RICARDO LEON VASQUEZ ARNEZ

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE APLICAÇÕES DO UPFC EM REDES ELÉTRICAS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cera Zanetta Jr.

São Paulo Fev. 2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Vasquez Arnez, Ricardo Leon

Contribuição ao Estudo de Aplicações do *UPFC* em Redes Elétricas, São Paulo. São Paulo, 2004. 143 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Compensação série e *shunt* 2.Controlador unificado do fluxo de potência I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

To the world you might merely be one person, but to one person you can be the world (Unknown).

Agradecimentos

Ao Professor Luiz Cera Zanetta Jr., pela orientação, o apoio e as sugestões durante o desenvolvimento do trabalho, mas principalmente pela oportunidade que me foi concedida para com esta pesquisa.

Ao amigo Doutor Eng^o. Fernando Augusto Moreira assim como ao M.Sc. Eng^o. Marcelo Moraes, para eles vai a minha gratidão, pela oportuna cooperação.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro que tornou possível a realização do presente trabalho.

Aos todos os meus colegas do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, pela amizade e o ameno convívio.

Resumo

Neste trabalho são exploradas as potencialidades e efeitos de possíveis aplicações do UPFC (Unified Power Flow Controller) em redes elétricas. Este recente equipamento da família FACTS, apesar de mais complexo, apresenta rapidez e versatilidade de respostas que podem justificar sua aplicação em redes elétricas. São apresentados modelos matemáticos deste dispositivo, para regime permanente e transitório, utilizando transformações para coordenadas ortogonais. Com base nas respostas obtidas, durante as simulações das aplicações estudadas, pode-se constatar que a tensão série e seu posicionamento angular, introduzidos pelo UPFC, desempenham um importante papel no controle rápido e eficiente do fluxo de potência. Como contribuição deste trabalho, explorou-se a conexão do conversor shunt ao enrolamento terciário de autotransformadores, demonstrando a viabilidade do controle do fluxo de potência nestes equipamentos de transformação. O esquema proposto, instalado em transformadores em paralelo, eleva a disponibilidade de operação do UPFC, aumentando a flexibilidade operativa do sistema em implementações práticas. Através da formulação apresentada, o transformador de acoplamento shunt, convencionalmente utilizado pelo UPFC, apresenta dimensões reduzidas. Foi também examinada a possibilidade de limitação de correntes de curto-circuito, equilibrados ou não, com a ação dos controles do UPFC, particularmente, aprofundando a análise do seu desempenho mais eficiente diante de curtos monofásicos. Os resultados satisfatórios obtidos permitem considerar a viabilidade de limitação destas correntes como um subproduto interessante da atuação deste dispositivo FACTS.

Abstract

In this thesis, the UPFC (Unified Power Flow Controller) various capabilities and effects for possible network applications, are studied. Although its structure is relatively more complex, when compared to the other FACTS controllers, its fast response and versatility can justify its application within the network. By utilising the orthogonal co-ordinates transform both the steady-state and transient mathematical models of the UPFC, are presented herein. Based on the results obtained and regarding the applications studied, it can be stated that the UPFC series voltage along with its phase angle play an important role for the fast and efficient control of the power flow. As a contribution of the present work, it has been proposed the connection of the shunt converter to the tertiary winding of autotransformers, demonstrating in this way the feasibility for controlling the power flow over such transforming assets. The proposed scheme, which regards two paralleled transformers, offers the UPFC a high operation availability increasing the system operative flexibility in actual implementations. By means of the proposed approach, the shunt coupling transformer, usually utilised in a classical UPFC configuration, presents a reduced size. Also, by utilising the UPFC control actions, it has been examined the possibility of short-circuit limitation over balanced and unbalanced circuits. Particularly, it has been analysed the UPFC most efficient performance towards line-to-ground faults. The satisfactory results obtained lead to consider the UPFC feasibility in limiting such currents; this, as an interesting by-product of this FACTS device action.

Lista de Símbolos

| δ | ângulo de fase da tensão |
|-----------------|--|
| θ_{pq} | ângulo de fase da tensão série |
| V _{pq} | tensão série injetada na linha |
| I _{sh} | corrente absorvida (gerada) pelo conversor shunt |
| k | fator de modificação da magnitude de V _{pq} |
| m | índice de modulação |
| Μ | índice de modulação (regime permanente) |
| n | relação de tensões no transformador |
| l _d | corrente no eixo direto |
| l _q | corrente no eixo em quadratura |
| d _s | eixo direto na coordenada ortogonal estacionaria |
| q _s | eixo em quadratura na coordenada ortogonal estacionaria |
| d | eixo direto na coordenada ortogonal rotativa |
| q | eixo em quadratura na coordenada ortogonal rotativa |
| γ | período de grampeamento da tensão no inversor de três níveis |
| σ | largura de pulso da tensão CA invertida |
| Φ | ângulo da tensão terminal onde é conectado o inversor VSI-1 |
| v | tensão CA variando no tempo |
| р | potência ativa instantânea |
| q | potência reativa instantânea |
| max | máximo |
| min | mínimo |
| CC | corrente contínua (dc) |
| CA | corrente alterna (ac) |
| dc-link | circuito em CC comum a ambos conversores |

Lista de Abreviaturas

| AEP | - American Electric Power | | | | |
|---------|---|--|--|--|--|
| ATP | - Alternative Transients Program | | | | |
| CTEEP | - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista | | | | |
| EPRI | - Electric Power Research Institute | | | | |
| EMTP | - ElectroMagnetic Transients Program | | | | |
| FACTS | - Flexible AC Transmission Systems | | | | |
| GCT | - Gate Controlled Thyristor | | | | |
| GTO | - Gate Turn-Off Thyristor | | | | |
| IGBT | - Insulated Gate Bipolar Transistor | | | | |
| IPC | - Interphase Power Controller | | | | |
| IPFC | - Interline Power Flow Controller | | | | |
| MCT | - MOS Controlled Thyristor | | | | |
| PLL | - Phase-Locked Loop | | | | |
| PWM | - Pulse Width Modulation | | | | |
| QHN | - Quasi Harmonic Neutralized | | | | |
| SSSC | - Static Synchronous Series Compensator | | | | |
| ST | - Sen Transformer | | | | |
| STATCOM | - Static Compensator | | | | |
| SVC | - Static Var Compensator | | | | |
| SVS | - Synchronous Voltage Source | | | | |
| SVS | - Static Var System | | | | |
| TACS | - Transient Analysis of Control Systems | | | | |
| TCBR | - Thyristor Controlled Braking Resistor | | | | |
| TCPST | - Thyristor Controlled Phase Shifter Transformer | | | | |
| TCSC | - Thyristor Controlled Series Capacitor | | | | |
| TCR | - Thyristor Controlled Reactor | | | | |
| TSC | - Thyristor Switched Capacitor | | | | |
| TSSC | - Thyristor-Switched Series Capacitor | | | | |
| TVA | - Tennesee Valley Authority | | | | |
| THD | - Total Harmonic Distortion | | | | |
| UHE | - Usina Hidro Elétrica | | | | |
| UPFC | - Unified Power Flow Controller | | | | |
| VSC | - Voltage Source Converter | | | | |
| VSI | - Voltage Source Inverter | | | | |

| Agrade | ecimentos | IV |
|-----------|--|-----------|
| Resum | no | V |
| Abstra | ict | VI |
| Lista d | le Símbolos | VII |
| Lista d | le Abreviaturas | VIII |
| Sumár | rio | IX |
| CAPÍT | TULO 1 | 1 |
| INTRO | DDUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Introdução | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 2 |
| 1.3 | Redistribuição de Fluxos e Flexibilidade | 3 |
| 1.4 | Principais Funções que um UPFC pode Realizar | 3 |
| 1.5 | Vantagens do UPFC sobre outros Dispositivos de Compensação Série | 4 |
| 1.6 | Estado-da-Arte do UPFC | 5 |
| 1.7 | Esboço Geral da Tese | 10 |
| CAPÍT | TULO 2 | 11 |
| MODE | ELO DO UPFC E CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA NA LINHA | 11 |
| 2.1 | Introdução | 11 |
| 2.2 | Capacidade de Controle na Transmissão pelo UPFC | 11 |
| 2.3 | Incremento na Capacidade de Transmissão e Controle de uma Linha | 12 |
| 2.4 | Modelo do UPFC em Regime Permanente | 14 |
| 2.5 | Modelo Dinâmico do UPFC | 16 |
| 2.6 | Modelo de um Sistema de Duas Barras com um UPFC | 18 |
| 2.7 | Diagramas Vetoriais do Sistema na Presença da Tensão Série | 22 |
| 2.8 | Variação da Tensão Terminal em Função da Tensão Série | 22 |
| CAPÍT | rulo 3 | 24 |
| ANAL | ISE E CONFIGURAÇAO DO INVERSOR VSI | 24 |
| 3.1 | Introdução | 24 |
| 3.2 | Sistema de Controle e Realimentação | |
| 3. | 2.1 Técnica de Controle Utilizada | |
| 3.3 | Controle da Tensão Série Injetada | |
| 3.4 | Controle da Corrente Shunt (STATCOM) | |
| 3.5 | Configuração do Inversor Utilizado | |
| 3. | 5.1 Conversor Tipo Fonte de Tensão de Três Niveis | |
| 3. | 5.2 Funcionamento do Conversor de Três Niveis | |
| 3.6 | Analise do Circuito Magnetico do UPFC | |
| 3. | 6.1 I ransformador em Estrela-Delta ou Estrela-Estrela | |
| 3. | 6.2 Transformador Contendo a Ligação em Zigue-Zague | |
| ა./ ვე | Arranjo da Tensão de 48 Pulsos | |
| 5.0 | | |
| | | |
| | 13E E SIIVIULAÇAU DUS CIRCUITUS SERIE E STUNT | |
| 4.1 | Introdução | 38 مە |
| 4.∠ ∧ | Analise du Cumperisadur selle | 38 مەر |
| 4. 1 | 2. Variação da Tansão Terminal devido à Tansão Va | 40 パつ |
| 4. 4 ૨ | Análise do Compensador Shunt | 42 ۸۸ |
| ч.5 | | |

Sumário

| 4.3.1 | Análise e Modelamento do Circuito Shunt | 46 |
|-------------|---|------------|
| 4.3.2 | Controle da Tensão de Linha | 48 |
| 4.4 Bala | inço de Potência do UPFC em Regime Permanente | 51 |
| 4.5 Cap | acitor do Circuito do Elo em Tensão Contínua | 53 |
| 4.5.1 | Capacitor no SSSC e STATCOM | 54 |
| 4.5.2 | Capacitor CC no UPFC | 54 |
| CAPÍTULO | 5 | 57 |
| RESPOSTA | DO UPFC NO CONTROLE DA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL E SUA INTERA F | ۹ÇÃO 57 |
| 5.1 Intro | zucao | 57 |
| 5.2 Vers | satilidade do UPEC em Modificar a Potência Transmissível | 58 |
| 5.3 Con | nportamento da Tensão no Circuito CC | 60 |
| 5.4 Con | trole da Potência em Sistemas Interligados. | |
| 5.4.1 | Análise e Comentários | |
| 5.5 Viab | ilidade de Conexão do UPFC a Terciário de Transformadores | |
| 5.6 Flux | o de Potência e Estudo de Caso | 74 |
| 5.6.1 | Utilização do UPFC para o Controle do Fluxo de Potência | 75 |
| 5.6.2 | Modelo de Injeção de Potência do UPFC | 75 |
| 5.6.3 | Fluxo de Potência | 79 |
| 5.6.4 | Análise de Resultados | 80 |
| 5.6.5 | Implementação de Dois UPFCs no Sistema Analisado | 85 |
| 5.6.6 | Perdas no Sistema Compensado | 89 |
| 5.7 Limi | tação das Correntes de Curto-Circuito através do UPFC | 89 |
| 5.7.1 | Princípio de Limitação da Corrente de Falta | 91 |
| 5.7.2 | Resultados | 93 |
| CAPÍTULO | 6 | |
| CONCLUSÕ | ES | 98 |
| 6.1 Con | clusões | 98 |
| 6.2 Inve | stigações | 99 |
| REFERÊNCI | AS | 100 |
| Apêndice A: | Aplicações em Regime Permanente e Dinâmico dos Dispositivos FACTS | 104 |
| Apêndice B: | Potência Instantânea Ativa e Reativa, Transformada d-q | 106 |
| Apêndice C: | Expressões da Tensão, Conversor de Dois e Três Níveis | 109 |
| Apêndice D: | Análise de Perdas no Sistema Compensado | 114 |

Capítulo 1 Introdução

1.1 Introdução

A expansão da capacidade de um sistema de transmissão pode ser realizada com a construção de novas linhas ou com o redimensionamento das linhas existentes. A segunda opção, muitas vezes, é a forma mais econômica de se aumentar a capacidade do sistema de transmissão em um ambiente sujeito a restrições financeiras. Uma das alternativas recentes mais importantes a ser utilizada neste quadro de contínuo crescimento da carga e do transporte de energia é o uso dos dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), especificamente o UPFC (*Unified Power Flow Controller*), principalmente devido às suas vantagens no controle da potência transmissível, além da sua rápida resposta aos fenômenos transitórios.

Os dispositivos *FACTS* constituem uma família de equipamentos construídos com recursos tecnológicos extraídos da eletrônica de potência e microprocessadores, que podem rapidamente regular o fluxo de potência com grande flexibilidade e elevar as propriedades dinâmicas do sistema de potência.

Os equipamentos de compensação de potência reativa como reatores em derivação, capacitores série e dispositivos *FACTS* permitem alterar as características elétricas da rede de transmissão, tornando possível um uso mais eficiente dos recursos disponíveis. Atualmente, a utilização dos dispositivos *FACTS* desponta como uma das alternativas mais promissoras a prestar colaboração em um ambiente de demanda contínua e crescente de energia, pois, construções de novas linhas de transmissão, em boa parte dos casos, configuram-se como soluções caras e que demandam um período considerável de tempo.

Basicamente o *UPFC*, que é o objeto central deste trabalho, é constituído por dois inversores tipo fonte de tensão (*VSI*), um deles correspondendo a um *SSSC* (*Static Synchronous Series Compensator*), e o outro a um *STATCOM* (*Static Synchronous Compensator*), conectados através de um capacitor, que opera como um elo em tensão contínua (Fig. 1.2).

Quando quaisquer dos componentes acima mencionados opera independentemente, existe uma troca quase que exclusiva de potência reativa com a rede [14]; ou seja, o SSSC injeta uma tensão série em quadratura com a corrente de linha, comportando-se desta maneira como uma reatância capacitiva ou indutiva em série com a linha de transmissão; de modo similar o STATCOM injeta uma corrente *shunt* reativa senoidal na linha, vista pelo sistema como oriunda de uma reatância indutiva ou capacitiva, dependendo do modo de operação a ser especificado.

Quando os componentes mencionados operam solidariamente, são estabelecidas e ampliadas as funções de compensação simultâneas e seletivas que este dispositivo pode executar, as quais estão

principalmente relacionadas ao controle de três fatores básicos associados ao fluxo de potência, a saber: tensão de linha, impedância de linha e ângulo de fase. Esta capacidade múltipla, até uma década atrás, era considerada impossível de ser atingida. Sua instalação, além de permitir uma melhor utilização das linhas de transmissão existentes, evita ou posterga a construção de novas linhas num determinado sistema elétrico e desse modo, ao longo de um período anual, uma economia significativa pode ser auferida.

Como exemplo, informações do EPRI (*Electric Power Research Institute*) em relação ao primeiro *UPFC* instalado do mundo, de propriedade da AEP (*American Electric Power, Kentucky*) apresentam ganhos da ordem de US\$ 8 milhões, devido à postergação da construção de uma nova linha; e outros US\$ 10 milhões associadas à redução de perdas no seu sistema [67]. Estas quantias correspondem a um período de dois anos (98-99). Em vista disso, o *UPFC* é tido pela *AEP* como um novo dispositivo revolucionário, que possibilita uma significativa melhoria na capacidade de transmissão de energia, tornando possível o pleno controle sobre o fluxo de energia.

O elevado desempenho técnico-econômico ao qual se fez referência anteriormente justifica a necessidade de uma pesquisa acerca do controlador unificado de potência (*UPFC*) e sua possível instalação na rede elétrica brasileira.

Embora algumas experiências úteis e resultados analíticos desde a etapa de concepção até a operação do dispositivo prático tinham sido publicadas [4], [9], [15], uma análise detalhada do mesmo, assim como modelos de simulação mais completos e protótipos ainda são necessários com a finalidade de se obter uma melhor compreensão sobre as características operacionais do *UPFC*. Este conceito relativamente novo assim como a estrutura mais complexa do equipamento, quando comparada com os outros dispositivos *FACTS*, requer portanto análises mais consistentes sobre os seus reais ganhos operativos.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos da presente tese podem ser resumidos da seguinte forma:

Analisar o comportamento do *UPFC* em regime permanente no controle do fluxo de potência, aumentando, diminuindo e redirecionando o fluxo de potência em circuitos específicos. Esta análise do controle eficiente do fluxo de potência estará inicialmente relacionada a um sistema radial e posteriormente será avaliada a sua respectiva interação com redes elétricas mais complexas. Para tanto, é necessário inicialmente uma análise do funcionamento do *UPFC* e a identificação dos seus principais componentes.

Analisar a efetividade dos compensadores série e *shunt* no *UPFC*, para controlar e modificar o fluxo de potência transmissível em uma linha compensada e a tensão terminal, quando a potência reativa *shunt* é absorvida ou gerada localmente.

Implementar um modelo matemático em regime permanente do *UPFC* num programa de fluxo de carga, visando a determinação de suas funções de compensação e efeitos em uma rede de transmissão.

O comportamento do referido modelo matemático será analisado com a sua aplicação e respectivos testes, em uma região do sistema interligado nacional (SIN). Deve-se lembrar que, atualmente, muitos transformadores e linhas dentro da rede elétrica brasileira operam perto do seu limite de capacidade de transmissão. Existem também períodos quando alguns transformadores no SIN operam em sobrecarga, existindo a necessidade de redirecionar o fluxo de potência para outras linhas. Desse modo, almeja-se dar contribuição à permanente evolução dos sistemas elétricos, em particular ao contínuo crescimento da rede elétrica brasileira.

1.3 Redistribuição de Fluxos e Flexibilidade

Basicamente, o conceito *FACTS* agrupa um conjunto de novos equipamentos de eletrônica de potência que permitem maior flexibilidade de controle dos sistemas elétricos. Em um sistema CA como o mostrado na Fig. 1.1, a divisão de carga durante a transmissão de potência depende diretamente das impedâncias do sistema de transmissão, apresentando uma inflexibilidade na divisão de fluxos. O conceito de flexibilidade neste caso refere-se ao controle que oferecem os dispositivos *FACTS* sobre os sistemas elétricos [5]. Este controle tem a característica de alterar de uma forma rápida e contínua os parâmetros vinculados à dinâmica de funcionamento de um sistema de potência.



Fig. 1.1 Sistemas de potência (a) Inflexível (b) Flexível

1.4 Principais Funções que um UPFC pode Realizar

De fato, o *UPFC* pode ser visto como um dispositivo com fase controlável (*phase-shift*) entre suas tensões terminais, onde estão compreendidos os elementos conectados em série e em derivação. A potência ativa é controlada diretamente pela ação do circuito conectado em série. A potência reativa é fornecida ou absorvida localmente por cada conversor e portanto não flui pelo elo CC.

Da descrição básica operacional apresentada anteriormente, pode ser estabelecido que o *UPFC* (Fig. 1.2) tem a capacidade de controlar de modo muito rápido as três principais variáveis de um sistema de potência: tensão de linha, impedância de linha e ângulo de fase.



Fig. 1.2 Arranjo básico do UPFC

As várias funções e atributos de controle relacionados ao mesmo, são [4], [6], [20]:

- Controle rápido do fluxo de potência ativo e reativo, tanto em regime permanente quanto transitório.
- Suporte de tensão da linha, gerando ou absorvendo localmente potência reativa.
- Aproximação das linhas de transmissão ao seu limite térmico.
- Controle e distribuição de carga entre corredores paralelos.
- Regulação do ângulo de fase.
- Controle de potência reativa.
- Melhoria da estabilidade transitória e dinâmica [7], [8], [23].
- Amortecimento de oscilações no sistema [62].
- Redução dos efeitos de ressonância sub-síncrona (*RSS*) ou oscilações de baixa freqüência.
- Limitação de correntes de falta [23], [69], [70].
- Minimização das perdas de energia sem necessidade de reprogramar a geração [51].

A estas vantagens técnicas, oferecidas pelo *UPFC*, somam-se os benefícios econômicos (item 1.1), pois o fato de incrementar a potência transmissível numa determinada linha posterga a construção de uma outra linha.

1.5 Vantagens do UPFC sobre outros Dispositivos de Compensação Série

As características funcionais inerentes ao controlador unificado de potência (*UPFC*) oferecem certas vantagens não disponíveis em outros dispositivos de compensação série, como são os capacitores série convencionais e os *TCSC's* (*Thyristor Controlled Series Capacitor*). Estas funções próprias do *UPFC*, apesar da presença dos transformadores de acoplamento série e *shunt*, referem-se às seguintes características:

 Não são requeridos capacitores CA de grande porte ou indutores. Consequentemente, os requisitos de espaço são muito menores.

- É capaz de gerar internamente uma tensão de compensação controlável sobre uma faixa capacitiva e indutiva idêntica, independentemente da magnitude da corrente de linha.
- Os conversores possuem uma impedância do tipo fonte de tensão (*VSI*) quase desprezível em relação às características da freqüência do sistema, o que exclui a possibilidade de ressonâncias com a impedância reativa da linha.
- É possível obter um amortecimento altamente efetivo das oscilações de potência modulando a compensação reativa em série, incrementando ou reduzindo a potência transmitida [22].
- Opera com uma tensão relativamente baixa (menor que 20 kV), necessitando um nível de isolamento relativamente reduzido tanto para o equipamento como para o sistema de refrigeração.

Estas outras funções, algumas ainda em pesquisa, fazem do *UPFC* um dispositivo promissor para os sistemas de transmissão.

1.6 Estado-da-Arte do UPFC

A tecnologia dos *FACTS* foi inicialmente proposta no princípio da década de 90, estando o *UPFC* incluído nesta nova família tecnológica, apresentando a possibilidade de regular as potências ativa e reativa numa linha de transmissão, sem comprometer a estabilidade e a confiabilidade do sistema. Até agora, o desenvolvimento da tecnologia dos *FACTS* seguiu quatro fases principais, chamadas de gerações [21], mostradas na Tabela 1.1.

| Fase | Dispositivos FACTS | | | |
|----------------|---|--|--|--|
| 1.ª geração | TCR : Thyristor Controlled Reactor (<i>shunt</i>) TSC : Thyristor Switched Capacitor (<i>shunt</i>) Capacitores série (controle de Z _{linha}) | | | |
| 2.ª geração | SVC : Static Var Compensator TCSC : Thyristor Controlled Series Capacitor TCVR : Thyristor Controlled Voltage Regulator TCPAR : Thyristor Controlled Phase Angle Regulator | | | |
| 3.ª geração | STATCOM : Static Compensator SSSC : Static Synchronous Series Compensator | | | |
| 4.ª geração | UPFC : Unified Power Flow Controller IPFC : Interline Power Flow Controller | | | |

Tabela 1.1 Dispositivos FACTS e suas correspondentes gerações

O *UPFC*, inicialmente proposto por L. Gyugyi [6], [21], [23], é um compensador capaz de controlar simultaneamente o fluxo de potência em uma linha de transmissão e a tensão CA de uma barra controlada. Apresenta uma resposta muito rápida e não existe nenhum substituto convencional, ou da eletrônica de potência, que possa realizar todas suas funções de compensação com desempenho equivalente.

Vários trabalhos já foram apresentados abordando o modelamento do *UPFC* [11], [15], [16], [26], [30]. Em relação ao controle do fluxo de potência foi sugerida [53] a aplicação de um compensador estático síncrono de reativos (similar a um *SSSC*), que seria conectado em série com a linha de transmissão sem nenhum transformador de acoplamento. Deve-se considerar que cada inversor do *UPFC* é conectado ao sistema CA por meio de transformadores de acoplamento. A proposição apresentada em [53] consiste basicamente de uma cadeia de inversores do tipo fonte de tensão (*VSI*) conectados diretamente à linha de transmissão. Porém, esta proposta implica em uma elevada probabilidade de mal funcionamento dos dispositivos semicondutores, pois, quanto maior o número de inversores série ou paralelo, também são maiores as possibilidades de falhas na operação das pontes conversoras e ocorrência de faltas nos *GTO's* (*Gate Turn-Off Thyristor*). O fato descrito anteriormente deve ser considerado quando se elabora um projeto de compensação série confiável. Além disso, um indutor ou transformador de acoplamento é necessário como interface entre o *VSI* e o sistema CA, para evitar que o capacitor CC não seja curto circuitado durante o chaveamento e descarregue diretamente sobre a linha de transmissão [4].

Nas referências [61] e [64], apresentam-se modelos de compensadores série e *shunt* para serem aplicados em filtros ativos. Porém, o modelamento dos referidos compensadores, baseados na teoria de potência instantânea [44], é destinado principalmente ao controle de desequilíbrios, fator de potência e harmônicas em sistemas de potência.

Nos EUA, o primeiro *STATCOM* de alta tensão, um dos dispositivos principais dentro do *UPFC*, foi instalado no final do ano 1995 na subestação de Sullivan pertencente à *TVA* (*Tennesee Valley Authority*) para a compensação de uma linha de transmissão. Segundo mencionado em [50], o projeto resultou de um patrocínio conjunto entre a *TVA* e o EPRI (*Electric Power Research Institute*) e projetado pela Westinghouse Electric Co. A capacidade nominal do *STATCOM* na TVA é de \pm 100 MVAr e instalado a uma tensão de 161,0 kV. A tensão nominal de saída do conversor é de 5,1 kV, com 8 conversores de seis pulsos e um número total de 240 GTO's.

O primeiro projeto de *UPFC* no mundo foi instalado em 1998 na estação de Inez (Kentucky) [13]. A primeira das duas fases de sua execução consistiu na instalação dos conversores *shunt* de ± 160 MVA (*STATCOM* cuja potência nominal total é de 320 MVA). Mais tarde, no mesmo ano, o conversor série (*SSSC*) foi instalado com idênticas características ao conversor *shunt*, aumentando a flexibilidade operacional do *UPFC*. O sistema completo está instalado em uma área relativamente compacta de apenas 60m x 30m. Cada conversor inclui 48 válvulas (mesmo número de pulsos) com uma tensão CC nominal de 24kV (±12 kV com respeito a seu ponto médio). Basicamente, o arranjo do *UPFC* referido acima apresenta as características mostradas na Fig. 1.3.



Fig. 1.3 Diagrama unifilar simplificado do projeto Inez

Relatos da literatura esperam a rápida expansão do *UPFC* em aplicações de alta tensão, associada aos avanços da tecnologia dos semicondutores de potência, atualmente baseada na tecnologia dos *GTO's*, cujas capacidades encontram-se na faixa de 9kV e 6 kA [4]. Outros dispositivos mais avançados, tais como os IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), MCT (*MOS Controlled Thyristor*) e o GCT (*Gate Controlled Thyristor*), estão ainda sendo desenvolvidos para competir com os *GTO's* nestas aplicações.

