
TECNOLOGIA FACTS - TUTORIAL

Edson H. Watanabe⁽¹⁾
watanabe@coe.ufrj.br

Pedro G. Barbosa⁽¹⁾
pedro@coe.ufrj.br

Katia C. Almeida⁽²⁾
katia@labspot.ufsc.br

Glauco N. Taranto⁽³⁾
tarang@coep.ufrj.br

⁽¹⁾ COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Elétrica
Caixa Postal: 68504
21945-970, Rio de Janeiro (RJ)

⁽²⁾ GSP – Universidade Federal de Santa Catarina
Dept^o. de Engenharia Elétrica
88040-900, Florianópolis (SC)

⁽³⁾ IME – Instituto Militar de Engenharia
Dept^o. de Engenharia Elétrica
Praia Vermelha
22290-270, Rio de Janeiro (RJ)

RESUMO: Este artigo apresenta um “tutorial” sobre os princípios básicos de operação de dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems), discute o seu impacto na operação em regime permanente de um sistema de geração/transmissão e aborda os pontos relevantes dos sistemas assistidos por esta tecnologia no que diz respeito aos estudos de dinâmica e de controle. Assim, primeiro serão apresentadas a operação ideal e em seguida a síntese de cada um dos elementos FACTS. Analisam-se resultados de alguns estudos sobre desempenho dos dispositivos FACTS em regime permanente através de modelos desenvolvidos para os mesmos. Discute-se a operação econômica e segura na presença destes dispositivos e analisa-se, a partir de um modelo ideal, o máximo benefício que pode ser conseguido através do uso de equipamentos FACTS. Na parte dos estudos dinâmicos, ênfase é dada aos problemas de natureza eletromecânica. A influência desta nova tecnologia nos estudos de estabilidade transitória e dinâmica dos sistemas de potência é discutida, em termos de análise e síntese. Conceitos de controle robusto e de controle descentralizado são destacados. Discute-se a importância da localização dos equipamentos FACTS e a escolha dos sinais de realimentação dos controladores.

Palavras Chaves: Dispositivos FACTS, STATCOM, SSSC, UPFC, Operação em regime permanente, Controle descentralizado, Controle robusto, Estabilidade transitória e frente a pequenas perturbações.

ABSTRACT: *This paper presents a tutorial on the basic principle of operation of FACTS (Flexible AC Transmission Systems) devices, discusses their impact on the steady-state operation of generation/transmission system and shows important issues of the dynamic and control problems of FACTS-assisted systems. First of all, the ideal operation of each device and then synthesis of FACTS devices based on thyristors and self-commutated switches are presented. A review is made of the main results regarding the impact of*

FACTS on the steady-state operation and devices models are introduced. The economic-secure operation with such devices is then analyzed. The maximum benefit that can be obtained with a FACTS device is studied with the help of an ideal model. The influence of FACTS devices on the transient and on the small-signal stability is addressed. The paper gives special emphasis on robust decentralized control analysis and design. It is presented a discussion on the importance of controller location and on the feedback signal selection. Finally, the paper briefly presents some systematic control design methods.

Keywords: *FACTS devices, STATCOM, SSSC, UPFC, Steady-state operation, Decentralized Control, Robust Control, Transient and Small-signal stability.*

1 INTRODUÇÃO

A complexidade do planejamento e operação de um sistema de potência se deve, em grande parte, a problemas relacionados com a rede de transmissão. As linhas de transmissão estão sujeitas a limites térmicos ou de estabilidade, que restringem o nível de potência que pode ser transmitido com segurança. Tais limites criam pontos de estreitamento da transmissão na rede. Estes pontos não são fixos; eles se movem de acordo com as alterações nos fluxos de potência resultantes do despacho de geração, características da carga e contingências. Os estreitamentos na transmissão geram problemas como: pontos de operação não econômicos, baixa capacidade de carregamento, necessidade de redespacho da geração, de capacidade extra de geração ou ainda de importação de energia elétrica (Nilson and Bahrman, 1994).

Em sistemas de potência de pequeno porte, pouco complexos e com poucas interconexões, os problemas acima podem ser resolvidos parcialmente através de projetos superdimensionados em relação à capacidade de geração e aos limites de transmissão. O aumento dos custos e das restrições ambientais tornou impraticável a estratégia do superdimensionamento e, ao mesmo tempo, dificultou a construção de novas unidades de geração e linhas de transmissão. Por outro lado, tem-se observado um contínuo aumento da demanda de energia elétrica. Tornou-se portanto

necessário o desenvolvimento de meios para controlar diretamente os fluxos de potência em determinadas linhas de um sistema. O controle dos fluxos pode direcioná-los para regiões que possuam capacidade ociosa de carregamento, aliviando, assim, as regiões de estreitamento da transmissão. O conceito de sistemas com fluxos de potência controláveis, ou “Flexible AC Transmission Systems” (FACTS), tem recebido muita atenção recentemente, resultando na concepção de vários novos dispositivos para o controle dos fluxos nas redes de energia elétrica. Estes dispositivos são pesquisados com dois objetivos principais :

- (i) aumentar a capacidade de transmissão de potência das redes;
- (ii) controlar diretamente o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão.

O fluxo de potência numa rede de transmissão está limitado por uma combinação dos seguintes fatores (Adapa *et alii*, 1995) :

- Estabilidade;
- Fluxos paralelos ou fluxos de malha;
- Limites de tensão;
- Limites térmicos de linhas ou equipamentos.

Dispositivos FACTS são aplicáveis, de forma mais direta, às restrições de transmissão de potência relacionadas com problemas de estabilidade. Com este objetivo, têm sido testados por exemplo, compensadores série controlados a tiristor, compensadores em derivação e amortecedores de ressonâncias sub-síncronas (Adapa *et alii*, 1995; Hingorani, 1993).

Os fluxos de malha são aqueles que se formam entre dois sistemas interconectados por uma malha fechada, mesmo que cada sistema seja capaz de suprir sua própria carga. Fluxos paralelos, por sua vez, são aqueles que, mesmo fazendo parte da transmissão normal de potência entre duas companhias, afetam regiões não desejáveis do sistema interconectado. Fluxos de malha ou fluxos paralelos são um problema principalmente na operação em regime permanente. Os efeitos podem ser sentidos no perfil de tensões, nas perdas de transmissão ou na redução da região segura de operação. Apesar do tempo de resposta dos controladores não ser crucial, dispositivos eletrônicos são justificáveis nestes casos quando ajustes freqüentes são necessários.

O controle de tensão é normalmente feito por uma combinação de ajustes na potência reativa de geradores, compensadores em derivação fixos ou controláveis mecanicamente e transformadores de tensão, também controláveis mecanicamente. Dispositivos baseados em componentes eletrônicos irão permitir um controle mais rápido das tensões no caso da ocorrência de transitórios.

Os limites térmicos são limites físicos inerentes aos equipamentos dos sistemas de transmissão. Normalmente os sistemas de potência operam muito abaixo dos seus limites térmicos por questões de segurança no caso de contingências. Os dispositivos FACTS irão afetar a operação do sistema, usualmente em resposta a perturbações críticas, permitindo uma melhor utilização da sua capacidade térmica.

Mesmo quando a questão dos limites não é crítica, o caminho seguido pelos fluxos de potência tem um impacto importante na operação de um sistema, tanto em regime permanente como em condições pós-falta. Entre os fatores que podem ser afetados estão o custo de operação, o controle de reativos e de tensão. Controladores baseados em eletrônica de potência

virão aumentar os meios de controle das rotas de transmissão, principalmente por permitirem um controle contínuo e operações freqüentes.

As perdas incrementais na presença destes novos dispositivos é um fator preocupante. Controladores conectados em série num sistema podem afetar drasticamente os fluxos nas linhas e, portanto, as perdas. Com isso levanta-se a questão custo versus benefício, pois a carga extra, possível com a presença dos FACTS, pode vir a ser inferior às perdas advindas do uso destes dispositivos.

Este conceito FACTS nasceu em 1988 quando Hingorani (1988) publicou o artigo intitulado “*Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems*” propondo o uso extensivo de Eletrônica de Potência ou, como ele chamou, “Eletrônica de Mega-Watt” para o controle de sistemas de potência CA. A idéia básica de Hingorani era obter, no futuro, sistemas CA com alto nível de flexibilidade como no caso de sistemas de transmissão HVDC (“High Voltage Direct Current”). Estas idéias foram baseadas no uso de tiristores de potência, bem como, no desenvolvimento de novos dispositivos semicondutores autocomutados (disparo e corte controlados) tais como: GTO (“Gate Turn-off Thyristor”), MCT (“MOS Controlled Thyristor”) e IGBT (“Insulated Gate Bipolar Transistor”) (Baliga, 1995).

Atualmente, o projeto de conversores eletrônicos autocomutados de alta potência (dezenas a centenas de MVA) têm sido feito com dispositivos tipo GTO. Como a conexão série destes dispositivos é mais complexa do que no caso de tiristores convencionais, conversores para aplicações nestas altas potências têm sido, normalmente, obtidos através da conexão de vários conversores, cada qual com poucas chaves em série.

A estabilidade dos sistemas de potência passou a ter mais graus de liberdade com a utilização dos equipamentos FACTS. Nos estudos de estabilidade transitória, ou seja, frente a grandes perturbações, estes equipamentos podem propiciar o aumento do limite de transferência de grandes blocos de energia como, por exemplo, com o chaveamento de grandes capacitores série em determinadas linhas de transmissão.

Os equipamentos FACTS também são de grande valia nos estudos de estabilidade dinâmica (frente a pequenas perturbações). Neste caso, por exemplo, o amortecimento das oscilações do sistema pode ser aumentado através da modulação de pequenos capacitores em série com as linhas de transmissão.

O uso destes dispositivos FACTS deve ser cuidadosamente estudado do ponto de vista de controle. Devemos levar vantagem do grau de flexibilidade que os sistemas FACTS nos permite, e não deixar que o aumento da complexidade desses novos sistemas não venha a degradar a operação hoje existente. Para isso, os conceitos de controle robusto e coordenado devem ser levados em consideração.

O objetivo deste trabalho é mostrar, numa forma tutorial, primeiramente, os conceitos básicos de operação de três dispositivos FACTS ideais: o compensador em derivação, o compensador série e os controladores defasadores ou *Phase-Shifter* e o UPFC (*Unified Power Flow Controller*). A síntese destes controladores será analisada tanto para o caso de implementação com o uso de tiristores como para o caso de chaves semicondutoras autocomutadas. Em seguida são

mostrados os modelos, válidos para regime permanente, para estes dispositivos FACTS. Depois, discute-se os limites de operação segura e econômica de um sistema utilizando ou não os controladores FACTS. Usando o conceito de modelo ideal de dispositivo FACTS analisa-se, então a questão do máximo benefício que pode ser conseguido com estes dispositivos. Um exemplo numérico ilustra os conceitos. A última parte deste artigo descreve sucintamente alguns pontos relevantes aos estudos da tecnologia FACTS em dinâmica e controle de sistemas de potência e discute técnicas que podem ser usadas na síntese dos controladores. No caso dos estudos dinâmicos, maior ênfase é dada aos problemas de natureza eletromecânica cujo espectro de frequência, em geral, se situa entre 0,2 e 2 Hz. A influência desta nova tecnologia nos estudos de estabilidade transitória e dinâmica dos sistemas de potência é discutida. Também discute-se o problema de controle a nível de análise e síntese. Conceitos de controle robusto e de controle descentralizado são destacados. Discute-se a importância da localização dos equipamentos FACTS na rede elétrica e a escolha dos sinais de realimentação dos controladores. Estes dois últimos assuntos estão relacionados, respectivamente, com os conceitos de controlabilidade e observabilidade. E por fim, apresentam-se algumas técnicas usadas no projeto de controladores.

2 PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DE DISPOSITIVOS FACTS

Nesta seção serão apresentados os princípios básicos de operação dos principais dispositivos FACTS. Para explicar o funcionamento ideal de cada um destes equipamentos FACTS será considerada sua conexão em um sistema CA simples composto de duas máquinas ideais interligadas através de uma linha de transmissão curta, e sem perdas. As relações básicas aqui apresentadas sofrem modificações quando são considerados modelos completos das linhas de transmissão. Entretanto, de uma maneira global o comportamento qualitativo do sistema com um dispositivo FACTS é mantido.

