Desenvolvimento e Implementação de Soluções FACDS no Sistema da CPFL – FACDS "Flexible Alternating Current Distribution Systems"

T. C. Monteiro; M. Galassi ; A. R. Giaretta; M. A.Oliveira; F. O. Martinz; W. M. Borges; M. Masuda; S. U. Ahn; J. A. Jardini, Fellow, IEEE; L. Matakas Jr; W. Komatsu, Member, IEEE; J. Camargo

Resumo- **Este projeto apresenta uma abordagem inovadora à conhecida tecnologia FACTS, ao aplicá-la em sistemas de distribuição. O objetivo do projeto foi construir um protótipo, testá-lo em condições reais de operação e validar a tecnologia, definindo assim os benefícios do uso desta ferramenta pela concessionária. Duas aplicações da nova tecnologia FACDS foram idealizadas: compensador série controlável de reativos e controlador de fluxo de potência entre dois alimentadores. Serão demonstrados os estudos teóricos, simulações computacionais, resultados experimentais obtidos com o protótipo em baixa tensão e as conclusões a respeito. A duração do projeto foi 3 anos, com início em 2003.**

Palavras-chave- **Condicionamento da Qualidade da Energia Elétrica, Critérios de Planejamento, FACDS - Flexible Alternating Current Distribution Sistem, FACTS - Flexible Alternating Current Transmission Sistem, Flexibilização do Sistema .**

I. INTRODUÇÃO

As novas tecnologias aplicadas a sistema de transmissão, com base em eletrônica de potência, podem ser úteis à distribuição. Para tal é preciso conduzir um procedimento de consolidação da utilização e do desempenho destas, para sua aplicação com menores riscos. A idéia básica da compensação é utilizar dispositivos que modifiquem as características elétricas da linha, tornando-a mais compatível com a demanda da carga. Assim, os sistemas de distribuição que contém estas linhas tornam-se mais flexíveis.

Normalmente em uma rede de distribuição os circuitos operam de forma radial. Existem vários pontos no sistema em que a alteração das distâncias elétricas entre dois nós é favorável à operação. Neste sentido, a utilização do dispositivo FACTS pode contribuir substancialmente com duas funcionalidades:

A. Compensação Serie

A compensação série é uma solução já conhecida para resolver problemas de regulação e balanceamento da tensão de suprimento. Como exemplo, a CPFL possui uma instalação em linha de distribuição 11,9kV: Cafelândia-Sabino, que vem operando desde 1989, e proporcionou uma economia para a empresa na ordem de dois milhões de dólares com a postergação da construção da SE Sabino, prevista para ter ocorrido em 1992.

A proposta do FACDS- "Flexible Alternating Current Distribution Systems" é o estudo e a verificação em campo de um controle contínuo da reatância série usando dispositivos à base de eletrônica de potência. O equipamento é composto de um retificador, que ligado à linha, carrega um capacitor; a este capacitor está conectado um inversor que gera uma tensão senoidal com módulo e ângulo controlados; esta tensão é inserida em série com a linha através de um transformador. É possível fazer esta tensão comportar-se como uma queda tipicamente capacitiva ou indutiva. Esta propriedade é conhecida como Emulação de Impedância.

B. Ligação em Paralelo de Alimentadores

Muitas das obras efetuadas no sistema de distribuição para aumento da confiabilidade do suprimento talvez possam ser evitadas com os alimentadores operando continuamente em paralelo (em anel). Para permitir a operação em paralelo outro conceito de FACDS se aplica. Trata-se do UPFC - "Unified Power Flow Controller". É um equipamento com conceito similar ao descrito acima porém ao atuar no módulo, e principalmente na fase da tensão série injetada na linha, age como um transformador defasador de ajuste contínuo, podendo assim controlar o fluxo entre alimentadores.

Os benefícios do uso de tecnologia FACDS para a Expansão da Distribuição são:

- Ampliação da capacidade de transmissão de potência;
- Flexibilização do uso da rede;
- Operação de linhas em paralelo, mesmo que tenham diferentes capacidades;
- Dirigir o fluxo de potência por caminhos mais adequados;
- Ajustar continuamente o suporte de reativos durante a operação;
- Condicionamento da qualidade da energia elétrica às restrições das normas vigentes;
- Controle dinâmico do fluxo de potência;
- Otimização dos ativos da empresa, visto que permite a operação da rede com o carregamento máximo dos seus equipamentos.

II. METODOLOGIA ADOTADA

No primeiro ano foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre o Estado da Arte da aplicação das tecnologias FACTS para redes de distribuição.

Foi estudada a aplicação da tecnologia FACTS para a Distribuição, gerando-se soluções FACDS com ênfase, inicialmente, para aplicação como compensação série, e posteriormente em alimentadores operando continuamente em paralelo.

Foi desenvolvido um estudo, para escolha de pontos do sistema de distribuição da CPFL em baixa e média tensão onde se constate a viabilidade da aplicação de soluções FACDS.

No segundo ano foi estudado, desenvolvido, implementado e testado em campo, em baixa tensão, o protótipo de tecnologia FACDS para compensação série e também para permitir que alimentadores diferentes operem continuamente em paralelo.

No terceiro ano foi implementado e testado em campo o protótipo FACDS desenvolvido no segundo ano, para aplicação em alimentadores operando continuamente em paralelo.

Foi feita a avaliação da Tecnologia FACDS para a compensação série, com base nos resultados de desempenho operativo do protótipo desenvolvido e implementado no segundo ano. Também foi feita a avaliação da tecnologia FACDS, que permite que alimentadores operem continuamente em paralelo, com base nos resultados dos testes e do desempenho operativo do protótipo desenvolvido e implementado no terceiro ano.