A *AEP*, baseada nos grandes benefícios e no desempenho técnico mostrado até agora pelo *UPFC* na estação de Inez, espera desenvolver em breve outros *UPFC*'s adicionais no seu sistema de transmissão em mais sete Estados [67].

Um outro dispositivo que evoluiu a partir do *UPFC* é o *IPFC* (Interline Power Flow Controller), que também promete ser muito efetivo no controle do fluxo de potência principalmente no caso de sistemas multi-linha saindo de uma determinada subestação (Fig. 1.4a).



Fig. 1.4 Esquema geral de um: (a) IPFC, (b) GIPFC

Já o *GIPFC*, também evoluído a partir do *UPFC*, compõe-se estruturalmente de um determinado número de compensadores série (*SSSC*), cujos terminais CC são conectados com o elo CC de um único inversor *shunt* (*STATCOM*), [40]. Dessa forma, evita-se a presença de *n*-1 inversores *shunt* (onde: n= número de inversores série e n>1).

O transformador de *Sen* [68], um outro equipamento recentemente proposto para o controle de carga e que também poderia desempenhar as principais funções do *UPFC*, ainda não está bem consolidado. Embora esse equipamento se apresente como uma opção economicamente competitiva, sua resposta lenta e o rápido envelhecimento dos seus tapes, devido ao uso intenso, limitam a sua aplicação em determinados sistemas elétricos. No entanto, o *EPRI* conjuntamente com outros parceiros pretende testar a funcionalidade dessa proposta de transformador versátil.

No momento, a configuração de inversor multi-pulso parece ser a configuração mais prática a ser implementada em sistemas de potência reais [6], [13], [26], [39]. A técnica de PWM (*Pulse Width Modulation*) ainda apresenta elevadas perdas no chaveamento, associadas à tensão transitória durante a abertura das chaves. A necessidade de filtragem das harmônicas de alta freqüência, a presença de ruído elétrico de alto nível e a elevada freqüência ainda são um desafio para os próximos anos, antes desta técnica tornar-se numa realidade [4]. Apesar disso, boa parte da literatura proposta usa inversores baseados na técnica *PWM* como fonte de tensão, tanto para o transformador série como para o transformador *shunt* [28], [31], [41] e [58].

A tabela 1.2, mostra uma lista dos principais projetos de sistemas *FACTS* na atualidade, contendo dados sobre o início da instalação, o objetivo do projeto e a faixa de potências envolvidas [24].

| | | Data de | Objetivo do | |
|-------------------------|--|--|--|---|
| Dispositivo | Participantes | Instalação | Projeto | Caraterísticas |
| SVC | Varias instalações no Mundo | 1970 | Controle de tensão, amortecimento de oscilações de potência. | Faixa Dinâmica tipicamente entre 60-600 MVAr. |
| NGH SSR Damping | Southern California Edison/EPRI/ Siemens | 1980 | Amortecimento de SSR. | - |
| TSSC Monofásico | American Electric Power/ABB | 1991, subestação de Kanawha River, West Virginia | Teste de válvulas. | - |
| TCSC Módulo simples | Western Area Power Administration (WAPA)/Siemens | 1992, subestação de Kayenta, Arizona | Controle do fluxo de potência e demonstração de tecnologia. | 16 Ohms, 1000 A, 16,2 kV; 3,3 kA de nível na falta. |
| TCSC 6-módulos | Boneville Power Adm/ Portland GE, EPRI, General Electric Co. | 1993, subestação de Slatt, Oregon | Controle do fluxo de potência, amortecimento de oscilações, SSR, demonstração de tecnologia. | 8 Ohms; 2,9kA, 26,7 kV; 46,4 kV; 20,8 kA de nível de falta. |
| TCSC | Sistema brasileiro Eletronorte/FURNAS/ Siemens | 1994, interconexão Norte-Sul, Serra da Mesa-Imperatriz | Controle do fluxo de potência, amortecimento de oscilações (≈ 0.2 Hz). | Permitir um fluxo reversível aprox. de 600 MW entre o Norte e o Sul. |
| TCPST | Western Area Power Administration/EPR/ General Electric Co. | 1993 | Desenvolver o conceito de <i>retrofit</i> (otimização), para se aplicar ao amor- tecimento de oscilações. | - |
| TCPST Núcleo simples | Minnesota Power and Light/EPRI/Univ. of Minn. /GE Co. | 1994 | Desenvolvimento de conceitos de projeto de hardware. | - |
| TCBR | Minnesota Power and Light/EPRI | 1994 | Estudos de estabilidade. | - |
| STATCOM | Orange and Rockland Utilities/Westinghouse/ ESEERCO | 1985 | Demonstração de tecnologia. | 1 MVAr |
| STATCOM | TVA/EPRI/ Westinghouse | 1995, subestação de Sullivan, Tennessee | Controle de tensão, demonstração de tecnologia. | ±100 MVAr 161 kV. |
| STATCOM | Toshiba Elec. Co. | 1992, subestação de Shin-Shinano, Japão | Suporte de tensão, Estabilização do sistema de potência. | 50 MVA; DC-16,8 kV. GTO: 6kV; 2,5 kA |
| STATCOM | VELCO/Mitsubishi Elec. Co. | 2001, subestação de Essex, Vermont, USA | Suporte de tensão, Estabilização do sistema de potência, melhorar a qualidade de energia. | +133/-41 MVA, 115 kV. |
| IPC | Hydro-Quebec /CITEQ/ABB | 1996 | Controle do fluxo de Potência, limitar curto circuitos. | 200 MW, 161 kV. |
| UPFC | Western Area Power Administration/EPRI/ Westinghouse | 1996 | Estabilização e controle do fluxo de potência, projeto de hardware. | - |
| UPFC | Electricité de France / General Electric Co./ GEC-Alsthom | 1997, na França | Controle do fluxo de potência, estudos de projeto de hardware. | ± 7 MVAr, 225 kV. |
| UPFC | American Electric Power/ EPRI/Westinghouse | 1998, subestação de Inez, Kentucky | Mitigar sobrecargas térmicas e problemas de tensão durante condições de contingência. | ± 160 MVA, 138 kV. |
| ST | EPRI/outros parceiros | 2003 | Demonstração de tecnologia. | - |

Tabela 1.2 Principais Projetos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) no Mundo

IPC NGH SSR ST TCPST TCBR NGH (N.G. Hingorani) : Interphase Power Controller

NGH Sub-synchronous Resonance Dampers
 Sen Transformer (K.K. Sen)
 Thyristor Controlled Phase Shifter Transformer
 Thyristor Controlled Braking Resistor

1.7 Esboço Geral da Tese

O presente trabalho está estruturado em mais 5 capítulos além desta introdução:

O Capítulo 2 apresenta uma descrição da capacidade de controle do fluxo de potência transmissível desenvolvido pelo *UPFC*. Os modelos matemáticos em regime permanente e dinâmico são também apresentados, os quais serão úteis nos procedimentos de simulação.

O Capítulo 3 faz um estudo do sistema de controle e das técnicas utilizadas no modelo do *UPFC*, importantes para a resposta rápida deste dispositivo. São também apresentados os aspectos relacionados ao inversor utilizado e à configuração do circuito magnético presente entre cada inversor e o sistema.

No Capítulo 4 apresenta-se a análise e o modelamento do compensador *shunt* quando este absorve ou injeta corrente reativa no sistema, suportando desta forma a tensão terminal. Do mesmo modo, apresentam-se a análise e o modelamento do compensador série, já que esse dispositivo e seu efeito direto sobre a potência transmissível constituem o aspecto principal do controlador unificado de potência. O capacitor de ligação CC apresenta uma importante função dentro do *UPFC*, especialmente durante o seu comportamento dinâmico, sendo também objeto de análise.

O Capítulo 5 apresenta aspectos computacionais e de simulação envolvidos na operação e desempenho do *UPFC*, controlando o fluxo de potência transmissível e interagindo com a rede elétrica em condições de regime permanente. A implementação e aplicação dos modelos em estudos de fluxo de potência é particularmente abordada neste capítulo. A proposta de um *UPFC* conectado ao terciário de transformadores assim como a limitação de eventuais correntes de curto-circuito, presentes na linha compensada pelo *UPFC*, são também apresentadas neste capítulo.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho além das sugestões para novos desenvolvimentos no campo de estudos do *UPFC*.

Capítulo 2

Modelo do UPFC e Controle do Fluxo de Potência na Linha

2.1 Introdução

Os dispositivos *GTO* de elevada capacidade podem tornar possível a substituição dos compensadores síncronos convencionais por fontes de tensão síncronas de estado sólido como são os SVS's (*Synchronous Voltage Sources*), os quais, devido a sua natureza, apresentam respostas rápidas e com bom desempenho. O *SVS* é semelhante a uma máquina síncrona ideal apresentando tensões senoidais trifásicas e equilibradas com magnitude e ângulo de fase controlável, geradas à freqüência fundamental desejada. Quando conectado em *shunt* ou em série com uma linha de transmissão, o *SVS* pode internamente gerar potência reativa, indutiva ou capacitiva. Quando dois *SVS's* são conectados um em *shunt* e o outro em série com a linha, e estes por sua vez forem interligados através de um capacitor, resulta um novo dispositivo (*UPFC*) que, além de gerar potência reativa, pode absorver num lado e fornecer do outro lado instantaneamente potência ativa.

Tentativas anteriores de controlar rapidamente o fluxo de potência em uma rede de transmissão foram prejudicadas pelos dispositivos mecânicos, que são relativamente lentos, inflexíveis e com vida útil limitada. Os caminhos do fluxo de potência em uma rede de grande porte são ditados pelas relações circuitais impostas pela matriz de admitâncias nodais. O *UPFC*, através de suas fontes de tensão, altera eletronicamente determinadas diferenças de potenciais que determinam os valores e caminhos do fluxo de potência. Desse modo, este equipamento pode desviar o fluxo de potência em direção a circuitos não utilizados em sua plenitude, sendo que esta opção tecnológica torna possível aos operadores de transmissão controlar o fluxo de potência de forma continua e instantânea em determinadas linhas de transmissão.

2.2 Capacidade de Controle na Transmissão pelo UPFC

Como a característica principal do *UPFC* se baseia na injeção de uma tensão (V_{pq}) e seu respectivo ângulo de fase (θ_{pq}) em série com a linha de transmissão, o controle do fluxo de potência pelo *UPFC* será alcançado por meio das seguintes funções de compensação [4], [6]:

 Regulação e Controle da Tensão, que resulta da adição de incrementos de tensão (V_{pq}=ΔV) em fase com a tensão V_A, mudando desta maneira só a magnitude da tensão terminal (V_A). Funcionalmente, esta tarefa é semelhante àquela alcançada com um transformador com derivações (*tap changer*) só que com um número muito maior de derivações (*taps*), Fig. 2.1(a).



Fig. 2.1 Possibilidades de controle da transmissão desenvolvidas pelo UPFC

- Compensação Série Reativa, onde a tensão série V_{pq}=V_q é exclusivamente injetada em quadratura em relação à corrente de linha (I_L). Funcionalmente, esta ação é semelhante à compensação série capacitiva ou indutiva realizada sobre uma linha de transmissão por um SSSC, Fig. 2.1(b).
- Regulação do Ângulo de Fase, onde a tensão série (V_{pq}=V_α) é injetada de tal modo que a tensão terminal (V_A), só é alterada em sua fase (atraso ou adiantamento) sem mudar a magnitude. Esta ação é funcionalmente semelhante àquela executada por um transformador de rotação de fase (*Phase-Angle Shifter*), Fig. 2.1(c).
- A ação resultante combinada da Regulação da Tensão Terminal, Compensação Série Reativa e Regulação do Ângulo de Fase, podem ser atingidos pelo UPFC de modo individual ou simultâneamente, Fig. 2.1(d).

2.3 Incremento na Capacidade de Transmissão e Controle de uma Linha

A capacidade de controle de fluxo de potência que um *UPFC* pode executar é melhor ilustrada através da análise das potências ativa e reativa em função do ângulo δ correspondentes a um sistema de duas máquinas, no qual foi inserida a tensão série V_{pq} (Fig. 2.2). O sistema de potência simples, apresentado nesta figura, é adequado para o estabelecimento das idéias iniciais sobre o comportamento do *UPFC*.



Fig. 2.2 (a) Sistema simplificado de duas máquinas com a tensão série V_{pq} (b) Diagrama fasorial com $X_1 = 0$ (V_X : queda de tensão em X_4)

Quando V_{pq} = 0, caso não compensado, adotando-se a convenção da referência [4]:

$$S_{R(0)} = \dot{V}_{4}\dot{I}_{L}^{*} = \dot{V}_{4}\left(\frac{\dot{V}_{1} - \dot{V}_{4}}{jX}\right) = P_{R(0)} - jQ_{R(0)}$$
(2.1)

Com $V_{pq} \neq 0$, caso compensado:

$$S_{R} = \dot{V}_{4}\dot{J}_{L}^{*} = V_{4}\left(\frac{\dot{V}_{1} + \dot{V}_{pq} - \dot{V}_{4}}{jX}\right)^{*} = P_{R} - jQ_{R}$$
 (2.2a)

onde,

$$\dot{V}_{1} = V_{1}e^{j\frac{\delta}{2}} = V_{1}\left(\cos\frac{\delta}{2} + j\sin\frac{\delta}{2}\right)$$
(2.2b)

$$\dot{V}_{4} = V_{4}e^{-j\frac{\delta}{2}} = V_{4}\left(\cos\frac{\delta}{2} - j\sin\frac{\delta}{2}\right)$$
$$\dot{V}_{pq} = V_{pq}e^{j\left(\theta_{pq} + \frac{\delta}{2}\right)} = V_{pq}\left[\cos\left(\theta_{pq} + \frac{\delta}{2}\right) + j\sin\left(\theta_{pq} + \frac{\delta}{2}\right)\right]$$
(2.2c)

substituindo \dot{V}_1 , \dot{V}_4 e \dot{V}_{pq} em (2.2a), as novas relações para P_R e Q_R tornam-se:

$$P_{R} = \frac{V_{1}V_{4}}{X} \operatorname{sen} \delta + \frac{V_{4}V_{pq}}{X} \operatorname{sen}(\theta_{pq} + \delta) = P_{R(o)} + P_{pq}(\delta, \theta_{pq})$$
(2.3)

$$Q_{R} = \frac{V_{1}V_{4}}{X}\cos\delta - \frac{V_{4}^{2}}{X} + \frac{V_{4}V_{pq}}{X}\cos(\theta_{pq} + \delta) = Q_{R(o)} + Q_{pq}(\delta, \theta_{pq})$$
(2.4)

Das eqs. (2.3), (2.4) e com o ângulo série (θ_{pq}) variando livremente de 0 à 360° em um círculo de raio V_{pq} (0 $\leq V_{pq} \leq V_{pq}^{max}$), pode-se observar a capacidade superior da linha compensada na presença do *UPFC* (Figs. 2.3 e 2.4). Neste caso a potência ativa transmissível (P_R), chega a ser controlada (para qualquer ângulo de potência δ) entre as faixas mostradas nas relações (2.5) e (2.6).

$$\left[\mathsf{P}_{\mathsf{R}(0)}(\delta) - \frac{\mathsf{V}_{4}\mathsf{V}_{\mathsf{pq}}}{\mathsf{X}}(\delta,\theta_{\mathsf{pq}})\right] \le \mathsf{P}_{\mathsf{R}} \le \left[\mathsf{P}_{\mathsf{R}(0)}(\delta) + \frac{\mathsf{V}_{4}\mathsf{V}_{\mathsf{pq}}}{\mathsf{X}}(\delta,\theta_{\mathsf{pq}})\right]$$
(2.5)

$$\left[\mathsf{Q}_{\mathsf{R}(0)}(\delta) - \frac{\mathsf{V}_{4}\mathsf{V}_{\mathsf{pq}}}{\mathsf{X}}(\delta,\theta_{\mathsf{pq}})\right] \le \mathsf{Q}_{\mathsf{R}} \le \left[\mathsf{Q}_{\mathsf{R}(0)}(\delta) + \frac{\mathsf{V}_{4}\mathsf{V}_{\mathsf{pq}}}{\mathsf{X}}(\delta,\theta_{\mathsf{pq}})\right]$$
(2.6)

Note-se a largura da faixa das curvas da potência transmissível P e Q, que demonstram a maior capacidade do controlador unificado de potência (*UPFC*) em melhorar a estabilidade transitória e o amortecimento das oscilações de potência [4].



Fig. 2.3 Faixa da potência ativa transmissível em presença do UPFC



Fig. 2.4 Faixa da potência reativa em V₄ em presença do UPFC

2.4 Modelo do UPFC em Regime Permanente

A finalidade de se apresentar os modelos matemáticos do *UPFC*, tanto em regime permanente quanto em regime transitório é, principalmente, estabelecer a relação existente entre as diferentes grandezas presentes nos conversores e no elo CC com os parâmetros do sistema CA.

O presente modelo em regime permanente considera certas suposições que devem ser satisfeitas pelas suas equações que, fundamentalmente, referem-se a:

- As perdas nos conversores são desprezadas.
- A tensão (V_{dc}) do capacitor no circuito *dc-link* permanece constante.
- O UPFC não pode ser visto pela rede elétrica nem como carga nem como um gerador de energia, devendo ser respeitada pelos inversores a relação P_{shunt} = P_{série}.
- As duas fontes conversoras são mutuamente dependentes, realizando uma troca contínua de potência ativa entre os conversores *shunt* e série.

A Fig. 2.5 mostra o circuito trifásico simplificado correspondente a ambos os conversores. Note-se a ausência da representação das perdas por condução e dos circuitos *snubber* nas válvulas de cada inversor.



Fig. 2.5 Representação do UPFC para regime permanente

Se a restrição da igualdade $P_{sh} = P_{se}$ for violada, o capacitor no elo CC e o próprio *UPFC* não estarão operando mais em regime permanente.

No circuito do conversor shunt (VSI-1), em regime premanente:

$$(v_{sh1_a} - v_{sh_a}) = (r_{sh} + j\omega L_{sh})i_{sh_a}$$
(2.7)

analogamente, considerando o transformador de acoplamento série (VSI-2):

$$\left(\mathbf{v}_{se_a} - \mathbf{v}_{se_a}\right) = \left(\mathbf{r}_{se} + \mathbf{j}\omega\mathbf{L}_{se}\right)\mathbf{i}_{se_a}$$
(2.8)

Para as fases 'b' e 'c', relações semelhantes a (2.7) e (2.8) podem também ser obtidas:

$$\begin{bmatrix} V_{sh1_a} - V_{sh_a} \\ V_{sh1_b} - V_{sh_b} \\ V_{sh1_b} - V_{sh_b} \\ V_{sh1_c} - V_{sh_c} \\ V_{se_a} - V_{se2_a} \\ V_{se_b} - V_{se2_b} \\ V_{se_c} - V_{se2_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_{sh} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z_{sh} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Z_{se} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{se} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{se} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_a} \\ I_{sh_b} \\ I_{sh_b} \\ I_{se_a} \\ I_{se_b} \\ I_{se_c} \end{bmatrix} = 0$$
2.9)

onde,

$$Z_{sh} = R_{sh} + j\omega L_{sh}$$
$$Z_{se} = R_{se} + j\omega L_{se}$$

A relação entre as tensões na saída dos conversores e a tensão V_{dc} pode ser expressa como:

$$V_{sh_a} = M_{sh} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \angle \theta_{sh} \qquad ; \qquad V_{se_a} = M_{se} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \angle \theta_{se}$$

$$V_{sh_b} = M_{sh} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \angle (\theta_{sh} - 120) \qquad ; \qquad V_{se_b} = M_{se} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \angle (\theta_{se} - 120)$$

$$V_{sh_c} = M_{sh} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \angle (\theta_{sh} - 240) \qquad ; \qquad V_{se_c} = M_{se} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \angle (\theta_{se} - 240)$$

Nas expressões anteriores M_{se} e M_{sh} representam os fatores de modulação dos conversores série e *shunt*, respectivamente. Como é conhecido, este índice é freqüentemente usado em casos onde a técnica de PWM (*Pulse Width Modulation*) é aplicada. Para o caso da técnica *phase-shift* com harmônicos quase neutralizados, utilizada no presente estudo, será definida uma nova constante vinculando a tensão no elo CC com a tensão de saída do inversor. Uma análise mais completa do modelo do *UPFC* em regime permanente pode ser encontrada em [15] e [28].

2.5 Modelo Dinâmico do UPFC

O estudo de transitórios em sistemas de potência, assim como a análise da estabilidade, requerem um modelo dinâmico do *UPFC* que permita fazer a interface com o sistema. A seguinte análise corresponde ao modelo matemático dinâmico do *UPFC*, relacionando o efeito do capacitor CC e em conseqüência os efeitos do *UPFC* sobre o comportamento dinâmico do sistema de potência [31]. A premissa adotada neste modelo é manter constante tanto a tensão terminal CA (V_S), à qual o *UPFC* está conectado, como a tensão CC, por meio do elemento de controle do compensador *shunt*.



Fig. 2.6 Circuito para o modelo dinâmico do UPFC

Onde,

n_{1,2}: Relação de tensão dos transformadores X_{t1,2}: Reatância de dispersão do transformador shunt e série

Inicialmente será considerada a dinâmica de carregamento do capacitor CC. Do circuito da Fig. 2.6, pode-se observar que as correntes i_{dc1} , i_{dc2} e a tensão do capacitor têm a seguinte relação:

$$i_{dc} = C \frac{d v_{dc}}{dt}$$

$$i_{dc} = i_{dc1} - i_{dc2}$$
(2.10)

assumindo que os inversores não têm perdas, o intercâmbio de potência ativa com o lado CA será:

$$\mathbf{p}_{1} = \mathbf{V}_{dc1} \mathbf{i}_{dc1} / \mathbf{S}_{Base}$$
(2.11)

$$p_2 = v_{dc2} i_{dc2} / S_{Base}$$

a combinação de (2.10) e (2.11) resulta em,

.

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{P_1}{v_{dc}} - \frac{P_2}{v_{dc}}$$

$$Cv_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = (P_1 - P_2)$$
(2.12)

Com relação à potência de saída dos conversores, estas podem ser calculadas da seguinte forma:

$$P_{1} = \Re e \left(\dot{V}_{1} \dot{I}_{1}^{*} \right)$$

$$P_{2} = \Re e \left(\dot{V}_{pq} \dot{I}_{L}^{*} \right)$$
(2.13)

Referindo-se à tensão V_S da Fig. 2.6, para o circuito do conversor shunt.

$$\left(n_{1}\dot{V}_{S}-\dot{V}_{1}\right)=jX_{t1}\dot{I}_{1}$$

$$\dot{I}_{1} = \left(\frac{n_{1}\dot{V}_{S} - \dot{V}_{1}}{jX_{t1}}\right)$$
(2.14a)

Analogamente para o transformador em série tem-se:

$$\dot{I}_{L} = \left(\frac{\dot{V}_{s} + \dot{V}_{pq} - \dot{V}_{R}}{jX_{t2}}\right)$$
(2.14b)

substituindo as equações (2.14a), (2.14b) em (2.13), obtêm-se:

$$P_{1} = \Re e \left[\dot{V}_{1} \left(\frac{n_{1} \dot{V}_{s} - \dot{V}_{1}}{j X_{t1}} \right)^{*} \right]$$

$$P_{2} = \Re e \left[\dot{V}_{pq} \left(\frac{\dot{V}_{s} + \dot{V}_{pq} - \dot{V}_{R}}{j X_{t2}} \right)^{*} \right]$$
(2.15)

As formas de onda das tensões geradas pelos conversores neste trabalho utilizam a tecnologia dos*GTOs*. Essas expressões permanecem válidas se as técnicas PWM (*Pulse Width Modulation*) utilizando IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) como chaves nos inversores fossem aplicadas a ambos conversores tipo *VSI*. Neste caso, as relações entre a tensão CC e as tensões $V_1 e V_2$ no lado CA podem ser expressas como: $V_1 = m_1 V_{dc}$, $V_2 = m_2 V_{dc}$. Onde *m* é o fator (índice de modulação) que relaciona a amplitude máxima da componente fundamental de V₁ ou V₂ com a tensão do elo CC. Na técnica *PWM* denominada *natural sampling technique*, por exemplo, $m = \frac{V_{ctrol}}{V_{triana}}$, onde V_{ctrol} é o sinal

de controle senoidal e V_{triang} representa a amplitude da onda triangular de modulação. Este fator permitirá que ambos os conversores possam manter a tensão desejada V_1 e V_2 no lado CA do inversor.

Os ângulos correspondentes a $V_1 \in V_2$ são controlados através dos ângulos de fase das tensões V_{ctrol} $\theta_1 \in \theta_2$ dos respectivos conversores, assim, $\delta_1 = (\delta_s - \theta_1) \in \delta_2 = (\delta_s - \theta_2)$. De modo similar ao caso do modelo em regime permanente, os índices de modulação (m_1 , m_2), ou suas constantes análogas no caso da técnica *phase shift*, constituem-se nas principais referências para o controle do *UPFC*.

2.6 Modelo de um Sistema de Duas Barras com um UPFC

Para facilitar a análise do circuito do *UPFC*, mostrado na Fig. 2.6 anterior, será utilizado em princípio um circuito contendo fontes ideais de tensão controláveis, operando com freqüência fundamental [34], [35], [54], [55], inserido em um sistema equivalente de duas máquinas ideais (similares a uma barra infinita). Com relação à tensão de compensação ($\dot{V}_{pq} = V_{pq} \angle \theta_{pq}$), esta pode ser decomposta em suas componentes ortogonais V_p e V_q , tendo a corrente de linha como referência.

A componente de tensão V_p , que está em fase com a corrente de linha, tem um efeito significativo sobre a potência ativa injetada. Por outro lado, V_q , que está em quadratura com a corrente de linha, afetará diretamente a potência reativa. Neste caso, a tensão V_{pq} girando em sentido anti-horário está referida à posição angular de V_s .



