diminui o ângulo da transmissão de linhas existentes, aumenta a estabilidade do sistema, etc.

A seguir apresenta-se o *TCSC* que é um dispositivo *FACTS* usado na compensação série.

3.2.1 TCSC

O TCSC tem como objetivo a diminuição da impedância da linha de transmissão no qual ele é inserido. O TCSC varia o comprimento elétrico da linha de transmissão compensada com um pequeno atraso. Devido a sua característica, ele pode ser usado para proporcionar a regulação rápida da potência ativa. O uso do TCSC aumenta a margem de estabilidade do sistema e tem provado ser efetivo no amortecimento das oscilações [20, 22].

O modelo do TCSC apresentado nesse capítulo baseia-se no conceito de reatância série não linear, o qual é ajustável para satisfazer uma potência ativa específica através da reatância variável representada nesse equipamento [23]. O diagrama esquemático do TCSC e o seu circuito equivalente mostram-se na Figura 2.

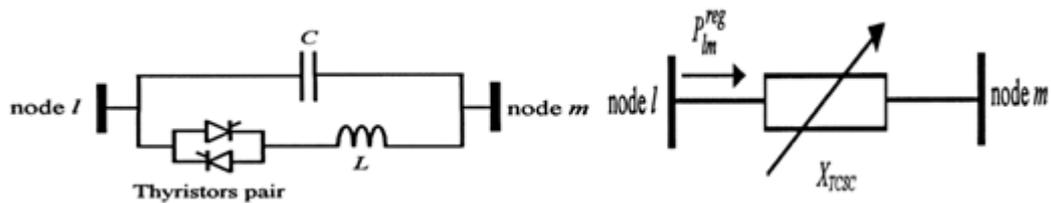


Figura 2 - Estrutura física de uma fase de um capacitor em série controlado por tiristores (TCSC) e a sua representação com reatância variável. [20]

A potência elétrica P_{lm} transferida através da linha representada pela impedância entre os nós l e m depende das magnitudes das tensões $|V_l|$ e $|V_m|$, da diferença dos ângulos de fase θ_l e θ_m , e também da impedância da linha $Z = R_{lm} + jX_{lm}$. Nas linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão pode-se aproximar a impedância da linha a apenas a parte reativa da mesma, assim a potência ativa transferida entre os nós l e m escreve-se [20]:

$$P_{lm} = \frac{|V_l||V_m|}{X_{lm}} \sin(\theta_l - \theta_m) \quad (3.1)$$

Se o ramo elétrico for controlado pelo TCSC em oposição a linha de transmissão, o cálculo da potência entre os nós l e m é dado por [20]:

$$P_{lm}^{reg} = \frac{|V_l||V_m|}{X_{TCSC}} \sin(\theta_l - \theta_m) \quad (3.2)$$

Na equação (3.2) o termo X_{TCSC} é a reatância do TCSC que pode ser ajustada para regular a potência elétrica da linha via TCSC, portanto, a potência da linha P_{lm} sem compensação passa a ser a potência P_{lm}^{reg} . A abordagem detalhada dessa modelagem será apresentada no capítulo 4.

3.3 COMPENSAÇÃO PARALELA

A compensação paralela é definida como todo tipo de compensação reativa, utilizando unidades de comutação que são controladas mecanicamente ou eletronicamente, que estejam ligadas em paralelo [2, 4] em um dado nó (ponto) da rede de transmissão. Os dispositivos FACTS usados nesse tipo de compensação são: o SVC, SPS, STATCOM e o TSC [12-17, 20].

A seguir apresentam-se o SVC, SPS, STATCOM e o TSC que são dispositivos FACTS usados na compensação paralela.

3.3.1 SVC

Do ponto de vista operacional, o SVC comporta-se como um *shunt* conectado com uma reatância variável, o que permite gerar ou absorver potência reativa visando regular a magnitude de tensão do sistema [17, 21]. Na sua forma mais simples, o SVC consiste de um TCR em paralelo com um banco de capacitores. É amplamente utilizado para fornecer potência reativa [2] e para a regulação de tensão. O controle do ângulo de disparo do tiristor permite que o SVC tenha uma velocidade de resposta quase instantânea. É usado extensivamente para fornecer rapidamente potência reativa e suportar a regulação de tensão. Também é

conhecido por aumentar a margem de estabilidade e amortecer as oscilações dos sistemas [24]. Nos estudos de fluxo de carga, o SVC é geralmente modelado com um gerador síncrono com geração de potência ativa nula; e que são fornecidos os limites máximos e mínimos de geração de potência reativa. Na Figura 3, mostra-se um circuito equivalente de um SVC, enquanto que na Figura 4 mostra-se o mesmo ligado a uma rede AC.

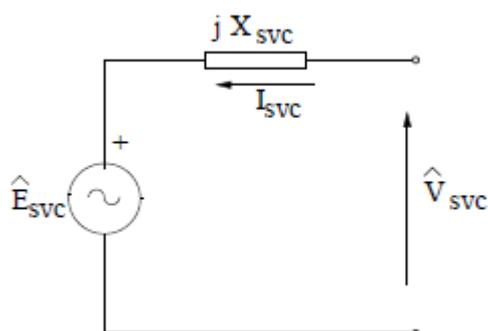


Figura 3 - Circuito equivalente do SVC. [4]

A rede externa para o SVC é modelada através do equivalente de Thévenin [4]. Se as impedâncias da rede são constantes, Z_{eq} permanece constante. A impedância equivalente é calculada como a impedância da rede vista nos terminais do SVC quando todas as fontes da rede são curto-circuitadas. \hat{V}_{eq} varia com o tempo, como as tensões do gerador variam durante uma perturbação.

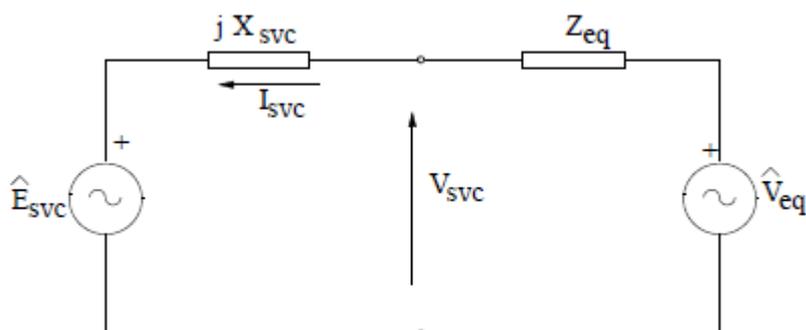


Figura 4 - SVC conectado ao equivalente de Thévenin. [4]

Da Figura 4, a corrente no SVC é calculada como [4]:

$$\hat{I}_{SVC} = \frac{(\hat{V}_{eq} - \hat{E}_{SVC})}{(Z_{eq} + jX_{SVC})} \quad (3.3)$$

Uma representação esquemática de um modelo mais realista do SVC mostra-se na Figura 5, em que o *TCR* é conectado em paralelo com um banco de capacitores fixo.