Foi feito um estudo prospectivo da inclusão da tecnologia FACDS como critério de Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição, para respaldo a futuros projetos nesta área.

III. CONCEITUAÇÃO DO FACDS

A. Hardware

O dispositivo UPFC - "Unified Power Flow Controller" é um equipamento que, ao atuar no módulo, e principalmente na fase da tensão série injetada na linha, age como um transformador defasador de ajuste contínuo, podendo assim controlar o fluxo entre alimentadores. Se o retificador que carrega o capacitor for controlável, pode-se agir na fase da corrente no retificador (lado CA) passando a se constituir uma carga reativa controlável.

O primeiro passo é identificar qual a Tecnologia FACDS é a mais adequada para aplicação no sistema da CPFL considerando a compensação série e também a operação de dois alimentadores em paralelos ligados continuamente.

Os compensadores shunt são utilizados para minimizar sobretensões nas linhas durante condições de carga leve (reatores fixos ou chaveados mecanicamente) e para manter o nível de tensão sob condições de carga pesada (capacitores fixos ou chaveados mecanicamente). Os dispositivos utilizados como compensador shunt são:

- SVC - Compensador Estático de Tensão
- STATCOM – Compensador Síncrono Estático

A compensação série foi introduzida décadas atrás para cancelar parte da impedância reativa da linha e conseqüentemente aumentar a potência transmitida. Os dispositivos utilizados para esta compensação são capacitores e transformadores defasadores.

- GCSC - Capacitor Série Controlado por GTO
- TCSC - Compensador Série Controlado a Tiristor
- TSSC - Capacitor Série Chaveado a Tiristor
- SSSC - Compensador Estático Síncrono Série

Para definição da tecnologia a ser utilizada, verificou-se que os compensadores shunt tornam-se ineficazes no controle de fluxo de potência quando o sistema opera com uma tensão definida. Dentre os compensadores série, o que apresenta maiores vantagens é o SSSC, cujo hardware é ilustrado pela figura 3.1, a escolha da tecnologia FACDS, pelas seguintes razões:

- Efetua a compensação da potência ativa além da reativa.
- Compensa tensão independente da magnitude da corrente de linha.
- O SSSC acoplado ao armazenador de energia aumenta a efetividade do amortecimento das oscilações de potência.

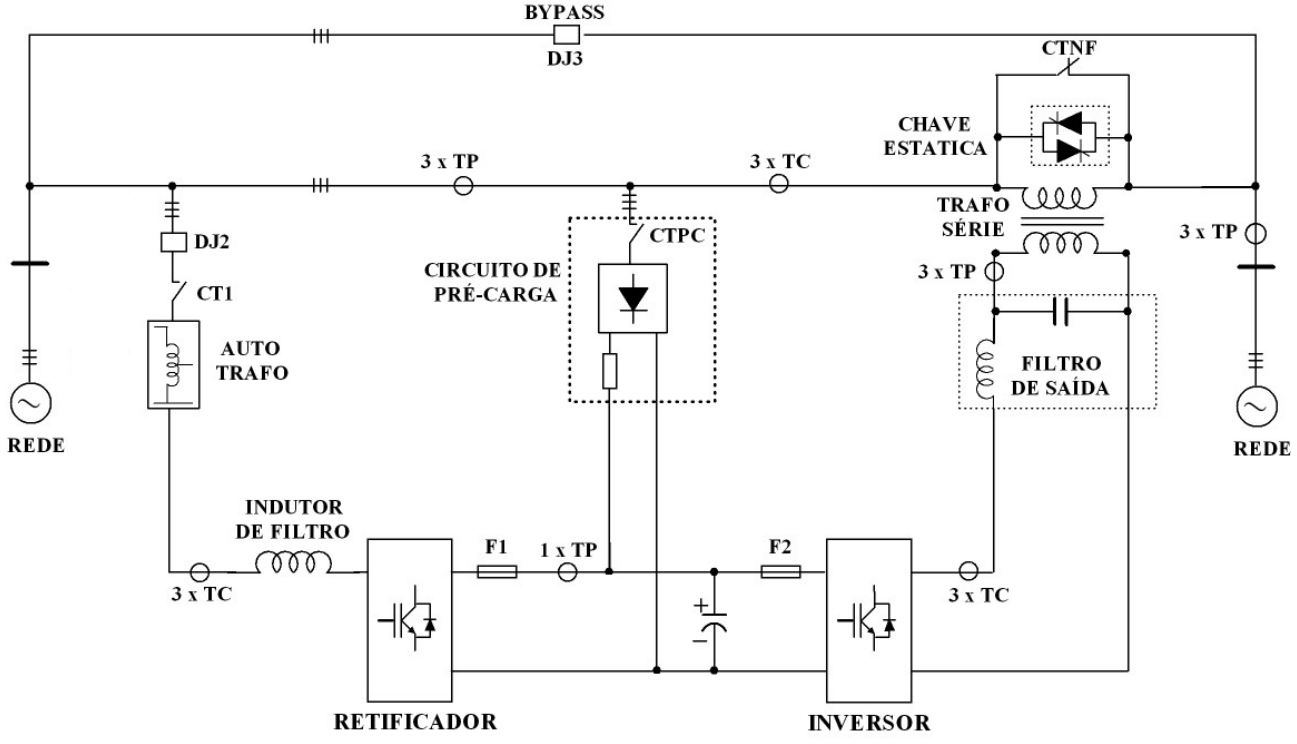

Figura 3.1: Diagrama unifilar simplificado do equipamento.

- Os compensadores TSSC, TCSC e GCSC são acoplados diretamente na linha e, portanto os seus controles também deverão ter isolamento para esta tensão.
- O compensador série TCSC não permite um controle contínuo da reatância série;
- O compensador série TSSC não deve ser usado em locais que requeiram um alto grau de compensação.