Fig. 2.7 Sistema equivalente de duas fontes ideais com um UPFC

As equações correspondentes à operação em regime permanente do sistema representado na Fig. 2.7 são:

$$\dot{V}_{s} = V_{s} e^{j\delta_{s}}$$

$$\dot{V}_{R} = V_{R} e^{j\delta_{R}}$$

$$\dot{V}_{pq} = k V_{pq} e^{j\theta_{pq}}$$
(2.16)

quando *k=0* \Rightarrow sistema sem compensação quando *k=1* \Rightarrow sistema compensado com tensão máxima \dot{V}_{pq}

A corrente na linha, considerando só o efeito da compensação série e com R₁=R₄=0, será:

$$\dot{I}_{L} = \left(\frac{\dot{V}_{S} + \dot{V}_{pq} - \dot{V}_{R}}{jX_{total}}\right)$$
(2.17)

A tensão no ponto 'A' do sistema pode ser obtida como, $\dot{V}_{A} = \dot{V}_{S} + \dot{V}_{pq} - jX_{1}\dot{I}_{L}$

$$S_{\rm S} = (P_{\rm S} + jQ_{\rm S}) = \dot{V}_{\rm S}\dot{I}_{\rm I}^{*}$$

$$S_{\rm R} = (P_{\rm R} + jQ_{\rm R}) = \dot{V}_{\rm R}\dot{I}_{\rm L}^{*}$$
(2.18)

Portanto a potência injetada na linha, pelo UPFC, será:

R.L. Vasquez-Arnez - Tese Doutorado - USP

$$P_{upfc} = V_{p}I_{L} \qquad (parcela de V_{pq} em fase com I_{L}) \qquad (2.19)$$

$$Q_{upfc} = V_{q}I_{L} \qquad (parcela de V_{pq} em quadratura com I_{L})$$
se I_{sh} não for desconsiderada, então:
$$\dot{I}_{L} = \dot{I}_{1} - \dot{I}_{sh} \qquad (2.20)$$

Adotando a tensão V_S como referência, a variação do fluxo de potência ativa e reativa no ponto receptor (P_R , Q_R), em função do ângulo da tensão série injetada θ_{pq} , resulta nas curvas mostradas na Fig. 2.8. Nestes gráficos, a tensão série injetada varia tanto em magnitude como em posição angular. O ponto P_0 , Q_0 , na Fig. 2.8(d), corresponde ao valor em pu da potência ativa e reativa no terminal receptor, com ausência da tensão de compensação série (k=0). Obviamente, para esta condição, P_0 e Q_0 seguem uma linha reta vertical ao longo dos 360 graus no eixo do ângulo série, ou seja, a potência ativa e a potência reativa permanecerão constantes se nenhum outro parâmetro for alterado.

Se, por exemplo, existe a necessidade de apenas compensar o sistema CA, com a potência reativa mantendo a potência ativa invariável num valor de 1,0 pu, então, as duas possibilidades para se alcançar esta condição corresponderão às posições do ângulo série de $\theta_{pq} = 150^{\circ}$ ou $\theta_{pq} = 330^{\circ}$ (Figs. 2.8a e 2.8b). O primeiro com um efeito predominante sobre a potência reativa indutiva na linha, enquanto que o segundo sobre a potência reativa capacitiva.

À área dentro do último círculo externo (k≤0,3 na Fig. 2.8c), corresponde à região controlável da tensão série. Teoricamente, nada impede que a tensão V_{pq} possa girar livremente dentro do círculo de raio máximo (V_{pq}^{max}). Não obstante, recomenda-se considerar as restrições inerentes à operação do *UPFC*, as quais são apresentadas em [9], [27].

Na ausência de compensação por parte de ambos os conversores, ou seja quando $V_{pq}=0$ e $I_{sh}=0$, uma pequena parcela da corrente de linha é derivada na direção das chaves semicondutoras dos inversores *VSI-1* e *VSI-2*. Nestas condições, as perdas totais do controlador unificado de potência (*UPFC*), serão proporcionais às perdas nas chaves semicondutoras somadas com as perdas nos transformadores de acoplamento.

Como normalmente acontece em qualquer sistema ideal analisado, o modelo simples anterior, assim como as suposições consideradas neste capítulo, poderiam conduzir a conclusões otimistas sobre o comportamento do *UPFC* na modificação do fluxo de potência. Por esta razão, as perdas nos conversores, transformadores de acoplamento e linhas de transmissão, devem ser convenientemente ponderadas, dependendo do caso analisado.



Fig. 2.8 Variação da potência ativa e reativa para $0 \le k \le 0.3$ e θ_{pq} girando 360°

O fato de se desprezar as perdas presentes nos conversores tem a finalidade de reduzir a complexidade na programação e em alguns casos de análise do *UPFC*. Porém, não há nenhuma dificuldade maior em se incluir estas perdas nos modelos utilizados, tanto no programa *ATP* como em rotinas no programa Matlab. Não obstante, pode-se afirmar que os resultados e conclusões alcançados são bastante aceitáveis mesmo quando se desprezam as perdas.

No caso de se utilizar a técnica de controle *PWM*, na geração das ondas nos inversores, é particularmente importante representar as perdas no modelo do *UPFC*, pois esta técnica, quando comparada com a técnica *phase shift* multipulso utilizada neste trabalho, apresenta perdas por chaveamento mais significativas. A referência [34], sugere que estas perdas sejam representadas como uma resistência conectada em paralelo com o capacitor CC.

2.7 Diagramas Vetoriais do Sistema na Presença da Tensão Série

O efeito devido à posição angular da tensão série (V_{pq}) sobre o diagrama vetorial do sistema CA é mostrado na Fig. 2.9. Para facilidade de análise e ilustração utiliza-se o circuito mostrado na Fig. 2.2, com a hipótese de X₁=0.



Fig. 2.9 Diagramas fasoriais na presença de V_{pq}

Note-se a condição de perpendicularidade entre a corrente de linha I_L e a queda de tensão V_X na linha de transmissão. A tensão V_X' é a queda de tensão na linha com a existência de V_{pq} . Esta tensão V_X' determinará a magnitude da corrente pela linha, e portanto o fluxo de potência a ser transmitido. A posição perpendicular entre a tensão V_{pq} e a corrente de linha I_L , na Fig. 2.9(a), caracteriza o diagrama vetorial de um *SSSC*.

2.8 Variação da Tensão Terminal em Função da Tensão Série

Em regime permanente, a magnitude e ângulo da tensão de linha V₂ variam de acordo com a magnitude e o ângulo da tensão V_{pq} . A Fig. 2.10(b) foi obtida apenas com o efeito da compensação série, ou seja, sem suporte da tensão V₂.





Fig. 2.10 Variação de V_2 e seu ângulo $\Phi_{\text{2}},$ quando θ_{pq} varia de 0 a 360°

O controle e suporte dessa tensão, que é uma das tarefas que o inversor *shunt* deve executar, pode ajudar a controlar, embora com menor importância, a transmissão de potência.

No gráfico mencionado, quando $V_{pq}=0$, o valor da tensão terminal V_2 corresponde a 0.966 pu com um ângulo de -15° . Se for necessário que a tensão V_2 seja modificada só em seu ângulo, mantendo invariável sua magnitude (ação funcional semelhante a de um *Phase-Shifter*, item 2.2), então os ângulos aproximados a serem utilizados corresponderão a $\theta_{pq}=$ 70 ou 260 graus. A forma como este suporte de tensão é realizado pelo *UPFC* será mostrada no Capítulo 4.

Capítulo 3 Análise e Configuração do Inversor VSI

3.1 Introdução

O presente capítulo tem a finalidade de discutir a estrutura básica do sistema de controle do *UPFC* e a configuração do inversor utilizado. Considera-se útil a realização dessa análise para o entendimento das funções de controle quando aplicadas em sistemas de transmissão. O sistema de controle é estruturado de tal forma que os sinais de referência derivados externamente sejam estabelecidos em uma ordem de prioridade seletiva para o caso da compensação reativa *shunt*, da compensação série e para a modificação do ângulo de potência e tensão terminal. Estes sinais de referência são usados em controles de malha fechada impondo que os inversores produzam as tensões CA nos terminais de entrada (conexão *shunt*) e saída (conexão série) do controlador do fluxo de potência, estabelecendo assim os requisitos de transmissão desejados. A estrutura de controle também tem que manter constante a tensão no capacitor CC, assegurando a transferência de potência entre os inversores, que deverá ser a menos oscilante possível.

Com a finalidade de controlar a potência, é importante observar as grandezas elétricas do sistema projetadas nas coordenadas ortogonais d-q. Este sistema de coordenadas é escolhido de tal forma que a componente de corrente no eixo d (i_d), tenha apenas efeito direto sobre a potência ativa instantânea e a componente de corrente no eixo q (i_q), tenha efeito direto sobre a potência reativa instantânea. Na condição de regime permanente equilibrado, as componentes nos eixos *d* e *q* dos vetores de tensão e corrente se comportam como se fossem grandezas constantes. Esta característica da representação dos vetores faz com que este método seja adequado ao controle do *UPFC*, facilitando o condicionamento das componentes de corrente ativa e reativa de maneira independente. Deve-se mencionar que a implementação da maioria dos programas desenvolvidos utilizam a decomposição em coordenadas ortogonais nos eixos d, q. A implementação no programa *ATP* utiliza também estas coordenadas (d, q) mas sob o ponto de vista da teoria de potência instantânea [44], [45], [46]. Uma síntese desta teoria de potência instantânea é apresentada no Apêndice B deste trabalho.

3.2 Sistema de Controle e Realimentação

A forma de onda da tensão de saída dos conversores deve ser a mais próxima possível de uma onda senoidal, evitando a presença de harmônicos de baixa ordem. Durante a escolha do método de

controle, deve-se inicialmente distinguir entre as duas técnicas mais conhecidas utilizadas em inversores tipo fonte de tensão, que são:

- a) Técnica baseada no controle de fase (*Phase-Shift*), que considera inversores de 6 pulsos multiconectados e defasados entre si.
- b) Técnica baseada no controle *PWM*, que permite desenvolver modelos mais gerais e que podem ser facilmente adaptados para representar outras técnicas de controle.

Ambas técnicas quando corretamente implementadas e desenvolvidas permitem controlar independentemente tanto a componente ativa como a componente reativa das variáveis a serem utilizadas.

3.2.1 Técnica de Controle Utilizada

Embora uma boa parte da literatura pesquisada apresente o sistema de controle do *UPFC* baseado na técnica *PWM*, ainda existem algumas desvantagens significativas vinculadas a este tipo de controle, principalmente o fator econômico relacionado à aplicação desta técnica para conversão em alta tensão, que apresenta elevadas perdas por chaveamento nos *GTO*'s, não sendo portanto muito prática na aplicação em inversores do tipo *VSI* de potência elevada.

No presente trabalho utiliza-se a técnica de controle do tipo *Phase-Shift*, constituída por um conjunto tanto de dois (24 pulsos) como de quatro (48 pulsos) inversores, cada qual baseado em um esquema trifásico de três níveis e 12 unidades de *GTO*'s. No caso de uma aplicação prática, cada unidade de *GTO* representa um módulo, contendo vários *GTO*'s conectados em série, com a finalidade de atingir determinado nível de tensão.

As formas de onda da tensão de 24 e 48 pulsos obtidas com a técnica de controle *phase-shift* correspondem à configuração de inversor *Quasi Harmonic Neutralized* (QHN) [14], [26], [39]. Uma descrição mais detalhada desta forma de onda é apresentada no Capítulo 4. A configuração do inversor *QHN* utilizada na técnica de controle *Phase-Shift* apresenta como vantagens os seguintes pontos:

- melhor adequação para o caso de análise e aplicação em alta tensão [13],
- reduzidas perdas por chaveamento quando comparada à técnica PWM,
- decréscimo do nível de interferência eletromagnética devido à redução da relação dv durante o

processo de chaveamento no inversor.

No entanto, com o propósito de se obter um conteúdo de harmônicos de tensão que esteja dentro dos padrões rigorosos de qualidade de energia, ou seja, evitando a instalação de filtros, será necessário pelo menos um conjunto de quatro inversores de três níveis para produzir o tipo de onda de tensão de 48 pulsos [50], [57].

3.3 Controle da Tensão Série Injetada

O controle da tensão série injetada V_{pq} apresenta um grau de dificuldade relativamente maior e o procedimento adotado considera a corrente de linha como referência do sistema [7]. Para se obter um melhor resultado no controle, faz-se a decomposição da tensão V_{pq} em suas componentes *d*, *q* (Fig. 3.1a):

 V_{ρ} : *em fase com I*_{Linha} que tem efeito sobre a potência ativa. V_{q} : *em quadratura com I*_{Linha} que tem efeito sobre a potência reativa. do VSI

A tensão injetada pelo inversor série pode então ser expressada como:

$$V_{pq} = \sqrt{\left(V_{p}^{2} + V_{q}^{2}\right)}$$

$$\theta_{pq} = \tan^{-1}\left(\frac{V_{q}}{V_{p}}\right)$$
(3.1)

Como é conhecido, a potência ativa transferida pode ser efetivamente controlada variando-se a reatância série da linha. A injeção da tensão V_q comporta-se de maneira similar à inserção de uma reatância em série com a linha, exceto que esta tensão pode ser controlada independentemente da corrente de linha.

Os tempos de resposta dos sinais de controle são suficientemente rápidos na sua atuação durante oscilações transitórias e dinâmicas em sistemas de potência, atuando de maneira eficaz no amortecimento de oscilações [7], [9].

3.4 Controle da Corrente Shunt (STATCOM)

A injeção/absorção de potência reativa *shunt* pode ser utilizada para regular e controlar a tensão nos terminais do STATCOM. De maneira similar ao procedimento anterior, a corrente I_{shunt} é também dividida em duas componentes: uma componente de corrente reativa, em quadratura com a tensão terminal (I_{sh-q}), e outra componente ativa, em fase com a mesma (I_{sh-p}), segundo a ilustração na Fig. 3.1(b).

 I_{sh_p} : *em fase com* V_{Linha} que tem efeito sobre a potência ativa derivada. I_{sh_q} : *em quadratura com* V_{Linha} ... que tem efeito sobre a potência reativa absorvida ou injetada.


Fig. 3.1 Representação vetorial de: (a) V_{pq} , (b) I_{sh}

Enquanto a componente I_{sh-q} é controlada para regular a magnitude da tensão terminal, a componente I_{sh-p} é usada para regular a tensão do capacitor, regulando a tensão do capacitor, indiretamente a potência ativa do *VSI-2* e das perdas já estão garantidas. A corrente total I_{sh} , é controlada variando a tensão de saída do conversor *shunt*.

3.5 Configuração do Inversor Utilizado

O tipo de inversor utilizado no presente trabalho para a geração das ondas e o controle de potência no programa *ATP* é o denominado de três níveis com neutro grampeado *(3-level neutral point clamped)*. As principais vantagens desta configuração (ou daquelas com um maior numero de níveis) em relação à de dois níveis, são [49], [50]:

- a capacidade de gerar formas de onda compostas por um maior número de pulsos,
- o menor conteúdo de harmônicos; o que resulta em uma melhor aproximação à onda de tensão desejada.

Entre as desvantagens deste tipo de arranjo pode-se mencionar a grande quantidade de diodos utilizados, o custo dos semicondutores que inevitavelmente é maior e a lógica de acionamento que obviamente é mais complexa. Porém, apesar do número de chaves controladas serem dobrada a potência também é dobrada, sendo o custo maior apenas o correspondente à dos diodos. Maiores detalhes a respeito do arranjo do inversor de três níveis podem ser encontrados em [39].

3.5.1 Conversor Tipo Fonte de Tensão de Três Níveis

A grande vantagem da configuração de três níveis está na capacidade de gerar formas de onda mais próximas à senoidal, utilizando para isto uma freqüência de chaveamento relativamente baixa e que pode ser utilizada em aplicações de alta tensão, devido à possibilidade de conexão em série dos *GTO*'s. Além disso, esta configuração permite variar a amplitude da tensão quase senoidal produzida sem ter que mudar a amplitude da tensão CC, pelo menos dentro de uma certa faixa.

3.5.2 Funcionamento do Conversor de Três Níveis

Devido ao fato de se ter utilizado este arranjo para a geração das ondas quase senoidais, apresentase a seguir uma síntese de sua operação, para o caso de uma única fase. As outras duas fases serão conectadas da mesma forma ao circuito CC. As chaves S2 e S3 na Fig. 3.2, são dispositivos auxiliares dentro do inversor e são utilizadas para grampear o terminal de saída C para o ponto de potencial neutro (M), através dos diodos D1 e D2.

Se a chave S1 for desconectada em um intervalo inferior a 180°, e por outro lado, se a chave S3 for conectada em um intervalo inferior a 180°; então, a tensão V_{dc} será grampeada ao ponto M durante um período equivalente a 2 γ (Fig. 3.2d). Durante este período a corrente nessa fase estará confinada ao circuito composto pelas chaves D1, D2, S2, e S3 e portanto, a tensão V_{ac} será nula. Quando γ =0, o inversor de três níveis se comporta de forma exatamente igual ao inversor de dois níveis.



Fig. 3.2 Operação de um conversor de três níveis: (a) representação de uma única fase (b) tensão de saída CA simples

Observações:

i) Se $I_a>0$ então a corrente fluirá por D1 e S2 \rightarrow V_{CM} = 0

ii) Se I_a<0 (o que não deve ser o caso já que S1 estará *ON*) então a corrente fluirá por S3 e D2 \rightarrow V_{CM} = 0

Durante a operação do conversor de três níveis monofásico, em todo instante, um par de chaves dentro do circuito terá que estar conduzindo simultaneamente. As possíveis combinações das chaves para a fase mostrada na Fig. 3.2, são:

- (a) S1 e S2 ⇒ *ON*
- (b) S3 e S4 ⇒ *ON*

O ponto C e , portanto, a tensão de saída CM, terá um potencial de $+\frac{V_{dc}}{2}$, 0, ou $-\frac{V_{dc}}{2}$ em relação ao ponto neutro M. Por outro lado, certas condições no processo de chaveamento não serão permitidas, sendo estas:

| (a) | S1 e S3 | ⇒ | NOT |
|-----|-------------|---|-----|
| (b) | S2 e S4 | ⇔ | NOT |
| (c) | S2 e S3 | ⇔ | NOT |
| (d) | S1, S2 e S3 | ⇔ | NOT |
| (e) | S2, S3 e S4 | ⇔ | NOT |

As condições não permitidas (c) e (d), ocasionam curto-circuitos nos capacitores superior e inferior, respectivamente. Tanto a configuração de três níveis como a de dois níveis podem ser conectadas em diferentes arranjos, com a finalidade de se obter o tipo de inversor ideal para determinada aplicação. As equações correspondentes ao conversor trifásico de três níveis são apresentadas no Apêndice C deste trabalho.

Nas Figs. 3.3(a) e (b), mostra-se a comparação entre um inversor trifásico de dois níveis e um de três níveis. Sendo o primeiro de 12 pulsos e o segundo de quase 24 pulsos. A onda quadrada, presente entre o inversor e o circuito magnético (transformador) da Fig. 3.3(a), corresponde à tensão de saída de uma só fase. A tensão de saída equivalente, correspondente à configuração de três níveis, mostra uma melhor forma de onda do que a configuração de dois níveis, apresentando harmônicos de baixa ordem inferiores, conforme estabelecido em [4], [57].



(a)



(b)

Fig. 3.3 Tensão de saída total num inversor de 24 pulsos:

- (a) estrutura de conversor de dois níveis (12 pulsos)
- (b) estrutura de conversor de três níveis (quase 24 pulsos)

3.6 Análise do Circuito Magnético do UPFC

Na aplicação dos equipamentos *FACTS* aos sistemas de potência, dois grupos de transformadores são freqüentemente utilizados: o transformador de acoplamento e o transformador com estrutura magnética para redução de harmônicos. Os arranjos básicos utilizados para reduzir o conteúdo de harmônicos seguem as ligações *estrela-delta*, *estrela-estrela* ou *zigue-zague*. Na Fig. 3.4, representam-se estes tipos de arranjos quando estes são utilizados em um inversor de 24 pulsos.





(b)

Fig. 3.4 Arranjo dos transformadores para um conversor de 24 pulsos (2 níveis) em: (a) estrela-delta (b) estrela-estrela e zigue-zague

3.6.1 Transformador em Estrela-Delta ou Estrela-Estrela

Uma das grandes vantagens deste tipo de arranjo é que ele não apresenta complexidade na composição do enrolamento, pois apenas dois tipos de transformadores são necessários para

completar o arranjo deste sistema. Porém, o arranjo estrela-delta, em relação à conexão zique-zague, quando utilizado para um número de pulsos maior do que 12, não efetua o cancelamento completo de harmônicos de ordem $6n \pm 1$ (n=1,2,3,...). Desse modo, este tipo de circuito é denominado de *Quasi Harmonic Neutralized (QHN)*. Neste arranjo, os sinais de acionamento dos inversores seguem defasagens de 15°, para o caso de 24 pulsos e de 7,5° no caso do inversor de 48 pulsos. Com relação ao circuito magnético deste tipo de arranjo, as ligações Y-Y e Y- Δ só permitem defasagens de 0° a 30° entre um e outro grupo de transformadores. Nas Figs. C3(a), (b) e (c) do Apêndice C, mostram-se as formas de onda das tensões correspondentes aos casos de inversores de 12, 24 e 48 pulsos, respetivamente. Mostra-se também o espectro harmônico e a *THD*, quando é utilizado este tipo de arranjo [49], [57].

3.6.2 Transformador Contendo a Ligação em Zigue-Zague

Este tipo de arranjo não muito comum na atualidade é basicamente composto por transformadores especiais montados de forma a gerar defasagens mais flexíveis nas tensões. Idealmente, este arranjo tem a capacidade de cancelar harmônicos de ordem menor, permitindo apenas a existência dos harmônicos de ordem $M6n\pm1$ (n=1,2,3,... e m =1,2,4,8,16,...; onde m = número de inversores utilizados), [49]. As formas de onda mostrados nas Figs. c4(a), (b) e (c) do Apêndice C, evidenciam esta situação. Porém, uma das desvantagens deste tipo de arranjo é o custo mais elevado, comparado com aqueles mais comuns, devido à complexidade mencionada anteriormente. Também deve ser lembrado o fato de que o tratamento do circuito magnético demanda alguma precisão para se obterem as defasagens e o cancelamento de harmônicos desejados [49], [57]. O tipo de arranjo utilizado no presente trabalho corresponde à configuração estrela-delta, basicamente pela sua simplicidade de análise, no conjunto do *UPFC*, e também porque a forma de onda na saída do circuito magnético é muito similar à do tipo de arranjo em zigue-zague.

Porém, é importante destacar que a quantidade de harmônicos na configuração utilizada será um pouco maior do que na configuração em zigue-zague. A análise dos harmônicos no *UPFC* com ambas as configurações apresentadas neste trabalho merece um estudo mais profundo e é proposto para uma pesquisa futura.

3.7 Arranjo da Tensão de 48 Pulsos

Neste tipo de inversor de 48 pulsos, o ângulo de defasagem entre os conversores de dois níveis é de 7,5° (Fig. 3.6). É evidente que o inversor de 48 pulsos tipo *Phase-Shift (QHN)*, mostrado na Fig. 3.5, terá uma melhor forma de onda senoidal e um conteúdo harmônico mais suave, quando comparado com outros tipos de conversores que possuam um número menor de pulsos. Note-se também que nesta configuração o capacitor no elo CC serve como uma única fonte de tensão para os oito conversores de seis pulsos.

As tensões dos conversores, devidamente defasadas, são denominadas neste caso como A1B1C1, A2B2C2, A3B3C3 e A4B4C4, correspondentes ao grupo de conversores na parte inferior da Fig. 3.6.

Por outro lado, D1E1F1, D2E2F2, D3E3F3 e D4E4F4 correspondem aos conversores na parte superior. As tensões de saída equivalentes V_X, V_Y e V_Z , na configuração de 48 pulsos, serão obtidas uma vez realizadas as respetivas combinações magnéticas (Fig. 3.7) com os transformadores de acoplamento. Neste tipo de arranjo, os transformadores estrela-delta têm uma relação de $\sqrt{3}$, entre as tensões do primário e secundário, o que deve ser levado em conta nas relações de tensão.

Na Fig. 3.7(a), mostra-se o circuito magnético da configuração de 48 pulsos tipo *phase-shift QHN*. Neste arranjo, as saídas ABC dos conversores estão eletricamente conectadas aos transformadores em delta, enquanto que as saídas DEF dos inversores estão conectadas aos transformadores com conexão estrela. As saídas com conexão estrela do secundário de cada transformador de acoplamento são conectadas em série, formando assim a configuração do inversor de 48 pulsos tipo *QHN*. Na Fig. 3.7(b) mostra-se a posição dos vetores de tensão na saída de cada conversor e a defasagem entre eles, tanto para o grupo de conversores ABC como para DEF.



Fig. 3.5 Configuração de 48 pulsos usando transformadores tipo Y- Δ (*VSI* de dois níveis)



Fig. 3.6 Defasagem entre pontes conversoras na configuração de 48 pulsos



(a)





Lembra-se que, no caso de se utilizar quatro conversores para a geração de ondas de 48 pulsos, cada conversor deverá ter 12 pulsos, ou seja, operar sob a configuração de conversor de três níveis.

3.8 Tensão Série Injetada de 48 Pulsos

Como o inversor *VSI-2* é responsável pelo fornecimento da tensão série senoidal à linha, foram geradas no programa *ATP* ondas com 24 pulsos e 48 pulsos utilizando a técnica de controle de fase (*Phase-Shift QHN*), com a finalidade de se observar a melhoria destas ondas geradas e a resposta do inversor quando ambas as configurações são aplicadas ao sistema (Fig. 3.8).



Fig. 3.8 Tensão série injetada (V_q=E_{2A}) de um: (a) inversor de quase 24 pulsos

- (b) inversor de quase 48 pulsos
- (c) fase A, inversor de quase 24 pulsos
- (d) fase A, inversor de quase 48 pulsos

De modo geral, ambas configurações mostraram um bom desempenho quando aplicadas ao caso de um sistema equilibrado. Porém, com a configuração de 48 pulsos (Fig. 3.8d) consegue-se uma melhor aproximação da forma de onda senoidal. Em conseqüência, com esta configuração poderia-se evitar o uso de filtros harmônicos entre o inversor e o sistema CA, sem transgredir o limite do conteúdo de harmônicos de tensão imposto pelos padrões de qualidade de energia [57]. A correspondente análise do THD (*Total Harmonic Distortion*) desta configuração pode ser observada no Apêndice C.

O modelamento básico utilizado no programa *ATP* é composto pelos seguintes elementos (vide Fig. 3.9 e Fig. 1.2):



Fig. 3.9 Sistema de controle simplificado do UPFC

Onde:

| θ | : | Ângulo de sincronização obtido pelo PLL |
|-----------------------|---|--|
| V _{1_abc} | : | Tensões nas fases a, b, c da barra 1 |
| V _{1_d, q} | : | Tensões senoidais estacionarias nos eixos d e q |
| I1_abc | : | Corrente shunt nas fases a, b, c da barra 1 |
| $\theta_1 (\theta_2)$ | : | Ângulo utilizado na lógica de disparo do VSI-1 (VSI-2) |

Os valores de V_{pq}^* , θ_{pq}^* e I_{1q}^* mostrados na Fig. 3.9 devem ser especificados segundo o nível de compensação que se deseje impor ao sistema. O ângulo de sincronização θ obtido pelo PLL (*Phase-Locked Loop*) é utilizado para sincronizar os sinais, em fase e freqüência, entre os valores medidos e

os gerados a partir do controlador do *SSSC* e do *STATCOM* [49]. Os ângulos $\theta_1 e \theta_2$, obtidos a partir do ângulo θ nos controladores destes inversores, são utilizados para controlar a lógica de disparo nos conversores *VSI-1* e *VSI-2*, modulando a tensão de saída de acordo com o modo de operação desejado (indutivo, capacitivo). Finalmente, as tensões quase-senoidais E₁ e E₂ procedentes dos inversores *shunt* e série, são utilizadas para a compensação da linha onde é instalado o controlador unificado de fluxo de potência [14], [26], [39].