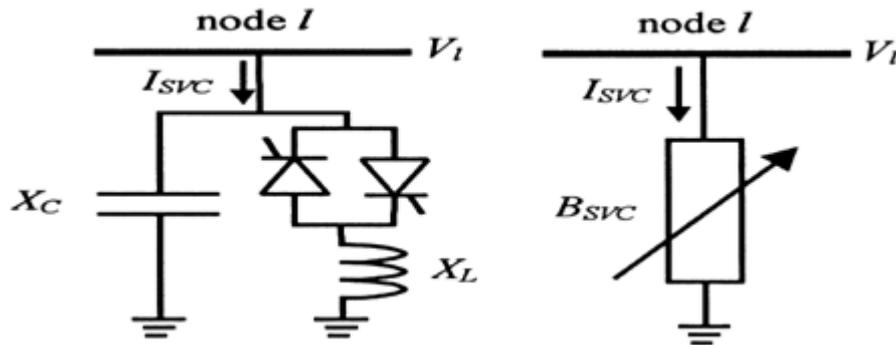


Figura 5 - Representação de um SVC com capacitores fixos e *TCR*, e a sua representação com susceptância variável. [20]

Num compensador *shunt* variável assume-se não ter componentes resistivos, ou seja, $G_{SVC} = 0$, para que o equipamento, não absorva potência ativa a partir da rede. Mas para que o equipamento forneça potência reativa em função da magnitude da tensão nodal do ponto de conexão, isto é do nó *l*, o SVC tem uma susceptância variável B_{SVC} . A formulação para o SVC é dada por [20]:

$$P_l = 0 \quad (3.4)$$

$$Q_l = -|V_l|^2 B_{SVC} \quad (3.5)$$

3.3.2 SPS

Antes da concepção destes equipamentos, sempre que se pretendia mudar ou variar o ângulo de fase da tensão na linha isso era implementado através de transformadores defasadores mecânicos. Com o advento do deslocador estático de fase (*SPS*) pode-se injetar uma tensão em quadratura com a tensão de linha na

barra de origem. Esse equipamento é usado para providenciar regulação rápida de potência ativa [1].

O modelo para estudos de fluxo de potência do deslocador estático de fase baseia-se no conceito de um transformador sem perdas com *taps*. A variável a ser controlada é o ângulo de fase, que é ajustado através do *SPS* [23] para que uma potência ativa específica flua através do transformador sem perdas.

Uma representação de um deslocador estático de fase (*SPS*) e do seu circuito equivalente, mostram-se na Figura 6, abaixo.

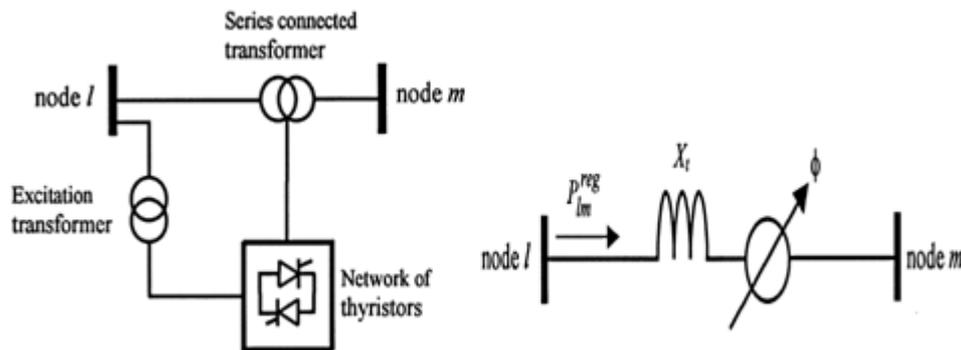


Figura 6 - Estrutura formada por um transformador série, um transformador de excitação, uma rede de tiristores e a representação do ângulo de fase variável. [20]

Um controlador de deslocamento de fase com relação de ângulos de fases dados por [20]:

$$T_V = \cos \Phi + j \sin \Phi \quad (3.6)$$

e

$$T_I = \cos \Phi - j \sin \Phi \quad (3.7)$$

Que tem a seguinte função admitância na forma matricial [20]:

$$\begin{bmatrix} I_l \\ I_m \end{bmatrix} = \frac{1}{X_t} \begin{bmatrix} 1 & -(\cos \Phi + j \sin \Phi) \\ -(\cos \Phi - j \sin \Phi) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_l \\ V_m \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Na equação (3.8), as variáveis X_l , T_V e T_l são variáveis complexas relacionadas aos *taps* variáveis, relacionadas uma com a outra pela operação de conjugação.

3.3.3 STATCOM

O STATCOM é uma concepção estática do condensador síncrono rotativo, contudo ele gera/absorve potência reativa numa taxa rápida porque esse equipamento não possui partes móveis (rotativas) envolvidas. Esse equipamento desempenha o mesmo papel na regulação da tensão como o SVC. Segundo [20] o STATCOM é mais robusto que o SVC, pois na sua operação existem presenças de tensões baixas (pequenas).

O diagrama esquemático do STATCOM e o seu circuito equivalente mostram-se na Figura 7. O STATCOM tem a capacidade de gerar e absorver potência reativa através do controle adequado da tensão invertida $|V_{vR}| \angle \theta_{vR}$ com relação a tensão em AC no lado de alta tensão do transformador do STATCOM, isto é, do nó l , $|V_l| \angle \theta_l$.