2.1 Compensador Ideal em Derivação

A Figura 1 (Gyugyi,1990) mostra um modelo ideal de um compensador em derivação conectado ao ponto médio da linha CA. Nesta figura, a fonte de tensão V_S é continuamente controlada com o objetivo de controlar o fluxo de potência através desta linha. Na análise que será apresentada, as tensões V_S e V_R são consideradas como tendo a mesma amplitude porém defasadas de um ângulo δ .

A Figura 2 mostra o diagrama fasorial do sistema da Figura 1 para o caso quando a tensão de compensação V_M tem a mesma amplitude que as tensões terminais, V_S e V_R . Neste caso, a potência ativa transferida do terminal V_S para o lado da carga V_R é dada por:

$$P_S = \frac{2V^2}{X_L} \text{sen}(\delta / 2), \quad (1)$$

onde, V é a amplitude das tensões terminais V_S e V_R .

Se nenhuma compensação estiver presente, a potência transferida é dada pela expressão:

$$P_S = \frac{V^2}{X_L} \text{sen}\delta. \quad (2)$$

Comparando (1) e (2) nota-se que a compensação reativa em derivação aumenta a capacidade de transmissão de potência

ativa pela linha CA, em especial se $\delta > 30^\circ$. Da Figura 2 é possível também concluir que como a corrente de compensação I_M está em quadratura com a tensão V_M não existe potência ativa fluindo através do compensador. Ou seja, apenas potência reativa flui pela fonte V_M . Esta é uma conclusão importante porque permite uma síntese simplificada desta fonte (compensador). Os casos em que I_M e V_M não são ortogonais foram discutidos em Watanabe e Barbosa (1995).

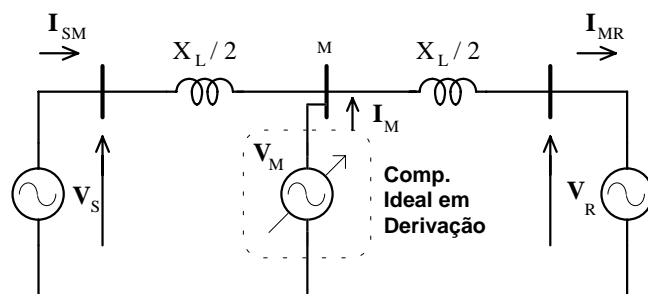


Figura 1: Compensador ideal em derivação conectado ao ponto médio de uma linha de transmissão.

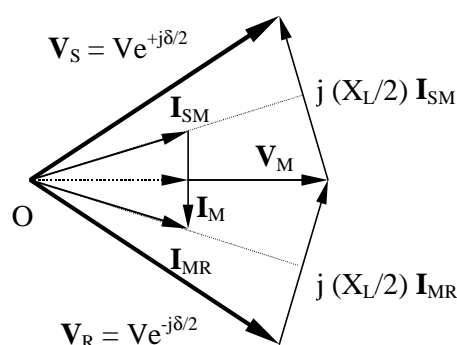


Figura 2: Diagrama fasorial do sistema proposto com compensação de potência reativa.

2.2 Compensador Série Ideal

A Figura 3 mostra um compensador série ideal, representado por uma fonte de tensão controlada V_C , conectado ao ponto médio de uma linha de transmissão curta. Pode-se mostrar que a corrente que circula pela linha é dada por:

$$I_L = \frac{(V_{SR} - V_C)}{jX_L}, \quad (3)$$

onde, $V_{SR} = V_S - V_R$.

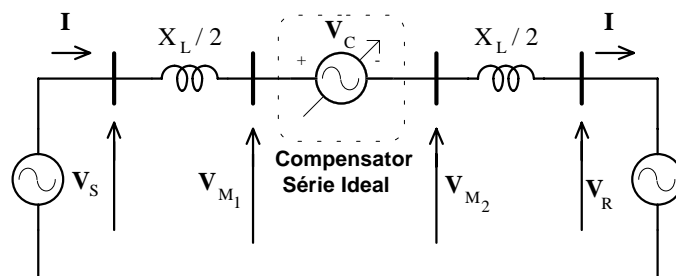


Figura 3: Compensador série ideal conectado ao ponto médio de uma linha de transmissão curta.

Se a tensão V_C está em quadratura em relação à corrente de linha, o compensador série não irá fornecer ou absorver potência ativa, ou seja, a potência nos terminais da fonte V_C será apenas reativa. Neste caso, a fonte de tensão V_C pode ser vista, a partir de seus terminais, como uma reatância equivalente capacitiva ou indutiva.

O fluxo de potência ativa pela linha de transmissão é dado por (Gyugyi, 1990):

$$P_s = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \text{sen}\delta, \quad (4)$$

onde, $-1 < s < 1$ é a taxa de compensação série. Esta equação mostra que a potência ativa transmitida pode ser aumentada consideravelmente variando-se a taxa de compensação série entre os limites $0 < s < 1$.

A Figura 4 mostra o diagrama fasorial do sistema proposto com a compensação série, assumindo que a fonte V_C está fornecendo uma potência reativa capacitiva. Neste caso, o fasor da corrente de linha está adiantado de 90 graus em relação ao fasor da tensão V_C .

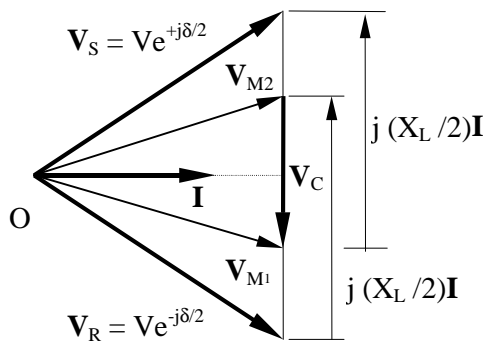


Figura 4: Diagrama fasorial do sistema proposto com uma compensação capacitiva série.

2.3 Compensador de Ângulo de Fase Ideal

A Figura 5 mostra um sistema CA com um compensador de ângulo de fase ideal. Este compensador controla a diferença entre os ângulos de fase entre dois sistemas CA podendo atuar assim diretamente sobre o fluxo de potência ativa trocado entre estes dois sistemas.

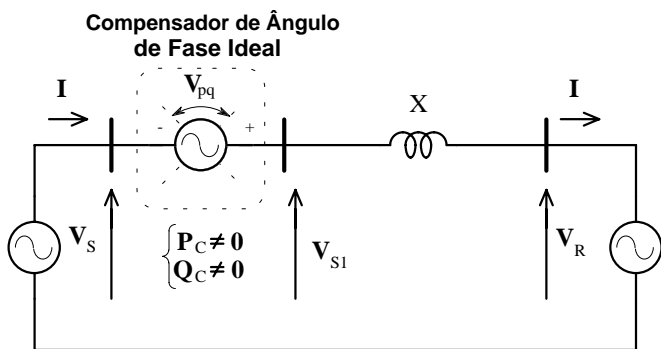


Figura 5: Compensador de ângulo de fase ideal.

A Figura 6 mostra o diagrama fasorial para um sistema CA com um compensador de ângulo de fase ideal. Este diagrama mostra que o fasor de tensão V_{pq} do compensador de ângulo de fase pode assumir qualquer defasagem em relação à corrente de linha I e sua região de operação é um círculo de raio máximo igual à máxima tensão V_{pq} de compensação. Isto significa que esse compensador pode ter que fornecer ou absorver potência ativa, bem como potência reativa. Esta é uma característica importante para ser considerada na síntese de um compensador de ângulo de fase. No caso do defasador, a região de operação do fasor V_{pq} é mais restrita, como será mostrado nas seções seguintes.

Este compensador genérico, como mencionado anteriormente, será analisado como um caso especial do compensador série e pode ser dividido em dois grupos:

Defasador, o qual é baseado em tiristores e,

UPFC, que é baseado em chaves semicondutoras autocomutadas.

No caso do compensador defasador, a potência fluindo pela linha de transmissão da Figura 5 é dada pela expressão (Gyugyi, 1990):

$$P_{s1} = \frac{V^2}{X_L} \text{sen}(\delta - \alpha) \quad (5)$$

onde, α é o ângulo de controle de fase. Assim, quanto mais próximo de 90 graus for a diferença de fase $(\delta - \alpha)$, maior será a potência ativa transmitida. O UPFC será discutido mais adiante.

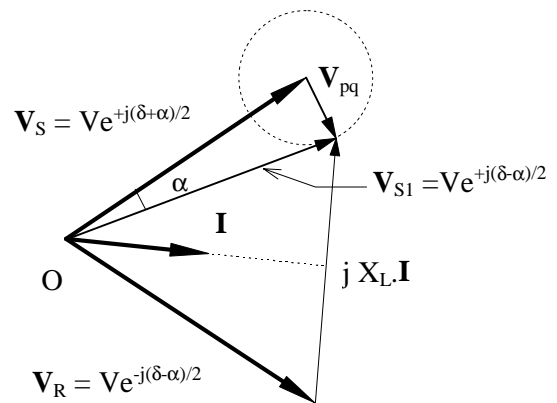


Figura 6: Diagrama fasorial do sistema proposto com um compensador de ângulo de fase ideal.

A Figura 7 mostra as características de transferência de potência ativa para um sistema CA sem compensação e com compensação em derivação, em série e do ângulo de fase. A compensação através do defasador mostrada nesta figura foi obtida assumindo que as tensões V_S , V_{S1} and V_R , mostradas na Figura 6, têm a mesma amplitude (Gyugyi, 1990). Fica claro, observando a Figura 7, que dependendo do nível de compensação, a compensação série é a melhor escolha para aumentar a capacidade de transferência de potência ativa. O compensador defasador é importante quando se deseja conectar dois sistemas distintos que possuem ângulo de transmissão

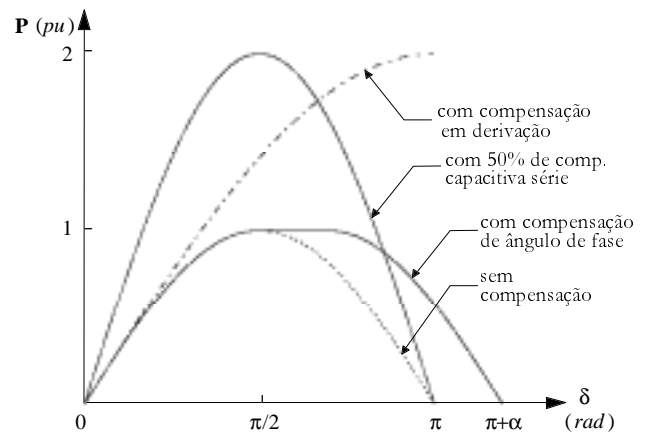


Figura 7: Características de transferência de potência ativa do sistema proposto com compensação em derivação, em série, de ângulo de fase e sem compensação.

grande ou de difícil controle. O compensador em derivação é a melhor opção para aumentar a margem de estabilidade dinâmica. Desta figura nota-se também que o incremento da potência ativa transmitida aumenta consideravelmente para $\delta > \pi/6 \text{ rad}$ para o caso da compensação em derivação.

O Controlador Universal de Fluxo de Potência (UPFC) é melhor representado, como mostrado na Figura 8, considerando a conexão simultânea de duas fontes de tensão controladas: uma em série e a outra em derivação. Uma das principais vantagens dessa topologia é que as duas fontes podem operar separadamente como dois compensadores distintos de potência reativa (um série e o outro em derivação) e compensando ainda potência ativa. Um caso interessante acontece quando uma quantidade de potência ativa consumida/fornecida por uma das fontes é igual à potência fornecida/consumida pela outra. Esta característica é especialmente relevante se existir um caminho comum para que essas potências possam ser trocadas. De fato, o conceito por trás do UPFC é muito mais genérico do que no defasador. O diagrama fasorial mostrado na Figura 6, onde a região de operação do fasor de tensão V_{pq} é um círculo, representa um caso particular de operação do UPFC, para $V_M = V_S$.

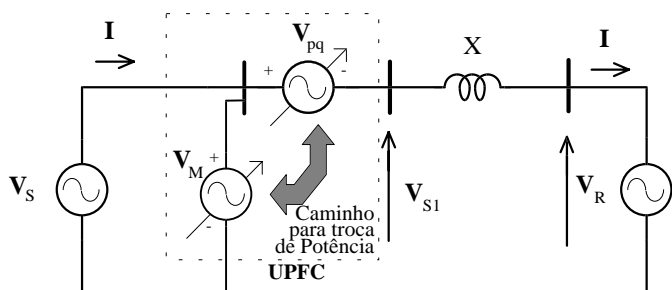


Figura 8: Diagrama esquemático ideal de controlador de fluxo de potência universal.