Capítulo 4

Análise e Simulação dos Circuitos Série e Shunt

4.1 Introdução

Devido a razões de desempenho e econômicas, os conversores do tipo fonte de tensão (VSI) são normalmente preferidos em aplicações de sistemas *FACTS* do que os conversores tipo fonte de corrente (*CSI*), [4]. A função do *VSI* é gerar a tensão CA a partir da fonte CC, além de servir de interface entre o elo CC e o sistema trifásico. Esta tensão CA de saída do *VSI* tem amplitude, ângulo de fase e freqüência controlados. Como a corrente CC em um *VSI* flui em ambas as direções, as chaves no conversor têm que ser bidirecionais (bidirecional em corrente e unidirecional em tensão) e, desde que a tensão CC não seja invertida, os dispositivos de interrupção *turn-off* (*GTO's*) utilizados não precisam ter capacidade de inversão da tensão. Por isto, estes dispositivos são denominados como dispositivos com ação *turn-off* assimétricos [4].

Uma interface indutiva em série com o sistema CA (constituída neste caso pelo transformador de acoplamento) é essencial para assegurar que o capacitor CC não seja curto circuitado e descarregue rapidamente sobre a linha de transmissão. Ademais, a presença de um filtro pode ser necessária entre a interface indutiva e o sistema CA, com a finalidade de limitar as correntes harmônicas injetadas no sistema CA pelo inversor. Porém, a realização de uma análise e descrição mais profunda acerca da configuração do inversor tipo *VSI*, foge do escopo deste trabalho. Uma análise mais detalhada sobre estes tipos de inversores, utilizados em *FACTS*, pode ser encontrada nas referências [2], [4].

4.2 Análise do Compensador Série

A análise do circuito série do *UPFC* baseia-se no princípio do SVS (*Synchronous Voltage Source*). A diferença em relação ao circuito *shunt* reside no fato de que o *SVS* está conectado à linha através de um transformador série (Fig. 4.1).



Fig. 4.1 Esquema geral: (a) SVS (b) SSSC

Se o conversor *shunt* for desconectado da linha ou separado do *UPFC*, o inversor série estará operando exatamente como um *SSSC* (*Static Synchronous Series Compensator*) segundo ilustração da Fig. 4.1(b).

De forma resumida, a compensação através da tensão série implica em aumentar ou diminuir a tensão sobre a impedância da linha, alterando a corrente nesta e consequentemente a potência transmitida.

Existem importantes diferenças entre o desempenho de um SSSC quando comparado com um banco de capacitores série. Estas diferenças referem-se à maior flexibilidade e faixa de controle do SSSC na curva de potência e ângulo de transmissão e à sua capacidade de modificar o intercâmbio de potência ativa, além de não introduzir problemas de ressonância sub-síncrona [21], [22], [26], dependendo do ajuste do controlador tipo PI para não dar lugar ao aparecimento de oscilações durante a compensação. Finalmente, do ponto de vista físico, o SSSC apresenta dimensões menores quando comparado, por exemplo, a um banco capacitivo série. A característica de um SSSC é que este deve gerar tensões trifásicas variáveis e independentes em amplitude, ângulo de fase e freqüência. Existem algumas características operacionais que diferenciam o SSSC, quando comparado aos compensadores convencionais [48], [57]:

- ✤ A tensão série injetada é independente da corrente de linha.
- 🏷 Rápida resposta ante qualquer mudança operacional solicitada pelo sistema.
- Apresenta uma característica de compensação bidirecional relacionada à direção do fluxo de potência na linha.

4.2.1 Expressão da Potência Compensada com um SSSC

No caso dos conversores *VSI-1* e *VSI-2* operarem separadamente, a tensão série procedente do inversor *VSI-2* estará em quadratura (±90°) em relação à corrente de linha [57]. Nessas condições, o ângulo da tensão série na equação (2.2c) do item 2.3, pode ser substituído por $\left(\theta_{pq} + \frac{\delta}{2}\right) = \pm \frac{\pi}{2}$.

Assim, as correspondentes expressões para a potência no terminal receptor, uma vez que a componente de tensão em quadratura V_a foi injetada pelo compensador série, são:

$$P_{R} = \frac{V_{1}V_{4}}{X} \operatorname{sen}\delta + \frac{V_{4}V_{q}}{X} \cos\frac{\delta}{2}$$
(4.1)

analogamente,

$$Q_{R} = \frac{V_{1}V_{4}}{X}\cos\delta - \frac{V_{4}^{2}}{X} + \frac{V_{4}V_{q}}{X}\sin\frac{\delta}{2}$$
(4.2)

Portanto, pode-se dizer que a potência P_R torna-se uma função da tensão série injetada V_q . Utilizando a eq. (4.1), obtém-se a característica da potência transmitida P_R e o ângulo de transmissão δ , em função da tensão V_q (Fig. 4.2).

Do gráfico abaixo, pode-se observar que enquanto um banco de capacitor série consegue somente aumentar a potência transmissível, o SSSC é capaz também de diminuir esta potência, simplesmente invertendo a fase da tensão CA injetada.



Fig. 4.2 Curva P- δ como uma função de V_q, fornecida pelo SSSC

Se esta tensão injetada, agora com fase invertida, for maior que a queda da tensão normalmente existente na linha não compensada, a potência transmitida pode inclusive ser invertida. Na equação (4.1), pode-se observar que mesmo com uma diferença angular entre as tensões V_1 e V_4 igual a zero, é possível transmitir potência ativa através da linha.

Devido à condição de quadratura entre a tensão de saída do inversor e a corrente de linha, existe injeção/absorção apenas de potência reativa. O inversor pode internamente gerar toda a potência reativa e consequentemente operar de acordo com o item 4.5 deste capítulo, com um capacitor CC relativamente pequeno. No entanto, os dispositivos de chaveamento do inversor possuem perdas e a energia armazenada no capacitor CC poderia ser utilizada para suprir as perdas internas do inversor [22].

Porém, em termos práticos, estas perdas podem ser supridas pelo próprio sistema CA, simplesmente fazendo que a tensão do inversor (V_q) atrase a corrente de linha (I_{Linha}) num ângulo menor que 90° [23]. Deste modo, o inversor absorve uma pequena potência ativa do sistema CA, suprindo suas perdas internas e mantendo a tensão CC do capacitor no nível desejado (Fig. 3.1a, Capitulo 3). A geração da tensão série, adiantada ou atrasada de 90° em relação à corrente de linha, pode ser utilizada para controlar o fluxo de potência na linha (Fig. 4.3).



Fig. 4.3 Transição do modo indutivo para o capacitivo da tensão V_q

Esta característica de compensação série pode ainda ser utilizada para amortecer oscilações transitórias na rede, assim como para realizar outras funções no sistema de transmissão [22], [26].

4.2.2 Variação da Tensão Terminal devido à Tensão Vq

Assumindo que, por qualquer motivo o conversor *shunt* (*VSI-1*) seja desconectado da linha, a tensão V_q do *SSSC* produzirá normalmente uma variação na tensão terminal. Para se ilustrar esta variação de tensão, considera-se o sistema simétrico apresentado na Fig. 4.9(a) do item 4.3, no qual apenas as reatâncias nas linhas são consideradas. Os diagramas vetoriais, considerando a corrente na linha I_L como referência, além das condições anteriores, são mostrados na Fig. 4.4.



Fig. 4.4 Diagrama vetorial de tensões na presença de V_q
(a) Injeção de V_q capacitiva
(b) Injeção de V_q indutiva

O comportamento das tensões nas barras V_2 e V_3 durante a injeção da tensão V_q para o caso capacitivo (-90°) e indutivo (+90°), quando a magnitude desta aumenta desde 0 até 0,3 pu, é mostrado na Fig. 4.5.

A injeção da tensão V_q, em quadratura com a corrente de linha I_L, faz com que ambas as tensões V₂ e V₃ possuam ângulos de fase opostos, porém com magnitudes praticamente iguais.



Fig. 4.5 Tensões nas barras V_2 e V_3 quando $V_q{=}0 \rightarrow 0{,}3$ pu

Onde: $\Phi_2 (\Phi_3)$: Ângulo de fase da tensão V₂ (V₃)

Por outro lado, a flexibilidade relativamente menor sobre o controle da potência, que é oferecida apenas pelo compensador série, pode ser observada na Fig. 4.6. Neste caso, o SSSC apresenta uma característica de controlabilidade linear, no plano P-Q, ao invés da área circular correspondente ao *UPFC* (vide Fig. 2.8c, Capítulo 2).



Fig. 4.6 Relação entre P e Q quando V_q = 0 \rightarrow 0,3 pu

4.3 Análise do Compensador Shunt

Os principais objetivos do circuito *shunt* no *UPFC* são o suporte de tensão no ponto de conexão com o sistema e o ajuste da potência reativa indutiva ou capacitiva (Fig. 4.7). Quando operado como um dispositivo em separado, o compensador *shunt* pode inclusive ser utilizado para controlar o fator de potência ou melhorar a estabilidade transitória e dinâmica do sistema [16], [23], [29].



Fig. 4.7 Esquema geral: (a) SVS (b) STATCOM

O STATCOM baseia-se também na configuração de um SVS [23]; porém, ao invés da injeção de uma tensão em série, este absorverá ou injetará uma corrente em derivação no ponto de conexão com a linha.

No caso em que o *SVS* for estritamente utilizado para compensação reativa *shunt*, o dispositivo de armazenamento de energia na Fig. 4.7(a), pode ser substituído por um capacitor CC de tamanho relativamente pequeno, cujo dimensionamento estará determinado principalmente pelo *ripple* da corrente de entrada no conversor (Fig. 4.7b). Se a tensão do capacitor (V_{dc}) for incrementada acima do seu valor nominal o *STATCOM* estará sobre-excitado, gerando assim potência reativa. Se ocorrer o contrário e a tensão V_{dc} for reduzida abaixo do seu valor nominal, o *STATCOM* estará sub-excitado, absorvendo potência reativa do sistema.

Este modo de operação é análogo a ação de incrementar ou diminuir a tensão de campo de um compensador síncrono [42]. O circuito *shunt* do *UPFC* opera com a corrente reativa da linha, essencialmente, do mesmo modo que um compensador síncrono rotativo, com a diferença que o *STATCOM* não apresenta constantes de tempo e inércia mecânica.

Para o modo de operação capacitivo, é necessário que a tensão síncrona gerada pelo *STATCOM* tenha amplitude maior que a tensão de linha e esteja em fase com esta. No modo de operação indutivo, é necessário que a tensão síncrona controlada tenha amplitude menor que a tensão de linha e também esteja em fase com a mesma (Fig. 4.8).

Esta resposta dinâmica do STATCOM frente ao sistema, pode ser resumida da forma seguinte:



Fig. 4.8 Tensão síncrona controlada do STATCOM para:

(a) modo de operação capacitivo

(b) modo de operação indutivo

O STATCOM é essencialmente um dispositivo que controla a corrente *shunt*, cuja capacidade de compensação reativa pode se manifestar inclusive em situações quando a tensão estiver consideravelmente baixa. Como será visto adiante, este dispositivo pode, teoricamente, passar do modo de compensação indutivo para o modo capacitivo quase que instantaneamente [42]. Como todos os conversores que incluem chaveamento, o *STATCOM* não contribui para elevação das correntes de curto-circuito presentes no sistema.

4.3.1 Análise e Modelamento do Circuito Shunt

O estudo e desenvolvimento do circuito *shunt* do *UPFC* foi realizado utilizando coordenadas ortogonais d-q [7], [15], aplicadas a todas as grandezas envolvidas no circuito. De acordo com [34], [54], [56], ambos os conversores tipo *VSI* na Fig. 4.9(a), podem ser considerados como fontes de tensão ideais operando com freqüência fundamental (Fig. 4.9b).





(b)

Fig. 4.9 Sistemas equivalentes CA com um UPFC

- (a) Diagrama unifilar
- (b) Circuito equivalente

Assume-se também que estes conversores ideais estão isentos de perdas, resultando as potências série (P_{se}) e *shunt* (P_{sh} e Q_{sh}):

$$\mathsf{P}_{se} = (\mathsf{V}_{p}\mathsf{I}_{4d} + \mathsf{V}_{q}\mathsf{I}_{4q}) \tag{4.3}$$

$$\mathsf{P}_{\mathsf{sh}} = (\mathsf{V}_{2\mathsf{d}}\mathsf{I}_{\mathsf{shd}} + \mathsf{V}_{2\mathsf{q}}\mathsf{I}_{\mathsf{shq}}) \tag{4.4}$$

$$Q_{sh} = (V_{2q}I_{shd} - V_{2d}I_{shq})$$
(4.5)

Em regime permanente, a relação entre as potências dos conversores série e *shunt* pode ser expressa como:

$$\mathsf{P}_{\mathsf{se}} - \mathsf{P}_{\mathsf{sh}} = 0 \tag{4.6}$$

tem-se ademais que,

$$\dot{\mathbf{I}}_{1(d,q)} = \dot{\mathbf{I}}_{4(d,q)} + \dot{\mathbf{I}}_{sh(d,q)}$$
 (4.7)

de (4.3), (4.4) e (4.6)

$$(V_{d}I_{4d} + V_{q}I_{4q}) = (V_{2d}I_{shd} + V_{2q}I_{shq})$$
(4.8)

Do circuito da Fig. 4.9(b), pode-se também estabelecer que:

$$\dot{V}_{2(d,q)} = -\dot{V}_{pq} + Z_4 \dot{I}_{4(d,q)} + \dot{E}_{4(d,q)}$$
(4.9)

com a finalidade de simplificar a eq. (4.9), considerou-se a reatância X_{se} incluída dentro da impedância Z_4 ,

$$V_{2d} = -V_{p} + E_{4d} + (R_{4}I_{4d} - X_{4}I_{4q})$$
(4.10)

$$V_{2q} = -V_{q} + E_{4q} + (R_{4}I_{4q} + X_{4}I_{4d})$$
(4.11)

Por outro lado,

$$\dot{\mathsf{E}}_{1(d,q)} - \mathsf{Z}_{1(d,q)}\dot{\mathsf{I}}_{1(d,q)} = -\dot{\mathsf{V}}_{pq(d,q)} + \dot{\mathsf{E}}_{4(d,q)} + \mathsf{Z}_{4(d,q)}\dot{\mathsf{I}}_{4(d,q)}$$
(4.12)

de onde resulta,

$$I_{4d} = \frac{1}{(X_1 + X_4)} \Big[E_{1q} - (R_1 I_{shq} + X_1 I_{shd}) - E_{4q} + V_q - (R_1 + R_4) I_{4q} \Big]$$
(4.13)

$$I_{4q} = \frac{1}{(X_1 + X_4)} \Big[E_{4d} + (R_1 I_{shd} - X_1 I_{shq}) - E_{1d} - V_p + (R_1 + R_4) I_{4d} \Big]$$
(4.14)

As expressões (4.10), (4.11), (4.13) e (4.14), assim como as equações não lineares (4.5) e (4.8) acima, podem ser resolvidas utilizando métodos numéricos iterativos. Uma vez calculada a corrente na linha (I_4), pode-se também calcular a tensão V_3 .

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \dot{V}_{pq} - jX_{se}\dot{I}_4$$
 (4.15)

A tensão V₃ representa um outro valor de importância dentro do sistema compensado; durante a sua avaliação deve-se levar em conta a condição de não ultrapassar seus limites operativos. A faixa

operativa da tensão V_3 situa-se aproximadamente entre 90%-110% da tensão nominal, sem cargas conectadas nesta barra.

4.3.2 Controle da Tensão de Linha

Nesta parte do estudo foi avaliado o controle da tensão terminal V₂, que é modificada pela ação da potência reativa *shunt* Q_{sh} , absorvida ou injetada no sistema. Esta tensão constitui-se em uma das variáveis a serem obtidas através da análise apresentada no item 4.3.1. A potência reativa *shunt* Q_{sh} , neste caso, foi estabelecida numa faixa entre –0,8 pu (indutivo) à +0,8 pu (capacitivo). A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos com este procedimento, e a Tabela 4.2 apresenta a variação das principais grandezas na extremidade receptora da Fig. 4.9 sob compensação série e *shunt* capacitiva.

| | Q _{sh} (pu) | V ₂ (pu) | $\mathbf{I}_{\rm sh} = \sqrt{\mathbf{I}_{\rm shd}^2 + \mathbf{I}_{\rm shq}^2}$ | V ₂ (pu) | $\mathbf{I}_{\rm sh} = \sqrt{\mathbf{I}_{\rm shd}^2 + \mathbf{I}_{\rm shq}^2}$ | |
|---|----------------------|---------------------|--|---------------------------|--|---|
| | | V _{pq} = | 0 | V _{pq} = +0,2 pu | $\theta_{pq}=30^{\circ}$ | |
| 1 | 0,8 | 0,8480 ∠-15° | 0,9433 ∠-105° | 0,8060 ∠-9,4° | 0,9433 ∠81,3° | i |
| 2 | 0,6 | 0,8808 ∠-15° | 0,6812 ∠-105° | 0,8408 ∠-9,2° | 0,6812 ∠79,2° | n |
| 3 | 0,4 | 0,9111 ∠-15° | 0,4391 ∠-105° | 0,8726 ∠-8,9° | 0,4391 ∠75,0° | d |
| 4 | 0,2 | 0,9393 ∠-15° | 0,2129 ∠-105° | 0,9023 ∠-8,8° | 0,2129 ∠63,2° | |
| 5 | 0,0 | 0,9659 ∠-15° | 0.0000 | 0,9299 ∠-8,6° | 0,0931 ∠-8,6° | |
| 6 | -0,2 | 0,9911 ∠-15° | 0,2018 ∠75° | 0,9560 ∠-8,5° | 0,2373 ∠-70,3° | С |
| 7 | -0,4 | 1,0151 ∠-15° | 0,3941 ∠75° | 0,9808 ∠-8,3° | 0,4277 ∠-80,8° | а |
| 8 | -0,6 | 1,0382 ∠-15° | 0,5779 ∠75° | 1,0044 ∠-8,2° | 0,6146 ∠-84,6° | р |
| 9 | -0,8 | 1,0603 ∠-15° | 0,7545 ∠75° | 1,0271 ∠-8,1° | 0,7949 ∠-86,6° | |

Tabela 4.1 Controle da tensão de linha (V₂) através da potência reativa shunt local

 Tabela 4.2
 Variação dos parâmetros na extremidade receptora sob compensação série e *shunt* capacitiva

| | $V_{pq} = 0,1 (pu)$; $Q_{sh} = -0,4 (pu)$ | | | | | |
|---------------|--|-------------------------|---------------------|---------|--|--|
| θ_{pq} | V ₂ (pu) | l _{Linha} (pu) | P ₄ (pu) | Q4 (pu) | | |
| 0° | 0,9692 ∠-15,0° | 1,2064 ∠-34,3° | 1,2024 | 0,0906 | | |
| 30° | 0,9821 ∠-16,7° | 1,2502 ∠-31,0° | 1,2492 | 0,0223 | | |
| 60° | 1,0040 ∠-17,8° | 1,2477 ∠-26,5° | 1,2447 | -0,0750 | | |
| 90° | 1,0287 ∠-18,1° | 1,2044 ∠-21,7° | 1,1913 | -0,1741 | | |
| 120° | 1,0495 ∠-17,6° | 1,1295 ∠-17,3° | 1,1018 | -0,2472 | | |
| 150° | 1,0613 ∠-16,4° | 1,0354 ∠-14,6° | 0,9981 | -0,2742 | | |
| 180° | 1,0614 ∠-14,8° | 0,9410 ∠-14,7° | 0,9072 | -0,2483 | | |
| 210° | 1,0495 ∠-13,3° | 0,8730 ∠-18,2° | 0,8543 | -0,1777 | | |
| 240° | 1,0286 ∠-12,2° | 0,8594 ∠-24,5° | 0,8551 | -0,0818 | | |
| 270° | 1,0040 ∠-11,7° | 0,9113 ∠-30,8° | 0,9109 | 0,0136 | | |
| 300° | 0,9821 ∠-12,1° | 1,0103 ∠-34,8° | 1,0065 | 0,0844 | | |
| 330° | 0,9692 ∠-13,3° | 1,1200 ∠-35,7° | 1,1139 | 0,1126 | | |

Sem compensação: $P_4^{(0)}$ =1,0 pu; $V_2^{(0)}$ =0,966 pu; I_{linha} = 1,0353 pu; E_1 =1,0 \angle 0°; E_4 =1,0 \angle -30° pu

Quando a tensão série injetada for igual a zero ($V_{pq}=0$), a corrente reativa *shunt* estará sempre em quadratura, seja para a condição capacitiva, com um ângulo de 75°, ou indutiva, com um ângulo de - 105°, em relação à tensão terminal V₂, cujo ângulo estará definido pela posição de E₁ $\angle \delta_1$ e E₄ $\angle \delta_4$. No

diagrama vetorial, representado na Fig. 4.10, a posição da tensão de linha V₂ serve como referência para a corrente *shunt* I_{sh}. A Fig. 4.11, obtida a partir do análise no item 4.3.1, mostra a relação entre a tensão terminal V₂ e a potência reativa *shunt*.

As tensões V₂ e V_{sh} podem ser observadas na Fig. 4.12, simulada com o modelo no programa *ATP*. Observa-se a forma de onda na saída do inversor, quando esta passa do modo indutivo para o modo capacitivo, desta forma absorvendo ou fornecendo potência reativa segundo a demanda da rede (C=42 μ F no *dc-link*).



Fig. 4.10 Representação vetorial do circuito shunt no UPFC



Fig. 4.11 Compensação da tensão terminal (V₂) através da potência reativa *shunt* (Q_{sh})



Fig. 4.12 (a) Tensões terminais (V₂) e shunt do VSI-1 (V_{sh})
(b) Representação só da fase A

Verifica-se na Fig. 4.13 a transição da corrente *shunt* I_{sh} no *STATCOM* em relação à tensão de linha V₂, adiantada ou atrasada, quando esta passa do modo capacitivo para o modo indutivo. É importante notar como esta transição é quase instantânea, ocorrendo num intervalo de tempo inferior a meiociclo.



Fig. 4.13 Sub-ciclo de transição da corrente no STATCOM quando I_{sh} passa do modo capacitivo para o indutivo

O perfil de tensão na barra V₂ (além de V₃), quando esta recebe suporte pela injeção da corrente *shunt*, é ilustrado na Fig. 4.14. O circuito da Fig. 4.9(a) foi utilizado para se obter esta resposta. Observa-se a forma como a barra 2 experimenta uma queda gradual da tensão V₂ conforme se incrementa a tensão série, V_{pq}. A injeção da corrente capacitiva *shunt* é efetuada quando t=0,4 s, para incrementar o módulo de V₂ desde aproximadamente 0,93 pu até 1,0 pu.



Fig. 4.14 Perfil de tensões nas barras V2, V3

De modo geral, tanto o compensador *shunt* como o compensador série mostraram uma rápida resposta transitória (menor a ½ ciclo). Isto depende principalmente do ajuste do controlador tipo PI (*Proporcional-Integral*) e também do PLL (*Phase-Locked Loop*), implementados no programa *ATP*. Porém, deve-se observar que um *PLL* rápido pode levar, tanto no caso do *SSSC* como no caso do *STATCOM*, a uma resposta oscilatória, enquanto que um *PLL* lento pode levar a erros de compensação durante os transitórios [49].

4.4 Balanço de Potência do UPFC em Regime Permanente

Deve-se lembrar que para todos os casos simulados, utilizando as equações não lineares apresentadas previamente (item 4.3.1), o balanço de potência em regime permanente entre os conversores série e *shunt* $(P_{se} - P_{sh} = 0)$, deve ser satisfeito [64].

As Tabelas 4.3 e 4.4, mostram a referida condição de balanço de potência para diferentes valores do ângulo θ_{pq} , quando a potência reativa *shunt* injetada localmente possui inicialmente uma compensação capacitiva e posteriormente esta compensação passa a ser do tipo indutiva.

| Q _{sh} (pu) | θ_{pq} | V ₂ (pu) | I _{Linha} (pu) | P _{se} (pu) | P _{sh} (pu) |
|----------------------|---------------|---------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| | 0° | 0,9234 | 1,3910 | +0,2111 | -0,2110 |
| | 30° | 0,9505 | 1,4575 | +0,1236 | -0,1236 |
| | 60° | 0,9953 | 1,4410 | +0,0143 | -0,0142 |
| | 90° | 1,0444 | 1,3624 | -0,0862 | +0,0862 |
| -0,4 (cap.) | 120° | 1,0846 | 1,2347 | -0,1588 | +0,1588 |
| | 150° | 1,1077 | 1,0655 | -0,1909 | +0,1909 |
| | 180° | 1,1078 | 0,8776 | -0,1755 | +0,1753 |
| | 210° | 1,0850 | 0,7165 | -0,1140 | +0,1141 |
| | 240° | 1,0444 | 0,6647 | -0,0172 | +0,0172 |
| | 270° | 0,9951 | 0,7784 | +0,0947 | -0,0947 |
| | 300° | 0,9505 | 0,9987 | +0,1918 | -0,1921 |
| | 330° | 0,9232 | 1,2280 | +0,2384 | -0,2384 |

Tabela 4.3 Balanço de potência, compensação *shunt* capacitiva (V_{pq}=0,2 pu)

Tabela 4.4 Balanço de potência, compensação shunt indutiva (V_{pq}=0,2 pu)

| Q _{sh} (pu) | θ_{pq} | V ₂ (pu) | I _{Linha} (pu) | P _{se} (pu) | P _{sh} (pu) |
|----------------------|---------------|---------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| | 0° | 0,8070 | 1,2923 | +0,2412 | -0,2412 |
| | 30° | 0,8379 | 1,4479 | +0,1977 | -0,1977 |
| | 60° | 0,8886 | 1,5019 | +0,1000 | -0,1000 |
| | 90° | 0,9435 | 1,4697 | -0,0133 | +0,0134 |
| | 120° | 0,9884 | 1,3688 | -0,1115 | +0,1115 |
| 0,4 (ind.) | 150° | 1,0133 | 1,2133 | -0,1746 | +0,1746 |
| | 180° | 1,0132 | 1,0201 | -0,1918 | +0,1919 |
| | 210° | 0,9883 | 0,8176 | -0,1615 | +0,1615 |
| | 240° | 0,9435 | 0,6609 | -0,0903 | +0,0902 |
| | 270° | 0,8887 | 0,6423 | +0,0093 | -0,0093 |
| | 300° | 0,8382 | 0,8003 | +0,1184 | -0,1184 |
| | 330° | 0,8072 | 1,0523 | +0.2085 | -0,2084 |

Sem compensação: V₂⁽⁰⁾=0,966 pu, I_{Linha}⁽⁰⁾=1,0353 pu

Pode-se observar a equivalência entre ambas as potências, série e *shunt*. Como era de se esperar, para valores de $\theta_{pq}=0^{\circ}\rightarrow90^{\circ}$ e $\theta_{pq}=240^{\circ}\rightarrow360^{\circ}$, na Tabela 4.4, a compensação *shunt* indutiva reduz a tensão de linha V₂.