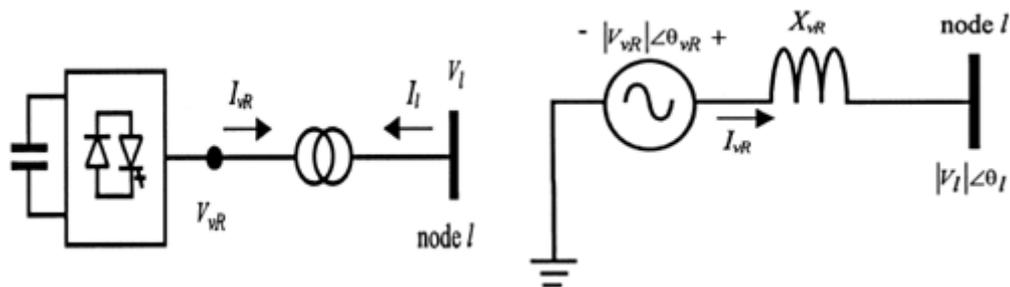


Figura 7 - Um STATCOM, como um SVC conectado a uma rede AC através de um transformador *shunt* conectado a uma fonte de tensão estática. [20]

Para um STATCOM ideal, em que não ocorre perdas de potência ativa, a equação de potência reativa abaixo mostra-se útil no entendimento de como ocorre a variação de potência reativa entre o STATCOM e a rede AC, e chega-se [20]:

$$Q_{vR} = \frac{|V_l|^2}{X_{vR}} - \frac{|V_l||V_{vR}|}{X_{vR}} \cos(\theta_l - \theta_{vR}) = \frac{|V_l|^2 - |V_l||V_{vR}|}{X_{vR}} \quad (3.9)$$

Onde $\theta_{vR} = \theta_l$ para o caso em que não ocorram perdas no *STATCOM*. Quando o *STATCOM* absorve potência reativa, Q_{vR} é positiva, se $|V_l| > |V_{vR}|$. Por sua vez, quando $|V_l| < |V_{vR}|$ a potência Q_{vR} torna-se negativa e o *STATCOM* gera potência reativa. Em estudos de fluxo de potência, um modelo mais flexível do *STATCOM* é especificado em termos da magnitude da tensão no ponto de conexão com o sistema AC dado por [20]:

$$V_{vR} = |V_{vR}|(\cos\theta_{vR} + j\sin\theta_{vR}) \quad (3.10)$$

Nota-se que os limites máximos e mínimos que existem para $|V_{vR}|$ dependem da capacidade nominal do *STATCOM*.

3.3.4 TSC

Quando a tensão do sistema é baixa, o SVC gera potência reativa capacitiva [15-17]. Quando a tensão do sistema é elevada, absorve potência reativa indutiva. A potência reativa é mudada ligando os bancos trifásicos capacitivos conectados ao lado secundário do transformador [15, 17]. Cada banco capacitivo é ligado ou desligado por válvulas tiristorizadas (*TSC*).

Quando um capacitor é ligado a uma fonte de tensão senoidal, uma grande corrente flui através do capacitor [4]. A tensão inicial do capacitor é diferente da tensão de alimentação no instante de comutação. A corrente através do capacitor corresponde ao valor de estado estacionário [4], se a tensão inicial do capacitor for igual a tensão de alimentação no instante de interrupção. No entanto, a taxa de variação da corrente será muito alta. Para limitar a taxa de variação da corrente é necessário inserir um reator em série com o capacitor, como mostra a Figura 8.

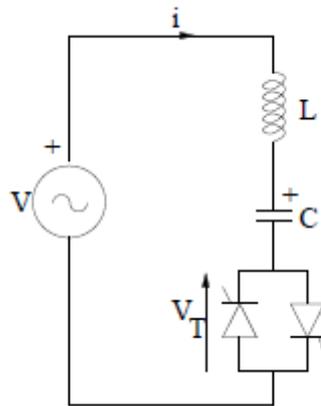


Figura 8 - TSC em série com o reator. [4]

A tensão de alimentação é definida como [4]:

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega_0 t + \alpha) \quad (3.11)$$

Se a comutação é transiente, as seguintes condições devem ser cumpridas [4]:

$$\cos \alpha = 0 \rightarrow \sin \alpha = \pm 1 \quad (3.12)$$

$$V_{CO} = \pm \sqrt{2} \frac{V_n^2}{V_n^2 - 1} = \pm \sqrt{2} X_C I_{AC} \quad (3.13)$$

Na prática, não é possível satisfazer ambas as condições. Em geral, a tensão residual sobre o capacitor V_{CO} pode variar de 0 a $\sqrt{2}V (n^2/n^2 - 1)$ [4].

3.4 COMPENSAÇÃO SÉRIE-PARALELA

A compensação série-paralela é formada pela combinação de dispositivos FACTS em série e em paralelo separados e controlados de maneira sistematizada, ou então por um regulador de fluxo de potência unido com dispositivos em série e em *shunt* [25]. Em princípio, nesses dispositivos com a parte série ocorre a diminuição da impedância e em conseqüência o aumento da corrente, e com a parte *shunt* injetam/removem reativo, aumentando/diminuindo a tensão no sistema [25].

No entanto, quando os reguladores estão unidos pode existir troca de potência ativa entre os dispositivos *série* e *shunt*.

A seguir apresentam-se a combinação do SVC e TCSC usada na compensação série-paralela.

3.4.1 Combinação do SVC e TCSC usada na compensação série-paralela

A compensação série-paralela é feita basicamente usando dois dispositivos FACTS de compensação, um de compensação série e outro de compensação paralela, numa composição para formar um dispositivo série-paralelo. A estrutura comum de uma compensação série-paralela formada por um SVC e um TCSC mostra-se na Figura 9.

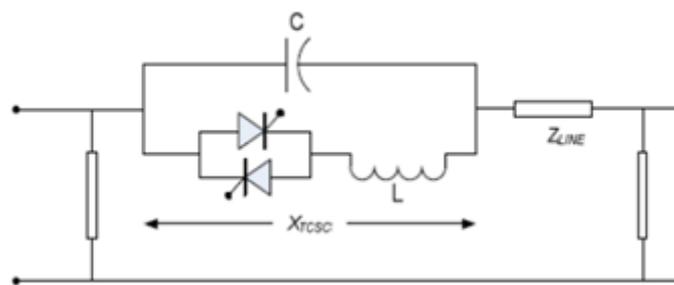


Figura 9 - Diagrama esquemático do SVC e TCSC. [25]

As principais diferenças entre os dois dispositivos são as seguintes [25]: o SVC é o *shunt* conectado a barra enquanto que o TCSC é conectado em série com a linha de transmissão, e ainda o SVC é conectado a barra por intermédio de um transformador abaixador (reductor) e por sua vez o TCSC é ligado diretamente a linha de transmissão. A reatância controlável X_V do TCR e do SVC é dada pela seguinte equação [25]:

$$X_V = X_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (3.14)$$

Onde, X_L representa a reatância indutiva do TCR na frequência fundamental.

3.5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram apresentados alguns modelos de componentes usados no controle de potência reativa e da magnitude de tensão nos sistemas de transmissão AC. As principais características dos mais importantes dispositivos *FACTS* foram apresentadas de modo simples e compreensível em termos de modelos para estudos de fluxo de carga. Os seguintes dispositivos *FACTS* foram apresentados: *TCSC*, *SVC*, *SPS*, *STATCOM* e *TSC*.