3 SÍNTESE DE DISPOSITIVOS FACTS

Nesta seção será apresentado a síntese de cada modelo ideal de dispositivo FACTS anteriormente discutido. Para esta síntese serão considerados, em primeiro lugar, o uso dos tiristores convencionais, já que são dispositivos semicondutores com uma longa história, tendo já demonstrado serem de alta confiabilidade. No entanto, como os tiristores têm sua capacidade de controle limitada apenas ao processo de disparo, a síntese dos dispositivos FACTS baseada em chaves semicondutoras com capacidade de corte também será apresentada.

3.1 Síntese de Compensadores em Derivação Usando Tiristores

A Figura 9 (a) mostra a topologia básica de um reator controlado a tiristor (RCT), o qual, através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores, produz uma reatância indutiva equivalente, continuamente variável. O RCT é a base do compensador de potência reativa estático convencional (SVC - *Static Var Compensator*). Devido ao controle de fase usado para chavear os tiristores, correntes harmônicas de baixa ordem são geradas pelo RCT. Transformadores ligados em delta-estrela, bem como a conexão de filtros passivos são então necessários para reduzir estes harmônicos a níveis aceitáveis.

A Figura 9 (b) mostra o capacitor chaveado a tiristor. Neste circuito, os tiristores são disparados apenas quando uma condição de chaveamento com tensão zero é alcançada para a

chave semicondutora (ZVS - *zero voltage switching*). Portanto, devido a sua característica de chaveamento, os tiristores mostrados na figura podem apenas conectar ou desconectar o banco de capacitores ao sistema de potência. Conseqüentemente, o controle da potência reativa gerada pelo banco chaveado é feito de forma descontínua. Outra característica importante é que, como o chaveamento é feito em uma frequência muito baixa, os harmônicos não são geralmente um problema sério nestes compensadores.

O uso de um dos compensadores mostrados na Figura 9 possibilita, assim, apenas um tipo de compensação capacitiva ou indutiva. Entretanto, na maioria das aplicações, é desejável ter a possibilidade de ambas características de compensação. O compensador estático de potência reativa foi projetado então para operar nestas condições. Em geral este compensador é usado como controlador estático de tensão.

A Figura 10 mostra o diagrama unifilar equivalente de um compensador estático de reativos. Nesta figura, um reator controlado a tiristor é conectado em paralelo com banco capacitivo, que pode ser fixo ou chaveado a tiristor. A capacitância C do compensador estático é calculada de maneira a gerar a máxima potência reativa que o compensador deve fornecer para o sistema. Quando este compensador tem a função de controlar a tensão é chamado de SVC ("Static Voltage Controller").

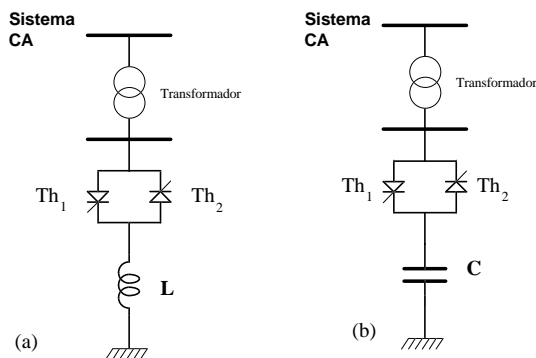


Figura 9: Dispositivos FACTS baseados em tiristores: (a)-Reator controlado a tiristor (RCT); (b)-Capacitor chaveado a tiristor (CCT).

O circuito mostrado na Figura 10 (a) é referente apenas a uma fase e não está mostrando os filtros passivos, normalmente necessários por causa dos harmônicos de corrente gerados pelo chaveamento dos tiristores. A Figura 10 (b) mostra a característica de operação tensão/corrente nos terminais do compensador estático. Quando a tensão terminal diminui a capacidade de corrente do compensador também é reduzida

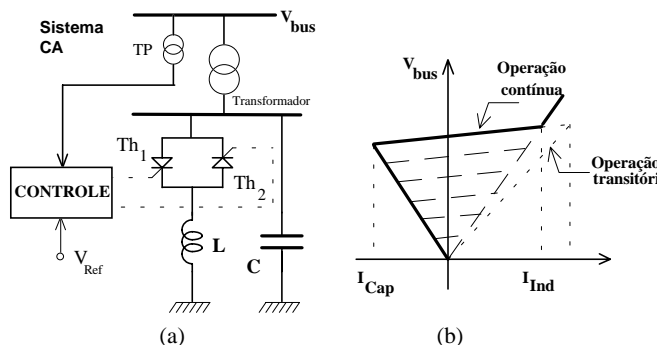


Figura 10: (a) Circuito básico de um compensador estático; (b) característica $V \times I$.

proporcionalmente.

3.2 Síntese de Compensadores em Derivação Usando Chaves Autocomutadas

O desenvolvimento de chaves semicondutoras autocomutadas de alta potência tais como GTO e IGBT tem permitido o projeto de conversores tipo fonte de tensão (CFT), como mostrado na Figura 11 (a), de alta potência. Nestes conversores, as chaves semicondutoras são compostas por um GTO (poderia também ser um IGBT) com diodo conectado em anti-paralelo. Estas chaves, formadas da associação do GTO com o diodo, possuem uma característica unidirecional em tensão e bidirecional em corrente.

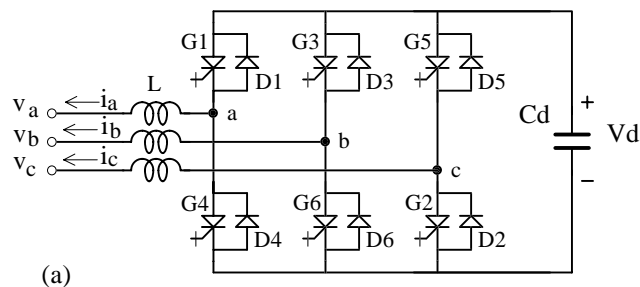
Os conversores fonte de tensão para aplicações industriais têm conectados em seus terminais CC uma fonte de tensão (Bose, 1986). Entretanto, no caso dos compensadores em derivação, quando apenas potência reativa deve ser fornecida/consumida, a fonte de tensão CC pode ser substituída por um capacitor. Caso o compensador deva absorver também alguma potência ativa do sistema CA, um esquema de dissipação de energia deve ser conectado no lado CC do conversor. Como uma primeira escolha, este pode ser um conversor CC-CC controlando a dissipação de energia sobre uma resistência. Entretanto, se a potência ativa absorvida deve ser devolvida ao sistema CA nos próximos ciclos, um esquema de armazenamento de energia deve ser previsto, o qual pode ser um banco capacitivo ou uma bateria.

Em aplicações práticas, indutores (“snubbers”) devem ser conectados em série entre os terminais do CFT e o sistema CA. Estas indutâncias reduzem as amplitudes dos transitórios de corrente provocados pelos chaveamentos da tensão de saída dos conversores.

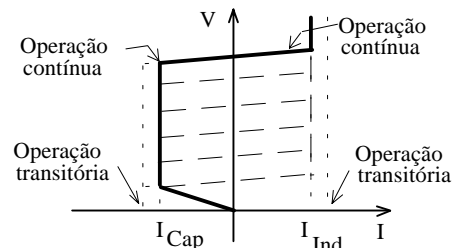
Figura 11 (b) mostra a característica tensão-corrente do compensador estático avançado baseado no CFT. Em contraste com o compensador convencional mostrado na Figura 10 (b), idealmente, a característica da corrente de compensação é mantida mesmo sob baixos valores da tensão do sistema CA. Isto nos mostra que o compensador a GTO tem uma característica de controle superior ao anterior.

3.2.1 Exemplos de Aplicação

Em aplicações industriais, o CFT mostrado na Figura 11 (a), é normalmente chaveado em frequências em torno de 1 kHz, para potências de conversores da ordem de centenas de kW até alguns poucos MW. O chaveamento é, neste caso, baseado em estratégias que usam modulação da largura dos pulsos (PWM). Entretanto, em aplicações FACTS, os valores de potência são maiores e as frequências de chaveamento dos dispositivos semicondutores é feita igual à frequência fundamental do sistema a fim de reduzir as perdas de comutação (Mori *et alii*, 1993), (Schauder *et alii*, 1995). Assim, para obter um efeito similar ao do caso industrial (PWM de alta frequência), em termos de eliminação de harmônicos, vários conversores são conectados em série/paralelo formando um sistema equivalente com múltiplos pulsos.



(a)



(b)

Figura 11: (a) Compensador estático avançado (STATCOM) baseado no conversor fonte de tensão (CFT); (b) característica de operação $V \times I$.

Um compensador em derivação baseado em GTO, em operação desde 1991 no Japão (Mori *et alii*, 1993) usa três CFT monofásicos para formar um CFT trifásico de 6-pulsos com 10 MVA. No total, 8 conjuntos destes CFT trifásicos são conectados, através de um transformador complexo, formando um conversor de 48 pulsos. A capacidade de compensação total deste sistema é de 80 MVA.

Recentemente, o desenvolvimento de um outro compensador a GTO de ± 100 MVA nos EUA foi divulgado (Schauder *et alii*, 1995). Os termos STATCOM (STATIC COMPensator) ou STATCON (STATIC CONDensator) são usados na literatura para designar este equipamento. Neste trabalho será adotado o primeiro. Nesta referência, o STATCOM é baseado em 8 conjuntos de conversores trifásicos, similares àqueles mostrados na Figura 11 (a). Devido ao grande número de pulsos, a forma de onda da tensão de saída destes conversores é praticamente senoidal e nenhum filtro é usado em ambos os casos (Mori *et alii*, 1993), (Schauder *et alii*, 1995).

O exemplo apresentado em Mori *et alii* (1993) foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a capacidade de transferência de potência ativa, em regime permanente, de uma linha de transmissão, sem pôr em risco a estabilidade transitória do sistema. Este compensador permitiu o aumento de 20% da potência ativa transmitida acima do limite de estabilidade previamente estabelecido sem compensação.

Nos exemplos de aplicação apresentados, os conversores são controlados para produzir, nos seus terminais, tensões em fase com as tensões do sistema CA. Assim, através do controle da amplitude desta tensões na saída dos compensadores, a corrente fluindo pelos terminais do compensador pode ser capacitiva ou indutiva. Esta técnica de controle é semelhante àquela usada no controle dos condensadores síncronos onde, pelo controle da corrente de excitação, as tensões trifásicas terminais são controladas e, como conseqüência, a corrente pode ser avançada ou atrasada em relação à tensão.

É importante observar que o conversor mostrado na Figura 11 (a) pode ser usado também para a compensação de cargas desbalanceadas como mostrado em Ichikawa *et alii* (1995), em Takeda *et alii* 1995, e em Izuka *et alii* (1995).

Uma outra maneira de controlar os conversores é pelo uso da teoria das potências $p-q$ instantâneas proposta inicialmente por Akagi *et alii* (1984) e discutida em detalhes em Watanabe *et alii*, (1993). Esta teoria foi primeiramente proposta para o controle de filtros ativos de potência e é baseada nela que foram desenvolvidas as estratégias de controle dos compensadores mostrados em Barbosa *et alii* (1995) e em Oliveira *et alii* (1995).

Nos compensadores testados em Barbosa *et alii* (1995) e em Oliveira *et alii* (1995) utilizou-se a técnica de chaveamento PWM, que devido as perdas de comutação inerentes têm sua faixa de potência limitada. Porém, esta faixa tem aumentado já havendo sistemas operando com PWM em potências de até dezenas de MW.

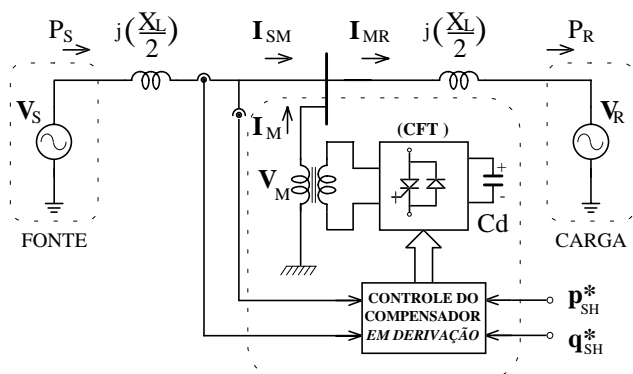


Figura 12: Compensador em derivação baseado em GTO (STATCOM).