Esta característica do balanço de potência em regime permanente entre ambos os conversores foi também simulada (Fig. 4.15); porém, a diferença em relação aos valores da Tabela 4.4 é que nenhuma compensação reativa *shunt* foi aplicada (Q_{sh}=0). No entanto, a inserção de Q_{sh} não modifica substancialmente o gráfico mostrado pois as potências ativa e reativa no conversor *VSI-1*, são tratadas de forma separada.

Para a injeção da tensão série com ângulos de θ_{pq} = 75° e 255° (graus), a potência de intercâmbio entre os conversores é teoricamente nula (P=0), pois para estes ângulos a tensão V_{pq} encontra-se em quadratura (indutivo e capacitivo) com a corrente de linha e, portanto, o *UPFC* opera como um *SSSC* (Fig. 4.15).



Fig. 4.15 Balanço de potência em regime permanente entre o conversor *shunt* e série quando θ_{pq} varia de 0 a 360°

A resposta dos conversores mostrada na Fig. 4.16 corresponde ao resultado obtido no programa *ATP*. Em t=0,2 s, o conversor *VSI-1* passa a absorver potência ativa da linha para fornecer ao inversor *VSI-2* segundo sua demanda. Esta ação cessa em t=0,6 s, quando cada dispositivo, de modo independente, supri apenas a potência reativa necessária.



Fig. 4.16 Potência *shunt* e série para $V_{pq}=0.3$ pu e $\theta_{pq}=135^{\circ}$ (P_{se}-P_{sh}=0)

O comportamento oscilatório, presente em ambas as potências, origina-se nos dispositivos de chaveamento em conjunto com a operação do capacitor CC. Uma análise da operação do capacitor CC é apresentada a seguir.

4.5 Capacitor do Circuito do Elo em Tensão Contínua

4.5.1 Capacitor no SSSC e STATCOM

De acordo com o balanço de potência que rege um inversor do tipo *VSI* (e todos outros conversores), a potência instantânea total nos terminais de saída CA deve a todo instante ser igual à potência instantânea total nos seus terminais de entrada CC, desprezando-se as perdas nas chaves.

Pelo fato do SSSC e do STATCOM fornecerem apenas potência reativa, a potência ativa de entrada fornecida pela fonte CC, deve ser nula. Assim, também o capacitor no elo CC não influi na geração de potência reativa, pois a freqüência no circuito CC é zero. Portanto, idealmente não haveria necessidade da presença do capacitor CC no SSSC e no STATCOM. Porém, a presença do capacitor de armazenamento no elo CC, deve-se principalmente a [45], [48]:

- servir como fonte de tensão continua ao inversor possibilitando sua atuação apropriada;
- presença de potência oscilatória nos terminais do VSI e que precisa ser absorvida pelo capacitor CC, mantendo constante a tensão sobre as chaves.

A potência oscilatória, referida anteriormente, vem do fato que a tensão de saída no inversor VSI não é uma onda senoidal perfeita (devido à condição de chaveamento) e quando multiplicada pela corrente de saída do VSI que também contem harmônicos (inclusive se esta corrente for uma onda senoidal pura, vide Fig. 4.13) dá lugar a esta oscilação [4]. Desse modo, como as potências instantâneas de entrada e saída são iguais, o VSI absorve uma corrente oscilatoria do capacitor do elo CC, que apresenta uma tensão quase constante na entrada do inversor. A condição mencionada de chaveamento dos *GTO*'s contribui para o aparecimento desta potência oscilante, que depende da freqüência de chaveamento nos terminais do VSI. Este é o principal parâmetro para o dimensionamento do capacitor.

4.5.2 Capacitor CC no UPFC

A potência ativa requerida pelo inversor *VSI-2*, para produzir a tensão série, é obtida do sistema via o inversor *VSI-1*. Esta potência ativa, derivada do sistema CA, flui através do elo CC (Fig. 4.17).

Normalmente, um capacitor de tamanho relativamente pequeno é instalado no circuito CC com a finalidade principal de absorver os desequilíbrios de potência ativa transitória [7]. Em outras palavras, qualquer energia adicional absorvida pelo *VSI-1* ou *VSI-2* durante períodos transitórios, terá que ser absorvida ou fornecida pelo capacitor CC.



Fig. 4.17 Diagrama unifilar com as correntes no circuito CC

Conforme foi observado durante as simulações, o acréscimo no tamanho do capacitor contribui levemente na redução da oscilação em ambas as potências ativa e reativa, pois a redução da oscilação é função direta da freqüência de chaveamento nos VSI's. Quanto maior o numero de pulsos, menor a oscilação presente em ambas as potências. Durante o regime permanente, a potência de entrada e saída no elo CC é obtida através das seguintes expressões:

$$\mathsf{P}_{\mathsf{dc}1} = \mathsf{V}_{\mathsf{dc}}\mathsf{I}_{\mathsf{dc}1} \tag{4.16}$$

$$\mathsf{P}_{\mathsf{dc}2} = \mathsf{V}_{\mathsf{dc}}\mathsf{I}_{\mathsf{dc}2}$$

Assumindo que ambos os conversores tipo VSI são ideais, obtemos:

$$\mathsf{P}_{1} = \mathsf{P}_{\mathsf{dc}1} \tag{4.17}$$

$$P_2 = P_{dc2}$$

Para a condição de regime permanente o balanço de potência ($P_1 - P_2 = 0$), tem que ser rigorosamente obedecido pelo UPFC, então:

$$C\frac{dv_{dc}}{dt} = 0$$
(4.18)

Contrariamente, durante a operação em regime transitório o comportamento do elo CC será regido por (3.6).

$$i_{dc} = i_{dc1} - i_{dc2}$$
 (4.19)

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc}$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = (i_{dc1} - i_{dc2})$$
(4.20)

A variação da tensão no elo CC faz com que as correntes i_{dc1} e i_{dc2} também variem, estabelecendo uma troca de energia entre o capacitor e o sistema CA [45], [48].

R.L. Vasquez-Arnez - Tese Doutorado - USP

dt

A tensão no elo CC deve ser controlada com auxilio da potência ativa derivada da rede e portanto, quando o inversor *shunt* fornece potência ativa ao elo CC, este se comporta exatamente como um retificador. A elevada freqüência de chaveamento nos conversores (comparada com o caso de inversores com comutação natural), faz com que o processo de carga e descarga do capacitor CC se mantenha quase invariável (V_{dc} na Fig. 5.4b, Capítulo 5). Esta é outra das razões para o uso de um capacitor de tamanho relativamente pequeno.

Porém, a condição de reduzir o capacitor de forma exagerada tem uma desvantagem, pois o *ripple* no elo CC passa a ser muito sensível em relação à variação de potência ativa derivada pelo conversor *shunt*. Supondo, por exemplo, que devido a um erro se perca o controle sobre esta potência ativa *shunt* (cujo efeito produza um sobrefluxo desta potência em direção ao elo CC), a tensão no elo CC subirá com uma taxa (dv/dt) que será tanto mais rápida quanto menor for o capacitor. Um estudo referente ao comportamento e análise do capacitor CC aplicado a filtros ativos e equipamentos *FACTS*, assim como o seu dimensionamento, pode ser encontrado em [4], [36], [48] e [49].

Capítulo 5

Resposta do UPFC no Controle da Potência Transmissível e sua Interação com a Rede

5.1 Introdução

Atualmente, existe uma grande necessidade de se elevar a capacidade de intercâmbio em corredores de energia, em muitos casos utilizando linhas de transmissão já existentes. É necessário portanto elevar e ao mesmo tempo controlar o fluxo de potência sem comprometer ou reduzir as margens de estabilidade do sistema.

Em determinadas condições, quando o sistema opera próximo de sua capacidade máxima de transmissão, a contingência de saída de uma determinada linha pode ter um efeito indesejável sobre linhas já suficientemente carregadas e sobre o sistema como um todo.

A inclusão de um *UPFC* na rede, conforme mencionado anteriormente, introduz três variáveis adicionais de controle (V_{pq} , $\theta_{pq} \in Q_{sh}$). Quanto maior o número de variáveis de controle, o problema de otimização conterá mais graus de liberdade, tornando desse modo o sistema mais flexível à otimização [66]. Geralmente, a otimização de uma rede elétrica tem o objetivo de alcançar uma solução ótima para:

- controlar a potência de transferência para uma determinada área;
- minimizar o custo de operação;
- minimizar as perdas de transmissão;
- nanter uma operação segura com uma mínima alteração dos ajustes de controle.

A determinação da máxima transferência de potência possível em um sistema interligado envolve vários aspectos, a saber:

- A capacidade de carregamento de linhas de transmissão, afetada por alguns fatores limitantes como o limite térmico, o limite de queda de tensão e o limite de estabilidade.
- O estudo de contingências [66]. Deve-se considerar que, durante a ocorrência de perturbações, alguns dos elementos no sistema que não foram afetados podem operar em condições próximas do seu limite térmico ou de sobrecarga.
- A topologia da rede, que limita a capacidade de transmissão em operação normal. Este fator inclui a existência ou não de qualquer tipo de compensação de linha.

Neste capítulo será analisada a versatilidade deste dispositivo, tornando possível o referido controle do fluxo de potência. No sentido de esclarecer tais propriedades, será inicialmente utilizado um sistema reduzido, que possa evidenciar o comportamento do *UPFC* no redirecionamento de fluxos.

5.2 Versatilidade do UPFC em Modificar a Potência Transmissível

No caso de se utilizar a configuração de 24 pulsos tipo *QHN*, há tipicamente a necessidade de se implementar filtros passivos nos terminais de saída do inversor para reduzir o conteúdo harmônico das formas de onda da tensão. Estas tensões e correntes, com apropriada filtragem de harmônicos, ou quando uma configuração de 48 pulsos é utilizada [57], podem ser modeladas com boa precisão como fontes de tensão que operam na freqüência fundamental [56]. As perdas nos inversores devem ser adequadamente representadas, especialmente naqueles circuitos que utilizam dispositivos de chaveamento de elevada freqüência, tais como a técnica de controle *PWM*, o que não é o caso do presente estudo.

O modelo de *UPFC* desenvolvido neste trabalho está inicialmente associado a um sistema radial simétrico (Fig. 5.1). Este modelo permite validar a capacidade do *UPFC* quando este modifica de forma seletiva e instantânea tanto a potência ativa como a reativa [14], [54]. Os resultados foram obtidos utilizando a formulação descrita no Capítulo 4. Inicialmente será analisado o comportamento do sistema reduzido com simulações realizadas no programa *ATP*.



Fig. 5.1 Modelo unifilar do UPFC implementado

A Fig. 5.2 mostra os resultados da potência no terminal receptor (R) correspondentes ao sistema da Fig. 5.1. Pode-se observar a forma como é possível modificar exclusivamente a potência ativa, mantendo-se invariável a potência reativa (Fig 5.2a). Do mesmo modo, a variação apenas da potência reativa assim como o controle simultâneo de ambas as potências, podem ser atingidos sem dificuldade (Figs. 5.2b e 5.2c).

Os gráficos mostrados são apenas alguns casos dentro da vasta gama de operações que o *UPFC* pode executar. A variação do ângulo θ_{pq} , dá origem a um elevado número de possibilidades para o

controle das potências ativa e reativa na linha. A Fig. 5.3(b) mostra o comportamento da corrente na saída do inversor *VSI-2*. Esta corrente, devido ao fato do inversor estar conectado em série com a linha, refletirá exatamente o comportamento da corrente de linha.



Fig. 5.2 Modificação exclusiva das potências ativa e reativa (a) Potência reativa mantida invariável

- (b) Potência ativa mantida invariável
- (c) Condição quando V_{pq}=0,15 pu; θ_{pq} = 270°





(b) corrente na saída do inversor série

5.3 Comportamento da Tensão no Circuito CC

A análise correspondente ao capacitor do elo CC, quando este opera em regime transitório, foi apresentada no item 4.5 (Capítulo 4), sendo a seguir examinados aspectos complementares do comportamento deste capacitor. Se apenas potência ativa for derivada do sistema CA pelo inversor

shunt, ou seja, quando não houver compensação de potência reativa local neste inversor (*VSI-1*), a tensão do capacitor CC permanece quase constante (Fig. 5.4a).



(b) compensação série e shunt

Por outro lado, quando o conversor *shunt* simultaneamente absorve tanto potência ativa como reativa do sistema CA, a tensão no elo CC varia conforme mostrado na Fig. 5.4(b). Quando t=0,2 s o *UPFC* injeta no sistema CA a tensão V_{pq} para diminuir a potência P_R no terminal receptor. Em t=0,3 s, corrente indutiva *shunt* é absorvida da linha pelo *UPFC* diminuindo assim a tensão V_{dc} . Quando t=0,4 s, a tensão V_{pq} é novamente injetada no sistema CA, esta vez com a finalidade de aumentar a potência P_R . Finalmente, quando t=0,5 s, corrente capacitiva *shunt* é injetada no sistema CA.

Note-se o incremento na tensão CC quando esta passa do modo indutivo para o capacitivo e que, com a compensação *shunt*, a potência ativa na linha é levemente modificada enquanto que a potência reativa, embora não mostrada, é fortemente afetada.

5.4 Controle da Potência em Sistemas Interligados

Para esta análise, foi proposto um sistema simplificado equivalente de uma rede (Fig. 5.5), cuja finalidade é contribuir para a interpretação das modificações de fluxo de potência na própria linha compensada e o simultâneo controle sobre eventuais caminhos em paralelo.

Na Fig. 5.5(b), a impedância Z_1 pode representar a impedância de transferência de um sistema equivalente genérico. O controle do fluxo de potência na linha 2, e consequentemente na linha 1, pode ser realizado utilizando a análise de "balanço de potências" no *UPFC* nas coordenadas ortogonais d, q. Similarmente à análise realizada no item 4.3.1 (Capítulo 4), estabelecem-se as equações do referido sistema baseadas na condição ($P_{se} - P_{sh} = 0$), ou seja,

$$\mathsf{P}_{se} = (\mathsf{V}_{p}\mathsf{I}_{2d} + \mathsf{V}_{q}\mathsf{I}_{2q}) \tag{5.1}$$

$$\mathsf{P}_{\mathsf{sh}} = (\mathsf{V}_{2\mathsf{d}}\mathsf{I}_{\mathsf{shd}} + \mathsf{V}_{2\mathsf{q}}\mathsf{I}_{\mathsf{shq}}) \tag{5.2}$$

$$\mathbf{Q}_{sh} = (\mathbf{V}_{2q}\mathbf{I}_{shd} - \mathbf{V}_{2d}\mathbf{I}_{shq})$$
(5.3)



(a) Vз V2 **I** 1 Ζ1 Z S1 Z S4 Vpq 12 Vм ls +Z Linha 2 X se E1 E4 X sh Ζ2 l sh P sh

(b)

Fig. 5.5 (a) Sistema com linhas paralelas em presença de um UPFC(b) Sistema equivalente com fontes controláveis
Também,

$$\dot{V}_{2(d,q)} = \dot{E}_{1(d,q)} - Z_{s1(d,q)} \dot{I}_{s(d,q)}$$
por outro lado,

$$\dot{I}_{s} = (\dot{I}_{1} + \dot{I}_{2} + \dot{I}_{sh})$$
(5.4)

resultando nas coordenadas d, q:

$$V_{2d} = E_{1d} - (R_{s1}I_{shd} - X_{s1}I_{shq}) - (R_{s1}I_{1d} - X_{s1}I_{1q}) - (R_{s1}I_{2d} - X_{s1}I_{2q})$$
(5.5a)

$$V_{2q} = E_{1q} - (R_{s1}I_{shq} + X_{s1}I_{shd}) - (R_{s1}I_{1q} + X_{s1}I_{1d}) - (R_{s1}I_{2q} + X_{s1}I_{2d})$$
(5.5b)

$$Z_{1(d,q)}\dot{I}_{1(d,q)} = -\dot{V}_{pq} + Z_{2(d,q)}\dot{I}_{2(d,q)}$$

$$R_{1}I_{1d} - X_{1}I_{1q} = -V_{p} + (R_{2}I_{2d} - X_{2}I_{2q})$$
(5.6a)

$$R_{1}I_{1q} + X_{1}I_{1d} = -V_{q} + (R_{2}I_{2q} + X_{2}I_{2d})$$
(5.6b)

Assim também, considerando que $Z_s = (Z_{s1} + Z_{s4})$

$$\dot{\mathsf{E}}_{1(d,q)} - \dot{\mathsf{E}}_{4(d,q)} + \dot{\mathsf{V}}_{pq} = Z_{2(d,q)}\dot{\mathsf{I}}_{2(d,q)} + Z_{s(d,q)}\dot{\mathsf{I}}_{s(d,q)}$$

$$\mathsf{E}_{1d} - \mathsf{E}_{4d} + \mathsf{V}_{p} = (\mathsf{R}_{s} + \mathsf{R}_{2})\mathsf{I}_{2d} - (X_{s} + X_{2})\mathsf{I}_{2q} + (\mathsf{R}_{s}\mathsf{I}_{1d} - X_{s}\mathsf{I}_{1q}) + (\mathsf{R}_{s}\mathsf{I}_{shd} - X_{s}\mathsf{I}_{shq})$$
(5.7a)

$$E_{1q} - E_{4q} + V_{q} = (R_{s} + R_{2})I_{2q} + (X_{s} + X_{2})I_{2d} + (R_{s}I_{1q} + X_{s}I_{1d}) + (R_{s}I_{shq} + X_{s}I_{shd})$$
(5.7b)

A componente da corrente *shunt* I_{shq} pode ser estabelecida para operar no modo capacitivo (indutivo) simplesmente especificando o sinal de Q_{sh} em (5.3). Se nas eqs. (5.5), (5.6) e (5.7) o valor das resistências forem desprezadas (R=0), então,

$$V_{2d} = E_{1d} + X_{S1} (I_{1q} + I_{2q} + I_{shq})$$
(5.8a)

$$V_{2q} = E_{1q} - X_{S1} (I_{1d} + I_{2d} + I_{shd})$$
(5.8b)

$$X_{1}I_{1q} = V_{p} + X_{2}I_{2q}$$
(5.9a)

$$X_{1}I_{1d} = -V_{q} + X_{2}I_{2d}$$
(5.9b)

$$E_{1d} - E_{4d} + V_{p} = -(X_{s} + X_{2})I_{2q} - X_{s}I_{1q} + X_{s}I_{shq}$$
(5.10a)

$$\mathsf{E}_{1q} - \mathsf{E}_{4q} + \mathsf{V}_{q} = (\mathsf{X}_{s} + \mathsf{X}_{2})\mathsf{I}_{2d} + \mathsf{X}_{s}\mathsf{I}_{1d} - \mathsf{X}_{s}\mathsf{I}_{shd}$$
(5.10b)

As eqs. (5.1), (5.2), (5.3), (5.8), (5.9) e (5.10) podem também ser resolvidas utilizando métodos numéricos iterativos. Uma vez computados os valores de $I_{1(d,q)}$, $I_{2(d,q)}$ e $V_{2(d,q)}$ o fluxo de potência em cada uma das linhas pode ser calculado utilizando as expressões (5.11a) e (5.11b).

$$S_{\text{Linha}_{1}} = \dot{V}_{2}\dot{I}_{1}^{*}$$
 (5.11a)

$$S_{\text{Linha}_2} = \dot{V}_2 \dot{I}_2^*$$
(5.11b)

A maior variação da curva correspondente à potência P₂ (Fig. 5.6a) mostra o efeito direto da tensão V_{pq} sobre a linha 2 (compensada), isto quando $X_2/X_1=1,0$. Com a mudança para $X_2/X_1=1/2$ (Fig. 5.6b) a linha 2, compensada por V_{pq} , torna-se mais flexível na sua capacidade de transmissão. Quando o valor de $X_2/X_1=2,0$ (Fig. 5.6c), a faixa de flexibilidade na transmissão de P₂ diminui.

Esse mesmo controle do fluxo de potência nas linhas $L_1 e L_2$ foi também analisado utilizando o princípio da superposição [55], no qual se utilizaram os mesmos dados do sistema considerado. Embora este método não considere com rigor certas condições internas do *UPFC*, como a presença da fonte I_{sh} no circuito da Fig. 5.5(b), os resultados obtidos, quando comparados com a análise utilizando o balanço de potências no *UPFC*, mostraram-se aceitáveis (Fig. 5.7).

Verifica-se que quanto maior o valor da relação X_2 / X_1 , menor será a transferência e o controle da potência total P. Ou seja, a injeção da tensão V_{pq} terá que ser aplicada preferencialmente sobre uma das opções seguintes:

- i) sobre a linha com menor impedância,
- ii) qualquer uma das linhas de um sistema paralelo que possuam impedância similar.

Nestas condições alcança-se uma melhor utilização do sistema completo ($P = P_1 + P_2$), com relação aos limites máximos de carregamento do sistema (Figs. 5.6a e 5.6b).

Para todos os casos simulados nas Figs. 5.6 e 5.7, a impedância total do sistema foi mantida constante, sendo a variação do fluxo de potência analisada na ausência do controle da tensão V_2 .



Fig. 5.6 Controle das potências sobre L₁ e L₂ Fig. 5.7 Controle das potências sobre L₁ e L₂ (balanço de potências no UPFC):

- (a) $X_2/X_1 = 1,0 \rightarrow (X_1 = 0,5 \text{ pu})$
- (b) $X_2/X_1 = \frac{1}{2} \rightarrow (X_1 = 0.75 \text{ pu})$
- (c) $X_2/X_1 = 2,0 \rightarrow (X_1 = 0,375 \text{ pu})$
- (princípio da superposição):
 - (a) $X_2/X_1 = 1,0 \rightarrow (X_1 = 0,5 \text{ pu})$
 - (b) $X_2/X_1 = \frac{1}{2} \rightarrow (X_1 = 0.75 \text{ pu})$
 - (c) $X_2/X_1 = 2,0 \rightarrow (X_1 = 0,375 \text{ pu})$

Para ambas figuras: E₁, E₄ =1,0 \angle 0°, -30°; V_{pq}=0,2 pu; X_{s1}=X_{s2}=j0,125 pu

Porém, o controle e suporte de V₂ sobre estas respostas não modifica substancialmente a forma das mesmas. Dependendo do modo de compensação *shunt* reativo que for aplicado ao longo dos 360° do ângulo série, a variação das curvas de potência no sistema aumentam ou diminuem de forma proporcional (vide Fig. 5.8). O fornecimento da potência reativa *shunt* será imprescindível durante os períodos de elevado carregamento com o intuito de se evitar uma queda significativa da tensão na linha.



Fig. 5.8 Variação de potências no sistema analisado tendo Q_{sh} (X₁=X₂, V_{pq}= 0,2 pu) como parâmetro

O sistema flexível da Fig. 5.5(a) também foi implementado no programa *ATP* com as linhas de transmissão e o *UPFC* fixados nas condições de $X_1=X_2$ e $V_{pq}=0,2$ pu, respectivamente.

A possibilidade de incremento na capacidade de transmissão de ambas as linhas é mostrada na Fig. 5.9(a). Neste caso a contribuição da corrente reativa injetada pelo inversor *VSI-1* foi significativa. Por outro lado, nas Figs. 5.9(c) e (d) mostra-se como a potência transmissível na linha 1 (não compensada) diminui, quando θ_{pq} =50°, e aumenta, quando θ_{pq} =230°. Nos casos (c) e (d), da Fig. 5.9, utilizou-se uma pequena corrente reativa I_{sh}. Pode-se observar a flexibilidade oferecida pelo *UPFC* para controlar o fluxo de potência nos casos analisados.



Fig. 5.9 Modificação da potência transmissível quando:

- (a) ambas potências em L₁ e L₂ são aumentadas
- (b) a potência em L_1 é mantida constante
- (c) a potência em L₁ é reduzida
- (d) a potência em L_1 é aumentada

Basicamente, a potência transmitida em cada linha do sistema paralelo é governada por uma expressão própria (item 2.3, Capitulo 2).

$$P_{1} = \frac{V_{2}V_{3}}{X_{1}} \sec \delta_{23}$$

$$P_{2} = \frac{V_{2}V_{3}}{X_{2}} \sec \delta - \frac{V_{3}V_{pq}}{X_{2}} \sec \left(\theta_{pq} + \delta_{23}\right)$$
(5.12)
(5.13)

A potência na linha 1 se altera principalmente devido à variação da tensão nos terminais. Se esta tensão, assim como os demais parâmetros em (5.12) forem mantidos constantes, a potência nesta linha não sofreria nenhuma variação. Com relação à linha 2, o controle do fluxo de potência é diretamente afetado pela tensão série injetada (5.13), e seu respectivo ângulo (θ_{pq}).

5.4.1 Análise e Comentários

Embora um melhor controle, tanto da potência nas linhas em paralelo como da tensão terminal V₂ pudesse ser realizado com a utilização de um *IPFC* (Interline Power Flow Controller), a aplicação deste dispositivo tornar-se-ia inadequada no caso em que a linha não compensada estivesse representando um número considerável de outras linhas paralelas, ou ainda se a mesma representasse o equivalente de um sistema genérico; a isto soma-se o maior custo deste equipamento com relação ao do *UPFC*. Desse modo, na presente análise, estuda-se o efeito do *UPFC* para uma efetiva utilização das linhas em paralelo, assim como avaliam-se as condições que favorecem o controle de potência nestas linhas.







(b)

Fig. 5.10 Efeito do ângulo θ_{pq} sobre as linhas 1 e 2 para: (a) $X_1 = 2X_2$ ($X_{s1}=X_{s4}=j0,15$ pu; $X_2=j0,30$ pu) (b) $X_1 = \frac{1}{2} X_2$ ($X_{s1}=X_{s4}=j0,08$ pu; $X_2=j0,51$ pu)

O controle de potência na linha não compensada P₁, em relação ao ângulo θ_{pq} , é influenciado pelo valor da impedância de curto-circuito existente em ambos os sistemas CA. Este grau de controle traduz-se em uma variação maior ou menor das curvas correspondentes a P₁ ou P₂. O comportamento das potências no circuito da Fig. 5.5, quando os sistemas CA equivalentes possuem uma potência de curto-circuito (S_{CC}) relativamente baixa ou elevada, é mostrado na Fig. 5.10. Similarmente aos casos anteriores, a impedância total do sistema foi mantida constante.

Nota-se a menor faixa de variação, portanto um menor controle de potência, da curva correspondente a P_1 para casos quando os sistemas equivalentes CA apresentam potências de curto-circuito (S_{CC}) elevadas (linha azul continua), independentemente da relação de reatâncias das linhas (X_2/X_1).

Por outro lado, quando os sistemas CA possuem potências de curto-circuito relativamente baixas (valores maiores de X_{s1} e X_{s2}), o controle sobre a potência na linha não compensada (P₁) é mais efetivo (linha azul tracejada).

5.5 Viabilidade de Conexão do UPFC a Terciário de Transformadores

Alguns dos transformadores dos sistemas interligados na atualidade podem estar submetidos a sobrecargas, existindo a necessidade de redirecionar o fluxo de potência para outras linhas que podem apresentar ociosidade em determinados períodos. Neste contexto, a implementação de um *UPFC* pode-se constituir em uma boa alternativa para realizar o controle do fluxo de um modo bem flexível.

