

MARIO MASUDA

**APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO FACTS (Flexible AC Transmission Systems) EM
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO - SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistema de Potência
Orientador: Prof. Dr. José Antonio Jardini

São Paulo
2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 28 de setembro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Masuda, Mario

Aplicação do dispositivo FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) em sistema de distribuição – simulação de desempenho / M. Masuda. -- ed.rev. -- São Paulo, 2006.

68 p.

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

1.FACTS 2.Compensação série 3. Controle de fluxo de potência ativa I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Aos amigos da Escola Politécnica que de alguma forma contribuíram
e incentivaram meu aperfeiçoamento técnico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao amigo e orientador Prof. Dr. José Antonio Jardini pela paciência, incentivo, colaboração sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

À ANEEL pelo programa de incentivo à pesquisa, à CPFL pela oportunidade da participação em seus projetos de pesquisa e desenvolvimento e especialmente ao Engº Edison Bórmio Jr. pelo suporte às tecnologias adquiridas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Doutores e amigos das disciplinas de pós-graduação pela atenção, apoio e contribuição técnica.

Aos amigos do Grupo GAGTD – Grupo de Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia especialmente à Fabiana Aparecida de Toledo e Silva.

À minha família, Noemi, Marcelo e Milena pelo incentivo.

RESUMO

As novas tecnologias FACTS aplicadas ao sistema de transmissão, com base em eletrônica de potência, podem também ser úteis à distribuição. Para tal é preciso conduzir um procedimento de consolidação da utilização e do desempenho destas, para sua aplicação sem riscos. Neste trabalho, dois aspectos serão contemplados. O primeiro se refere à aplicação do dispositivo FACTS atuando como um capacitor série. Em se tendo controle de módulo e da fase da tensão inserida em série com a linha pode-se fazê-la comportar-se como uma queda em uma reatância série capacitiva ou indutiva. O controle dessa reatância série (aumentando/diminuindo) permitirá a aplicação do conceito de compensação série em qualquer ponto do sistema de distribuição, provendo benefícios de um controle contínuo da tensão e também do controle do fluxo de carga no sistema independente da corrente. O segundo aspecto refere-se ao uso dos dispositivos na conexão de alimentadores controlando a potência ativa entre eles. Para esta operação outro dispositivo UPFC, com conceito similar ao descrito acima, entretanto atuando na fase da tensão entre 2 barras, comporta-se como um transformador defasador com variação contínua de “taps”, podendo controlar a potência ativa entre os alimentadores.

A aplicação destas tecnologias propiciarão vários benefícios para a expansão da distribuição tais como, flexibilização do uso da rede, interligação de alimentadores permitindo manobras de blocos de energia sem “pisca”, ajuste contínuo do suporte de reativos durante a operação, controle dinâmico do fluxo de potência.

O objetivo deste trabalho é estudar a aplicabilidade da tecnologia FACTS e estender este conceito para aplicação em sistemas de distribuição e conduzir simulações

digitais em redes de distribuição (15kV) identificando o desempenho e os benefícios atingidos.

O programa de simulação utilizado é o ATP (Alternative Transients Program).

ABSTRACT

The new FACTS technologies applied to the transmission system, based on power electronics, can also be useful to the distribution. For that, it is necessary to drive a procedure to consolidate the use and the performance for their application without risks. In this work two aspects will be approached. The first refers to the application of a FACTS device acting as series compensator. This device will be able to control the voltage in module and phase in order to act as a voltage drop in a serie reactance with capacitive or inductive features. The control of this series reactance (increasing/decreasing) will allow the application of series compensation concept to any point of the distribution system, providing the benefits of continuous control of the voltage added to the load flow control in the system independent of the current. The second aspect refers to its use in the connection of two feeders controlling the active power between them. For this operation other device, UPFC, with similar concept as described previously, acts mainly in the phase of the injected voltage in the line, performing as a phase-shift with continuous taps variation and is able to control the active power flow between feeders.