Figura 12 mostra o diagrama unifilar de um compensador estático a GTO conectado em derivação com um sistema elétrico CA. Em Barbosa *et alii* (1995) mostra-se os resultados obtidos com um protótipo em pequena escala desenvolvido para testes em laboratório. Os sinais de referência p_{SH}^* e q_{SH}^* representam os valores de potência que o conversor tem que absorver ou gerar em seus terminais. Nas aplicações onde apenas potência reativa deve ser compensada o sinal de potência ativa, p_{SH}^* , é feito igual a zero.

3.3 Síntese do Compensador Série Usando Tiristores

A Figura 13 mostra o diagrama do capacitor série chaveado a tiristor. Neste sistema, para conectar os capacitores em série com a linha, os tiristores são mantidos cortados. Se os tiristores conectados em paralelo com os capacitores são disparados, estes capacitores são curto-circuitados. O disparo dos tiristores, como no caso do capacitor em derivação chaveado a tiristor, deve ser feito, idealmente, com tensão nula sobre as chaves semicondutoras (ZVS - Zero Voltage Switching). Um exemplo de aplicação baseado neste conceito está apresentado em Deri *et alii* (1992). Este sistema de compensação tem a vantagem de ser muito simples, entretanto não permite um controle contínuo da reatância série. Observe-se que, se a conexão e desconexão dos bancos capacitivos for feita de maneira esporádica, possivelmente não ocorrerão problemas devidos aos harmônicos de chaveamento. Entretanto, dependendo da frequência em que os tiristores são chaveados, tensões subharmônicas (harmônicos com frequência menor que a da rede) podem ser geradas.

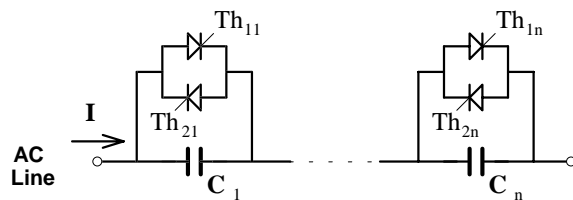


Figura 13: Capacitor série chaveado a tiristor (módulos discretos de chaveamento).

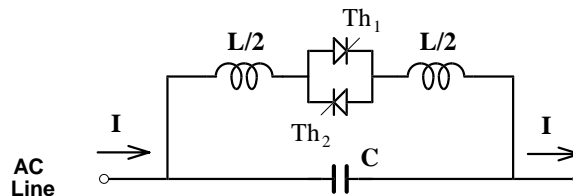


Figura 14: Capacitor série controlado a tiristor - TCSC (módulo de controle contínuo).

A Figura 14 mostra o diagrama de um capacitor série controlado a tiristor (TCSC - Thyristor Controlled Series Capacitor). Neste compensador, o valor equivalente do capacitor série pode ser controlado continuamente através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores. À primeira vista, este circuito é semelhante ao compensador estático convencional em derivação, com a diferença que, aqui, ele é conectado em série com a linha. Um sistema baseado neste conceito já se encontra em operação (Christl *et alii*, 1992), e tem provado ser um importante dispositivo para controlar o fluxo de potência bem como reduzir oscilações dinâmicas dos sistemas. Como no caso anterior, a operação de chaveamento dos tiristores gera harmônicos de baixa ordem. Entretanto, o capacitor série associado com a impedância da linha de transmissão tem se mostrado suficiente para filtrar estes harmônicos.

Como a tecnologia dos tiristores de potência é bem dominada e este é um dispositivo de alta confiabilidade, é possível dizer que o TCSC será, provavelmente, um dos dispositivos FACTS largamente empregados nos sistemas de potência, num futuro muito próximo.

No caso brasileiro, o TCSC está sendo considerado como elemento fundamental para a conexão dos sistemas elétricos Norte-Sul. A princípio sua função será a de amortecer possíveis oscilações de baixa frequência entre os dois sistemas (Salgado *et alii*, 1996), entretanto nada impede deste também ser usado para o controle do fluxo de potência.

3.4 Síntese de Compensadores Série Usando Chaves Autocomutadas

A Figura 15 mostra a configuração básica de um Capacitor Série controlado por GTO (GCSC - GTO Controlled Series Capacitor). Neste circuito, chaves tipo GTO são disparadas e cortadas sempre com tensão zero, emulando assim o comportamento de um tiristor dual. De fato, a topologia apresentada é um circuito dual do RCT da Figura 9 (a). Para uma análise inicial, vamos assumir que a corrente pela linha de transmissão é senoidal e que os GTOs, conectados em anti-paralelo com o capacitor série, são disparados toda vez que a tensão entre anodo e catodo passa por zero (de negativa para positiva). Então os capacitores são curto-circuitados e através do controle do instante de corte dos GTOs, estes são reconectados em série com a linha. As formas de onda da corrente e da tensão nos GTOs são idênticas as dos caso do reator controlado a tiristor, trocando apenas a corrente aqui

pela tensão no primeiro e vice-versa. Portanto, a tensão sobre o capacitor C é modulada de maneira a produzir uma reatância capacitiva equivalente série continuamente controlada. Acredita-se que, apesar de ainda não existirem muitos trabalhos publicados na literatura técnica, este compensador poderá uma opção real para muitas aplicações.

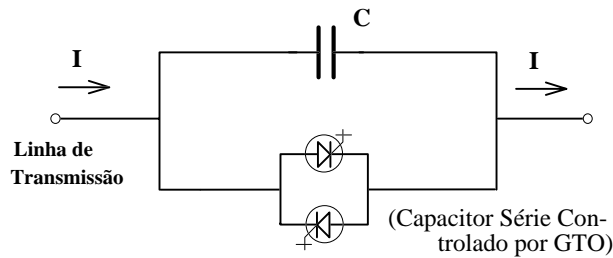


Figura 15: Capacitor série continuamente controlado por tiristores duais.

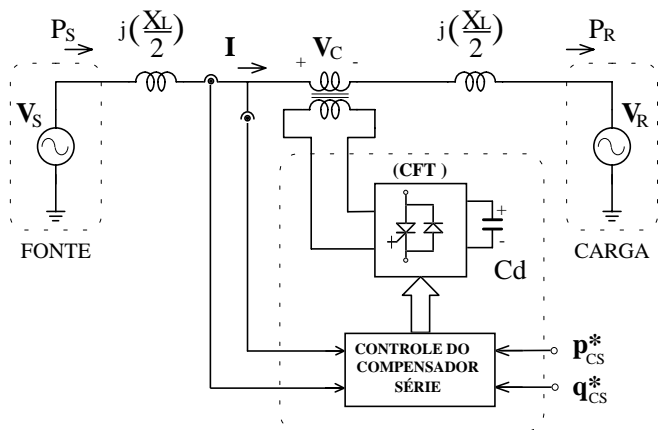


Figura 16: Compensador série avançado.

Usando uma filosofia semelhante à do compensador GTO em derivação é possível projetar um compensador série. De fato, o compensador série mostrado na Figura 16 é uma topologia dual da versão em derivação (Barbosa, P.G. *et alii* 1995). Esta figura mostra o diagrama básico do Compensador Série Avançado (SSSC - Static Synchronous Series Compensator) conectado com a linha de transmissão através de um transformador série. Este compensador é formado a partir de conversores tipo fonte de tensão (CFT) com um capacitor conectado em seus terminais CC (Barbosa e Watanabe (1995a); Barbosa e Watanabe (1995b)). O bloco de controle usa os conceitos de potência ativa e reativa instantâneas e os sinais de referência são p_{CS}^* and q_{CS}^* . Se apenas a potência reativa for compensada pelo conversor, o sinal p_{CS}^* é feito igual a zero e q_{CS}^* é escolhido de maneira a compensar a impedância série da linha CA ou controlar o fluxo de potência na linha.

A aplicação e o projeto de compensadores série deste tipo ainda necessita de muitos estudos. Entretanto, do ponto de vista do controle de fluxo de potência ativa pela linha e de seu tamanho reduzido, sua utilização é bastante promissora.

3.5 Síntese de Controladores de Ângulo de Fase Usando Tiristor

A Figura 17 mostra um exemplo de um controlador defasador (Gyugyi, 1992). Neste exemplo, válvulas de tiristores são associados em anti-paralelo formando uma chave bidirecional, comutada naturalmente. Estas chaves são conectadas ao enrolamento secundário de um transformador. Assim, disparando um conjunto de tiristores, uma tensão é conectada em série com a linha de transmissão através do secundário do

transformador. A amplitude da tensão inserida em série pode então ser variada através de um controle de fase para disparar os tiristores. Para evitar a geração excessiva de harmônicos um transformador com vários “taps” secundários é usado. O diagrama fasorial da tensão fase-neutro da fase “a” está mostrado na Figura 17.

3.6 Síntese do Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC)

O UPFC é um conceito relativamente novo de compensação e é um compensador de reativo mais completo (Gyugyi, 1990). A Figura 18 mostra um diagrama de blocos simplificado de um UPFC. Como explicado anteriormente, ele é formado por dois compensadores avançados, um série e outro em derivação, tendo um elo CC comum (Barbosa e Watanabe, 1995b; Gyugyi, 1992; Yu *et alii*, 1995; Ooi *et alii*, 1993). A capacidade de armazenar energia no elo CC comum é geralmente pequena, pois a potência ativa absorvida pelo conversor em derivação é igual à potência ativa gerada pelo conversor série e vice-versa. Se essa troca não é realizada, a tensão CC pode aumentar ou diminuir dependendo da potência que está sendo absorvida ou gerada por ambos os conversores. Do outro lado, a potência reativa compensada pelos conversores em derivação ou série podem ser escolhidas independentemente uma da outra, dando assim uma grande flexibilidade no controle do fluxo de potência pela linha.

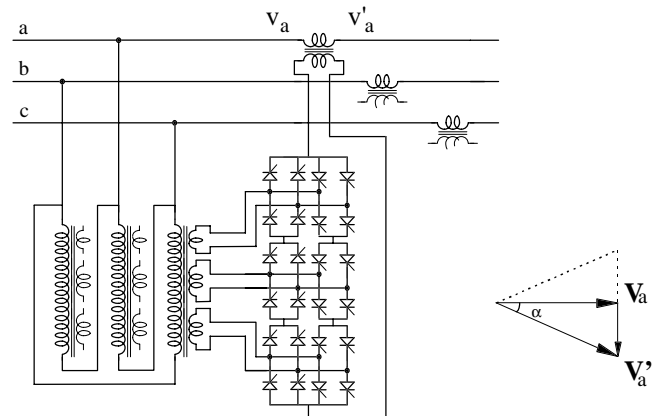


Figura 17: Exemplo de um controlador defasador usando tiristores e diagrama fasorial da tensão fase-neutro da fase “a”.

O diagrama fasorial da Figura 18 mostra que o UPFC pode ser controlado de maneira que este possa gerar uma tensão de compensação série, com qualquer amplitude e fase (sua região de operação é um círculo). Esta é uma das principais vantagens do UPFC quando comparado com controlador defasador baseado em tiristores.

Neste capítulo foi apresentados alguns conceitos básicos e princípios de operação de dispositivos FACTS. O principal objetivo não é forçar uma conclusão sobre qual é o melhor, mas sim mostrar resumidamente como eles funcionam, suas vantagens e limitações. O uso de tiristores e chaves autocomutadas foi discutido separadamente, em princípio porque elas levam a diferentes conceitos em termos de compensação. A seguir serão apresentados os tópicos relativos à operação de dispositivos FACTS em regime permanente.