Além disto, este dispositivo tem a vantagem de que com algumas implementações poderá ser transformado em *UPFC* (*Controlador Universal de Fluxo de Potência*).

A Figura 3.2 mostra o protótipo desenvolvido, com capacidade de 5kVA.

Figura 3.1: Equipemento desenvolvido para o FACDS.

B. Sistema de controle

O sistema de controle do dispositivo FACDS é composto pelos blocos de Geração de Referência, Phase Locked Loop (PLL) e Controle de Tensão. O bloco de geração de referência tem por objetivo fornecer ao controlador de tensão a referência de tensão a ser injetada pelo FACDS. Por exemplo, para o caso do dispositivo FACDS operando como capacitor série, a referência de tensão pode ser um sinal senoidal (60Hz) atrasado 90 graus em relação à seqüência positiva da corrente de carga. O controlador de tensão tem a função de reproduzir na saída do inversor a tensão de referência, garantindo a injeção correta da tensão de compensação no menor tempo de resposta possível. O PLL garante o sincronismo da tensão injetada com a tensão de alimentação (60Hz).

O PLL implementado é baseado na detecção de cruzamento de zero de um sinal amostrado, de modo a gerar três sinais senoidais de sincronismo $v_{PLL}(k)$ com a mesma fre-qüência do sinal amostrado. O algoritmo é implementado em um modelo de tempo discreto e consiste em forçar a primeira amostra do próximo período do sinal amostrado a ser coincidente com o cruzamento por zero da referência senoidal interna , por meio da inserção de amostras igualmente espaçadas (Figura 3.3).

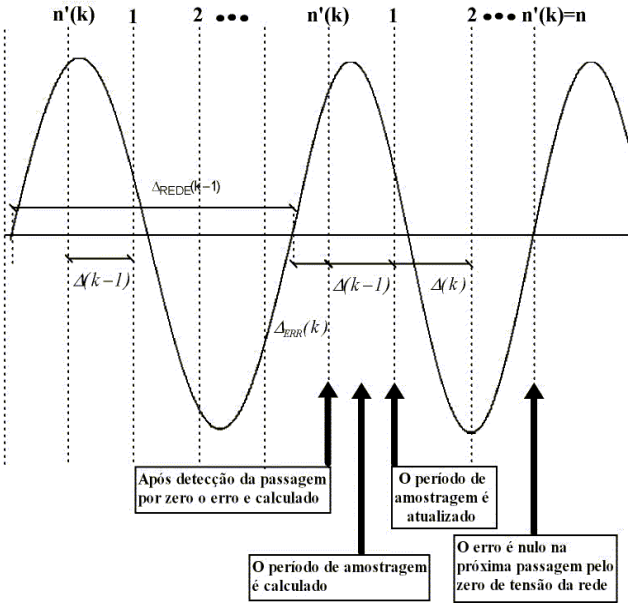

Figura 3.3. Descrição Gráfica do PLL

Para que a tensão injetada emule sempre um indutor ou capacitor puro, e por conseqüência o dispositivo FACDS não injete potência ativa, esta deve ser sempre ortogonal ao sinal de corrente, ou seja 90° defasada. Para obter este resultado, a referência de tensão é obtida pelo valor integrado da corrente, multiplicado por uma constante K, que controla a magnitude da tensão injetada. Assim, o bloco de geração de referência de tensão agora utiliza um PI, e não mais um PLL.

Erros no cálculo da tensão de referência devido à digitalização e processamento do sinal em aritmética de ponto fixo, bem como atrasos de cálculo e de atuação do conversor fazem com que a tensão injetada não esteja exatamente defasada noventa graus em relação à corrente medida. Além disso, há um consumo de potência ativa para suprir perdas do conversor do FACDS. Nestes casos, sempre haverá fluxo de potência ativa entre a linha e o dispositivo, resultando em valores de tensão medida do barramento CC (V_{CC}) diferentes do valor de referência V_{REFCC}.

O controle de tensão V_{CC} do FACDS é feito por meio de um controlador do tipo Proporcional-Integral (PI), conforme Figura 3.4. Deseja-se que o bloco de controle de tensão de barramento CC emule uma resistência em série com o capacitor de compensação, a qual represente o fluxo de potência ativa. Deste modo, caso a tensão do barramento CC seja menor que a tensão CC de referência V_{REFCC}, haverá consumo de potência ativa pelo conversor; caso contrário, haverá retirada de energia ativa do banco de capacitores do barramento CC, entregue à rede 60Hz. Para tal, o sinal de saída do controlador PI, V'_{compCC} deve ter

dimensão de impedância (Ohm). Como é necessário obter a grandeza *tensão* de referência, a saída do PI deve ser multiplicada pela corrente de carga de modo a obter a tensão de compensação de tensão do barramento CC V_{compCC} ,ou seja:

$$V_{compCC}(k) = V'_{compCC}(k) \cdot I_{CARGA}(k) \quad (3.1)$$

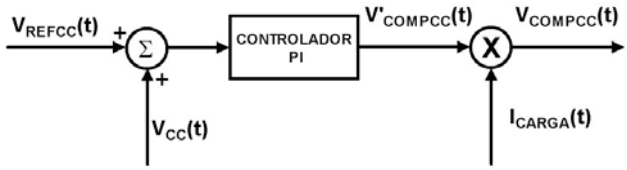

Figura 3.4 - Controle de tensão do barramento CC

C. Injeção de Tensão

Com o PLL descrito acima, é obtido um sinal senoidal em fase com a corrente do sistema. Como o objetivo é emular o comportamento capacitivo ou indutivo, basta defasar 90° este sinal obtido na saída do PLL. Para determinar a capacitância emulada, utililza-se de um ganho K variável em série com o PI.