The application of this technology will provide several benefits for the distribution expansion, such as, a greater flexibility in the use of the network, connection of feeders without load flow interruption, continuous adjust of reactive power during the operation and dynamic control of power flow.

The purpose of this work is to study the applicability of the FACTS technology, to extend this concept for the application in the distribution system by using digital simulations in distribution network up to 15kV identifying the performance and the reached benefits.

SUMÁRIO

1	PREÂMBULO	1
1.1	Introdução	1
1.2	Escopo	3
1.3	Apresentação	4
2	ESTADO DA ARTE	6
2.1	Histórico	6
2.2	Flexibilização de Sistemas Elétricos de Potência	7
2.3	Soluções para Flexibilização dos Sistemas Elétricos	8
2.3.1	Tecnologias primárias (soluções tradicionais)	8
2.3.2	Tecnologias secundárias (soluções computacionais e novas tecnologias)	10
2.4	Sistemas Flexíveis de Transmissão e Distribuição CA	11
2.5	Eletrônica de Potência Aplicada aos Sistemas CA	12
2.6	Controladores FACTS “Flexible AC Transmission Systems”	14
2.7	Controladores FACTS e suas Aplicações	20
2.8	Expectativas de Novas Tecnologias	21
2.9	Levantamento Bibliográfico	22
2.9.1	Introdução e Conceituação	22
2.9.2	Qualidade de Energia	23
2.9.3	Modelagens	23
2.9.4	Soluções de Equipamentos e Controle	24
2.9.5	Aplicações	24
		VI

2.9.6	Protótipos e Experiência de Campo	25
2.9.7	Observações e Comentários	25
3	APLICAÇÕES	27
3.1	Escolha do Dispositivo FACTS para utilização nas aplicações	27
3.2	Compensador Série	28
3.3	Dispositivo para Operação de Alimentadores operando em Paralelo	31
4	RESULTADOS	38
4.1	Introdução	38
4.2	FACTS atuando como Compensação Série	38
4.2.1	Sistema Elétrico para simulação do FACTS atuando como Compensação Série	38
4.2.2	Modelo do FACTS atuando como Compensação Série	41
4.2.3	Resultados	41
4.2.3.1	Resultados Obtidos sem o FACTS (D)	42
4.2.3.2	Resultados Obtidos com o FACTS	44
4.2.3.3	Resultados Obtidos com o Capacitor Fixo	46
4.2.3.4	Queda de tensão no transformador e na impedância do filtro	47
4.2.3.5	Análise dos Resultados	48
4.3	FACTS para permitir a operação de alimentadores em paralelo	48
4.3.1	Sistema elétrico para simulação do FACTS para permitir operação de alimentadores em paralelo	48
4.3.2	Modelo do FACTS atuando para permitir a operação de alimentadores em paralelo	51

4.3.3	Resultados Obtidos para o FACTS atuando para permitir alimentadores operando em paralelo	52
4.3.3.1	Resultados Obtidos Zerando o Fluxo na Interligação	52
4.3.3.2	Resultados Obtidos para outras condições de fluxo	55
4.3.3.3	Análise dos Resultados	58
5	RESUMO, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	59
5.1	Compensação Série	59
5.2	Operação de Alimentadores operando em Paralelo	59
6	BIBLIOGRAFIA	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Capacitor série chaveado a tiristor	17
Figura 2.2	Capacitor shunt chaveado a tiristor	18
Figura 2.3	Transformador defasador com tap chaveado a tiristor	18
Figura 2.4	Compensador estático de reativo (SVC) tradicional	18
Figura 2.5	Compensador série controlado a tiristor	19
Figura 2.6	Compensador avançado de reativos	19
Figura 2.7	Controlador unificado de fluxo de potência	20
Figura 3.1	Alimentador de distribuição	29
Figura 3.2	Alimentador de distribuição com capacitor para uma dada compensação	29
Figura 3.3	Tensões no alimentador antes da compensação	29
Figura 3.4	Tensões no alimentador após a compensação	30