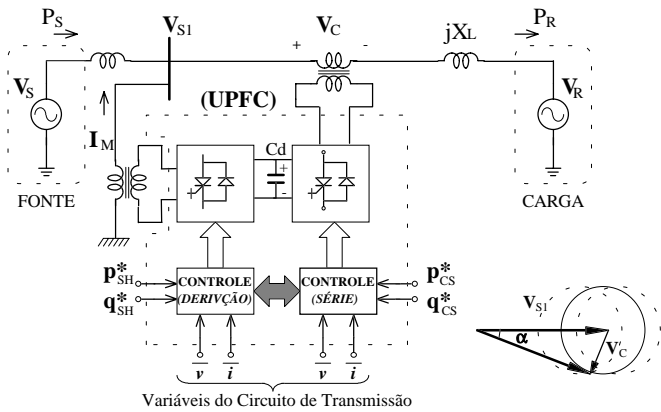


Figura 18: Diagrama de bloco do compensador unificado (UPFC) e diagrama fasorial da tensão fase-neutro da fase "a".

4 DISPOSITIVOS FACTS: OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE.

O impacto dos dispositivos FACTS na operação em regime permanente tem sido bastante estudado. Basicamente duas ferramentas são utilizadas nestes estudos: (i) programas de fluxo de carga e (ii) programas de fluxo de carga ótimo linear e não-linear. Os aspectos mais analisados têm sido o carregamento máximo permitido com a introdução de dispositivos FACTS e as perdas incrementais que advêm deste aumento na carga. Algoritmos de fluxo de carga foram usados em Maliszewski *et alii* (1990) e em Salgado *et alii* (1996) em estudos com compensadores série variáveis para se testar o aumento na carga máxima obtido com estes dispositivos, tendo como critério o limite de estabilidade de tensão. Os estudos em Maliszewski *et alii* (1990) mostram um aumento de até 80% no carregamento da linha sendo compensada e também um aumento nas perdas de transmissão. Os testes apresentados em Salgado *et alii* (1996b) demonstram que os equipamentos FACTS permitem um aumento na carga máxima do sistema pouco inferior àquele permitido por expansão no sistema, com um menor custo.

Programas de fluxo de carga ótimo foram usados em Ewart *et alii* (1991) e em Taranto *et alii* (1992) para também estudar o impacto destes equipamentos FACTS no limite máximo de carregamento. Em Ewart *et alii* (1991) são relatados aumentos de até 80% na capacidade máxima de transmissão adotando-se compensadores série e em derivação variáveis. Mais uma vez, este aumento de carga foi acompanhado por um aumento das perdas de transmissão.

Os estudos realizados por Griffin *et alii* (1996), por Galiana *et alii* (1996), e por Almeida (1996) tendo como critério a operação segura e econômica de um sistema, demonstram o melhor desempenho dos sistemas com dispositivos FACTS, a importância da localização correta destes dispositivos e o seu impacto nas perdas totais de um sistema. Neste capítulo, inicialmente são mostrados os modelos para dispositivos FACTS, em regime permanente. Em seguida, discute-se a operação segura e econômica de um sistema sem e com dispositivos FACTS. Analisa-se então a questão do máximo benefício que pode ser conseguido com estes dispositivos, usando para isso o conceito de *modelo ideal* de dispositivos FACTS. Por fim, um exemplo numérico ilustra os conceitos.

4.1 Modelos de Dispositivos FACTS na Operação em Regime Permanente

O fluxo de potência numa linha de transmissão de resistência desprezível, f_{ik} , é expresso por:

$$f_{ik} = \frac{V_i V_k}{X_{L_{ik}}} \text{sen}(\delta_i - \delta_k) \tag{6}$$

onde V_i , δ_i e V_k , δ_k são as magnitudes e ângulos de tensão da barra de origem, i , e destino, k , e $X_{L_{ik}}$ é a reatância da linha.

Os equipamentos FACTS procuram controlar o fluxo f_{ik} atuando nas magnitudes das tensões terminais da linha, na sua reatância e no ângulos de defasagem entre as barras terminais. Pode-se modificar f_{ik} para:

$$f_{ik} = \frac{a V_i V_k}{X_L + X_C} \text{sen}(\delta_i - \delta_k - \phi) \tag{7}$$

de acordo com a Figura 19 (a), ou ainda para:

$$f_{ik} = \frac{V_i V_k}{(X_{L_{ik}} / 2)} \text{sen}(\delta'_i - \delta_k) \tag{8}$$

de acordo com a Figura 19 (b). O fluxo pode, portanto, ser controlado atuando-se na compensação série X_C , no ângulo de defasagem de um transformador defasador, ϕ , na relação de transformação de um transformador de tensão, $1/a$, ou ainda por uma compensação em derivação, X_S . Estes componentes constituem os modelos básicos para dispositivos FACTS na operação em regime permanente.

No modelo linearizado (CC) de um sistema de transmissão, a representação de dispositivos FACTS se simplifica. Neste caso, o fluxo na linha (i,k) é dado por:

$$f_{ik} = \frac{1}{X_{L_{ik}} + X_C} (\delta_i + \phi - \delta_k) \tag{9}$$

De (9) tem-se que um compensador série pode ser representado no modelo CC por uma modificação na reatância da linha. Supondo apenas a presença de um defasador, (10) se torna

$$f_{ik} = \frac{1}{X_{L_{ik}}} (\delta_i - \delta_k) + \frac{1}{X_{L_{ik}}} \phi = f_{ik}^0 + f_{ik} \tag{10}$$

onde f_{ik}^0 é o fluxo sem o defasador e f_{ik} é o fluxo adicional.

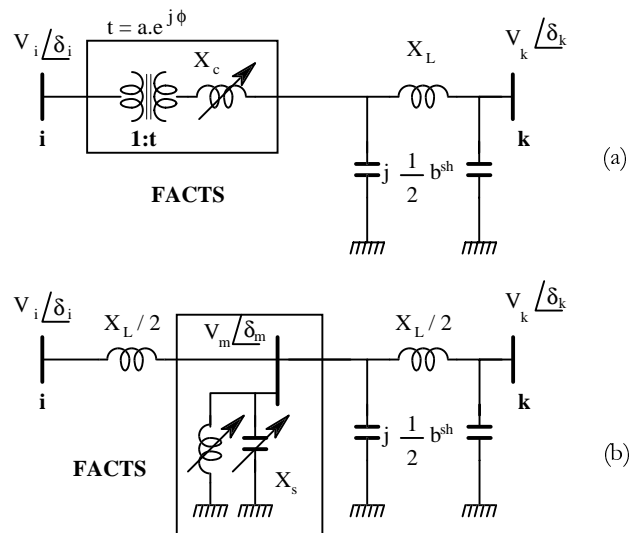


Figura 19: Modelos de dispositivos FACTS: (a) série; (b) em derivação.

Portanto, o defasador pode ser representado por injeções de compensação nas barras i e k (Figura 20).

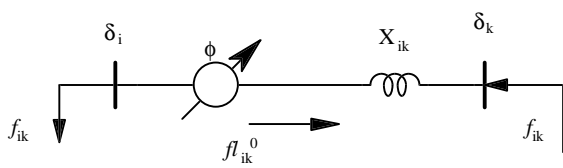


Figura 20: Modelo do Transformador Defasador

4.2 Segurança de Sistemas de Potência

A segurança de um sistema de geração/transmissão pode ser definida como sendo a robustez deste sistema em relação a falhas potenciais de equipamentos e sua capacidade de continuar a operar depois destas contingências (Griffin *et alii*, 1996). Segurança é um estado que varia com o tempo porque depende das condições do sistema, que também são variantes no tempo. Na prática, os sistemas de potência são compostos por equipamentos que devem ser operados dentro de limites estabelecidos por razões de construção ou de estabilidade, que devem ser respeitados mesmo que ocorram contingências. Os principais limites impostos são:

Magnitude das tensões: $V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$;

Gerações de potência ativa: $P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max}$;

Gerações de potência reativa: $Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max}$;

Fluxo de potência nas linhas: $f_l^{\min} \leq f_l \leq f_l^{\max}$;

Taps de transformadores de tensão: $a^{\min} \leq a \leq a^{\max}$;

Ângulo de defasagem dos transformadores defasadores: $\phi^{\min} \leq \phi \leq \phi^{\max}$.

4.2.1 Regiões de Segurança

O conceito de região de segurança é uma caracterização teórica da segurança de um sistema. Este conceito permite uma representação matemática ou mesmo gráfica da capacidade de operação sob contingências. Seja \mathbf{x} um vetor composto pelas variáveis de decisão (i.e., ângulos e magnitude de tensões, geração ativa e reativa ou ainda parâmetros controláveis dos dispositivos FACTS) e pelas cargas de um sistema de potência operando em regime permanente. A operação do sistema pode ser modelada através de um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade, $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$. A região de segurança, S , pode ser definida como o conjunto de valores \mathbf{x} para os quais as restrições de segurança são respeitadas:

$$S = \{\mathbf{x} | \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\} \quad (11)$$

Regiões de segurança são conceitos fundamentais já que elas representam todos os pontos de operação factíveis de um sistema. Sendo assim, elas possuem todas as informações necessárias para se avaliar um dado sistema. O exemplo de 3 barras (Galiana *et alii*, 1996) mostrado na Figura 21 ilustra o conceito. Este sistema é modelado através de suas equações de fluxo de carga linear e limites nos geradores 1 e 2 e nas linhas (1,2) e (2,3):

A representação gráfica da região de segurança em termos de P_{g1} e P_{g2} é mostrada na Figura 22. Por esta figura, pode-se ver que os limites dos fluxos nas linhas (1,2) e (2,3) restringem o

conjunto de pontos de operação definido pelos limites dos geradores para uma área menor.

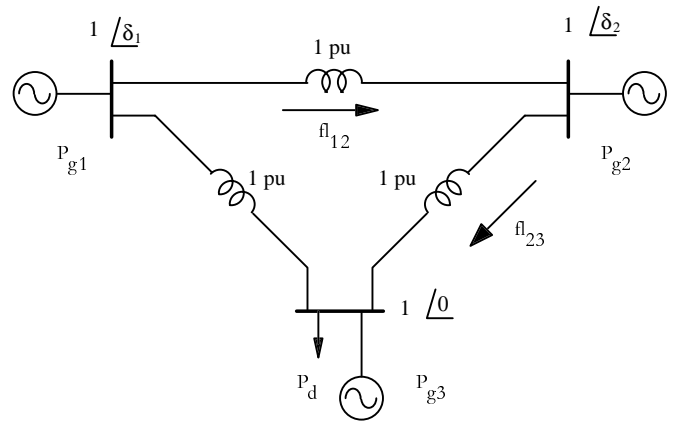


Figura 21: Exemplo de 3 barras.

As restrições do sistema são:

$$P_{g1} = 2\delta_1 - \delta_2 \quad fl_{12} = \delta_1 - \delta_2 \quad 0 \leq P_{g2} \leq 0.5$$

$$P_{g2} = 2\delta_2 - \delta_1 \quad fl_{23} = \delta_2 \quad -0.1 \leq fl_{12} \leq 0.1 \quad (12)$$

$$P_{g3} = P_d - P_{g1} - P_{g2} \quad 0 \leq P_{g1} \leq 0.5 \quad -0.4 \leq fl_{23} \leq 0.4$$

4.2.2 Segurança e Otimização da Operação

O problema de se encontrar um ponto de operação de um sistema que respeite todas as restrições a ele impostas não é trivial. O operador do sistema pode tomar uma gama de diferentes ações de controle para tornar um estado seguro. Diferentes ações de controle para melhorar a segurança de um sistema podem resultar em diferentes custos de operação, perdas de transmissão ou complexidade das manobras de correção. A escolha da melhor ação de controle deve portanto ser feita tendo como referência algum critério de otimização. O problema de operação com segurança transforma então num problema de otimização a ser resolvido no espaço definido pela região de segurança de um dado sistema. Alguns parâmetros típicos a serem otimizados são: custo de operação, perdas no sistema, carga total do sistema e número de ações de controle (Almeida, 1996).

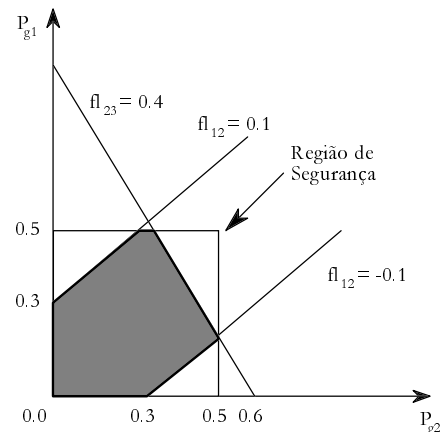


Figura 22: Região de segurança do exemplo de 3 barras.