IV. Operação Como Compensador Série

A. Conceituação

O equipamento FACDS pode funcionar como capacitor série ajustável. Os benefícios da compensação série serão exemplificados abaixo. Naturalmente, o dispositivo FACDS tem um custo maior em comparação a um banco de capacitores comuns colocados em série, no entanto ele apresenta a vantagem técnica de ser um equipamento regulável, com maior versatilidade.

O princípio de funcionamento da compensação série é demonstrado abaixo. As grandezas utilizadas são:

E1 → Tensão no inicio da linha;
E2 → Tensão no final da linha;
I → Corrente Circulante na Linha;
X → Reatância Indutiva da Linha;
Xc → Reatância do Banco de Capacitores Série;
R → Resistência da Linha.

Os diagramas fasoriais apresentados demonstram claramente o comportamento do sistema sob três condições distintas. Dentre estas, a figura 4.3 que equivale a sobre-compensação, utilizando-se de uma reatância capacitiva maior do que a reatância indutiva proveniente da linha.

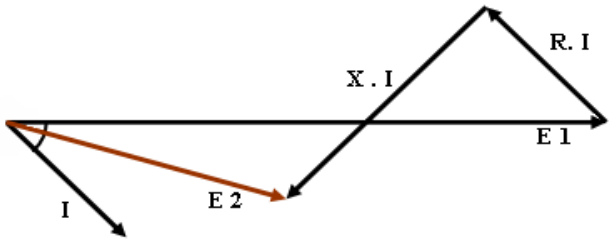

Figura 4.1 – Diagrama Fasorial do sistema sem a instalação do banco de capacitores

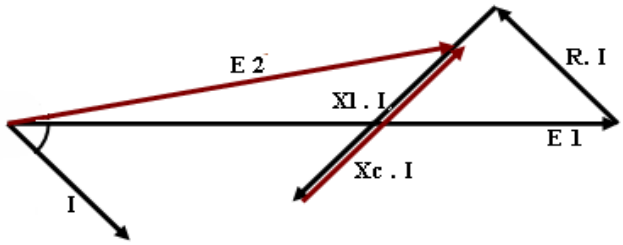

Figura 4.2 – Diagrama Fasorial das tensões no sistema após instalação de banco de capacitores com Xc inferior a X

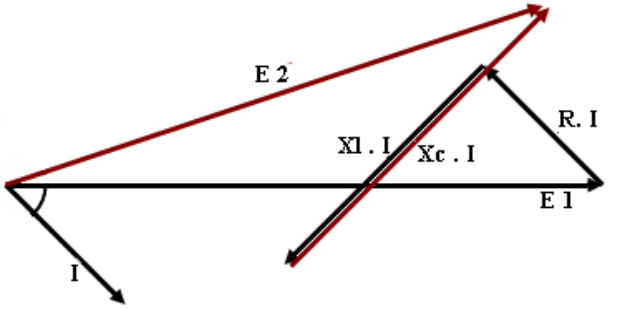

Figura 4.3 – Diagrama Fasorial das tensões no sistema após instalação de banco de capacitores com Xc superior a X

A figura 4.4 apresenta o perfil da tensão para um sistema com um banco de capacitores série.

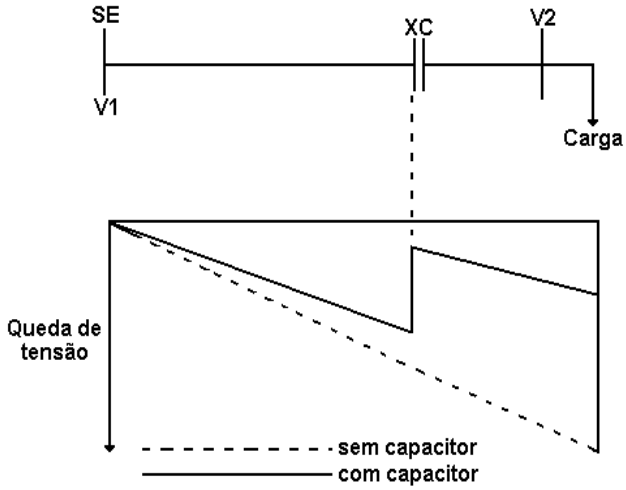

Figura 4.4 - Perfil da tensão para um sistema com compensação série

A funcionalidade de compensador série permite, pela redução da reatância série da linha, maiores comprimentos das linhas de distribuição, uma vez que a queda de tensão é minimizada. Assim, é possível atender pequenas cargas distantes de subestações sem a necessidade de construção de novas SE`s ou de reguladores de tensão.

B. Resultados Experimentais

O equipamento FACDS foi testado experimentalmente para os casos de emulação de capacitor série com 0 e 100% de compensação. O controle de tensão do barramento CC não foi testado na etapa, o banco de capacitores foi alimentado continuamente por meio de uma ponte retificadora não controlada.

Apesar de todas as medições terem sido realizadas com pontas diferenciais de tensão, em função do alto nível de ruído de alta freqüência presente no painel, a tensão de

trabalho no barramento CC foi regulada para 100V.

A figura 4.5 mostra os resultados experimentais obtidos demonstrando as tensões fase-neutro V1,V2,V3 e V4 para o caso monofásico sem compensação de reatância série de linha. Com compensação de 100%, obtém-se a figura 4.6.