4 COMPENSAÇÃO SÉRIE MEDIANTE CONTROLE POR TIRISTORES

Nos sistemas elétricos de potência atual com restrições na construção de novas instalações e na utilização máxima das existentes visando obter o fluxo de potência máximo, requer de alguma forma um tipo de compensação. Os tipos de compensação usadas nos sistemas físicos de potência são: série, paralela e série-paralela. Embora existam dois tipos de compensação série, nomeadamente *TSSC* e

TCSC, nesse capítulo se aborda a compensação série de linhas de transmissão elétricas através do *TCSC*. Assim, enfatizam-se os tipos de configurações série, os modos de operação e a modelagem deste dispositivo.

4.1 TIPOS DE CONFIGURAÇÕES SÉRIE

Basicamente existem os dois tipos de compensação série mostrados na figura abaixo. Na Figura 10, o diagrama a esquerda representa o modelo do *TSSC*, enquanto que o diagrama da direita se apresenta o modelo do *TCSC*.

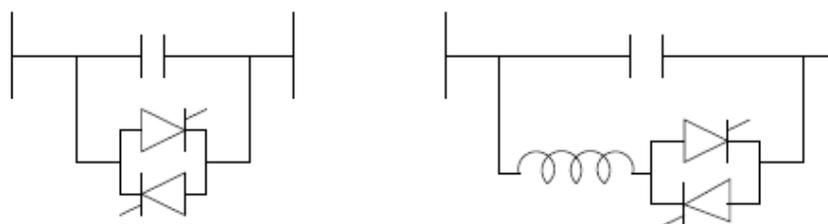


Figura 10 - Diagrama dos modelos do *TSSC* e *TCSC*. [4]

No diagrama do *TSSC* o tiristor é continuamente ligado e desligado. Para inserir o capacitor, o tiristor é desligado. O tiristor é ligado apenas quando a tensão no capacitor for a zero. Por sua vez, o diagrama do *TCSC* mostra que o controle da reatância (*TCR*) em paralelo com um capacitor fixo permite o controle da compensação série [4]. O uso dos dois tipos de compensação apresenta vantagens e desvantagens, nesse trabalho a prioridade é o *TCSC*, pois o mesmo permite o ajuste da impedância da linha.

Segundo [4], um circuito equivalente de um modelo do *TCSC* mostra-se na Figura 11.

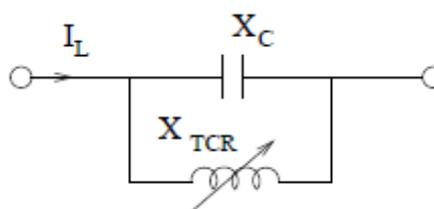


Figura 11 - Circuito equivalente de um *TCSC*. [4]

Dessa figura, dependendo do valor da reatância variável, o circuito pode ser de natureza capacitiva ou indutiva, como mostra-se na Figura 12.

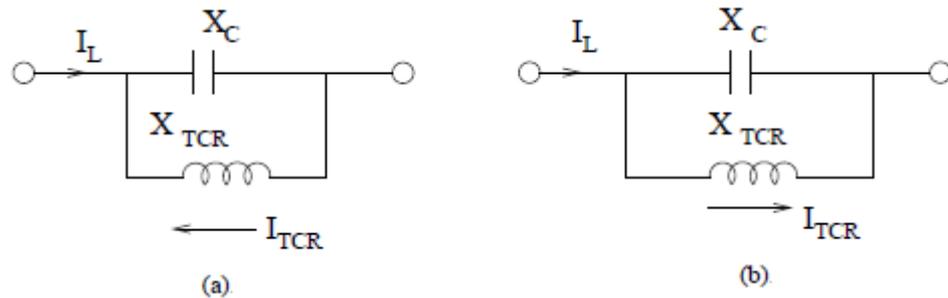


Figura 12 - Circuito equivalente de um TCSC a) capacitivo e b) indutivo. [4]

Assim, consideremos o circuito equivalente mostrado na Figura 12 a) correspondente ao modelo de um capacitor em paralelo com um indutor variável. Nessa situação, a impedância Z_{TCSC} do TCSC representa-se como [4]:

$$Z_{TCSC} = \frac{-jX_C \cdot jX_{TCR}}{j(X_{TCR} - X_C)} = \frac{-jX_C}{\left(1 - \frac{X_C}{X_{TCR}}\right)} \quad (4.1)$$

e a corrente no circuito de reatância controlada por tiristores, \hat{I}_{TCR} é dada por [4]:

$$\hat{I}_{TCR} = \frac{-jX_C}{j(X_{TCR} - X_C)} \hat{I}_L = \frac{\hat{I}_L}{\left(1 - \frac{X_{TCR}}{X_C}\right)} \quad (4.2)$$

A impedância do TCSC é puramente reativa, de modo que a reatância capacitiva do TCSC obtida a partir de (4.1) expressa-se como [4]:

$$X_{TCSC} = \frac{X_C}{\left(1 - \frac{X_C}{X_{TCR}}\right)} \quad (4.3)$$

A reatância do TCSC será capacitiva sempre que $X_C < X_{TCR}$. A condição em que $X_{TCR} = \infty$, corresponde a situação em que os tiristores estão bloqueados, e a corrente na reatância controlada será $I_{TCR} = 0$. Na condição em que $X_C < X_{TCR}$, \hat{I}_{TCR} está defasado 180° da corrente de linha \hat{I}_L . Pode-se afirmar que \hat{I}_L está em fase com $-\hat{I}_{TCR}$ [4].

Existe outra condição que corresponde a situação em que $X_C > X_{TCR}$, a reatância X_{TCSC} do TCSC é negativa, o que implica que o comportamento seja similar a um indutor. Nesse caso, os fasores \hat{I}_L e \hat{I}_{TCR} estão em fase.

4.2 MODOS DE OPERAÇÃO DO TCSC

O TCSC possui três modos fundamentais de operação [4, 20]: tiristor no modo bloqueado, tiristor no modo contornado (*bypass*) e o tiristor no modo de fase controlada. A seguir apresenta-se cada um dos modos de operação do TCSC.

4.2.1 Tiristor no modo bloqueado

No modo tiristor bloqueado, a corrente que flui através do TCR é zero, assim o TCSC possui uma reatância capacitiva [20]. A corrente nesse modo não flui através do reator porque as válvulas de disparo dos tiristores estão bloqueadas. Nesse modo a reatância do TCSC é igual a reatância do capacitor fixo, portanto nesse modo o desempenho do TCSC é igual a de um capacitor fixo [4]. Assim, este modo de operação do TCSC é geralmente evitado. O tiristor no modo bloqueado mostra-se na Figura 13.