Portanto, o problema de operação com segurança pode ser formulado como

$$\text{Min}_{\mathbf{x} \in S} c(\mathbf{x}) \quad (13)$$

onde $c(\mathbf{x})$ é um critério a ser minimizado (e.g. perdas), ou,

$$\text{Max}_{\mathbf{x} \in S} c'(\mathbf{x}) \quad (14)$$

onde $c'(\mathbf{x})$ é um critério a ser maximizado (e.g. carga que pode ser atendida).

As funções $c(\mathbf{x})$ e $c'(\mathbf{x})$, além de serem critérios para escolha de soluções mais adequadas para se manter um estado seguro de operação, são *medidas* do tamanho da região de segurança. Supondo duas regiões de segurança, S_1 e S_2 , com $S_1 \supseteq S_2$, se $c_1(\mathbf{x}^*)$ e $c_2(\mathbf{x}^*)$ são as soluções ótimas do problema (13) para $\mathbf{x} \in S_1$ e $\mathbf{x} \in S_2$ respectivamente, então $c_1(\mathbf{x}^*) \leq c_2(\mathbf{x}^*)$. Da mesma forma, se $c'_1(\mathbf{x}^*)$ e $c'_2(\mathbf{x}^*)$ são as soluções ótimas do problema (14) para $\mathbf{x} \in S_1$ e $\mathbf{x} \in S_2$, respectivamente, então tem-se que $c'_1(\mathbf{x}^*) \geq c'_2(\mathbf{x}^*)$.

4.2.3 Regiões de Segurança com FACTS

Sejam S_F e S_0 as regiões de segurança de um sistema com e sem dispositivo FACTS numa linha. Tem-se que:

$$S_F \supseteq S_0 \quad (15)$$

Ou seja, a região de segurança com dispositivos FACTS inclui todos os pontos de operação factíveis sem este dispositivo. Isto é óbvio porque qualquer vetor \mathbf{x} pertencente à região original S_0 pertence também à S_F , uma vez que é sempre possível ajustar os parâmetros de qualquer FACTS de forma a simular o sistema original. Por outro lado, para a maioria dos dispositivos FACTS, é possível encontrar ao menos um ponto de operação, \mathbf{x} , que pertença a S_F mas não a S_0 . Portanto, o problema se torna então determinar quão maior é S_F em relação à S_0 . Tomando o exemplo da Figura 21, a equação (15) pode ser ilustrada pela adição de um defasador de ângulo ϕ , $-0.1 \leq \phi \leq 0.1$, à linha (1,2). Nota-se que a nova região de segurança (Figura 23) engloba a original (Figura 22).

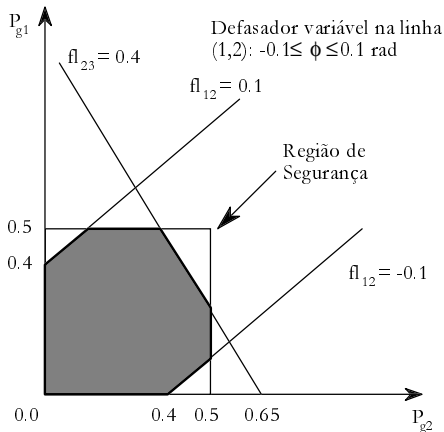


Figura 23: Região de segurança com um transformador defasador.

Sejam agora dois dispositivos FACTS, F_1 e F_2 , o primeiro possuindo mais graus de liberdade do que o segundo. Se estes dois dispositivos são colocados na mesma linha de um sistema, um de cada vez, as regiões de segurança correspondentes devem satisfazer

$$S_{F1} \supseteq S_{F2} \quad (16)$$

Uma vez que qualquer ponto de operação seguro obtido com F_2 será também seguro na presença de F_1 . Para ilustrar esta situação, adicionou-se à linha (1,2), do exemplo da Figura 21, um dispositivo FACTS composto por um transformador defasador variável mais um capacitor série variável com $-0.1 \leq \phi \leq 0.1$, e $-0.5 \leq x_c \leq 0.5$. A nova região de segurança (Figura

24) engloba aquelas obtidas anteriormente (Figura 22 e Figura 23).

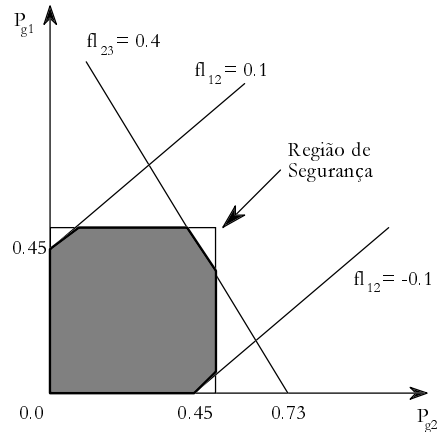


Figura 24: Região de segurança com reatância série variável e transformador defasador.

$S_F \supseteq S_0$ implica que o sistema com um dispositivo FACTS tem um desempenho melhor do que sem FACTS para qualquer medida quantitativa de desempenho avaliada em S . Uma medida de desempenho, para ser efetiva, deve ser avaliada em toda a região S e não somente em um ponto de operação, ou subconjuntos de pontos de operação, o que acontece quando se compara desempenho de sistemas com base em casos específicos de estudo. A resolução do problema (12) ou do problema (13) com $\mathbf{x} \in S_0$ e $\mathbf{x} \in S_F$, utilizando qualquer dos critérios de otimização citados anteriormente, fornece uma medida efetiva do impacto dos FACTS na operação em regime permanente.

4.3 Modelos Ideais de Dispositivos FACTS em Regime Permanente

Um *modelo ideal* de FACTS pode ser definido como sendo aquele cujos parâmetros controláveis podem ser ajustados de forma que o comportamento de uma rede com um elemento FACTS ideal reproduzirá exatamente o comportamento desta mesma rede com qualquer outro dispositivo FACTS (Stott *et alii*, 1987). Esta definição implica que a região de segurança de uma rede com equipamentos FACTS ideal, S_{FI} , contém a região de segurança do mesmo sistema com qualquer outro tipo de FACTS, S_F , quando tais dispositivos se encontram no mesmo local da rede.

Um dispositivo FACTS na linha (i,k) de um sistema com n barras (Figura 25) pode ser substituído, sem que o estado de operação do sistema se altere, por:

Duas fontes de corrente complexas (Figura 26);

Duas fontes de tensão complexas (Figura 27);

Duas fontes de potência complexas (Figura 28).

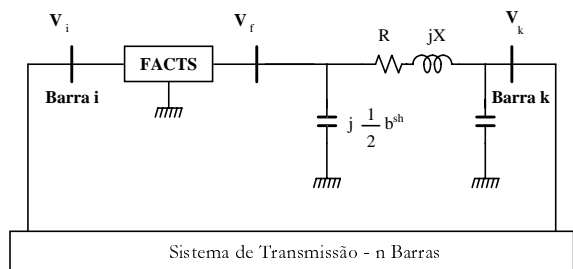


Figura 25: Sistema com FACTS na linha (i,k).

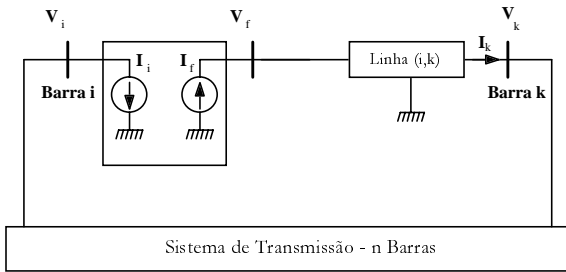


Figura 26: Modelo ideal de dispositivos FACTS com fontes de corrente.

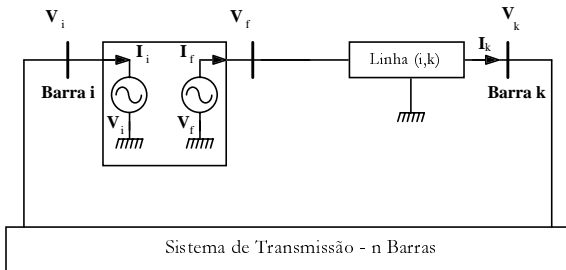


Figura 27: Modelo ideal de dispositivo FACTS com fontes de tensão.

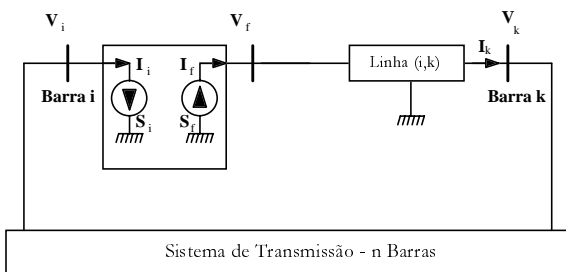


Figura 28: Modelo ideal de dispositivo FACTS com fontes de potência.

Qualquer dos dispositivos acima, com fontes de corrente, tensão ou potência arbitrárias e independentes satisfaz à condição imposta para o modelo ideal, ou seja, as fontes podem ser ajustadas para se reproduzir qualquer ponto de operação de um sistema que possua qualquer tipo de dispositivo FACTS. O exemplo da Figura 21, com um FACTS ideal na linha (1,2) injetando uma potência ativa P_f , $-0.1 \leq P_f \leq 0.1$, passa a ter uma região de segurança definida apenas pelos limites nos geradores (Figura 29). O estudo do impacto de um dispositivo FACTS ideal em um sistema de potência é importante uma vez que ele define limites do que seria realizável, que podem ser usados para analisar o desempenho de qualquer dispositivo. Além disto, se o desempenho do modelo ideal não é satisfatório, nenhum outro dispositivo dará resultados

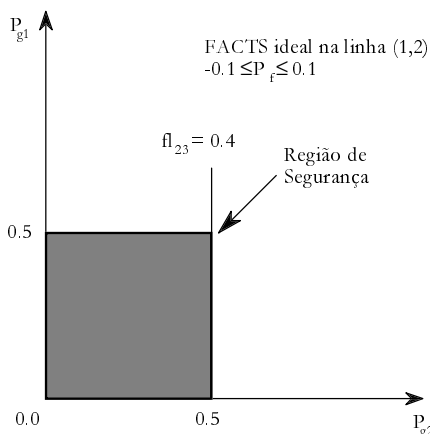


Figura 29: Região de segurança com equipamento FACTS ideal

superiores.

5 TECNOLOGIA FACTS: DINÂMICA E CONTROLE

Já se passaram quase 10 anos da concepção do conceito de FACTS pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*) (Hingorani, 1988; Electric Power Research Institute, 1989). De lá para cá diversos estudos de viabilidade, “workshops” (Electric Power Research Institute, 1990; Electric Power Research Institute, 1992; Cigre, 1995), seções especiais em congressos, projetos financiados (FACTS, 1990) e, centenas de artigos técnicos (Taranto and Chow, 1995; Larsen *et alii*, 1995; Othman *et alii*, 1995; Martins *et alii*, 1994; Taranto *et alii*, 1994; Taranto *et alii*, 1995; Klein *et alii*, 1995; Bazanela *et alii*, 1995; Simões Costa *et alii*, 1996), já foram de uma forma ou de outra publicados e discutidos. Não nos cabe aqui ficar repetindo as potencialidades já provadas desse novo tipo de tecnologia, nem ao menos tentar fazer propaganda positiva ou negativa do mesmo.

Este capítulo descreve sucintamente algumas das técnicas que podem ser usadas na síntese dos controladores. Uma larga gama de metodologias, que vão desde técnicas de controle moderno H_∞ a técnicas de controle inteligente (Algoritmos Genéticos) podem ser usadas na síntese de controladores FACTS.

O problema de interação entre controles pode ser minimizado pela escolha da localização dos equipamentos e também pela escolha dos sinais de realimentação. A tendência é de se perceber maior interação quando a distância elétrica entre controladores é pequena. Um grau de interação maior também se percebe quando os sinais de realimentação escolhidos são significativamente modificados pelos sinais de controle.

5.1 Aplicação nos Estudos de Estabilidade

Além de aplicações nos estudos de regime permanente, os equipamentos FACTS podem também ser usados nos estudos dinâmicos. A aquisição de um equipamento FACTS poderá se dar para a solução de um problema de estabilidade transitória e/ou dinâmica, ao invés de uma solução para um problema de regime permanente apenas.