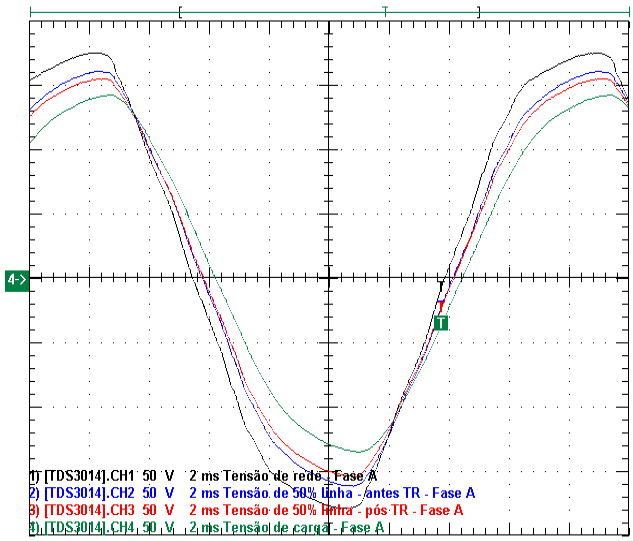

Figura 4.5 – Tensões de fase (127V) no domínio do tempo sem compensação, FASE A – Tensão de rede (V1,CH1), tensão de 50% de linha (V2,CH2), tensão após o compensador (V3,CH3), tensão de carga(V4,CH4). Escala utilizada: eixo X(tempo) – 2ms/divisão. Eixo Y (tensões) - 50V/divisão.

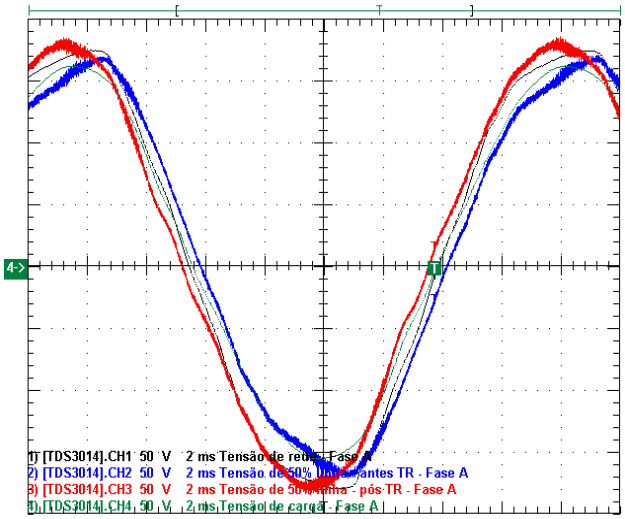

Figura 4.6 – Tensões de fase (127V) no domínio do tempo com 100% de compensação, FASE A – Tensão de rede (V1,CH1), tensão de 50% de linha (V2,CH2), tensão após o compensador (V3,CH3), tensão de carga(V4,CH4). Escala utilizada: eixo X(tempo) – 2ms/divisão. Eixo Y (tensões) - 50V/divisão.

A tensão de carga está em fase com a tensão de rede.

A tensão após os 50% de linha está atrasada em relação à tensão da rede 60Hz de aproximadamente 8 graus. A tensão após o compensador (V3) por sua vez está adiantada em relação à tensão de rede, já que neste ponto do sistema ainda é necessário compensar os 50% restantes de reatância de linha. Finalmente, a tensão de carga está em fase com a tensão de rede.

Para o caso sem compensação da reatância de linha, ocorre a defasagem aproximadamente igual a 14 graus entre tensão de rede e tensão de carga. Quando ocorre a compensação total da linha, os fasores das duas tensões anteriores estão em fase e a amplitude da tensão da carga é pouco maior que para o caso sem compensação, já que a queda de tensão nas indutâncias de linha é compensada.

O experimento demonstrou a viabilidade de implementação de um dispositivo FACDS atuando como compensador série. Os resultados obtidos via simulação computacional foram confirmados na prática, com poucas distorções e baixo nível de ripple.

Esse resultado confirma as expectativas para o protótipo FACDS atuando como compensador série.

V. Controle de Fluxo Entre Barras

A. Simulações

A simulação do protótipo foi efetuada utilizando-se a configuração do sistema elétrico da Fig. 5.1, que consiste em duas cargas resistivas A e B, supridas por alimentadores distintos, com impedâncias ZLA e ZLB. Nos barramentos destas cargas é inserido o dispositivo FACDS, emulando uma impedância jXcomp, que deve acrescentar importantes características à operação deste sistema.

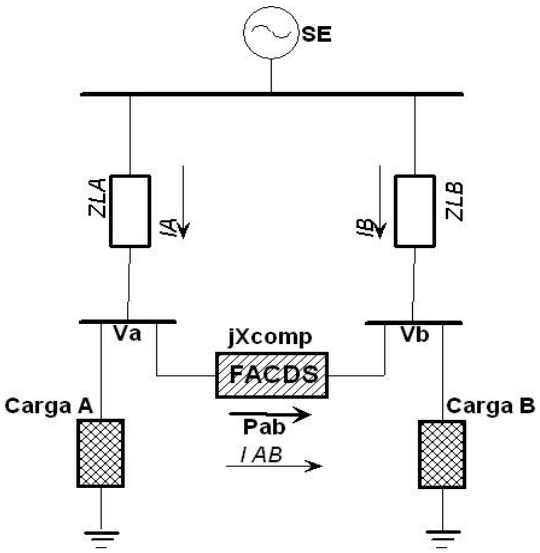

Figura 5.1: Sistema simulado.

O objetivo desta simulação é estudar e especificar valores de impedâncias para as linhas, resistências para as cargas, valor de jXcomp a ser emulado, além de estabelecer a tensão de operação e corrente nominal da montagem. Estes valores devem ser especificados de modo que a montagem prática reflita, de maneira segura, uma situação factível e ao mesmo tempo demonstre as qualidades de um sistema FACDS atuando no paralelismo de alimentadores, que são a equalização da tensão entre diferentes barras, equalização da potência entre diferentes circuitos, e a transferência plena ou parcial de potência entre os alimentadores.