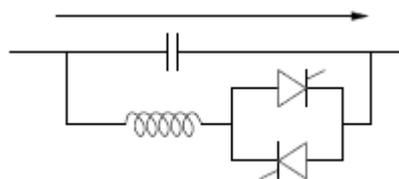


Figura 13 - Diagrama unifilar de um TCSC no modo bloqueado. [4]

4.2.2 Tiristor no modo contornado (*bypass*)

No modo tiristor contornado, as válvulas dos tiristores são fechadas com um ângulo de condução de 180° (em cada sentido) [4], assim o TCSC tem uma pequena reatância indutiva [20], pois a susceptância do reator é maior do que a do capacitor [4]. Nesse modo, a maior parte da corrente da linha fluirá através das válvulas dos tiristores e do reator, com uma pequena corrente fluindo através do capacitor [4]. Este modo é utilizado principalmente para proteger o capacitor contra sobretensões (durante sobrecorrentes transitórias na linha) [4]. O tiristor no modo contornado (*bypass*) mostra-se na Figura 14.

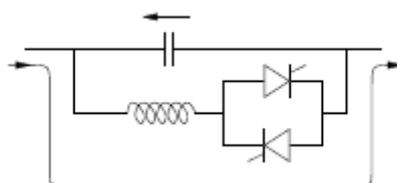


Figura 14 - Diagrama unifilar de um TCSC no modo contornado (*bypass*). [4]

4.2.3 Tiristor no modo de fase controlada

Nesse modo de operação o valor do ângulo de disparo determina o sentido da corrente através do TCR e do capacitor, permitindo que o TCSC funcione tanto no modo capacitivo como no modo indutivo [20]. Para essa condição de operação, as válvulas dos tiristores são disparadas (acionadas) na região $\alpha_{min} < \alpha < 90^\circ$ de tal maneira que elas conduzem em meio ciclo. A reatância indutiva do TCSC aumenta à medida que o ângulo de condução de 180° reduz [4]. Nesse modo, o mecanismo de disparo dos tiristores é controlado para variar o valor da reatância conectada ao sistema [20]. O tiristor no modo de fase controlada mostra-se na Figura 15.

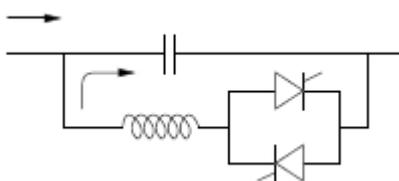


Figura 15 - Diagrama unifilar de um TCSC no modo de fase controlada. [4]

4.3 CÁLCULO DA REATÂNCIA DO TCSC (X_{TCSC})

A compreensão do funcionamento do controle do TCSC pode ser analisada a partir da figura abaixo, extraída de [4].

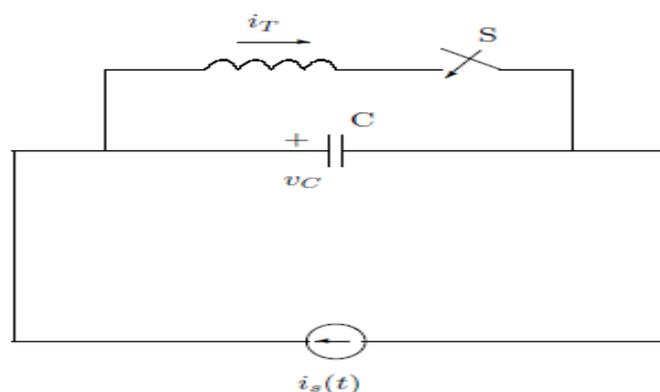


Figura 16 - O circuito de um TCSC. [4]

Sem perdas de generalidade, algumas expressões desenvolvidas para explicar o funcionamento do circuito acima, podem ser encontradas em [4]. Nessa explanação usaremos algumas expressões extraídas da referida referência bibliográfica, para não tornar exaustiva e repetitiva a explicação do mesmo.

Segundo [4], a reatância do TCSC correspondente à frequência fundamental, é obtida entre a relação do valor de pico da frequência fundamental da componente V_{C1} e do valor de pico da corrente de linha senoidal. A partir da análise de Fourier, a componente de frequência fundamental V_{C1} é calculada como abaixo, [4].

$$V_{C1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} v_C(t) \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (4.4)$$

A equação acima decorre do fato de que v_C tem uma meia onda de simetria ímpar sobre o eixo $\omega t = 0$. Do circuito mostrado na Figura 16, tiram-se alguns conceitos importantes para a compreensão do funcionamento do mesmo.

O intervalo do ângulo de atraso α é de 0° a 90° , correspondente ao ângulo de condução σ variando de 180° a 0° . O ângulo de avanço β é definido como [4]:

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (4.5)$$

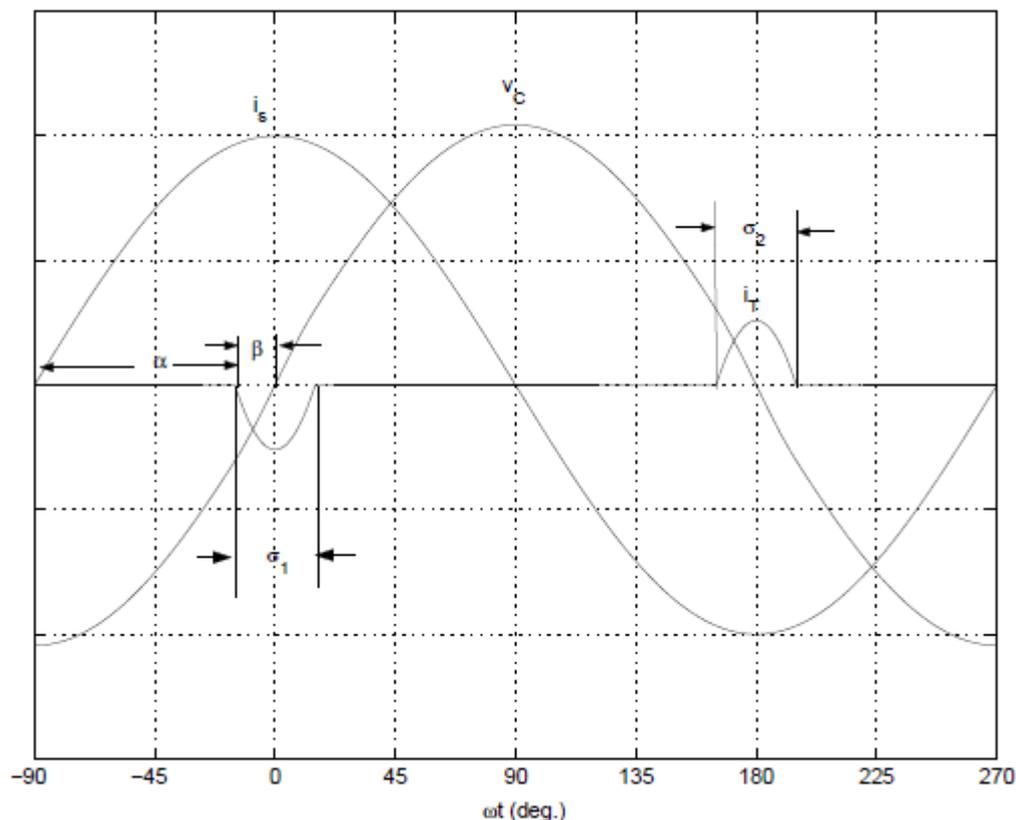


Figura 17 - Formas de ondas da corrente e tensão no circuito de um TCSC. [4]