A regulação da tensão terminal no transformador é, normalmente, realizada através do controle dos *taps*, porém, a resposta do comutador automático é relativamente lenta e o seu uso freqüente podese traduzir na necessidade maior de manutenção. Segundo relatórios de operação e manutenção de transformadores, sabe-se que as faltas associadas aos *taps* encontram-se entre as principais causas que afetam o seu desempenho. É de conhecimento geral que períodos de sobrecarga prolongados deterioram o óleo do transformador e que o incremento excessivo na temperatura interna acelera a formação de vapor de água e ácidos.

Neste trabalho propõe-se que a alimentação do inversor *shunt* do *UPFC* seja efetuada através do enrolamento terciário do autotransformador, desta forma fazendo com que a regulação da tensão seja rápida e contínua (Fig. 5.11). O transformador auxiliar *shunt* será necessário apenas para distinguir a tensão senoidal do enrolamento terciário da tensão quase-senoidal gerada pelo inversor *shunt* (*VSI-1*), desta forma facilitando ao *PLL* o acompanhamento da tensão senoidal de referência.

Deve-se assinalar que é possível a utilização de uma indutância de valor apropriado em substituição ao transformador auxiliar. A injeção de potência reativa através do terciário do transformador para o suporte da tensão de linha mostrou bons resultados nas simulações [72].



Fig. 5.11 Conexão de transformadores em paralelo com o UPFC (TAS : Transformador Auxiliar Shunt)

Tomando-se um caso mais geral, com dois transformadores operando em paralelo, o esquema proposto na Fig. 5.11 tem como finalidade oferecer ao sistema em análise uma elevada flexibilidade operativa, considerando a possibilidade de ocorrência de falhas tanto no transformador T_1 , como no T_2 . Aliás, se por algum motivo um dos inversores que fazem parte do *UPFC* estiver fora de operação, o inversor disponível pode operar tanto como um *SSSC* ou como um *STATCOM*, alimentado por quaisquer dos transformadores. A funcionalidade do esquema proposto pode ser sintetizada da seguinte forma:

| i) | UPFC via T_1 | : | chaves | a-b-c-e-f-i | = | ON |
|-------|-----------------------------------|---|--------|---------------|---|----|
| ii) | $UPFC$ via T_2 | : | chaves | k-j-d-e-f-i | = | ON |
| iii) | STATCOM (VSI-1) via T_1 | : | chaves | a-b-c | = | ON |
| iv) | STATCOM (VSI-1) via T_2 | : | chaves | k-j-d | = | ON |
| v) | STATCOM(VSI-2) via T ₁ | : | chaves | a-b-g-f | = | ON |
| vi) | $STATCOM(VSI-2)$ via T_2 | : | chaves | k-j-h-f | = | ON |
| vii) | SSSC (VSI-1) | : | chaves | d-h-i (c-g-i) | = | ON |
| viii) | SSSC (VSI-2) | : | chaves | f-i | = | ON |
| | | | | | | |

O esquema proposto aumenta a disponibilidade operativa do *UPFC* e consequentemente a flexibilidade do sistema, pois, utilizam-se somente chaves que operam em 13,8 kV. Economicamente, esse aspecto pode ser significativo para a implementação prática em um sistema de potência real.

É evidente que, devido às mudanças nas condições operativas do sistema, por exemplo, durante os períodos de elevação no carregamento dos transformadores, as tensões terminais V_1 e V_2 serão afetadas, com a conseqüente redução das mesmas (Fig. 5.12a). O suporte de tensão oferecido pela corrente *shunt* capacitiva para estas condições operativas, pode ser observado na Fig. 5.12(b). Na Fig. 5.12(c) mostram-se as tensões no terciário do transformador T₁ e na saída do inversor *VSI-1*, compensadas através da corrente *shunt* capacitiva.

A atuação dinâmica e rápida no controle da potência no sistema considerado (subestação de 230/138 kV) pode ser observada na Fig. 5.13. De maneira análoga aos resultados obtidos no item 5.2, a tensão série inserida no esquema da Fig. 5.11 produz um efeito significativo na corrente de linha e consequentemente na potência transferida, desta forma validando a proposta apresentada.







(b)



Fig. 5.12 Controle da tensão nos transformadores e seus perfis de tensão (a) Tensões V_1 e V_2 , sem compensação *shunt*

- (b) Tensões V₁ e V₂, compensadas
- (c) Tensões no terciário (Vt) e na saída do conversor (VSI-1)



Fig. 5.13 Controle sobre a potência dos transformadores
(a) Redução e incremento da potência sobre a linha
(b) Comportamento de I Linha e de V_{pq}

Entretanto, o enrolamento terciário de um autotransformador poderia não ter capacidade suficiente para atender aos requerimentos do conversor série, se este for apenas projetado para circulação de correntes harmônicas ou alimentação de circuitos auxiliares. Freqüentemente, o enrolamento terciário conectado em delta é projetado de forma a poder alimentar determinadas cargas auxiliares, apresentando uma capacidade da ordem de 30% a 35% da potência dos enrolamentos de alta e media tensão.

Para um caso ilustrativo analisado, obtiveram-se determinadas regiões, que serão chamadas áreas não operativas, as quais devem-se principalmente às restrições relacionadas com os limites operativos das tensões $V_2 e V_3$ (que não deverão ser ultrapassados) assim como, embora num grau menor, às restrições na potência do enrolamento terciário. O efeito destas restrições produz uma degradação na região operativa, originalmente circular, correspondente à tensão V_{pq} (vide Fig. 2.1d).

Na Fig. 5.14, onde foram representados o módulo da tensão série (V_{pq}) e seu ângulo de fase (θ_{pq}), pode-se observar esta característica. Com a elevação da magnitude de V_{pq} , segundo a tendência das curvas que delimitam ambas as regiões e se nenhum outro parâmetro no sistema for alterado, as áreas não operativas serão mais significativas.

Um efeito similar ocorrerá nos casos quando o enrolamento terciário não estiver suficientemente dimensionado para transmitir potência ao conversor série, traduzindo-se em uma potência menor do *UPFC*, o que poderia inviabilizar o projeto. Por outro lado, a disponibilidade de uma maior potência neste enrolamento diminui as referidas áreas (Fig. 5.14b).



Fig. 5.14 Áreas não operativas de V_{pq} (S_{Nominal do transformador} = 100 MVA): (a) S_{UPFC Nominal} = 35 MVA (b) S_{UPFC Nominal} = 45 MVA

Os pontos mínimos das curvas que delimitam as áreas não operativas devem-se, no caso analisado, principalmente à restrição $0,9 \le (V_2, V_3) \le 1,1$ pu, e que aproximadamente correspondem a valores do ângulo θ_{pq} para os quais a compensação do *UPFC* tem um efeito predominante sobre a potência reativa da linha (vide Fig. 2.8b, no Capítulo 2). Nestes casos a tensão V_{pq} está aproximadamente em fase com as tensões V_2 e V_3 , que não podem superar os limites anteriores. Para estas condições, seria mais razoável que o arranjo apresentado na Fig. 5.11 operasse no modo de *STATCOM*, controlando estas tensões (V_2 , V_3) diretamente.

5.6 Fluxo de Potência e Estudo de Caso

No Sistema Interligado Nacional (SIN), em que a energia produzida por um grande conjunto de usinas hidrelétricas é complementada por geração térmica, tem-se uma superposição das restrições operativas de cada usina, das características de cada bacia, dos limites decorrentes do aproveitamento energético da diversidade hidrológica entre as diferentes bacias, além das restrições da rede de transmissão que interliga as bacias e os centros de consumo de energia.

De um modo mais especifico, as restrições da rede de transmissão no SIN, referem-se a:

- a) restrições de carregamento de transformadores e outros equipamentos nas subestações,
- b) restrições associadas ao nível mínimo de armazenamento nas UHEs,
- c) máximas transferências de potência entre os subsistemas,
- restrições para atendimento aos critérios de confiabilidade e segurança da rede, os quais deverão também ser considerados na programação e despacho eletroenergético.

Os fatores acima nomeados são analisados de modo dinâmico, adequando-se às diferentes condições de carga e disponibilidade dos recursos de geração, levando em conta a situação específica da rede de transmissão em cada caso, o que afeta a capacidade de transporte de energia entre subsistemas e áreas elétricas.

Nesta seção, será feita uma aplicação do sistema proposto em uma parcela do SIN, mais especificamente na região SUDESTE, principalmente devido às necessidades de expansão observadas neste sistema nos anos recentes.

Um certo número de conexões presentes nessa região, constitui-se de auto-transformadores que operam com tensões de 230/138/13,8 kV. O circuito terciário do autotransformador, com ligação em delta, pode ser utilizado para o fornecimento de energia a circuitos auxiliares, tendo os seus terminais disponíveis.

Durante os períodos de carga pesada os comutadores podem ser acionados para compensar as quedas de tensão. De outro lado, durante os períodos de carga leve, esta parte do sistema pode-se encontrar ociosa e com elevadas tensões em ambos os lados dos transformadores.

5.6.1 Utilização do UPFC para o Controle do Fluxo de Potência

Com a implementação apropriada dos dispositivos *FACTS*, especificamente do *UPFC*, em um programa de fluxo de potência, é possível avaliar as principais grandezas de um determinado sistema, assim como o seu desempenho sob condições de controle. Este controle refere-se à redução do fluxo em linhas sobrecarregadas, menores perdas na transmissão e outras vantagens inerentes ao sistema. Geralmente, a sobrecarga nos sistemas de transmissão não é recomendável, exceto por períodos bem curtos, devido aos seus efeitos nocivos bem conhecidos.

A seguir será abordada a inclusão do *UPFC* em um programa de fluxo de potência. Em um primeiro estágio será modelado o inversor, com fonte de tensão (*VSI*), que é conectado em série com a linha e para isto utiliza-se o modelo denominado de injeção de potência [51]. Posteriormente, o referido modelo será implementado para análise de fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson.

5.6.2 Modelo de Injeção de Potência do UPFC

Assumindo que a tensão série injetada (V_{pq}), situa-se entre os nós *i* e *j* do sistema na Fig. 5.15, esta pode ser modelada como uma tensão série ideal, com a respectiva reatância (X_{se}) do transformador de acoplamento. Nesta figura, V_{pq} representa a fonte de tensão ideal, à qual se fez referência, enquanto que V_i pode ser vista como uma tensão fictícia fase-terra entre a tensão V_{pq} e a reatância série.



Fig. 5.15 Modelo de VSI conectado em série

$$\dot{V}_i' = \dot{V}_{pq} + \dot{V}_i$$
(5.14)

onde,

$$\begin{split} \dot{V}_{pq} &= k V_i e^{j \theta_{pq}} \eqno(5.15) \\ 0 &\leq k \leq k^{max} \eqno(5.16) \\ 0 &\leq \theta_{pq} \leq 2\pi \eqno(5.16) \\ modifica a posição angular de V_{pq} \end{split}$$

O diagrama de fasores, correspondente ao circuito da Fig. 5.15, pode ser representado segundo a Fig. 5.16.



Fig. 5.16 Diagrama vetorial do VSI

O modelo de injeção é obtido substituindo a fonte de tensão \dot{V}_{pq} por uma fonte de corrente $\dot{I}_{pq} = -jb_{se}\dot{V}_{pq}$, em paralelo com a reatância X_{se}, segundo a representação da Fig. 5.17.



Fig. 5.17 Fonte de corrente em série equivalente a V_{pq}

A fonte de corrente I_{pq} mostrada acima pode ser representada pelas potências injetadas $S_{pq_i} e S_{pq_j}$ nas barras *i* e *j*, respectivamente.

$$S_{pq_{i}} = \dot{V}_{i} \left(-\dot{I}_{pq} \right)^{*}$$
 (5.16)

$$S_{pq_{j}} = \dot{V}_{j} (\dot{J}_{pq})^{*}$$
 (5.17)

Ou seja,

$$S_{pq_{i}} = \dot{V}_{i} [jb_{se} (kV_{i}e^{j\theta_{pq}})]^{*}$$

$$S_{pq_{i}} = \dot{V}_{i} [jb_{se} kV_{i} (\cos \theta_{pq} + j \sin \theta_{pq})]^{*}$$

$$S_{pq_{i}} = -b_{se} kV_{i}^{2} \sin \theta_{pq} - jb_{se} kV_{i}^{2} \cos \theta_{pq}$$
(5.18)

Analogamente para S_{pq_j} , chamando $\theta_{ij} = (\theta_i - \theta_j)$

$$S_{pq_{j}} = \dot{V}_{j} \left[-jb_{se} \left(kV_{i}e^{j\theta_{pq}} \right) \right]^{t}$$

$$S_{pq_{j}} = \dot{V}_{j} \left[-jb_{se} kV_{i} \left(\cos \theta_{pq} + j \sin \theta_{pq} \right) \right]^{t}$$

$$S_{pq_{j}} = b_{se} kV_{i}V_{j} \sin \left(\theta_{ij} + \theta_{pq} \right) + jb_{se} kV_{i}V_{j} \cos \left(\theta_{ij} + \theta_{pq} \right)$$
(5.19)

Tanto a equação (5.18) assim como a (5.19) constituem o modelo de injeção de um inversor tipo *VSI* conectado em série na linha, que pode ser representado como duas cargas dependentes (Fig. 5.18a). Se as perdas em ambos inversores são desprezadas, segundo a formulação do Capítulo 4, temos:

$$\mathsf{P}_{\mathsf{pq}} - \mathsf{P}_{\mathsf{sh}} = 0 \tag{5.20}$$

onde:

P_{pq}: Potência série (P_{se})

As potências ativa e reativa, injetadas pelo conversor VSI-2, podem ser obtidas através de:

$$S_{pq} = \dot{V}_{pq}\dot{I}_{jj}^* = kV_i e^{j\theta_{pq}} \left(\frac{\dot{V}_i' - \dot{V}_j}{jX_{se}} \right)$$
(5.21)

considerando (5.21) e (5.15),

$$S_{pq} = kV_{i}(\cos\theta_{pq} + j \sin\theta_{pq}) \left[\frac{k\dot{V}_{i}(\cos\theta_{pq} + j \sin\theta_{pq}) + \dot{V}_{i} - \dot{V}_{j}}{jX_{se}} \right]^{2}$$

Manipulando as expressões anteriores, obtém-se:

$$S_{pq} = -kb_{se}V_i^2 \sin \theta_{pq} + kb_{se}V_iV_j \sin(\theta_{ij} + \theta_{pq}) + j[kb_{se}V_i^2(k + \cos \theta_{pq}) - kb_{se}V_iV_j \cos(\theta_{ij} + \theta_{pq})]$$

Ou seja,

$$P_{pq} = -kb_{se}V_{i}^{2} \operatorname{sen} \theta_{pq} + kb_{se}V_{i}V_{j} \operatorname{sen} (\theta_{ij} + \theta_{pq})$$
(5.22)

$$Q_{pq} = kb_{se}V_{i}^{2}(k + \cos\theta_{pq}) - kb_{se}V_{i}V_{j}\cos(\theta_{ij} + \theta_{pq})$$
(5.23)

Nesta altura, deve-se lembrar que o inversor *VSI-2* realiza a função principal dentro do *UPFC* e que a tensão V_{pq} injetada é independente da corrente na linha. A potência reativa absorvida ou fornecida ao sistema CA pode ser controlada de maneira independente através do compensador *shunt* e pode ser modelada de forma separada. Devido às razões anteriores, será assumido inicialmente que a potência reativa fornecida ou absorvida pelo inversor *shunt* é nula ($Q_{sh}=0$), com o propósito de simplificar o desenvolvimento das equações, muito embora a inclusão desta potência seja uma tarefa simples, podendo-se facilmente incluir esta injeção de reativos no controle do fluxo de potência do sistema [65], (vide Fig. 5.18b). Considerando a igualdade estabelecida em (5.20), toda vez que a potência ativa P_{pq} for injetada no sistema, através do inversor *VSI-2*, esta terá que ser fornecida pelo conversor *shunt* através do elo CC. Portanto, adicionando-se ao nó *i*, na equação (5.18), uma potência equivalente a ($P_{sh} + j0$), e sabendo que $P_{pq} = P_{sh}$, então, $P_{pq_i} = kb_{se} V_i^2 \operatorname{sen} \theta_{pq} + P_{sh}$

Utilizando (5.22) na ultima expressão,

$$\mathsf{P}_{\mathsf{pq}_{i}} = \mathsf{kb}_{\mathsf{se}} \mathsf{V}_{\mathsf{i}} \mathsf{V}_{\mathsf{j}} \operatorname{sen} \left(\theta_{\mathsf{ij}} + \theta_{\mathsf{pq}} \right)$$

Portanto, o modelo de injeção do *UPFC* será regido pelas equações (5.24) e (5.25) correspondentes à Fig. 5.18(a):

Potência injetada ao nó *i*,

$$P_{pq_{i}} = kb_{se} V_{i} V_{j} \operatorname{sen} \left(\theta_{ij} + \theta_{pq}\right)$$

$$Q_{pq_{i}} = kb_{se} V_{i}^{2} \cos \theta_{pq}$$
(5.24)

Potência injetada ao nó j,

$$P_{pq_{j}} = -kb_{se} V_{i} V_{j} \operatorname{sen} \left(\theta_{ji} + \theta_{pq} \right)$$

$$Q_{pq_{j}} = -kb_{se} V_{i} V_{j} \cos \left(\theta_{ij} + \theta_{pq} \right)$$
(5.25)



(b) com Q_{sh}

Se, como anteriormente estabelecido, o *UPFC* estiver situado entre os nós *i* e *j* de um sistema de potência, a matriz de admitâncias da rede terá que contemplar a admitância do compensador, $Y_{se} = \frac{1}{jX_{se}}$ (Fig. 5.18a). Da mesma forma, a matriz Jacobiana terá que ser modificada, incluindo as

potências de injeção. Considerando a expressão matricial linearizada (5.26) utilizada nos modelos de fluxo de potência:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathsf{P} \\ \Delta \mathsf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathsf{H} & \mathsf{N} \\ \mathsf{J} & \mathsf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta \mathsf{V}}{\mathsf{V}} \end{bmatrix}$$
(5.26)

A matriz Jacobiana, terá os elementos relativos aos nós *i* e *j* modificados pelas potências de injeção, conforme indicado em (5.27), onde o sobrescrito '*o*' denota os elementos da matriz Jacobiana sem *UPFC* [51].

$$Jac = \begin{bmatrix} H_{(i,i)} = H_{(i,i)}^{\circ} - Q_{pq_{-}j} & N_{(i,i)} = N_{(i,i)}^{\circ} - P_{pq_{-}j} \\ H_{(i,j)} = H_{(i,j)}^{\circ} + Q_{pq_{-}j} & N_{(i,j)} = N_{(i,j)}^{\circ} - P_{pq_{-}j} \\ H_{(j,i)} = H_{(j,i)}^{\circ} + Q_{pq_{-}j} & N_{(j,i)} = N_{(j,i)}^{\circ} + P_{pq_{-}j} \\ H_{(j,i)} = H_{(j,j)}^{\circ} - Q_{pq_{-}j} & N_{(j,j)} = N_{(j,j)}^{\circ} + P_{pq_{-}j} \\ J_{(i,i)} = J_{(i,i)}^{\circ} & L_{(i,i)} = L_{(i,i)}^{\circ} + 2Q_{pq_{-}i} \\ J_{(i,j)} = J_{(i,j)}^{\circ} & L_{(i,j)} = L_{(i,j)}^{\circ} + Q_{pq_{-}j} \\ J_{(j,j)} = J_{(j,j)}^{\circ} + P_{pq_{-}j} & L_{(j,j)} = L_{(j,j)}^{\circ} + Q_{pq_{-}j} \end{bmatrix}$$

$$(5.27)$$

5.6.3 Fluxo de Potência

O modelo de injeção para freqüência fundamental apresentado no item 5.6.2, foi implementado em um programa de fluxo de potência. Uma parte correspondente à rede de 230/138 kV do SIN, foi devidamente isolada para se avaliar como o UPFC é capaz de modificar o fluxo de potência, uma vez inserido dentro do sistema. As cargas e gerações equivalentes da rede mencionada foram obtidas dos arquivos disponíveis no formato ANAREDE (programa analisador de redes desenvolvido pelo CEPEL)

Na ausência de compensação no sistema, o programa de fluxo de potência converge tipicamente com poucas iterações (ate 6), dependendo do valor de tolerância especificado. Por outro lado, quando a rede está compensada a convergência do programa pode ser atingida em um número de iterações igual ou maior ao caso anterior. O número de iterações para a convergência depende principalmente da magnitude da tensão série especificada e de seu correspondente ângulo de fase.

No caso de alguns limites serem violados, como por exemplo quando se estabelecem valores muito altos da tensão série ou da potência reativa *shunt* injetada ou absorvida, o número de iterações para se alcançar a convergência aumenta consideravelmente, ou até mesmo não alcançando a convergência.

Para a inserção do *UPFC* dentro da rede considerada, criaram-se dois nós fictícios designados como $f_1 e f_2$. A admitância série do *UPFC* está presente entre estes nós considerados. A inserção da barra fictícia f_1 teve a finalidade principal de facilitar a verificação da igualdade da potência de entrada no *UPFC* com a de saída ($P_{f_1} - P_{f_2} = 0$). Nos resultados apresentados no item 5.6.4, os valores especificados nas barras de carga e geração foram mantidos constantes.

5.6.4 Análise de Resultados

Caso I. Fluxo de potência na rede considerada, sem compensação.

A Fig. 5.19, mostra os resultados do fluxo de potência na rede de teste utilizada na ausência de compensação com o *UPFC*. A Tabela 5.1 apresenta os valores das tensões calculadas nos nós do sistema considerado, bem como os correspondentes valores angulares. Com relação ao disjuntor entre as barras 3 e 4 da Fig. 5.19, este permanece normalmente aberto, mas dependendo das condições operativas dos transformadores, o mesmo pode estar fechado.

| | | Barra | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------|--------|----------|----------|---------|---------|----------|---------|----------|--|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| V (pu) | 1.0003 | 0.9886 | 0.9893 | 0.9893 | 0.9452 | 0.9478 | 0.9084 | 0.9285 | 0.9347 | | | | |
| δ (graus) | -1.3132 | -7.738 | -11.5311 | -11.5311 | -23.397 | -27.845 | -25.5028 | -24.229 | -19.2124 | | | | |

Tabela 5.1 Tensões Nodais sem UPFC (Caso I)

| | | Barra | | | | | | | | | | |
|-----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--|--|--|
| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | |
| V (pu) | 0.9587 | 0.9725 | 0.9396 | 1.0039 | 0.9984 | 1.0121 | 0.9631 | 0.9698 | 1.0600 | | | |
| δ (graus) | -13.395 | -10.52 | -19.833 | -3.4008 | -6.0810 | -4.2759 | -18.402 | -13.139 | 0.0000 | | | |

Caso II. Incremento da potência transmissível entre as barras 3–5, e re-direcionamento de fluxos.

A razão para se escolher a linha compreendida entre as barras 3-5, para a implementação de um *UPFC* é admitir hipoteticamente que os transformadores das barras 2, 3 e 4 apresentam períodos de operação com sobrecarga e períodos com carga leve, sendo desejável portanto, um controle do fluxo nas referidas linhas. Por outro lado, a existência de uma linha em paralelo dificulta a ação de um único *UPFC*. O menor nível de tensão deste circuito (138kV) é um outro fator que determina sua escolha, pois, isto se traduz em um menor nível do isolamento necessário para o transformador de acoplamento em série.

Na Fig. 5.20, pode-se notar o redirecionamento de fluxos de potência como resultado da compensação realizada pelo *UPFC*. Observa-se o aumento da potência ativa na linha situada entre as barras 3 e 7 (compensada). A Tabela 5.2 mostra os valores das tensões calculadas nos nós do sistema, assim como os seus correspondentes ângulos. O valor da tensão computada na barra f_2 corresponde à tensão na barra 3 mais a tensão série injetada na linha, que poderia ser melhor controlado com o efeito de I_{shunt}, não utilizado neste caso.

Tabela 5.2 Tensões Nodais com UPFC (Caso II)

| | | Barra | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|---------|---------|--------|----------------|---------|---------|----------|--------|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | f_1 | f ₂ | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| V (pu) | 1.0014 | 0.9897 | 0.9532 | 1.0025 | 0.9531 | 1.1751 | 0.9985 | 1.0012 | 0.9584 | 0.9622 | | | |
| δ (graus) | -1.470 | -7.881 | -13.643 | -11.129 | -13.64 | -10.2249 | -21.506 | -25.492 | -23.5315 | -22.78 | | | |

| -1.470 | -7.001 | -13.043 | -11.129 | -13.04 | -10.2249 | -21.500 | -25.492 | -23.5315 | |
|--------|--------|---------|---------|--------|----------|---------|---------|----------|---|
| | | | | | | | | | 1 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | Barra | | | | | Ĩ |

| | | Barra | | | | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| V (pu) | 0.9533 | 0.9734 | 0.9805 | 0.9812 | 1.0058 | 1.0003 | 1.0156 | 0.9817 | 0.9884 | 1.0600 | |
| δ (graus) | -18.58 | -13.11 | -10.47 | -18.68 | -3.502 | -6.1726 | -4.2752 | -17.816 | -12.750 | 0.0000 | |

Caso III. Redução da potência transmissível na linha considerada e re-direcionamento de fluxos.

No caso em que os transformadores de 230/138 kV situados entre as barras 2, 3 e 4 estejam operando em sobrecarga, embora seja possível reduzir o fluxo de carga destas linhas para um outro circuito do sistema (barras *2-13*), este efeito não é muito expressivo (Fig. 5.21). As novas tensões obtidas no programa para a rede em estudo são apresentadas na Tabela 5.3.

| | | Barra | | | | | | | | | | |
|-----------|---------|--------|---------|---------|----------------|----------------|---------|----------|---------|--------|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | f ₁ | f ₂ | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| V (pu) | 0.9985 | 0.9869 | 0.9840 | 0.9880 | 0.9840 | 0.9883 | 0.9448 | 0.9473 | 0.9077 | 0.9273 | | |
| δ (graus) | -1.2324 | -7.680 | -10.991 | -11.619 | -10.994 | -13.751 | -23.970 | -28.4232 | -26.018 | -24.56 | | |

| Tabela 5.3 | Tensões | Nodais com | UPFC | (Caso III) | |
|------------|---------|------------|------|------------|--|
|------------|---------|------------|------|------------|--|

| | | Barra | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| V (pu) | 0.9330 | 0.9569 | 0.9707 | 0.9380 | 1.0025 | 0.9970 | 1.0112 | 0.9614 | 0.9680 | 1.0600 | |
| δ (graus) | -19.36 | -13.49 | -10.54 | -20.24 | -3.353 | -6.0416 | -4.2758 | -18.546 | -13.264 | 0.0000 | |
| | | | | | | | | | | | |

Nos resultados mostrados a seguir, as cores amarelo e vermelho das flechas identificam o aumento e a diminuição do fluxo de potência, respectivamente, em relação ao caso da rede sem compensação.



Fig. 5.19 Fluxo de potência na rede considerada, sem compensação (rede de 230/138 kV, MVA_{base}=100)



Fig. 5.20 Incremento na potência transmissível entre as barras 3-7, rede compensada (k=0,3 e θ_{pq} =30°)



Fig. 5.21 Redução da potência transmissível entre as barras 3-7, rede compensada

5.6.5 Implementação de Dois UPFCs no Sistema Analisado

Em outro teste realizado, observou-se a possibilidade de se instalar um segundo *UPFC* na linha situada entre as barras 9 e 10 de 138 kV, conforme mostrado na Fig. 5.22.