Foi implementado um algoritmo com o objetivo de calcular as variáveis de estado deste circuito de acordo com as variações da tensão injetada pelo FACDS, interpretadas como uma impedância Xcomp entra as barras A e B. Este cálculo é feito com base nos equivalentes de Thevénin vistos pela fonte:

Tensões equivalentes de A e B.

$$V_{thA} = V \frac{Z_A}{Z_A + Z_{LA}} \qquad (5.1)$$

$$V_{thB} = V\frac{Z_B}{Z_B + Z_{LB}} \quad (5.2)$$

Impedâncias de A e B.

$$Z_{thA} = \frac{Z_A.Z_{LA}}{Z_A + Z_{LA}} \quad (5.3)$$

$$Z_{thB} = \frac{Z_B.Z_{LB}}{Z_B + Z_{LB}} \quad (5.4)$$

Assim, corrente e tensão no FACDS são dadas por:

$$I_{AB} = \frac{V_{thA} - V_{thB}}{Z_{thA} + Z_{thB} + j.X_{comp}} \quad (5.5)$$

$$V_{AB} = I_{AB}.j.X_{comp} \quad (5.6)$$

E as tensões nas barras A e B.

$$V_A = V_{thA} - Z_{thA}.I_{AB} \quad (5.7)$$

$$V_B = V_{thB} + Z_{thB}.I_{AB} \quad (5.8)$$

Portanto o fluxo de potência no FACDS é:

$$P_{AB} = \mathrm{Re}(V_A x.I_{AB}^*) = \mathrm{Re}(V_B x.I_{AB}^*) \quad (5.9)$$

$$Q_{AC} = \mathrm{Im}(V_A.I_{AB}^*) \quad (5.10)$$

$$Q_{CB} = \mathrm{Im}(V_B.I_{AB}^*) \quad (5.11)$$

$$Q_{comp} = \mathrm{Im}(V_{AB}.I_{AB}^*) \quad (5.12)$$

Variáveis de estado na rede A

$$I_A = \frac{V - V_A}{Z_{LA}}. \quad (5.13)$$

$$P_A = \mathrm{Re}(V_A.I_A^*) \quad (5.14)$$

$$Q_A = \mathrm{Im}(V_A.I_A^*) \quad (5.15)$$

Variáveis de estado na rede B

$$I_B = \frac{V - V_B}{Z_{LB}} \quad (5.16)$$

$$P_B = \mathrm{Re}(V_B.I_B^*) \quad (5.17)$$

$$Q_B = \mathrm{Im}(V_B.I_B^*) \quad (5.18)$$

Assim, é possível projetar as condições de carregamento (Carga A e Carga B), e os parâmetros da linha (XLa, RLa, XLb e RLb) que possibilitam melhor compreensão destes efeitos.

Com os dados obtidos, foi possível implementar uma simulação com o modelo completo, incluindo o circuito das chaves eletrônicas e as malhas de controle e geração de referência, o qual validou o sistema simplificado para operação em regime permanente e forneceu dados sobre regime transitório.

A partir dos resultados obtidos da análise acima efetuada pode-se concluir pelo perfeito funcionamento do protótipo do dispositivo FACTS proposto, dentro das limitações físicas existente, atuando no paralelismo de alimentadores. Ou seja, demonstrou-se ser possível o controle parcial do fluxo de potência entre duas barras quaisquer, e a equalização da tensão na carga em qualquer caso. Verificou-se que a eficiência no controle de fluxo de potência de tal modelo é limitada para casos de redes radiais, como as redes de distribuição comumente utilizadas

Foram feitos estudos para determinar as melhores técnicas controle para injeção de tensão e os melhores algoritmos para as malhas de controle, bem como as limitações e possibilidades de melhorias no funcionamento do protótipo.

B. Resultados Experimentais

Com base nas simulações anteriores, foi realizada uma montagem de testes para determinar o comportamento real do dispositivo FACDS. Alguns valores foram modificados em relação à simulação para limitar a corrente e potência, por razões de segurança. Deste modo, a configuração final de testes foi a seguinte:

Valores de base:
Ibase = 5 A
Vbase = 127 V
Pbase = 635 VA
Zbase = 25,4 Ω

Os parâmetros utilizados foram:
Resistores de carga:
RcargaA = 61 Ω
RcargaB = 26 Ω

Impedância da linha:
RLa = 0,47 Ω
LLa = 1,92 mH
RLb = 6,8 Ω
LLb = 7,68 mH

A potência de perdas é calculada por:

$$Ppa = Ila.Rla \quad (5.19)$$

$$Ppb = Ilb.Rlb \quad (5.20)$$

A relação entre as perdas totais e a potência total reflete um parâmetro importante de desempenho e otimização do uso da rede elétrica, e é dada por:

$$RP = \frac{Ppa \quad Ppb}{Pa \quad Pb} \quad (5.21)$$

Assim, a primeira rodada de medição foi feita para estabelecer o caso-base, com o equipamento FACDS fora da rede.

Tabela 5.1: Variáveis de estado para circuito aberto, caso base.

Corrente (A rms)			
Linha A	*Carga A*	*Linha B*	*Carga B*
1,88	1,88	3,42	3,42

Tensão (V rms)			
Barra A	*Barra B*		*V ab*
118,9	91,12		29,45

Perdas:
Pa = 231,8 W
Pb = 319,3 W
Ppa = 0,9 W
Ppb = 23,26 W
RP = 4,20 %

A mesma meta de equalizar as correntes pode ser alcançada com o FACDS operando de modo a simular um indutor. Neste caso injetando tensão de 22 V indutiva, foi obtido o seguinte resultado:

Tabela 5.2: Variáveis de estado para circuito com FACDS indutivo injetando 22V.