5.1.1 Estabilidade Transitória (Grandes Perturbações)

Os estudos de estabilidade transitória, em geral, são efetuados para grandes perturbações no sistema de potência. As ferramentas computacionais existentes consistem basicamente dos programas de simulação no domínio do tempo. A solução nos programas de estabilidade transitória é alcançada através da integração numérica de um conjunto de equações algébrico-diferenciais não lineares (17) que modelam o sistema de potência.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, w, u) \\ 0 &= g(x, w, u) \\ y &= h(x, w, u) \end{aligned} \quad (17)$$

onde x é o vetor de variáveis de estado dinâmicas, w é vetor de variáveis algébricas, u é o vetor de variáveis de entrada (controle) e, y é o vetor de variáveis de saída (medidas). A representação de um equipamento FACTS na modelagem (17), é feita com a inclusão da equação diferencial que modela o equipamento no conjunto representado pela função f . A

representação de um TCSC, por exemplo, poderia ser realizada considerando u como a susceptância do banco de capacitores e y como a potência ativa através do equipamento.

5.1.2 Estabilidade Dinâmica (Pequenas Perturbações)

Os estudos de estabilidade dinâmica são efetuados para pequenas perturbações no sistema de potência. Este fato permite que as equações não lineares que representam o sistema elétrico (17) possam ser linearizadas num determinado ponto de operação do sistema. O sistema (17) linearizado é dado por (18).

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x}(t) &= A\Delta x(t) + B\Delta u(t) \\ \Delta y(t) &= C\Delta x(t) + D\Delta u(t)\end{aligned}\quad (18)$$

onde A é a matriz de estados do sistema, B é a matriz de entrada, C é a matriz de saída, D é a matriz de alimentação direta e, Δ representa a perturbação nas variáveis.

Assumindo que o sistema possa ser representado por (18), as técnicas de álgebra linear e controle linear podem ser eficientemente usadas nos problemas de análise e síntese. As ferramentas computacionais existentes se baseiam em métodos modais que são fundamentadas na análise dos autovalores da matriz A .

A aplicação mais significativa dos equipamentos FACTS nos estudos de estabilidade frente a pequenas perturbações seja o amortecimento de oscilações eletromecânicas. Diversos trabalhos já estudaram este assunto, dentre os quais podemos destacar os artigos Taranto and Chow (1995), Larsen *et alii* (1995), Othman *et alii* (1995), e Martins *et alii* (1994).

5.2 O Problema do Controle

Nesta seção apresentamos alguns conceitos importantes do ponto de vista de controle dos equipamentos FACTS. Cabe salientar que os pontos a serem abordados serão em termos do controle da operação do sistema como um todo, e não do controle do equipamento em si.

5.2.1 Robustez

A necessidade de robustez nos sistemas elétricos tem se tornado cada vez mais imperativa, uma vez que o surgimento de novas tecnologias e a tendência de transformar o sistema elétrico num mercado aberto, proporcionam um aumento na complexidade da operação deste sistema.

O conceito de robustez implica em operar o sistema com adequadas margens de estabilidade e grau de desempenho, apesar das várias incertezas inerentes ao sistema e das simplificações dos modelos.

Contrariamente ao controle adaptativo cujos parâmetros são variantes no tempo, o controle robusto é definido a parâmetros fixos. A idéia básica é determinar a estrutura e os parâmetros dos controladores de forma que estes consigam proporcionar um bom desempenho em diversas condições de operação do sistema.

5.2.2 Descentralização

O interesse pelo controle descentralizado em algumas aplicações de equipamentos FACTS se dá pelo ponto de vista econômico e de confiabilidade. Custos de canais de

telecomunicação são eliminados quando se opta pela estrutura descentralizada. A estrutura não apoiada nos canais de telecomunicação faz com que a confiabilidade do sistema seja maior.

Em muitos sistemas de controle multivariáveis, as informações disponíveis para que cada controlador tome sua decisão de controle, é limitada. Nessas situações, se faz necessário o uso de múltiplos controladores individuais que tomem decisões baseadas no conhecimento limitado sobre as variáveis do sistema, disponíveis localmente. Sistemas de grande porte, como é o caso do sistema elétrico, em geral, requerem a descentralização dos controles.

Controle descentralizado é definido como uma estratégia de controle que possui as seguintes propriedades:

- Existência de múltiplos controladores.
- A informação disponível para qualquer controlador não é disponível para os outros controladores.
- A decisão feita por um controlador não é conhecida pelos outros controladores.

A solução dos problemas com controle descentralizado é, em geral, mais difícil de se obter do que com controle centralizado, onde toda informação é disponível a cada controlador. É factível que em situações em que haja uma solução do tipo centralizada, não exista uma solução descentralizada. Também é possível que o desempenho do sistema com controle descentralizado seja inferior ao desempenho com controle centralizado.

Apesar do controle descentralizado ser um problema mais complexo, ele é, em geral, mais simples de ser implementado do que a solução centralizada que necessita de canais de comunicação entre os diversos controladores. Num sistema de grande porte, é preferível usar uma solução descentralizada, se a degradação do desempenho devida a descentralização não for significativa.

5.2.3 Interação Entre Controladores

A inserção de múltiplos equipamentos FACTS no sistema elétrico poderá causar problemas de interação entre os diversos controladores. Equipamentos que apesar de estarem fisicamente distantes podem estar eletricamente próximos, aumentando a probabilidade de interação entre os sinais dos controladores. Por exemplo, quando mais de um equipamento FACTS estiver instalado no sistema de potência, aumentará a possibilidade de um modo de oscilação entre áreas ser afetado por vários equipamentos FACTS, ou um equipamento FACTS afetar vários modos de oscilação entre áreas. Nesse contexto, fica evidenciada a relevância da busca de projetos sistemáticos que levem em consideração a coordenação da ação desses controladores.

Medidas que possam minimizar a interação entre controladores são a localização física do equipamento no sistema e a seleção dos sinais de realimentação dos controladores. Esses dois últimos pontos são discutidos a seguir.

5.2.4 Importância da Localização

A capacidade de controle de um equipamento FACTS é relacionada com a localização do mesmo no sistema. Esta característica pode ser analisada através do conceito de controlabilidade. Por exemplo, um TCSC situado numa linha de interconexão entre áreas (veja

Figura 30) tem significativa controlabilidade sobre o modo de oscilação associado entre as áreas e muito menos controlabilidade sobre os modos locais. Em casos com múltiplos modos entre áreas, a compensação necessária pode estar 180° defasada de um modo para o outro. Situações como essas significariam que se as velocidades médias dos geradores de cada área fossem enviadas ao controlador, este, enquanto atuasse positivamente num modo, estaria simultaneamente diminuindo o amortecimento do outro modo.

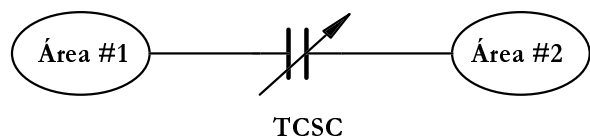


Figura 30: Sistema com duas Áreas.

Um SVC localizado numa barra que tenha necessidade de suporte de tensão será mais efetivo para controle de amortecimento do que um localizado perto da barra terminal do gerador (Goldberg, 1989). Métodos utilizando análise modal (Larsen *et alii*, 1995; Goldberg, 1989) são ferramentas eficazes no problema de determinação da localização de controladores no sistema de potência.

5.2.5 Importância dos Sinais de Realimentação

Nas aplicações dos equipamentos FACTS para amortecimento de oscilações eletromecânicas, vários sinais são candidatos a serem usados como sinais de realimentação dos controladores. Alguns critérios devem ser aplicados na seleção dos sinais de entrada dos controladores. De acordo com a aplicação, o sinal deve observar o modo de oscilação a ser amortecido.

Conforme ênfase dada à descentralização de controles nas aplicações FACTS dá-se preferência ao uso de sinais locais ou sinais remotos que possam de alguma maneira ser sintetizados através dos sinais locais (Larsen *et alii*, 1995). O uso de sinais locais elimina a necessidade do uso de canais de telecomunicação, reduzindo atrasos de tempo e aumentando a confiabilidade.

Uma característica importante do sinal de realimentação é a sua invariabilidade com as condições de operação do sistema. É desejável que o sinal seja consistente nos diversos pontos de operação, proporcionando uma contribuição positiva no amortecimento das oscilações.

Instabilidade em frequências mais elevadas devem ser evitadas. Esse problema pode ocorrer quando o sinal de realimentação escolhido é afetado diretamente pelo sinal de saída do controlador. Interações com outros controladores no sistema são também influenciadas pela escolha dos sinais de realimentação.

Alguns equipamentos FACTS como por exemplo o TCSC, TCPR (*Thyristor Controlled Phase Regulator*) e SVC serão, muito provavelmente, localizados longe dos parques geradores. Como resultado, o sinal da velocidade dos rotores não estará disponível localmente aos equipamentos. Desta forma, o controle de amortecimento dos equipamentos FACTS deve se basear nos sinais locais que tenham um bom desempenho na tarefa de amortecer as oscilações eletromecânicas.

Os sinais básicos disponíveis aos equipamentos FACTS localizados no sistema de transmissão são correntes e tensões. Todavia, o uso direto desses sinais pode não ser desejado devido à falta de sensibilidade ao modo a ser observado e por

possíveis problemas de interação. Uma possível forma de solucionar o problema da falta de bons sinais locais é usar os sinais existentes de forma a sintetizar sinais remotos que tenham maior sensibilidade modal e que não propiciem problemas de interação. Os desafios de selecionar sinais robustos para o problema de oscilações entre áreas incluem:

- modo entre áreas deve ser o modo dominante observado no sinal.
- Modos secundário entre áreas e modos locais podem estar incluídos no sinal se os seus amortecimentos podem ser melhorados sem que haja detrimento do amortecimento do modo primário entre áreas. Caso contrário, a presença deles no sinal deve ser minimizada.
- À medida que as condições de operação variam, o sinal deve possuir características de adaptação e robustez que compensem variações na controlabilidade dos equipamentos.

5.3 Técnicas de Projeto

O uso de técnicas de controle clássico ainda predominam nos projetos de controladores nos sistemas de potência atuais. O avanço da teoria de controle observado nos últimos 20 anos não foi acompanhado no campo da aplicação, formando assim, uma *gap* indesejável que deve ser preenchido.

A complexidade dos controles tendem a aumentar nos sistemas assistidos por equipamento FACTS e nos sistemas com uma estrutura desverticalizada. Isto faz com que o futuro sistema elétrico se torne uma área atrativa para aplicação das novas técnicas de controle moderno tais como Taranto *et alii* (1994), Taranto *et alii* (1995), Simões Costa *et alii* (1996).

Uma nova tendência que se tem observado nos últimos anos na comunidade científica é o uso dos chamados métodos inteligentes na solução de problemas não facilmente resolvidos por técnicas convencionais. Dentre estes métodos destacam-se as Redes Neurais, os Algoritmos Genéticos (Taranto *et alii*, 1996) e a Lógica Nebulosa (Fuzzy).

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou alguns conceitos básicos e princípios de operação de dispositivos FACTS. O principal objetivo não é forçar uma conclusão sobre qual é o melhor, mas sim mostrar como eles funcionam, suas vantagens e limitações. O uso de tiristores e chaves autocomutadas foi discutido separadamente, em princípio porque elas levam a diferentes conceitos em termos de compensação. O uso da teoria das potências ativa e reativa instantânea é uma ferramenta valiosa para o melhor entendimento da operação dos compensadores FACTS que foram mostrados. Os autores estão convencidos que esta teoria será importante para o projeto otimizado destes dispositivos.

Os estudos utilizando o conceito de regiões de segurança e de medidas feitas a partir da resolução dos problemas de fluxo de carga ótimo ou de maximização da carga, indicam uma melhora no desempenho de um sistema com FACTS. É importante notar que este desempenho é obtido através da otimização global (inclusive dos parâmetros dos equipamentos FACTS) do sistema em relação a um critério específico. Isso significa que, caso os parâmetro dos dispositivos FACTS sejam controlados segundo um critério local (e.g. aumento do carregamento da linha sendo compensada), o desempenho do sistema como um todo poderá ser inferior aos observados na otimização. Sob este ponto de vista, então, os resultados

mostrados aqui são limites superiores do potencial dos dispositivos FACTS na operação em regime permanente.