O ângulo de avanço também varia de 0° a 90° . A Figura 17 mostra as formas de ondas de $i_s(t)$, $i_T(t)$ e $v_C(t)$ com ângulo de ataso α , ângulo de avanço β e ângulo de condução σ indicados.

Para o intervalo em que a frequência angular está compreendida entre $-\beta \leq \omega t \leq \beta$, a tensão no capacitor é dada por [4]:

$$v_C(t) = \frac{I_m X_C}{\lambda^2 - 1} \left[-\sin \omega t + \frac{\lambda \cos \beta}{\cos \lambda \beta} \sin \omega_r t \right] \quad (4.6)$$

Por sua vez, para o intervalo em que a frequência angular esteja compreendida entre $-\beta \leq \omega t \leq \pi - \beta$, a tensão no capacitor, segundo [4] é expressa como:

$$v_c(t) = v_{c2}(t) + \frac{1}{C} \int_{\beta}^{\omega t} i_s(t) d\omega t = v_{c2} + I_m X_C [\sin \omega t - \sin \beta] \quad (4.7)$$

Do circuito mostrado na Figura 16, substituindo-se (4.6) e (4.7) na equação (4.4), obtemos [4]:

$$V_{C1} = \frac{4}{\pi} \left[\int_0^{\beta} v_c^1(t) \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_{\beta}^{\frac{\pi}{2}} v_c^2(t) \sin(\omega t) d(\omega t) \right] \quad (4.8)$$

Onde na expressão anterior, os termos v_c^1 e v_c^2 mostram-se abaixo, [4].

$$v_c^1(t) = \frac{I_m X_C}{\lambda^2 - 1} \left[-\sin \omega t + \frac{\lambda \cos \beta}{\cos \lambda \beta} \sin \omega_r t \right] \quad (4.9)$$

$$v_c^2(t) = v_{c2} + I_m X_C (\sin \omega t - \sin \beta) \quad (4.10)$$

A tensão nos terminais do capacitor, geralmente contem harmônicos de natureza ímpar, $k = 1, 2, 3, \dots, 15$. Nesse estudo, considera-se apenas o componente fundamental.

A reatância X_{TCSC} é normalmente expressa em termos de X_C , ou seja, reatância capacitiva. Define-se, a reatância do TCSC como sendo [4],

$$X_{TCSC} = \frac{V_{C1}}{I_m} \quad (4.11)$$

Pode-se derivar a relação de $\frac{X_{TCSC}}{X_C}$, assim obtemos [4]:

$$\frac{X_{TCSC}}{X_C} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)} \left[\frac{2 \cos^2 \beta}{(\lambda^2 - 1)} (\lambda \tan \lambda \beta - \tan \beta) - \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right] \quad (4.12)$$

A expressão anterior pode ser simplificada como [4]:

$$\frac{X_{TCSC}}{X_C} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)} \left[-\left(\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2 - 1} \right) \frac{\sin 2\beta}{2} - \beta + \frac{2 \cos^2 \beta \cdot \lambda \tan \lambda \beta}{(\lambda^2 - 1)} \right] \quad (4.13)$$

4.4 CONCLUSÃO

Nesse capítulo apresentam-se de modo sucinto os dois tipos de configurações série usadas na compensação de linhas de transmissão de sistemas de potência. Posteriormente é feita a descrição dos modos de operação do TCSC, na configuração bloqueada, contornada (*bypass*) e de fase controlada. Por último, apresenta-se a dedução da reatância de um dispositivo TCSC. Todos os fundamentos aqui apresentados serão usados nas simulações sobre o fluxo de carga a serem efetuados no âmbito de projeto.

5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Esse capítulo destina-se a apresentação das simulações computacionais para todos os casos de aplicação de compensação série através do *TCSC*. Todos os programas necessários a obtenção dos resultados serão escritos na linguagem computacional *MatLab*.

Serão abordados dois tipos de sistemas: um de 5 barras e outro de 30 barras, para a validação dos programas e obtenção dos resultados finais.

5.1 SISTEMA DE 5 BARRAS

O sistema de 5 barras possui uma base de 100 MVA, 2 geradores e 7 linhas de transmissão. O sistema possui 1 barra de referência, 2 barras do tipo PQ (barras com cargas) e duas barras do tipo PV (barras reguladoras de tensão e potência). O sistema possui uma demanda máxima de 60 MW e 15 MVar. Esse é um sistema real que foi extraído de [2] para mostra-se o efeito da compensação por meio do controle de tiristores em sistema. A Figura 18 mostra o sistema de 5 barras representado por meio de um diagrama unifilar.

5.1.1 Sistema sem a compensação série

Linha	Fluxo de potência ativa		Potência ativa recebida (MW)	Fluxo de potência reativa		Potência reativa recebida (Mvar)
	De barra	Para barra		De barra	Para barra	
1	1	2	86,85	1	2	72,91
2	1	3	40,27	1	3	17,51
3	2	3	24,11	2	3	0,35
4	2	4	27,25	2	4	0,83
5	2	5	53,44	2	5	4,83
6	3	4	19,35	3	4	4,69
7	4	5	6,56	4	5	5,17

Tabela 5.1 - Fluxo de potência sem a compensação série

Barra	Tensão (p.u.)	Mínima (p.u.)	Máxima (p.u.)	Tipo de barra
1	1,06	0,94	1,06	Referência
2	1	0,94	1,06	PV
3	0,987	0,94	1,06	PQ
4	0,984	0,94	1,06	PQ
5	0,972	0,94	1,06	PQ