Corrente (A rms)			
Linha A	*Carga A*	*Linha B*	*Carga B*
2,93	1,83	2,84	3,68

Tensão (V rms)			
Barra A	*Barra B*		*V ab*
117,6	100		22,3

Perdas:
Pa = 226,7 W
Pb = 384,6 W
Ppa = 1,38 W
Ppb = 19,3 W
RP = 3,27 %

O objetivo final da montagem de testes foi zerar a corrente em uma linha, conseguindo a transferência total e suave da carga de um alimentador para outro. Esta operação depende da configuração do circuito, ela é fortemente afetada pelos parâmetros das linhas e das cargas.

Tabela 5.3: Variáveis de estado para circuito com FACDS capacitivo injetando 5,6V.

Corrente (A rms)			
Linha A		*Linha B*	
5,12		0,93	

Tensão (V rms)			
Barra A	*Barra B*		*V ab*
115,7	112,1		5,6

Perdas:
Pa = 219,4 W
Pb = 483,3 W
Ppa = 2,4 W
Ppb = 6,3 W
RP = 1,23 %

Embora não tenha sido possível zerar completamente a corrente da linha B, conseguiu-se uma redução significativa da mesma, passando de 4,3 para 0,9 A, uma redução de 79% de corrente na linha mais carregada. Além disso, conseguiu-se uma melhor regulação de tensão na barra, além de melhoria das perdas técnicas.

A manobra de equalização suave das correntes entre circuitos com o FACDS atuando como capacitor foi possível, mas sujeita a instabilidades, pois níveis intermediários de tensão injetada podem ser característicos de ressonâncias no circuito.

A utilização de dispositivos FACDS para a operação de transferência de carga entre dois circuitos radiais, típicos em linhas de distribuição, requer estudos prévios acerca das características das linhas e das cargas presentes nas mesmas. Estes estudos são necessários para a determinação dos níveis possíveis de compensação, a serem analisados caso-a-caso.

VI. Avaliação dos Resultados

Os resultados experimentais obtidos primeiramente demonstraram a validade dos modelos computacionais desenvolvidos, uma vez que seus resultados estão razoavelmente próximos dos obtidos por medição. Além disso, mostrou-se que as funcionalidades de compensador série e UPFC também têm implementações viáveis.

Na função de compensador série, o dispositivo tem funcionamento adequado na emulação de 0 e 100% de compensação, com baixos níveis de ripple e distorção, e embora o controle de tensão do barramento CC não tenha sido testado, com o banco de capacitores sendo alimentado continuamente por meio de uma ponte retificadora não controlada, provou-se que a função compensador série é uma opção factível.

Para atuar na interligação de dois circuitos e controlar o fluxo de potência, o dispositivo FACDS confirmou os dados obtidos via simulação, ou seja, o equipamento FACDS garante controle parcial do fluxo de portência entre dois alimentadores quaisquer, podendo obter resultados como equalização de tensão e corrente entre as linhas, e também a transferência total ou parcial da carga entre os circuitos. Foram observadas melhorias no funcionamento do circuito com a instalação do protótipo FACDS. Entre elas:

- Diminuição das perdas técnicas.
- Melhor regulação de tensão.
- Equalização das correntes, o que pode evitar sobrecargas.

No entanto, seu desempenho depende diretamente dos parâmentros de impedância e carregamento dos circuitos. Existem ainda possibilidades não testadas para paralelismo de alimentadores, como o funcionamento como transformador defasador.

VII. Aplicação na Concessionária

Equipamentos FACDS podem ser extremamente úteis na operação da distribuição, diminuindo os valores de DEC e FEC. O uso de equipamentos de tecnologia FACDS pode ser incluído como critério da operação na transferência de carga entre dois circuitos para fins de manobras ou

manutenção sem que haja interrupção de fornecimento de energia.

Para que esta operação seja possível, é necessário desenvolver um protótipo de classe 15kV, "Plug and Play", disposto em um equipamento móvel, como uma carreta. Para ilustrar uma das possibilidades, segue um exemplo comentado, onde se deseja desligar a linha B sem causar desligamento da carga ZB.

Passo 1: O equipamento é inserido na interconexão de dois circuitos, emulando alta impedância, desse modo ele não vai influir no estado do circuito.

Passo 2: A impedância emulada do FACDS é gradativamente reduzida até que se faça um curto-circuito. Ao atingir este ponto, os dois circuitos foram suavemente interligados. É possível bypassar o equipamento.

Passo 3: O FACDS é bypassado e retirado da linha. Os alimentadores A e B estão conectados em anel.

Passo 4: O FACDS é inserido em paralelo a uma chave do circuito que se deseja desligar. Inicialmente é ligado emulando baixa impedância. Desliga-se a chave e gradativamente aumenta-se Xcomp.

Passo 5: Quando a impedância tender a um circuito aberto, o FACDS poderá ser retirado, e a transferência da carga B para o circuito A terá sido feita de maneira suave, sem interrupção de energia na carga ZB.

Este exemplo é bastante simples, e demonstra apenas uma das várias possibilidades de um dispositivo FACDS atuando na operação da distribuição. No entanto é possível detectar a utilidade e versatilidade deste equipamento.

A utilização de equipamentos de tecnologia FACTS como compensadores série pode ser implementada como critério de planejamento de expansão da distribuição, uma vez que seu uso pode ser útil na flexibilização da rede e otimização da capacidade de transmissão de potência, de modo a postergar obras e otimizar os ativos. Foram visualizadas as seguintes utilidades da tecnologia FACDS no planejamento de expansão da distribuição.

- *Atendimento de regiões distantes da subestação sem uso de reguladores de tensão.*

A funcionalidade de compensador série permite, pela redução da reatância série da linha, maiores comprimentos das linhas de distribuição, uma vez que a queda de tensão é minimizada. Assim, é possível atender pequenas cargas distantes de subestações sem a necessidade de construção de novas SE`s ou de reguladores de tensão.