Fig. 5.22 Conexão de dois dispositivos UPFCs, no sistema considerado



Fig. 5.23 Controle da potência transmissível entre as barras *3a-3b*, rede compensada (*UPFC-1*)

Para esta condição de operação, devido à presença das linhas em paralelo saindo das barras *3a* e *3b*, apresenta-se um esquema modificado do circuito pertencente ao *UPFC-1* (Fig. 5.23), que possa tornar mais significativo o controle do fluxo de potência. Esta opção também apresenta características interessantes para a compensação destas linhas, pois diferentes estados de operação do *UPFC-1* podem ser obtidos através da simples combinação na posição das chaves na Fig. 5.23. As chaves *1*' e *'m'* oferecem a possibilidade de ao mesmo tempo injetar a tensão série nas duas linhas em paralelo ou, de se compensar apenas uma delas, por exemplo durante os períodos de manutenção de quaisquer uma das linhas, de modo similar à configuração apresentada na Fig. 5.20. Observa-se que através da utilização de apenas um inversor série consegue-se compensar ambas as linhas (Fig. 5.24).



Fig. 5.24 Controle de potência simultâneo sobre L₁ e L₂

Com relação as chaves de *by-pass* dos transformadores em série, estas encontram-se normalmente abertas, entretanto, podem ser fechadas para isolar estes transformadores durante os períodos de manutenção. Um dado importante do arranjo proposto é que, através do mesmo, evita-se a necessidade de um segundo inversor série conectado à segunda linha (configuração de um *IPFC*) e portanto consegue-se reduzir os custos de maneira significativa. Nas Figs. 5.25 e 5.26 apresentam-se os resultados correspondentes à rede mostrada na Fig. 5.22 para o caso quando foram incluídos dois dispositivos *UPFCs*. No Caso A, os dispositivos foram fixados de forma que o *UPFC-1*, com dois transformadores série, incremente o fluxo de potência na linha 3-4 e o *UPFC-2*, situado na linha entre as barras 9-10, proporcione uma leve redução do fluxo na linha a qual está conectado (Fig. 5.25).

O efeito principal estudado neste caso é o do *UPFC-1*, sendo o efeito do *UPFC-2* propositalmente apenas marginal, mostrando a possibilidade de se incluírem vários *UPFCs*, simultaneamente, no programa desenvolvido. No caso B (Fig. 5.26), a compensação de ambos os dispositivos foi ajustada de modo a evidenciar um efeito mais efetivo do *UPFC-2* na redução do fluxo na linha *3-4*.



Fig. 5.25 Implementação de dois UPFCs, Caso A



Fig. 5.26 Implementação de dois UPFCs, Caso B

5.6.6 Perdas no Sistema Compensado

A avaliação das perdas no sistema considerado também constitui-se em um ponto de interesse, pois diferentes estados de operação do controlador unificado de potência (*UPFC*) levam a diferentes níveis de perdas na linha compensada e em menor grau no sistema completo. A análise e avaliação de perdas correspondentes às redes consideradas nos itens 5.6.3 e 5.6.5 é apresentada no Apêndice D.

É importante assinalar que esta análise de perdas não tem como objetivo obter a perda mínima no sistema, estudo que se enquadraria em um estudo de fluxo de potência ótimo, mas apenas apresentar o *UPFC* como uma estratégia adicional para diminuir as mesmas. Alternativas para simultaneamente reduzir as perdas e atender aos requisitos desejados de transmissão poderiam ser desenvolvidas utilizando métodos de otimização.

5.7 Limitação das Correntes de Curto-Circuito através do UPFC

Os níveis da corrente de curto em uma determinada rede aumentam com a adição de novas linhas e gerações. Isto requer alterações em equipamentos, principalmente disjuntores, pois os níveis permissíveis da corrente de curto podem ser excedidos se os mesmos não forem substituídos. Nestas condições, a limitação da corrente de falta oferecida pelos dispositivos *FACTS*, que apresentam respostas quase que instantâneas, pode ser de grande utilidade na diminuição destas correntes.

A reatância de dispersão do transformador de acoplamento em série também contribui para reduzir as correntes de falta na linha onde o *UPFC* está conectado (limitação passiva da corrente de falta). Nesta seção, será mostrado que a tensão série injetada na linha poderá ser um meio efetivo [69] para diminuir as correntes de falta. O sistema apresentado na Fig. 5.27, será utilizado para realizar a análise e as simulações de limitação de correntes de curto com o *UPFC*.



Fig. 5.27 Sistema utilizado para análise de limitação de correntes de faltas

Inicialmente, com a finalidade de facilitar a análise, a impedância do lado emissor assim como as componentes resistivas das impedâncias e a corrente I_{sh}, serão desprezadas.



Fig. 5.28 Sistema equivalente para análise de limitação de faltas

Será também assumido que a tensão V_{pq} está em quadratura com a corrente de linha (característica de um *SSSC*). Consequentemente, os diagramas fasoriais, correspondentes a diferentes estados do circuito mostrado na Fig. 5.28, serão (Fig. 5.29):



Fig. 5.29 Diagramas fasoriais do sistema em análise: (a) modo capacitivo de V_q (b) modo indutivo de V_q (c) condição de falta, V_q pré falta

onde:

 V_X : Queda de tensão em X_L

V_X': Queda de tensão em X_L compensada; $\dot{V}_{x}' = j(X_{se} + X_{L})\dot{I}_{L} + \dot{V}_{a}$

Dos diagramas anteriores, tem-se que a relação $\frac{\dot{V}_{q}}{\dot{I}_{L}} = \pm jX_{c}$ representa uma reatância (X_c) indutiva

(capacitiva) em série com a linha de transmissão.

5.7.1 Princípio de Limitação da Corrente de Falta

Com o sistema operando em condições normais e o inversor série injetando a tensão V_q tem-se:

$$\dot{V}_2 + \dot{V}_q = j(X_{se} + X_L)\dot{I}_L + \dot{V}_4$$
 (5.28)

Durante o período de curto-circuito (por exemplo no caso de um curto trifásico) acontecendo na barra 4 ($V_4 \approx 0$) e se a tensão na barra 2 permanece constante (Fig. 5.29c):

$$\dot{V}_2 + \dot{V}_q = j(X_{se} + X_L)\dot{I}_L$$
 (5.29)

sendo a reatância equivalente na linha dada por:

$$X = (X_{\rm C} + X_{\rm se} + X_{\rm L}) \tag{5.30}$$

Para a limitação da corrente de falta será necessário injetar a tensão série V_q, no seu modo de compensação indutivo, durante o período de falta. Quanto maior for a tensão V_q injetada durante o período de falta, a limitação da corrente de curto será mais efetiva.

A análise realizada nesta seção também é válida para o caso do *UPFC*, pois, neste caso, a relação entre a tensão V_{pq} e a corrente de linha será vista pelo sistema como uma resistência ±R positiva (negativa) e sua respectiva reatância ±jX_c positiva (negativa), em série com a linha [4], [39].

A injeção de um valor diferente de V_{pq} durante o período de falta não apresenta uma dificuldade maior para o *UPFC*, considerando que este é capaz de passar de maneira instantânea de um estado de compensação, anterior à falta, para aquele cujo ângulo série possa diminuir a corrente na linha. Uma vez completada a tarefa de limitar a corrente de curto o *UPFC* pode retornar ao seu modo de compensação anterior à falta.

A seguir apresenta-se uma análise matemática em relação ao efeito de V_{pq} para o caso de curtos trifásicos e monofásicos, considerando a corrente de curto total I_F como a variável a ser controlada. A idéia principal desta análise é minimizar a tensão no ponto de falta, sem a presença do curto, por meio da tensão V_{pq} (Fig. 5.30).



Fig. 5.30 Circuito utilizado na análise de faltas

Inicialmente, definem-se as matrizes de impedâncias equivalentes de ambos os lados do ponto de curto como Z_E (esquerda) e Z_D (direita), de forma a generalizar o tipo de curto e o seu local, que

também pode-se deslocar para o interior da linha Z_2 . De qualquer modo, para efeito de análise, será focado o caso de curto no início da linha Z_2 , onde os níveis da corrente de curto poderiam ser mais elevados, sobretudo pela contribuição do sistema equivalente Z_1 .

$$[Z_{E}] = \begin{bmatrix} Z_{E_aa} & Z_{E_ab} & Z_{E_ac} \\ Z_{E_ba} & Z_{E_bb} & Z_{E_bc} \\ Z_{E_ca} & Z_{E_cb} & Z_{E_cc} \end{bmatrix}, \quad [Z_{D}] = \begin{bmatrix} Z_{D_aa} & Z_{D_ab} & Z_{D_ac} \\ Z_{D_ba} & Z_{D_bb} & Z_{D_bc} \\ Z_{D_ca} & Z_{D_cb} & Z_{D_cc} \end{bmatrix}, \quad [V_{4}] = \begin{bmatrix} \dot{V}_{4_a} \\ \dot{V}_{4_b} \\ \dot{V}_{4_b} \\ \dot{V}_{4_c} \end{bmatrix}$$

Considerando-se a reatância de dispersão X_{se} incluída dentro da impedância Z_1 , a tensão V_{pq} pode ser deslocada no sentido da barra 1, assim,

$$\begin{bmatrix} V_{1'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{1_a} \\ \dot{V}_{1_b} \\ \dot{V}_{1_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{pq_a} \\ \dot{V}_{pq_b} \\ \dot{V}_{pq_c} \end{bmatrix}$$
(5.31)

A corrente na linha, em condições normais, será:

$$[I_{L}] = [Z_{E} + Z_{D}]^{-1} [V_{1}' - V_{4}]$$
(5.32)

e no ponto de curto-circuito,

$$\left[\mathsf{V}_{\mathsf{F}_{\mathsf{NC}}}\right] = \left[\mathsf{V}_{4}\right] + \left[\mathsf{Z}_{\mathsf{D}}\right]\left[\mathsf{I}_{\mathsf{L}}\right]$$
(5.33)

onde:

V_{F_NC} : Tensão no local de falta, sem compensação

Com a substituição de (5.32) em (5.33), a tensão V_{F_NC} torna-se:

$$\left[V_{F_NC}\right] = \left([I] - [Z_D][Z_E + Z_D]^{-1}\right)[V_4] + [Z_D][Z_E + Z_D]^{-1}[V_1] + [Z_D][Z_E + Z_D]^{-1}[V_{pq}]$$
(5.34)

O termo [I] em (5.34) representa a matriz identidade. A fim de simplificar (5.34), os termos afetados por V₁ e V₄, desconsiderando o efeito de V_{pq}, correspondem à V_{F_NC} ao passo que o último termo será denominado como V_C (tensão de compensação no ponto de falta).

$$[V_{\rm C}] = [Z_{\rm D}][Z_{\rm E} + Z_{\rm D}]^{-1}[V_{\rm pq}]$$
(5.35)

Assim, a tensão de falta compensada (V_{F_C}), será dada por:

$$[V_{F_{C}}] = [V_{F_{NC}}] + [V_{C}]$$
(5.36)

Para minimizar $V_{F_{c}C}$, a tensão de compensação V_{C} terá que estar em oposição a $V_{F_{n}NC}$ e com o máximo valor em módulo, com uma redução proporcional na corrente de falta. No caso do curtocircuito trifásico é fácil perceber que a tensão série atua predominantemente na contribuição do lado esquerdo das duas malhas independentes.

No caso do curto monofásico, alguns outros aspectos, como o efeito do acoplamento das fases não afetadas e a sua possível contribuição à redução da corrente de curto devem ser considerados. Como é sabido, o efeito de acoplamento entre as fases de uma linha de transmissão é modelado através da indutância e da capacitância mútua (L_m, C_m). Apesar disso, no caso analisado apenas o efeito indutivo das fases não afetadas será considerado.

Assim, reescrevendo o produto matricial de (5.35) em (5.37) e considerando-se ainda, para simplificar a análise, que as linhas são transpostas, tem-se:

$$[Z_{\rm D}][Z_{\rm E} + Z_{\rm D}]^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \beta \\ \beta & \alpha & \beta \\ \beta & \beta & \alpha \end{bmatrix}$$
(5.37)

com a substituição de (5.35) e (5.37) em (5.36),

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{F_{c}C_{a}} \\ \dot{V}_{F_{c}C_{b}} \\ \dot{V}_{F_{c}C_{c}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{F_{n}NC_{a}} \\ \dot{V}_{F_{n}NC_{b}} \\ \dot{V}_{F_{n}NC_{c}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \beta \\ \beta & \alpha & \beta \\ \beta & \beta & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{pq_{a}} \\ \dot{V}_{pq_{b}} \\ \dot{V}_{pq_{c}} \end{bmatrix}$$
(5.38)

A tensão V_{F_C} correspondente à fase A, pode também ser escrita como:

$$\dot{V}_{F_{-}C_{-}a} = \dot{V}_{F_{-}NC_{-}a} + \alpha \dot{V}_{pq_{-}a} + \beta \left(\dot{V}_{pq_{-}b} + \dot{V}_{pq_{-}c} \right)$$
(5.39)

a) Aplicação de Seqüência Positiva

Quando a tensão do UPFC, V_{pq} for um trifásico simétrico equilibrado, sabe-se que:

$$\dot{V}_{pq_a} = -(\dot{V}_{pq_b} + \dot{V}_{pq_c})$$
(5.40)

Desse modo, a expressão (5.39) transforma-se em:

$$\dot{V}_{F_{c_a}} = \dot{V}_{F_{nc_a}} + (\alpha - \beta)\dot{V}_{pq_a}$$
(5.41)

b) Aplicação de Seqüência Zero

Se a tensão aplicada pelo UPFC for composta apenas pela seqüência zero, obtém-se:

$$\dot{V}_{pq_a} = \dot{V}_{pq_b} = \dot{V}_{pq_c}$$

e portanto,

$$\dot{V}_{F_{-C_{-}a}} = \dot{V}_{F_{-NC_{-}a}} + (\alpha + 2\beta)\dot{V}_{pq_{-}a}$$
 (5.42)

5.7.2 Resultados

Com relação à contribuição da tensão série, tanto o *UPFC* como o *SSSC* apresentaram comportamento semelhante nos casos estudados.

a) Resposta do SSSC ao Curto Trifásico

A título de exemplo, inicialmente será observada a efetividade do SSSC na limitação da corrente de curto trifásico. Para todos os casos, a chave de curto foi conectada na barra 3 (falta próxima ao

inversor série, Fig. 5.27). Embora a análise anterior, tenha considerado a corrente total de curto I_F, neste caso elementar será estudada a contribuição da corrente de curto do sistema (lado esquerdo) na corrente de curto total.

Na Fig. 5.31, em t=0,15 s, a tensão $V_q = 0,1 \angle +90^\circ$ pu (capacitiva), em relação à corrente I_L, é injetada na linha para aumentar a potência transmitida. Em t=0,2 s é aplicado o curto trifásico no terminal de linha. Pode-se constatar que a operação capacitiva tem um efeito deletério, aumentando o nível da corrente de curto-circuito.

Quando t=0,3 s modifica-se a tensão série para $V_q = 0,3 \angle -90^\circ$ pu (indutiva), novamente em relação à corrente de linha. Nestas condições a tensão injetada (V_q) é vista pelo sistema como uma reatância indutiva, aumentando a impedância equivalente e forçando uma redução da corrente de curto. As correntes de curto trifásicas na linha foram reduzidas em aproximadamente 40% do valor anterior com compensação capacitiva, porém, é importante destacar que, a redução em relação ao caso sem compensação capacitiva estaria em torno de 30%.



Fig. 5.31 Redução de um curto trifásico por meio de um SSSC: (a) curto com compensação capacitiva (b) curto com limitação da corrente

b) Resposta do UPFC, Curto Trifásico

Com relação à atuação do *UPFC* e conforme a análise do item 2.2 (Capítulo 2), através da utilização de um ângulo que esteja na faixa θ_{pq} =120° \rightarrow 180°, obtém-se o efeito de uma reatância predominantemente indutiva e a conseqüente redução da corrente de curto-circuito.

Observa-se (Fig. 5.32) a redução da corrente de curto trifásica, uma vez injetada a tensão $V_{pq}=0.3 \ge 180^{\circ}$ pu em t=0,2 s. Similarmente ao caso do *SSSC* os curto-circuitos trifásicos foram também limitados de maneira satisfatória. As correntes de curto na linha foram reduzidas em torno de 30%. Ambos os dispositivos (*SSSC* e *UPFC*) mostraram-se efetivos na redução das correntes de curto.



Fig. 5.32 Redução da corrente de curto trifásica (UPFC), fase B

c) Curto Monofásico

O exemplo a seguir é elucidativo de um caso de curto-circuito monofásico, quando se consideram os seguintes dados de um sistema, similar ao da Fig. 5.30, para os equivalentes de seqüência zero e positiva da rede.

Sejam:

Z_{E0}=0,109 pu

Z_{E1}=0,5 pu

Z_{D0}=1,739 pu

Z_{D1}=0,5 pu

O lado esquerdo representa o equivalente de uma rede elétrica com $Z_{E0} < Z_{E1}$ e o lado direito representa a linha de transmissão e rede equivalente, com $Z_{D0} > Z_{D1}$. Para este caso, os fatores $\alpha \in \beta$ encontrados são:

α=0,6471

β=0,1471

Considera-se uma defasagem angular de 30° entre as tensões dos sistemas CA equivalentes. Com os dois fatores positivos é mais conveniente a estratégia de utilizar a tensão \dot{V}_{pq} com tensão de

seqüência zero (5.42), em oposição à tensão pré-existente no local de falta. A tensão V_{F_NC} (tensão no local de falta não compensada) na fase A, nesta condição do sistema simétrico para seqüência positiva, apresenta um valor: $\dot{V}_{F_NC} = 0.966 \angle -15^\circ$ pu.

A tensão \dot{V}_{pq} a ser aplicada será portanto: \dot{V}_{pq} =0,3∠165° pu, considerando uma tensão máxima de 0,3 pu a ser desenvolvida pelo *UPFC*. A tensão V_{F_C} é dada pela expressão (5.42):

 $\dot{V}_{FC} = 0,966 \angle -15^{\circ} + (\alpha + 2\beta) \times 0,3 \angle 165^{\circ}$

Com uma redução de 29,2% em relação à tensão pré-existente na fase A, sem compensação, e conseqüentemente com a mesma redução na corrente de falta de curto fase-terra I_F.



(b) aplicação de seq. zero

d) Contribuição do VSI-1 na Limitação das Correntes de Curto-Trifásico

A seguir, avalia-se uma possibilidade adicional na redução da corrente de curto-circuito, com o controle *shunt* do *UPFC*. Através da redução da tensão no ponto onde o conversor em paralelo (*VSI-1*) é conectado, uma limitação adicional da corrente de curto pode ser obtida. Lembra-se que esta diminuição de tensão é feita por meio da compensação com a corrente I_{sh} indutiva.



Fig. 5.34 Contribuição dos VS/s na redução da corrente de curto

A redução total na corrente de curto que passa pelo transformador série, para o exemplo da Fig. 5.27, atinge no caso examinado o valor de 45% (Fig. 5.34). A primeira fase de redução é devida à ação do inversor série (*VSI-2*) e a segunda corresponde à ação conjunta dos conversores *VSI-1* e *VSI-2*. Pode-se, nesta figura, visualizar o efeito benéfico da ação conjunta dos dois inversores constituintes do *UPFC*, na redução de correntes de falta.

Capítulo 6 Conclusões

6.1 Conclusões

Neste trabalho foram exploradas as potencialidades e efeitos de possíveis aplicações do *UPFC* em redes elétricas.

Foram apresentados e desenvolvidos modelos matemáticos deste dispositivo para regime permanente e transitório. Com base nas respostas obtidas durante as simulações das aplicações estudadas pode-se constatar que o *UPFC* pode proporcionar um controle rápido e eficiente do fluxo de potência.

A tensão série injetada e seu posicionamento angular desempenham um importante papel no controle dos fluxos de potência. A modificação desta tensão, assim como a da corrente *shunt*, é quase que instantânea, dependendo do ajuste do controlador no inversor, constituindo-se este fato em uma vantagem expressiva no caso de aplicações transitórias e dinâmicas.

O balanço de potência ativa entre os conversores *shunt* e série desempenha um papel fundamental na operação do *UPFC*. Este aspecto, apesar de bem conhecido, encontra-se pouco explorado na literatura disponível e desse modo, procurou-se apresentar uma análise detalhada do intercâmbio destas potências, para condições de operação em regime permanente e transitório.

Os modelos desenvolvidos e aprimorados, relacionando a potência reativa injetada pelo inversor *shunt* com a tensão de linha, são eficientes e formam a base para investigações em regime permanente e transitório. O método utilizado para analisar este controle de tensão, apoiado na transformação para coordenadas ortogonais, revelou-se adequado e eficiente.

O efeito, em condições de regime permanente, tanto da tensão série injetada como da compensação reativa *shunt* do *UPFC*, no controle do fluxo de potência em uma linha compensada e outra não compensada, constituiu-se em um assunto de interesse que foi analisado detalhadamente para diferentes redes elétricas.

Como contribuição mais significativa deste trabalho, menciona-se a conexão do conversor *shunt* ao enrolamento terciário de autotransformadores, demonstrando a possibilidade de controle contínuo da tensão e do fluxo de potência nestes equipamentos de transformação. O esquema proposto, quando instalado em transformadores em paralelo, incrementa a disponibilidade de operação do *UPFC*, elevando a flexibilidade operativa do sistema, simplesmente utilizando chaves que operam em 13,8
kV, apresentando uma economia significativa em implementações práticas. Desse modo, através da formulação apresentada, o transformador de acoplamento *shunt*, convencionalmente utilizado pelo *UPFC*, pode ter suas dimensões reduzidas.

Com relação ao transformador auxiliar *shunt* com relação 1:1, utilizado nas simulações, este pode também ser substituído simplesmente por uma indutância, sem comprometer o desempenho do *UPFC*. Desse modo, novos auto-transformadores a serem instalados, poderiam levar em conta a possibilidade de utilizar a estratégia proposta, dimensionando adequadamente a potência do seu circuito terciário. Uma redução adicional no custo total do arranjo proposto poderia ser conseguida com a eliminação deste transformador de acoplamento, o que merece investigações complementares.

Espera-se com isso contribuir para elevar significativamente a vida útil e o desempenho de transformadores, além de se obter um melhor controle do fluxo de potência nos sistemas de transmissão.

Como complementação, utilizando o modelo de injeção de potências do *UPFC*, foi desenvolvida uma rotina para análise do fluxo de potência em redes de maior porte. A implementação deste dispositivo *FACTS* em uma parcela da rede de 230/138 kV do sistema SUDESTE, pertencente ao sistema interligado nacional, como caso de aplicação, evidencia que a sua instalação oferece à rede modificada uma maior flexibilidade e um melhor controle do fluxo de potência.

Foi também examinada a possibilidade de limitação de correntes de curto-circuito, equilibrados ou não, com a ação dos controles do *UPFC*. Os resultados satisfatórios, obtidos nas simulações, sugerem considerar a opção de limitar estas correntes como um subproduto interessante da atuação deste dispositivo *FACTS*. Particularmente, foi aprofundada a análise no seu desempenho mais eficiente diante de curtos monofásicos.

6.2 Investigações

São múltiplas as possibilidades de investigações futuras abordando aplicações e desenvolvimentos de equipamentos *FACTS*, em especial o *UPFC*, em redes elétricas. Em particular, com relação a este trabalho, seriam oportunas análises e investigações futuras mais detalhadas de aspectos como, transitórios causados pelo chaveamento dos dispositivos eletrônicos, compensação de harmônicos, perdas, comportamento diante de sistemas desbalanceados, simplificações nos equipamentos de conexão com a rede e contribuição para redução de correntes de curto-circuito.

Referências

- [1] MILLER, T.J. et al. **Reactive Power Control in Electric Systems**. New York: John Wiley & Sons, 1972.
- [2] SLONIM, M.A. Theory of Static Converter Systems, Mathematical Analysis and Interpretation. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V. Part A: Steady-State Processes, 1994.
- [3] MASTASCUSSA, E.J. Computer Assisted Network and System Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [4] HINGORANI, N.G.; GYUGYI, L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000.
- [5] MOORE P.; ASHMOLE P. Flexible AC Transmission Systems, **Power Engineering Journal**, v.9, n.6, Dec. 1995.
- [6] GYUGYI, L. Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON AC AND DC POWER TRANSMISSION, IEE, n.345, p.19-26, London, UK, 1991.
- [7] PADIYAR, K.R.; RAO, K.U. Modeling and Control of Unified Power Flow Controller for Transient Stability, Elsevier Science Ltd., Electric Power Systems Research, v.21, n.1, p.1-11, 1999. Disponível em: <u>http://www.sciencedirect.com</u>
- [8] KANAN, S.; JAYARAM, S.; SALAMA, M.M. Dynamic Stability Improvement of Multi-machine Power System with UPFC, Elsevier Science Ltd., Electric Power Systems Research, v.55, n.1, 1999. Disponível em: <u>http//www.sciencedirect.com</u>
- [9] BIAN, J.; RAMEY, D. G.; NELSON, R. J.; EDRIS, A. A Study of Equipment Sizes and Constraints for a Unified Power Flow Controller (UPFC). In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE PROCEEDINGS - IEEE/PES, L.A.-California, Sept. 15-20, 1996. p.332-38.
- [10] TYLL H. Requirements on Steady-state and Transient Studies for SVC and other FACTS Applications. In: V SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING (SEPOPE), p.617-23, Recife (PE), Brazil, 1996.
- [11] PAPI, I. Mathematical Analysis of FACTS Devices Based on a Voltage Source Converter -PART I, Elsevier Science Ltd., Electric Power Systems Research, v.56, n.2, p.139-48, 2000. Disponível em: <u>http://www.sciencedirect.com</u>
- [12] PAPI, I. Steady-state Operational Characteristics of FACTS Devices PART II, Elsevier Science Ltd., Electric Power Systems Research, v.56, n.2, p.149-57, 2000, Disponível em: <u>http://www.sciencedirect.com</u>>
- [13] SCHAUDER, C. et al. Installation, Commissioning and Operation of the ±160 MVA STATCOM (Phase I), AEP UPFC Project, <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v.13, n.4, p. 1530-35, Oct. 1998.
- [14] SEN, K.K.; STACEY, E.J. UPFC-Unified Power Flow Controller: Theory, Modeling and Applications, <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v.13, n.4, p.1953-60, Oct. 1998.
- [15] KERI, A. F. et al. Unified Power Flow Controller (UPFC): Modeling and Analysis, <u>IEEE</u> <u>Transactions on Power Delivery</u>, v.14, n.2, p.648-54, Apr. 1999.
- [16] ARABI, S.; KUNDUR, P.; ADAPA, R. Innovative Techniques in Modeling UPFC for Power System Analysis, IEEE Transactions on Power Systems, v.15, n.1, p.336-40, Fev. 2000.
- [17] WATANABE, E.; BARBOSA, P.G. FACTS Technology: Devices, In: I SIMPOSIO DE AUTOMÁTICA APLICADA, p.1059-64, 2-6 set. São Paulo, 1996.
- [18] GE, S. Y.; CHUNG, T.S. Optimal Active Power Flow Incorporating Power Flow Control Needs in FACTS, <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v.14, n.2, p.738-44, May 1999.
- [19] HABUR, K.; O'LEARY, D. FACTS For Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy. Disponível em: <u>http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts_siemens.pdf</u>. Acesso em: 16 ago. 2001.