Tabela 5.2 - Tensões nas barras sem a compensação série

5.1.2 Sistema com a compensação série: TCSC inserido entre as barras 3 e 4

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Linha	Fluxo de potência ativa		Potência ativa recebida (MW)	Fluxo de potência reativa		Potência reativa recebida (Mvar)
			De barra	Para barra		De barra	Para barra	
144	-0,077	6	3	4	26,35	3	4	2,3
145	-0,047	6	3	4	23,17	3	4	3,64

146	-0,035	6	3	4	22,02	3	4	4,01
147	-0,027	6	3	4	21,43	3	4	4,19
148	-0,023	6	3	4	21,08	3	4	4,28

Tabela 5.3 - Fluxo de potência entre as barras 3 e 4 com a compensação série

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Barra	Tensão (p.u.)	Mínima (p.u.)	Máxima (p.u.)	Tipo de barra
144	-0,077	3	0,987	0,94	1,06	PQ
		4	0,984	0,94	1,06	PQ
145	-0,047	3	0,987	0,94	1,06	PQ
		4	0,985	0,94	1,06	PQ
146	-0,035	3	0,987	0,94	1,06	PQ
		4	0,984	0,94	1,06	PQ
147	-0,027	3	0,987	0,94	1,06	PQ
		4	0,984	0,94	1,06	PQ
148	-0,023	3	0,987	0,94	1,06	PQ
		4	0,984	0,94	1,06	PQ

Tabela 5.4 - Tensões nas barras 3 e 4 com a compensação série

5.1.3 Sistema com a compensação série: TCSC inserido entre as barras 4 e 5

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Linha	Fluxo de potência ativa		Potência ativa recebida (MW)	Fluxo de potência reativa		Potência reativa recebida (Mvar)
			De barra	Para barra		De barra	Para barra	
144	-0,077	7	4	5	7,78	4	5	4,73
145	-0,047	7	4	5	7,26	4	5	4,94
146	-0,035	7	4	5	7,06	4	5	5,01
147	-0,027	7	4	5	6,95	4	5	5,05
148	-0,023	7	4	5	6,88	4	5	5,07

Tabela 5.5 - Fluxo de potência entre as barras 4 e 5 com a compensação série

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Barra	Tensão (p.u.)	Mínima (p.u.)	Máxima (p.u.)	Tipo de barra
144	-0,077	4	0,984	0,94	1,06	PQ
		5	0,972	0,94	1,06	PQ
145	0,047	4	0,984	0,94	1,06	PQ
		5	0,972	0,94	1,06	PQ
146	-0,035	4	0,984	0,94	1,06	PQ
		5	0,972	0,94	1,06	PQ
147	-0,027	4	0,984	0,94	1,06	PQ
		5	0,972	0,94	1,06	PQ
148	-0,023	4	0,984	0,94	1,06	PQ
		5	0,972	0,94	1,06	PQ

Tabela 5.6 - Tensões nas barras 4 e 5 com a compensação série

5.2 SISTEMA DE 30 BARRAS

5.2.1 Sistema sem a compensação série

Linha	Fluxo de potência ativa		Potência ativa recebida (MW)	Fluxo de potência reativa		Potência reativa recebida (Mvar)
	De barra	Para barra		De barra	Para barra	
1	1	2	1,4	1	2	22,2
2	1	3	71,05	1	3	8,71
3	2	4	35,19	2	4	0,87
4	3	4	68,03	3	4	6,59
5	2	5	70,21	2	5	9,75
6	2	6	48,44	2	6	1,91
7	4	6	60,63	4	6	5,28
8	7	5	13,99	5	7	15,88
9	6	7	36,99	6	7	4,98
10	6	8	20,96	8	6	19,22
11	6	9	19,95	6	9	7,7
12	6	10	13,33	6	10	5,9
13	11	9	10	11	9	10,58
14	9	10	29,95	9	10	16,85
15	4	12	34,55	4	12	7,14
16	13	12	10	13	12	16,01
17	12	14	7,88	12	14	2,56
18	12	15	17,8	12	15	7,63
19	12	16	7,23	12	16	4,57
20	14	15	1,67	14	15	0,95
21	16	17	3,72	16	17	2,72
22	15	18	6,09	15	18	2,2
23	18	19	2,89	18	19	1,29
24	20	19	6,61	20	19	2,11
25	10	20	8,83	10	20	2,85
26	10	17	5,28	10	17	3,08
27	10	21	15,57	10	21	9,72
28	10	22	7,5	10	22	4,46
29	22	21	1,93	22	21	1,48
30	15	23	5,08	15	23	3,69

31	22	24	5,51	22	24	2,9
32	23	24	1,87	23	24	2,06
33	25	24	1,32	25	24	1,76
34	25	26	3,5	25	26	2,3
35	27	25	4,88	27	25	4,14
36	28	27	18,26	28	27	7,65
37	27	29	6,11	27	29	1,52
38	27	30	6,93	27	30	1,36
39	29	30	3,67	29	30	0,54
40	8	28	0,95	8	28	6,61
41	6	28	17,31	6	28	2,73

Tabela 5.7 - Fluxo de potência sem a compensação série

Barra	Tensão (p.u.)	Mínima (p.u.)	Máxima (p.u.)	Tipo de barra
1	1,06	0,94	1,06	Referência
2	1,02	0,94	1,06	PV
3	1,01	0,94	1,06	PQ
4	1	0,94	1,06	PQ
5	1	0,94	1,06	PV
6	0,994	0,94	1,06	PQ
7	0,989	0,94	1,06	PQ
8	1	0,94	1,06	PV
9	0,977	0,94	1,06	PQ
10	0,957	0,94	1,06	PQ
11	1	0,94	1,06	PV
12	0,977	0,94	1,06	PQ
13	1	0,94	1,06	PV
14	0,96	0,94	1,06	PQ
15	0,954	0,94	1,06	PQ
16	0,96	0,94	1,06	PQ
17	0,953	0,94	1,06	PQ
18	0,942	0,94	1,06	PQ
19	0,938	0,94	1,06	PQ
20	0,942	0,94	1,06	PQ

21	0,944	0,94	1,06	PQ
22	0,944	0,94	1,06	PQ
23	0,941	0,94	1,06	PQ
24	0,932	0,94	1,06	PQ
25	0,941	0,94	1,06	PQ
26	0,922	0,94	1,06	PQ
27	0,956	0,94	1,06	PQ
28	0,99	0,94	1,06	PQ
29	0,934	0,94	1,06	PQ
30	0,922	0,94	1,06	PQ