- *Suporte a instalações industriais que demandem partida de motores, maximizando a capacidade dos alimentadores.*

Ainda com a função compensador série, é possível fornecer melhor suporte a indústrias que utilizem partida de motores. Com a sobrecompensação da impedância série, a queda de tensão provocada por tais motores é minimizada.

Naturalmente, o dispositivo FACDS como compensador série tem um custo maior em comparação a um banco série de capacitores. No entanto, ele apresenta a vantagem técnica de ser um equipamento regulável, com maior versatilidade.

Com a utilização de dispositivos FACDS na rede de distribuição, também pode ser possível utilizar dois alimentadores em paralelo, controlando o fluxo de potência ativa e reativa entre eles. Deste modo é possível flexibilizar os circuitos de distribuição. Esta característica é especialmente útil em regiões de demanda com caráter esporádico ou sazonal, como cidades litorâneas ou com eventos anuais, permitindo postergação de obras.

Os estudos realizados pelo PD110 permitiram o compreendimento da tecnologia FACDS. Foi possível identificar os possíveis usos de equipamentos FACDS na operação e expansão da distribuição. As vantagens e limitações desta tecnologia agora são conhecidas e com isso foi possível avaliar algumas possibilidades de novas soluções FACDS para P&D`s futuros. Abaixo seguem algumas das idéias.

A. Desenvolver e implementar equipamentos Multifuncionais classes 15 e 25kV.

Para a implementação prática do dispositivo FACDS, tanto em compensação série quanto no paralelismo de alimentadores, é necessário o desenvolvimento de um equipamento de classe de tensão adequada. Por isso, seria de grande valia desenvolver a tecnologia FACDS para classe de tensão 15kV. Um equipamento com esta característica poderia se tornar uma solução para diversos tipos de problemas que normalmente ocorrem no sistema elétrico das concessionárias, alguns deles descritos neste texto.

B. Desenvolvimento de um equipamento móvel, de fácil instalação e retirada, tipo plug-and-play, para ser utilizado em pontos do sistema de 15 KV/25kV.

Após desenvolver a tecnologia para 15kV e 25kV, o passo seguinte seria torná-la modular e de fácil instalação e retirada. Assim, com o equipamento instalado sobre uma carreta, por exemplo, as equipes de operação da distribuição disporiam de uma ferramenta muito eficiente.

Um bom exemplo sobre a implementação de tecnologias modulares é o uso do protetor de transformador Trans Rupter II. Trata-se de uma tecnologia que engloba as proteções usuais (fúsíveis, disjuntores) em um único equipamento móvel.

Ele é especialmente útil em casos de manutenção de disjuntores em subestações, dispensando o uso de uma subestação móvel, e por isso seu uso está sendo implementado na CPFL.

C. Desenvolver um protótipo de um Sistema Integrador CA-CC, para uso industrial.

Um sistema integrador CA-CC consiste em um retificador controlado tipo PWM utilizado para alimentar uma planta industrial com tensão CC, visto que muitas cargas podem ser diretamente alimentados em CC.

Desta forma é possível obter:

- economia de energia pela eliminação das fontes CA/CC dos equipamentos como acionamentos e reatores;
- simplificação da instalação ao se usar cabos bipolares ao invés de trifásicos para as cargas mais potentes;
- possibilidade de controle do fator de potência na entrada da fábrica, e até mesmo o funcionamento como filtro ativo de harmônicas e injeção de reativos para controle de fator de potência.

As possíveis desvantagens seriam::

- custo do conversor;
- necessidade de realizar estudos sobre proteção dos circuitos, uma vez que não é possível o uso de disjuntores.

D. Aplicação do Dispositivo FACDS no Sistema de 138 KV.

Após desenvolvida a tecnologia 15kV e 25kV para o

FACDS, o próximo passo seria migrar para tensões maiores, nível transmissão, 34,5kV, 69kV, 88kV ou mesmo 138kV. Os custos para esta operação seriam altos, mas existem boas possibilidades de ganhos operacionais e de postergação de obras.

VIII. BIBLIOGRAFIA

[1] Hingorani, N., Gyugyi, L.,"Understanding FACTS - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems," IEEE Press

[2] Agrawal, B. L., et al., "Advanced Series Compensation (ASC) Steady-State, Transient Stability and Subsynchronous Resonable Studies," Proceedings of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Conference, Boston, MA, May 1992.

[3] Gyugyi, L., et al.,"Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Aproach to the Series Compensation of Transmission Lines," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, nº 1, January 1997

[4] Gribel, J., et al., "Brazilian North-South Interconnection - Application of Thyristor-Controlled Series Compensation (TCSC) to Damp Inter Area Oscillation Mode," CIGRE Paper nº 14-101, 1998

[5] Kazerani, M.,Ye, Y.,"Comparative Evaluation of Three-Phase PWM Voltage and Current-Source Converter Topologies in FACTS Applications," 2002 Summer Meeting, IEEE Power Engineering Society

[6] Boening, H. J., Mielke, C. H., Burley, B. L., "The Bridge-Type Fault Current Controller - A New FACTS Controller," 2002 Summer Meeting, IEEE Power Engineering Society

[7] Camargo, J., "Aplicação de Capacitores Série na Distribuição" - X SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - Rio de Janeiro - 1.988

[8] Camargo, J., Santana, R., "A Visão Atual da CPFL e da CPFL sobre Aplicação de Capacitores Série na Distribuição" - I SIDEE - Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica - Belo Horizonte – 1990

[9] Camargo, J., "Aplicação de Capacitores Série na Distribuição" - XI SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - Blumenau – 1992

[10] Camargo, J., "A Experiência da CPFL na Aplicação de Capacitores Série" - Encontro do CIER - Florianópolis - 1.993.