Este artigo tentou, também, de forma sucinta salientar os pontos de maior relevância dos sistemas assistidos por equipamentos FACTS sob o prisma da dinâmica e controle. Destacou-se a importância dos controladores robustos e descentralizados nas aplicações FACTS.

O problema de interação entre diversos controladores foi abordado e medidas que tendem a minimizar este problema, como a localização dos controladores e a seleção de sinais de realimentação, foram apontadas.

A tendência até agora mostra que as aplicações dos equipamentos FACTS nos sistemas de potência podem ser divididas em dois tipos:

- (i) aplicações de efeitos localizados onde destacamos o uso dos equipamentos FACTS para controle de tensão e para o amortecimento de modos locais de oscilação.
- (ii) aplicações de efeitos globais onde podemos destacar o uso dos equipamentos FACTS para o amortecimento de modos de oscilação entre áreas.

Os autores entendem que muito trabalho deve, ainda, ser feito antes que esses sistemas sejam reconhecidos como seguros. Estes trabalhos envolvem por exemplo:

- desenvolvimento de novas chaves semicondutoras de potência;
- síntese de conversores eletrônicos autocomutados de alta potência;
- planejamento dos novos sistemas de potência com esses novos controladores;
- modelagem dos controladores e sua validação para faixa de frequências maiores que as usadas atualmente;
- desenvolvimento de controle descentralizado para os controladores FACTS.

Várias questões em relação ao comportamento e potencial dos dispositivos FACTS em regime permanente continuam em aberto. Sabe-se que o impacto destes dispositivos depende do seu posicionamento na rede (Almeida, 1996), entretanto não existem ainda critérios para indicar a melhor localização de um dispositivo FACTS num sistema. Por outro lado, não se sabe ainda quão maiores serão os carregamentos dos sistemas com equipamentos FACTS em relação aos sistemas de hoje. Dispositivos FACTS só serão aceitos pelas indústrias de geração e transmissão de energia elétrica se sua utilidade for comprovada por uma redução nos custos e/ou um aumento na segurança da operação.

A mensagem positiva fica por conta dos novos desafios que o engenheiro de potência deverá enfrentar com a chegada dos equipamentos FACTS nos sistemas elétricos, o que nos deixará com o que se preocupar por muitos anos a frente.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pela concessão de bolsas de recém-doutor a dois dos co-autores, à CAPES pela bolsa de doutorado de outro co-autor, à COPPE/UFRJ e à UFSC pela oportunidade de desenvolvimento de seus trabalhos.

Os autores agradecem também o apoio dos coordenadores dos Comitês de Sistemas de Potência e de Eletrônica de Potência

da Sociedade Brasileira de Automática e do corpo de editores da revista da SBA que, sem os mesmos, este trabalho não teria sido realizado. Agradecemos também aos revisores que, com suas críticas e anotações, ajudaram a melhorar esta versão final

7 REFERÊNCIAS

- Adapa, R. *et alii*, (1995) FACTS Overview, *IEEE Power Engineering Society*, pp. 2.1-2.4.
- Akagi, H., Y. Kanazawa and A. Nabae (1984), "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625-630.
- Almeida, K.C. (1996); "Impacto de Dispositivos FACTS no Comportamento em Regime Permanente de Sistemas de Geração/ Transmissão". *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Automática*, São Paulo, setembro, pp. 929-934.
- Baliga, B. J. (1995), "Power Ics in the Saddle", *IEEE Spectrum*, July, pp.34-40.
- Barbosa, P.G. and E.H. Watanabe (1995a), "Series Connection of PWM-Voltage Source Inverter for Reactive Power Compensation of AC Transmission Lines", *Proc. of IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Rio de Janeiro, Brazil, Aug., pp. 673-676.
- Barbosa, P.G. and E.H. Watanabe (1995b), "Advanced Series Reactive Power Compensator Based On Voltage Source Converters", *Proc. of III Brazilian Power Electronics Conf.*, São Paulo, Brazil, Dec, pp. 03-08.
- Barbosa, P.G., I. Misaka and E.H. Watanabe (1995), "Shunt-PWM Advanced Var Compensators Based on Voltage Source Inverters For FACTS Applications", *Proceedings of IV SEPOPE*, Foz do Iguaçu, Brazil, Maio, SP-11.
- Bazanela, A.S., A. Fischman, A. S. Silva, J. M. Dion and L. Dugard (1995), "Coordinated Robust Controllers in Power Systems," *Proceedings of the IEEE Stockholm Power Tech Conference*, June, pp.256-261.
- Bose, B. K. (1986), "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall.
- Christl, N., R. Hedin, K. Sadek, P. Lützelberger, P.E. Krause, S.M. McKenna, A.H. Montoya and D. Torgerson (1992), "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor Controlled Impedance", Paris, France, paper n°. 14/37/38-05.
- Cigre - SC 38/14 (1995), *Proceedings of the Workshop on FACTS*, Rio de Janeiro, RJ, Nov.
- Deri, A.J.F., B.J. Ware, R.A. Byron, A.S. Mehraban, M. Chamia, P. Halvarsson and L. Ängquist (1992), "Improving Transmission System Performance Using Controlled Series Capacitors", Paris, France, paper n°. 14/37/38-07.
- Doyle, J.C., K. Glover, P. P. Khargonekar and B. A. Francis (1989), "State-Space Solutions to Standard H and H-infinity Control Problems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.34, pp. 831-847.

- Electric Power Research Institute (1989), "The Future of Transmission: Switching to Silicon," *EPRI Journal*, June.
- Electric Power Research Institute (1990), "The Future in High-Voltage Transmission: Flexible AC Transmission System (FACTS)," *Proceedings of the First FACTS Conference*, Cincinnati, Ohio, Nov.
- Electric Power Research Institute (1992), "Flexible AC Transmission Systems," *Proceedings of the Second FACTS Conference*, Boston, MA.
- Ewart, D.N.; Koessler, R.J.; Mountford, J.D. e Maratukulam, D. (1991); "FACTS Options Permit the Utilization of the Full Thermal capacity of AC Transmission". *Fifth International Conference on AC and DC Transmission*, Londres, Sept., pp.13-18.
- Flexible AC Transmission Systems (FACTS) (1990), Scoping Study, EPRI RP3022-2, Final Report.
- Galiana, F.D. *et alii* (1996); "Assessment and Control of the Impact of FACTS Devices on Power System Performance", *Transactions on PWRs*, Vol.11, No.4, November, pp. 1931-1936.
- Goldberg, E.(1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Martins, N. and L. T. G. Lima (1990), "Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.5, pp. 1455-1468.
- Griffin, J.; Atanackovic, D. e Galiana, F.D. (1996); "A Study on the Impact of FACTS on the Secure-Economic Operation of Power Systems", *Proceedings of 12th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dresden, August, pp. 1077-1082.
- Gyugyi, L. (1990), "Solid-state Control of AC Power Transmission", *Proc. of Workshop on the Future in High-Voltage Transmission: Flexible AC Transmission Systems*, Cincinnati, Ohio, Nov., EPRI TR-100504.
- Gyugyi, L. (1992), "Unified Power-Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", *IEE Proceedings-C*, Vol. 139, No. 4, Julho, pp. 323-331.
- Hingorani, N. G. (1988), "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", *Proceedings of IEEE, Special Issue on Power Electronics*, April.
- Hingorani, N.(1993); "Flexible AC Transmission". *IEEE Spectrum*, April, pp. 40-45.
- Ichikawa, F., *et alii* (1995), "Operating Experience of a 50 MVA Self-Commutated SVC at the Shin-Shimano Substation", *Proc. of IPEC-Yokohama'95*, Yokohama, Japan, April , pp.597-601.
- Izuka, A. *et alii* (1995), "Self-commutated Static Var Generator at Shintakatsu Substation", *Proc. of IPEC-Yokohama'95*, Yokohama, Japan, April , pp. 609-615.
- Klein, M., L. X. Le, G. J. Rogers, S. Farrokhpay, and N. J. Balu (1995), "H ∞ Damping Controller Design in Large Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, pp.158-166.
- Larsen, E.V., J. J. Sanchez-Gasca, and J. H. Chow (1995), "Concepts for Design of FACTS Controllers to Damp Power Swings", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, May, pp. 948-956.
- Maliszewski, R.M.; Pasternack, B.M.; Chamia, M. e Frank, H. (1990); "Power Flow Control in a Highly Integrated Transmission Network". *Anais do CIGRÉ*, artigo 37-03.
- Martins, N., H. J. C. P. Pinto, A. Bianco and N. J. P. Macedo (1994), "TCSC Control Structures for Line Power Scheduling and Methods to Determine their Location and Tuning to Damp System Oscillations," *IV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, Foz do Iguaçu, Brazil.
- Mori, S., K. Matsuno, M. Takeda, M. Seto (1993), "Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, Feb. , pp. 371-377.
- Nilson, A. and M. Bahrman (1994); "Power Flow Control". Panel Session on FACTS Changes Power System Control, *IEEE/PES Winter Power Meeting*, pp. 1-15.
- Oliveira, M. M., E.H. Watanabe and Å. Ekström (1993), "Substituição de Compensadores Síncronos por Conversores de Tensão: Uma Análise Preliminar", *Proceedings of XII SNPTEE*, Recife, RE/GAT-18.
- Ooi, B. T., S. Z. Dai and F. D. Galiana (1993), "A Solid-State PWM Phase Shifter", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8 No. 2, April, pp. 573-579.
- Othman, H.A., R. Vedam, J. Finney and L. Angquist (1995), "Robust Supplementary Damping Controllers," *Proceedings of the IEEE Power Tech Conference*, Paper SPT PS08-05-0370, Stockholm, Sweden, pp.244-249.
- Salgado, E. *et alii*. (1996); "Controlled Series Compensation: Digital Program Modelling and Possible Applications to the Brazilian System". *Anais do V SEPOPE*, Recife, maio, pp. 659-666.
- Schauder, C., M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T. W. Cease and A. Edris (1995), "Development of a ± 100 Mvar Static Condenser for Voltage Control of Transmission System", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.10, No.3, July, pp.1486-1493.
- Simões Costa, A.J.A., F. D. Freitas and A. S. Silva (1996), "Design of Decentralized Controllers for Large Power Systems Considering Sparsity," *IEEE Winter Power Meeting*, Baltimore, MD.
- Stott, B.; Alsac, O. e Monticelli, A.J. (1987); "Security Analysis and Optimization". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 75, N $^{\circ}$ 12, dezembro, pp. 1623-1644.
- Takeda, M. *et alii* (1995), "Development of an SVC Series for Voltage Control over Three-Phase Unbalance caused by Railway Load", *Proc. of IPEC-Yokohama'95*, Yokohama, Japan, April , pp. 602-608.

- Taranto, G.N. and J. H. Chow (1995), "A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, Aug., pp. 1219-1225.
- Taranto, G.N.; Pinto, L.M.V.G. e Pereira, M.V.F. (1992); "Representation of FACTS Devices in Power System Economic Dispatch", *IEEE Transactions on PWRs*, Vol. 7, Nº 2, May, pp. 572-576.
- Taranto, G.N., J. H. Chow, and H. A. Othman (1994), "Robust Decentralized Control Design for Damping Power System Oscillations," *Proc. IEEE Conf. On Decision and Control*, Orlando, Florida, pp. 4080-4085.
- Taranto, G.N., J. K. Shiau, J. H. Chow and H. A. Othman (1995), "A Robust Decentralized Control Design for Damping Controllers in FACTS Applications," *Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications*, Albany, NY, Sept., pp.233-238.
- Taranto, G. N. and D. M. Falcão (1996), "A Genetic-Based Control Design for Damping Power System Inter-Area Oscillations", *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, December, pp. 4389-4394.
- Watanabe, E.H. and P.G. Barbosa (1995), "Principle of operation of FACTS devices", Workshop on FACTS - *CIGRE/IEEE*, Rio de Janeiro, Nov., Cigré Brazil CE 38/14.
- Watanabe, E. H., R. M. Stephan and M. Aredes (1993), "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power for Three Phase System and Generic Loads", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, April, pp.697-703.
- Yu, Q., S.D. Round, L.E. Norum and T.M. Undeland (1995), "A New Control Strategy for a Unified Power Flow Controller", *EPE'95, Proc.*, Sevilla, Spain, Setembro, pp.2901-2906.