Tabela 5.8 - Tensões nas barras sem a compensação série

5.2.2 Sistema com a compensação série: TCSC inserido entre as barras 6 e 7

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Linha	Fluxo de potência ativa		Potência ativa recebida (MW)	Fluxo de potência reativa		Potência reativa recebida (Mvar)
			De barra	Para barra		De barra	Para barra	
144	-0,077	9	6	7	42,72	6	7	11,13
145	-0,047	9	6	7	40,38	6	7	8,02
146	-0,035	9	6	7	39,43	6	7	7,03
147	-0,027	9	6	7	38,92	6	7	6,55
148	-0,023	9	6	7	38,6	6	7	6,27

Tabela 5.9 - Fluxo de potência entre as barras 6 e 7 com a compensação série

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Barra	Tensão (p.u.)	Mínima (p.u.)	Máxima (p.u.)	Tipo de barra
144	-0,077	6	0,996	0,94	1,06	PQ

		7	0,984	0,94	1,06	PQ
145	0,047	6	0,995	0,94	1,06	PQ
		7	0,987	0,94	1,06	PQ
146	-0,035	6	0,995	0,94	1,06	PQ
		7	0,987	0,94	1,06	PQ
147	-0,027	6	0,995	0,94	1,06	PQ
		7	0,988	0,94	1,06	PQ
148	-0,023	6	0,995	0,94	1,06	PQ
		7	0,988	0,94	1,06	PQ

Tabela 5.10 - Tensões nas barras 6 e 7 com a compensação série

5.2.3 Sistema com a compensação série: TCSC inserido entre as barras 10 e 21

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Linha	Fluxo de potência ativa		Potência ativa recebida (MW)	Fluxo de potência reativa		Potência reativa recebida (Mvar)
			De barra	Para barra		De barra	Para barra	
144	-0,077	27	10	21	23,55	10	21	9,2
145	-0,047	27	10	21	19,85	10	21	9,81
146	-0,035	27	10	21	18,54	10	21	9,87
147	-0,027	27	10	21	17,87	10	21	9,87
148	-0,023	27	10	21	17,47	10	21	9,87

Tabela 5.11 - Fluxo de potência entre as barras 10 e 21 com a compensação série

Ângulo de disparo do TCSC (graus)	Reatância final do TCSC (p.u.)	Barra	Tensão (p.u.)	Mínima (p.u.)	Máxima (p.u.)	Tipo de barra
144	-0,077	10	0,957	0,94	1,06	PQ
		21	0,949	0,94	1,06	PQ
145	0,047	10	0,957	0,94	1,06	PQ
		21	0,947	0,94	1,06	PQ
146	-0,035	10	0,957	0,94	1,06	PQ
		21	0,946	0,94	1,06	PQ
147	-0,027	10	0,957	0,94	1,06	PQ
		21	0,946	0,94	1,06	PQ
148	-0,023	10	0,974	0,94	1,06	PQ
		21	0,945	0,94	1,06	PQ

Tabela 5.12 - Tensões nas barras 10 e 21 com a compensação série

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. California: Wiley-IEEE Press, 1999.
- [2] ACHA, E. et al. FACTS Modelling and Simulation in Power Networks. Chichester: John Wiley and Sons, 2004.
- [3] ROGERS, K. M.; OVERBYE, T. J. Some Applications of Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) Devices in Power Systems. North American Power Symposium (NAPS), 2008.
- [4] PADIYAR, K. R. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution. New Delhi: New Age International, 2007.
- [5] FUCHS, R. D. Transmissão de Energia. Itajubá: Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- [6] STEVESON JR., W. D. Elementos de Análise de Potência. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

- [7] QIU, Q.; WU, N. E. Control Effectiveness of FACTS Devices in Power Systems. American Control Conference (ACC), 2016.
- [8] TYLL, H. K.; SCHETTLER, F. Power System Problems Solved by FACTS Devices. Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2009.
- [9] BOCOVICH, M. Overview of Series Connected Flexible AC Transmission Systems (FACTS). North American Power Symposium (NAPS), 2013.
- [10] JOHANSSON, N.; ÄNGQUIST, L.; NEE, H. P. An Adaptive Controller for Power System Stability Improvement and Power Flow Control by Means of a Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC). IEEE Transactions on Power Systems, v. 25, n. 1, p. 381-391, 2010.
- [11] RETNAMONY, R.; RAGLEND, I. J. Congestion Management is to Enhance the Transient Stability in a Deregulated Power System Using FACTS Devices. International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), 2015.
- [12] BRUNO, S.; CARNE, G.; SCALA, M. Transmission Grid Control Through TCSC Dynamic Series Compensation. IEEE Transactions on Power Systems, v. 31, n. 4, p. 3202-3211, 2016.
- [13] GELEN, A.; YALCINOZ, T. Analysis of TSR-based SVC for a Three-Phase System With Static and Dynamic Loads. International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2007.
- [14] FINOTTI, C.; GAIO, E. Continuous Model in dq Frame of Thyristor Controlled Reactors for Stability Analysis of High Power Electrical Systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 63, p. 836-845, 2014.
- [15] OSBORN, D. L. Factors for Planning a Static VAR System. Electric Power Systems Research, v. 17, n. 1, p. 5-12, 1989.

- [16] SU, H.; LI, Q. Rough Controlling TSC for Reactive Current Compensation in Traction Substations. International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2006.
- [17] MERCADO, L. E. C.; RIVAS, J. J. R.; GONZÁLEZ, P. F. H. Simulation of the Static VAR Compensator Culiacan Three Substation for the Analysis of Transients. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, v. 14, n. 3, p. 421-434, 2013.
- [18] MURALI, D.; RAJARAM, M. Active and Reactive Power Flow Control using FACTS Devices. *International Journal of Computer Applications*, v. 9, n. 8, p. 45-50, 2010.
- [19] RICHA; KUMAR, V.; Dhiraj, K. Voltage Instability and its Prevention Using Facts controller. *International Journal of Engineering Research and Development*, v. 3, n. 11, p. 06-08, 2012.
- [20] ACHA, E. et al. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Woburn: Newnes Power Engineering Series, 2002.
- [21] MILLER, T. J. E. *Reactive Power in Electrical Systems*. New York: John Wiley and Sons, 1982.
- [22] LARSEN, E. V.; MILLER, N. W.; NILSSON, S. L. Benefits of GTO-based Compensation Systems for Electric Utility Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 4, p. 2056-2064, 1992.
- [23] ESQUIVEL, C. R. F.; ACHA, E. Unified Power Flow Controller: A Critical Comparison of Newton-Raphson UPFC Algorithms in Power Flow Studies. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, v. 144, n. 5, p. 437-444, 1997.
- [24] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. California: McGraw-Hill, 1994.
- [25] ALAM, M. S.; CHOWDHURY, A. H.; HASAN, N. Comparison of Series and Combined Series- Shunt Compensation on East-West Interconnectors of

Bangladesh Power System. International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2015.