- [20] GEPEA/EPUSP: Sistemas STATCOM e UPFC, Versão Preliminar, São Paulo, jan. 2001. (Relatório Técnico).
- [21] GYUGYI, L. Voltage Source Converters and Series Compensated HVDC Schemes. In: CURSO E WORKSHOP - TECNOLOGIA FACTS, Rio de Janeiro, 23-28 Mar. 2000.
- [22] GYUGYI, L.; SCHAUDER, C; SEN, K. K. Static Synchronous Series Compensator: A Solid State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines. In: IEEE TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE, 96-Winter Meeting, Baltimore, 1996.
- [23] GYUGYI, L. Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real-Time Control of AC transmission Lines, In: IEEE-EMERGING PRACTICES IN TECHNOLOGY, Jan 2000. Disponível em: http://standards.ieee.org/reading/ieee/ept/ac_transmission.pdf Acesso em: 16 ago. 2001.
- [24] MCCALLEY, J.; BULS, J.; NATA, A. Multimedia, Web-based Courseware Development for Power Flow Control Devices, 2. Disponível em: <u>http</u>//powerlearn.ee.iastate.edu/modules/T4/html/T4.html Acesso em: 24 set. 2001.
- [25] OOI, B.T.; KAZERANI, M.; GALIANA, F. D. Mid-Point Siting of FACTS Devices in Transmission Lines, <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v. 12, n.4, p.1717-22, Oct. 1997.
- [26] SEN, K. K. SSSC Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling and Applications, <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v.3, n.1, p.241-46, Jan. 1998.
- [27] SONG, Y.H.; LIU J.Y.; MEHTA P.A. Strategies for Handling UPFC Constraints in Steady-State Power Flow and Voltage Control, <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v.15, n.2, p.566-71, May, 2000.
- [28] IRAVANI, M.R.; NABAVI-NIAKI, A. Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies, <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v.11, n.4, p.1937-43, Nov. 1996.
- [29] DOUGLAS, J.G.; HEYDT G.T. Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices, <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v.13, n.1, p.60-65, Feb. 1998.
- [30] ARABI, S.; KUNDUR P. A Versatile FACTS Device Model for Power Flow and Stability Simulations, <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v.11, n.4, p.1944-50, Nov. 1996.
- [31] HUANG, Z. et al. Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems – Modeling, Interface, Control Strategy and Study Case, <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v.15, n.2, p.817-24, May, 2000.
- [32] MIHALIC R.; ZUNKO P.; POVH D. Improvement of Transient Stability Using Unified Power Flow Controller, <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v.11, n.1, p.485-90, Jan. 1996.
- [33] WATANABE, E.; BARBOSA P.; ALMEIDA K.; TARANTO G. Tecnologia FACTS Tutorial. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE , v.9, n.1, p.39-55, jan.-abr. 1998.
- [34] UZUNOVIC, E.; CAÑIZARES, C.; REEVE, J. Fundamental Frequency Model of Unified Power Flow Controller. In: NORTH AMERICAN POWER SIMPOSIUM (NAPS), p.294-99, Cleveland, Ohio, Oct. 1998.
- [35] YU, Q.; ROUND, D.; NORUM, E.; UNDELAND, T. Dynamic Control of a Unified Power Flow Controller. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 27th Annual IEEE, PESC '96 Record, v.1, p.508-14, 1996.
- [36] YU, Q.; ROUND, D.; NORUM, E.; UNDELAND, T. Performance of a Unified Power Flow Controller Using a D-Q Control System. In: AC & DC TRANSMISSION CONFERENCE, IEE, n.423, 29 Apr.- 3 May, 1996.
- [37] PAPIC, I.; ZUNKO, P.; POVH, D.; WEINHOLD, M. Basic Control of Unified Power Flow Controller, <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v. 12, n.4, p.1734-39, Nov. 1997.
- [38] FUGITA, H.; WATANABE, Y.; AKAGI, H. Control and Analysis of a Unified Power Flow Controller, <u>IEEE Transactions on Power Electronics</u>, v.14, n.6, p.1021-27, Nov. 1999.
- [39] SEN, K.K. STATCOM Static Synchronous Compensator: Theory, Modeling and Application. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, WINTER MEETING, v.2, p. 1177-83, 1999.
- [40] GYUGYI, L.; SEN, K.K.; SCHAUDER, C.D. The Interline Power Flow Controller Concept: A New Approach to Power Flow Management in Transmission Systems, <u>IEEE Transactions on Power</u> <u>Delivery</u>, v.14, n.3, p.1115-23, Jul. 1999.

- [41] BARBOSA, P.G.; DE LIMA A.C.; WATANABE, E.H. Modeling of Thyristor and GTO Based Compensators for FACTS Applications. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÓNICA DE POTÊNCIA (COBEP'97), 4, p.455-60, 1997.
- [42] NELSON, R.J. et al. Transient Stability Enhancement with FACTS Controllers. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON AC AND DC POWER TRANSMISSION, IEE, n.423, p.269-74, 29 Apr.-3 May, 1996.
- [43] CAVALIERE, C.A.; WATANABE, E.D.; AREDES, M. Analysis and Operation of STATCOM in Unbalanced Systems, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <u>http://www.ipst.org/TechPapers/2001/IPST01 Paper207.pdf</u> Acesso em: 11 mar. 2002.
- [44] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components, <u>IEEE Transactions on</u> <u>Industry Applications</u>, v.IA-20, n.3, p.625-31, May-Jun. 1984.
- [45] WATANABE, E.; STEPHAN, R. New Concepts of Instantaneous Active and reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads. In: IEEE/PES WINTER MEETING, NY, 26-30 Jan. 1992.
- [46] SCHAUDER, C.; METHA, H. Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators, 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON AC AND DC POWER TRANSMISSION, IEE Proceedings-C, v.140, n.4, p.299-306, London, UK, Jul. 1993.
- [47] AREDES, M. ; SANTOS, J. A Robust Voltage Control for Multipulse STATCOMs. In: INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE (IPEC), v.4, p. 2163-68, Tokyo, Japan, 3-7 Apr. 2000.
- [48] DA SILVA, E.M. Modelo Experimental de Compensação Série Baseado em Conversor de Tensão. 1997. 100p. Dissertação (Mestrado). UFRJ, COPPE/Dept. de Engenharia Elétrica.
- [49] CAVALIERE, C.A.C. Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados. 2001. 161p. Dissertação (Mestrado). UFRJ, COPPE/Dept. de Engenharia Elétrica.
- [50] SCHAUDER, C. et al. Development of a ±100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems, <u>IEEE Trans. on Power Delivery</u>, v.10, n.3, p.1486-96, Jul. 1995.
- [51] NOROOZIAN, M.; ANGQUIST, L.; GHANDARI, M.; ANDERSSON, G. Use of UPFC for Optimal Power Flow Control, <u>IEEE Trans. on Power Delivery</u>, v.12, n.4, p.1629-34, Oct. 1997.
- [52] RENZ, B.A. et al. AEP Unified Power Flow Controller Performance, <u>IEEE Transactions on</u> <u>Power Delivery</u>, v.14, n.4, p.1374-80, Oct. 1999.
- [53] STEMMLER, H.; BEER, A. Transformerless Reactive Series Compensators with Voltage Source Inverters. In: POWER CONVERSION CONFERENCE (PCC'97), v.I, p.197-202, Nagaoka, Japan, 1997.
- [54] VASQUEZ-ARNEZ, R.L.; ZANETTA, J. L.C. Steady-State Analysis of the Unified Power Flow Controller (UPFC) and its Capability in Modifying the Transmittable Power. In: LATIN AMERICA TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE, IEEE/PES, São Paulo, BRASIL, Mar. 18-22, 2002.
- [55] VASQUEZ-ARNEZ, R.L.; ZANETTA, J. L.C. Unified Power Flow Controller (UPFC) and its Effect over an Uncompensated Parallel Line. In: 10th INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, EPE-PEMC 2002, Cavtat & Dubrovnik, CROATIA, Sept. 9-11, 2002.
- [56] VASQUEZ-ARNEZ, R.L.; ZANETTA, J. L.C. Unified Power Flow Controller (UPFC): its Versatility in Handling Power Flow and Interaction with the Network. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION 2002: ASIA PACIFIC, Yokohama, Tokyo, JAPAN, Oct. 6-10, 2002. p. 1338-43..
- [57] VASQUEZ-ARNEZ, R.L.; ZANETTA, J. L.C. 48-Pulse Based SSSC (Static Synchronous Series Compensator) an Evaluation of its Performance. In: WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCES ON: SYSTEM SCIENCE, APPLIED MATHEMATICS & COMPUTER SCIENCE AND POWER ENGINEERING SYSTEMS 2002, Rio de Janeiro, BRAZIL, Oct. 21-24, 2002.
- [58] FUJITA, H.; WATANABE, Y.; AKAGI, H. Transient Analysis of a Unified Power Flow Controller and its Application to Design the DC-Link Capacitor, <u>IEEE Trans. on Power Electronics</u>, v.16, n.5, p.735-40, Sept. 2001.

- [59] CAÑIZARES C. A.; POZZI M.; CORSI S.; UZUNOVIC E. STATCOM Modeling for Voltage and Angle Stability Studies, University of Waterloo, Ontario. Disponível em: <u>http://thunderbox.uwaterloo.ca/~claudio/papers/cesi EPES.pdf</u> Acesso em: ago. 2002.
- [60] GRUNBAUM, R.; SHARMA, R.; CHARPENTIER, J.P. Improving the Efficiency and Quality of AC Transmission Systems, Joint World Bank/ABB Power Systems Paper. Disponível em: <u>http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/efficiency abb.pdf</u> Acesso em: 24 mai. 2002.
- [61] HONDA, J.T. Controle de Desequilíbrios, Fator de Potência e Harmônicas em Sistemas de Potência por Injeção de Correntes de Compensação. 2000. 142p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [62] YU, Y.; JIANYE, C.; YINGDUO, H. Statcom Modeling and Analysis in Damping Power System Oscillations. In: ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE AND EXHIBIT (ECECE'02), v.2, p.756-62, 2000.
- [63] NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. Power Flow Control by Use of Controllable Series Components, <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v.8, n.3, p.1420-29, Jul. 1993.
- [64] WATANABE, E.H.; AREDES, M. Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações: Filtros Ativos e FACTS, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <u>http://www.coe.ufrj.br/~aredes/cba98.pdf</u>>. Acesso em: jul. 2001.
- [65] FUERTE-ESQUIVEL, C. R.; ACHA, E. Unified Power Flow Controller: A Critical Comparison of Newton-Raphson UPFC Algorithms in Power Flow Studies, <u>IEE Proc.-Gener. Transm. &</u> <u>Distrib.</u>, v.144, n.5, p.437-44, Sept. 1997.
- [66] ORFANOGIANNI, T. A Flexible Software Environment for Steady-State Power Flow Optimization with Series FACTS Devices. 2000. Tese (Doutorado), ETH n. 13689, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- [67] EPRI News, American Electric Power Achieves Unprecedented Power Flow Control with the World's First UPFC. Disponível em: <u>http://www.epri.com/attachments/2697 15_IN-113526.pdf</u> Acesso em: nov. 2001.
- [68] SEN, K. K. Introducing the Family of Sen Transformers: A Set of Power Flow Controlling Transformers, <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v.18, n.1, p.149-57, Jan. 2003.
- [69] DUANGKAMOL, K.; MITANI, Y.; TSUJI, K.; HOJO, M. Fault Current Limiting and Power System Stabilization by Static Synchronous Series Compensator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY (PowerCon2000), AUSTRALIA, Dec. 2000. p.1581-86.
- [70] TAKESHITA, M.; SUGIHARA, H. Effect of Fault Current Limiting of UPFC for Power Flow Control in Loop Transmission. In: IEEE/PES TRANSM. & DISTRIB. CONFERENCE AND EXHIBITION 2002, Asia Pacific, Oct. 6-10, 2002, Vol. 2, pp. 2032 –36, Yokohama, JAPAN, 2002.
- [71] VASQUEZ-ARNEZ, R.L.; ZANETTA, Jr. L.C. UPFC Based Strategy and its Impact over the Flexibility of a Power System. In: 36th ANNUAL FRONTIERS OF POWER CONFERENCE, Oklahoma State University, Oklahoma, USA, Oct. 27-28, 2003.
- [72] VASQUEZ-ARNEZ, R.L.; ZANETTA, Jr. L.C. Compensation Strategy of Auto-transformers and Parallel Lines' Performance, Assisted by the UPFC. Paper accepted for publication in the <u>IEEE</u> <u>Transactions on Power Delivery</u> under code TPWRD-00319-2003.R1, Jan. 16, 2004.

Apêndice A: Aplicações em Regime Permanente e Dinâmico dos Dispositivos FACTS

| Conexão | Ação Corretiva | Dispositivo FACTS | Representação |
|------------------------|---|-------------------|---------------|
| Paralelo | Suporte de tensão Regulação de VAr | SVC | |
| | | STATCOM | |
| Série | Limites térmicos Regulação de tensão Controle do fluxo de potência Ressonância Sub-Síncrona | TCSC | |
| | Limites térmicos Regulação de tensão Controle do fluxo de potência Limitação de correntes de falta Ressonância Sub-Síncrona | SSSC | |
| Série e Paralelo | Limites térmicos Regulação de tensão Controle do fluxo de potência Limitação de correntes de falta Estabilidade tansitória Suporte da tensão pós-falta Ajuste de ângulo de fase Ressonância Sub-Síncrona | UPFC | |

Fig. a1 Esquema geral e funções dos principais dispositivos FACTS

Referência de Custos dos Principais Dispositivos FACTS

A seguir apresenta-se uma referência aproximada em relação aos custos dos principais dispositivos *FACTS* [19]. Os limites inferiores das áreas de custo referem-se ao custo dos equipamentos, enquanto que os limites superiores indicam os custos de investimento totais incluindo os custos de infra-estrutura. Deve-se mencionar que para capacidades muito pequenas de dispositivos *FACTS*, estes custos podem chegar a ser maiores que aqueles mostrados na Fig. a2. Contrariamente, para capacidades maiores estes podem ser menores que os dos gráficos.



Fig. a2 Custo comparativo dos principais dispositivos FACTS

Apêndice B: Potência Instantânea Ativa e Reativa, Transformada d-q

A teoria de potência instantânea, foi inicialmente proposta por Akagi et al. [44]. Esta teoria, devido ao fato de tratar com grandezas instantâneas, é válida tanto para regime permanente como para transitório, para sistemas com ou sem distorção harmônica e ainda mais, é completamente válida para sistemas balanceados ou não [44], [64]. As descrições e derivações matemáticas estão baseadas na transformada de Clarke, a qual permite passar de um sistema trifásico para um sistema de coordenadas ortogonal estacionário e posteriormente, através da transformada de Park, para um sistema girante de coordenadas síncrona.

Quando aplicado a um sistema de potência, esta característica ortogonal dos eixos d-q fazem com que o controle sobre a potência seja altamente efetivo. No caso dos dispositivos *FACTS*, e em particular para o *UPFC*, esta teoria permite o desacoplamento entre a corrente i_d , a qual tem um efeito direto sobre a potência ativa instantânea, e a corrente i_q , a qual tem efeito sobre a potência reativa [46]. Considerando o sistema trifásico de tensões da Fig. b1, os vetores equivalentes d-q estacionários, serão,



Fig. b1 Vetores estacionários d-q equivalentes

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ds} \\ \mathbf{v}_{qs} \\ \mathbf{v}_{0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a} \\ \mathbf{V}_{b} \\ \mathbf{V}_{c} \end{bmatrix}$$
(b1)

e expressões semelhantes às anteriores podem também ser obtidas para as correntes:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_{ds} \\ \dot{\mathbf{i}}_{qs} \\ \dot{\mathbf{i}}_{0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_{a} \\ \dot{\mathbf{i}}_{b} \\ \dot{\mathbf{i}}_{c} \end{bmatrix}$$
(b2)

O subscrito '0' corresponde aos valores de tensão e corrente de seqüência zero, os quais serão fundamentais na análise de sistemas assimétricos ou desbalanceados. Na literatura correspondente a esta análise, a referência estacionária d_s - q_s pode também ser designada como referência $\alpha \in \beta$. Os vetores espaciais instantâneos correspondentes a v_{ds} , i_{ds} , $v_{qs} \in i_{qs}$, podem ser representados segundo a Fig. b2, [46].

Pode-se observar que a potência ativa instantânea efetivamente está definida pelo produto da tensão instantânea em um eixo e a corrente instantânea no mesmo eixo. Observe-se que só vetores no mesmo eixo contribuem para a potência ativa instantânea (b4).



Fig. b2 Vetores espaciais instantâneos

$$\mathbf{p} = \mathbf{v}_{a}\mathbf{i}_{a} + \mathbf{v}_{b}\mathbf{i}_{b} + \mathbf{v}_{c}\mathbf{i}_{c} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{a} \\ \mathbf{i}_{b} \\ \mathbf{i}_{c} \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{a} \\ \mathbf{v}_{b} \\ \mathbf{v}_{c} \end{bmatrix}$$
(b3)

$$\mathbf{p} = \mathbf{v}_{ds}\mathbf{i}_{ds} + \mathbf{v}_{qs}\mathbf{i}_{qs} + \mathbf{v}_{o}\mathbf{i}_{o}$$
(b4)

Por outro lado, o produto entre os vetores $\begin{cases} v_{ds} i_{qs} \\ v_{qs} i_{ds} \end{cases}$ não tem contribuição na potência ativa

instantânea pois não estão no mesmo eixo. A soma de tais termos é denominada de potência imaginária instantânea, tendo como unidade o Volt-Ampere Imaginário (VAI).

$$q = \vec{v}_{ds} \times \vec{i}_{qs} + \vec{v}_{qs} \times \vec{i}_{ds}$$

$$q = v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds}$$
(b5)

Portanto,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{q} \\ \mathbf{p}_{o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ds} & \mathbf{v}_{qs} & 0 \\ -\mathbf{v}_{qs} & \mathbf{v}_{ds} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{v}_{o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ds} \\ \mathbf{i}_{qs} \\ \mathbf{i}_{0} \end{bmatrix}$$
(b6)

Utilizando as eqs. (b1) e (b2), podem-se obter as potências instantâneas ativa e reativa equivalentes ao sistema trifásico:

$$p = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs})$$

$$q = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds})$$
(b7)

No caso de redes trifásicas balanceadas e simétricas, ainda uma outra simplificação pode ser feita:

$$V_{a} + V_{b} + V_{c} = 0$$

$$V_{b} + V_{c} = -V_{a}$$

$$V_{ds} = \frac{2}{3} \left(V_{a} - \frac{1}{2} V_{b} - \frac{1}{2} V_{c} \right) = \frac{2}{3} \left(V_{a} - \frac{1}{2} (V_{b} + V_{c}) \right)$$

$$V_{ds} = \frac{2}{3} \left(V_{a} - \frac{1}{2} (-V_{a}) \right) = \frac{2}{3} \left(V_{a} + \frac{V_{a}}{2} \right)$$

$$V_{ds} = V_{a}$$
(b9)

em relação à tensão v_{qs}:

$$\mathbf{v}_{qs} = \frac{2}{3} \left(0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{v}_{b} - \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{v}_{c} \right) = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} (\mathbf{v}_{b} - \mathbf{v}_{c}) \right)$$
(b10)

manipulando em (b10),

$$(v_{b} - v_{c}) = -(v_{a} + 2v_{c})$$
 (b11)

de (b10) e (b11), obtém-se

$$\mathbf{v}_{qs} = -\frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} (\mathbf{v}_{a} + 2\mathbf{v}_{c}) \right)$$
$$\mathbf{v}_{qs} = -\frac{(\mathbf{v}_{a} + 2\mathbf{v}_{c})}{\sqrt{3}}$$
(b12)

Uma simplificação similar também é válida para o caso das correntes. Obviamente, para um sistema trifásico assimétrico e/ou com quatro condutores, será preferível

Apêndice C: Expressões da Tensão, Conversor de Dois e Três Níveis

Em um conversor trifásico como o mostrado na Fig. c1, três chaves estarão na posição *ON* em todo instante. Assim, as formas de onda quadradas, na saída do inversor v_a , v_b e v_c , correspondem às tensões de fase em relação ao ponto central hipotético M da tensão CC e não ao ponto neutro no lado do sistema CA [4].



Fig. c1 Conversor trifásico de onda completa

Para uma onda quadrada cuja amplitude corresponda a $V_{do}/2$, os valores instantâneos de tensão v_a , v_b , v_c , baseados na análise de Fourier, serão dados por:

$$v_{a} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \left[\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right]$$

$$v_{b} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \left[\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \cos 3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{5} \cos 5 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{7} \cos 7 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \dots \right]$$

$$v_{c} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \left[\cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \cos 3 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{5} \cos 5 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{7} \cos 7 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \dots \right]$$

$$(c1)$$

Os termos $\cos 3\left(\omega t \pm \frac{2\pi}{3}\right)$, $\cos 9\left(\omega t \pm \frac{2\pi}{3}\right)$, etc, que correspondem aos harmônicos múltiplos de três

podem ser reduzidos à expressão $\cos 3k\omega t$ (k=1, 2, 3 ...), estão em fase.

Supondo que as três fases estão conectadas a um transformador em estrela com neutro flutuante (p), então, a tensão de saída CA na fase *A* em relação a este ponto torna-se:

$$v_{ap} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \left[\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5 \omega t - \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \dots \right]$$
(c2)

a qual conterá harmônicos de ordem,

h=6n±1

onde, n = 1, 2, 3,...

O valores correspondentes à componente fundamental e aos harmônicos da tensão fase-fase, são determinados pela expressão:

$$V_{ab} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_{dc} \left[\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \dots \right]$$
(c4)

Similarmente, para o caso de um conversor de três níveis (Fig. c2), os valores correspondentes à componente fundamental e aos harmônicos de tensão na fase *A*, em relação ao ponto central hipotético (M), estarão definidos segundo a expressão mostrado em (c5), [4]:

$$\mathbf{v} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\mathbf{V}_{dc}}{2} \right) \left[\operatorname{sen} \frac{\sigma}{2} \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\sigma}{2} \right) - \frac{1}{3} \operatorname{sen} \frac{3\sigma}{2} \operatorname{sen} 3 \left(\omega t + \frac{\sigma}{2} \right) + \frac{1}{5} \operatorname{sen} \frac{5\sigma}{2} \operatorname{sen} 5 \left(\omega t + \frac{\sigma}{2} \right) - \dots \right]$$
(c5)

onde,

 σ = largura do pulso da tensão CA

a equação (c5) pode ser reduzida para:

$$\mathbf{v}_{n} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\mathbf{V}_{dc}}{2} \right) \left[\frac{1}{n} \operatorname{sen} \frac{n\sigma}{2} \operatorname{senn} \left(\omega t + \frac{\sigma}{2} \right) \right]$$
(c6)

onde, n = 1, 2, 3...



Fig. c2 Operação de um conversor de três níveis

(a) representação da fase A

(b) tensão CA de saída

(c3)

O valor eficaz de (c6) é dado por:

$$\mathbf{v}_{n} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{\mathbf{V}_{dc}}{2}\right) \frac{1}{2} \operatorname{sen} \frac{n\sigma}{2}$$
(c7)

A tensão eficaz da componente fundamental, torna-se então:

$$\mathbf{v}_{1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{\mathbf{V}_{dc}}{2}\right) \operatorname{sen} \frac{\sigma}{2}$$

$$\operatorname{para} \sigma = 180^{\circ} \Rightarrow \mathbf{V}_{1}^{\max} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \mathbf{V}_{dc}$$
(c8)

para $\sigma = 180^\circ \Rightarrow V_1^{max} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc}$

para $\sigma = 0^{\circ}$ \Rightarrow $V_1 = 0$

A seguir mostram-se as formas de onda, espectro harmônico e THD correspondentes às configurações de 12, 24 e 48 pulsos, para o arranjo do inversor de 3 níveis. Para estas configurações o circuito magnético considera transformadores em delta-estrela (Fig. c3) e transformadores conectados em zigue-zague (Fig. c4), respectivamente [49], [57].







b) Forma de onda da tensão de 24 pulsos



c) Forma de onda da tensão de quase 48 pulsos

Fig. c3 Utilização de transformadores tipo delta-estrela após o inversor, mostrando a forma de onda, espectro harmônico e THD







b) Forma de onda da tensão de 24 pulsos



c) Forma de onda da tensão de 48 pulsos

Fig. c4 Utilização de transformadores tipo zigue-zague após o inversor, mostrando a forma de onda, espectro harmônico e THD

Apêndice D: Análise de Perdas no Sistema Compensado

A análise de perdas apresentada neste anexo corresponde ao item 5.5.4 do Capítulo 5 e especificamente à rede apresentada na Fig. 5.19. Lembra-se que a presente análise não tem como objetivo atingir a mínima perda no sistema, a qual se enquadraria em um estudo de fluxo de potência ótimo, mas apenas apresentar o *UPFC* como uma estratégia para diminuir as mesmas. Na Fig. d1 mostram-se os valores das perdas (RI²) calculadas para os casos: rede sem compensação (Fig. 5.19), rede com um *UPFC* (Fig. 5.20) e rede com dois *UPFCs* (Fig. 5.22).



Fig. d1 Comparação das perdas no sistema analisado (valores em pu, MVA_{Base}=100)

Obviamente, a avaliação das perdas nos sistemas considerados não estão limitadas, simplesmente, à variação da magnitude da tensão série do (s) *UPFC* (s), pois a variação do ângulo θ_{pq} também dará origem a um outro conjunto de possibilidades de níveis de perdas.

Por outro lado, o comportamento das perdas correspondentes ao sistema da Fig. 5.22, no qual foram implementados dois *UPFCs*, são mostrados na Fig. d2. A implementação de dois *UPFCs* sobre este sistema contribuiu na diminuição das perdas. Para este caso, a magnitude das tensões V_{pq1} e V_{pq2} foram variadas em uma faixa entre $0,01 \le V_{pq} \le 0,30$ pu.



Fig. d2 Curva de perdas totais para as tensões V_{pq1} e V_{pq2} (θ_{pq1} =30°, θ_{pq2} =230°)

A mínima perda obtida para o sistema completo, com dois *UPFCs*, foi de $23,09^{(x)}$ MW (Fig. d2b), isto quando as tensões série de ambos compensadores foram fixadas em V_{pq1}=0,20 pu e V_{pq2}=0,225 pu, respectivamente.

As perdas calculadas anteriormente correspondem exclusivamente àquelas produzidas na rede considerada, não sendo incluídas as perdas geradas nos conversores. Estas perdas dependerão principalmente do tipo de arranjo do conversor a ser utilizado, assim como das características inerentes às chaves de cada conversor.