Figura 3.5	Alimentador de distribuição com o UPFC(D)	30
Figura 3.6	Diagrama fasorial ilustrando a capacidade do UPFC(D)	31
Figura 3.7	Alimentadores conectados através de um UPFC(D) para controle do fluxo de potência	32
Figura 3.8	Tensões nos alimentadores antes da atuação do UPFC(D)	32
Figura 3.9	Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como reator e para um fluxo de potência ativa positivo	33
Figura 3.10	Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor e ainda para um fluxo de potência ativa positivo	34
Figura 3.11	Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor para um fluxo máximo de potência ativa	34
Figura 3.12	Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor para um fluxo de potência ativa negativo	35
Figura 3.13	Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor para um fluxo de potência ativa negativo	36
Figura 3.14	Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor para um fluxo de potência ativa negativo	36
Figura 4.1	Diagrama unifilar do Sistema Simulado	39
Figura 4.2	Sistema de controle das chaves	42
Figura 4.3	Correntes do motor e alimentador do sistema simulado antes da compensação	43
Figura 4.4	Perfil de Tensão Durante Partida do Motor antes da compensação	43
Figura 4.5	Tensões nas barras do sistema simulado antes da	

	compensação	43
Figura 4.6	Correntes do motor e alimentador do sistema simulado - Motor partindo no instante $t= 0,2s$ e compensador inserido em $t=0,5s$	45
Figura 4.7	Tensões nas barras do sistema simulado - Motor partindo no instante $t= 0,2s$ e compensador inserido em $t=0,5s$	45
Figura 4.8	Correntes do motor e alimentador do sistema simulado - Motor partindo no instante $t= 0,2s$ e capacitor inserido em $t=0,5s$	46
Figura 4.9	Tensões nas barras do sistema simulado - Motor partindo no instante $t= 0,2s$ e capacitor inserido em $t=0,5s$	47
Figura 4.10	Diagrama unifilar do SE de alimentação do sistema de transmissão 138 kV	49
Figura 4.11	Diagrama unifilar do Sistema Elétrico Simulado com as respectivas cargas	50
Figura 4.12	Sistema de controle das chaves	53
Figura 4.13	Tensão fase A antes (SEREDA) e após (STCOMA) o UPFC(D)	54
Figura 4.14	Corrente na Interligação	54
Figura 4.15	Potência na interligação	54
Figura 4.16	Perfil das Potências na Interligação	55
Figura 4.17	Tensão injetada pelo compensador e corrente na interligação para $P= 3MW$	56
Figura 4.18	Tensões nas barras de interligação para $P=3 MW$	56
Figura 4.19	Tensão injetada pelo compensador e corrente na	

	interligação para P= -3MW	57
Figura 4.20	Tensões nas barras de interligação para P= -3 MW	57
Figura 4.21	Tensão em STCOM (fase A) para P= -3 MW e P=+3 MW	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Dados do sistema simulado	40
Tabela 4.2	Dados do Inversor	40
Tabela 4.3	Dados Capacitor do Link CC	40
Tabela 4.4	Dados do Filtro do Inversor	40
Tabela 4.5	Dados do Transformador Série	41
Tabela 4.6	Tensão Fase-Terra nas Barras do Sistema sem a atuação do compensador	44
Tabela 4.7	Tensão fase-terra, nas barras do sistema, com a atuação do compensador nos instantes iniciais da partida	46
Tabela 4.8	Tensão fase-terra, nas barras do sistema, com a Inserção do capacitor nos instantes iniciais da partida	47
Tabela 4.9	Dados do sistema simulado	50
Tabela 4.10	Dados do Inversor	51
Tabela 4.11	Dados Capacitor do Link CC	51
Tabela 4.12	Dados do Filtro do Inversor	51
Tabela 4.13	Dados do Transformador Série	51

LISTA DE ABREVIATURAS

FACTS	Flexible Alternate Current Transmission System
ATP	Alternative Transients Program
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
AC	Alternate Current
DC	Direct Current
EAT	Extra Alta Tensão
HVDC	High voltage direct current
GTO	Gate turn-off thyristor
MCT	MOS Controlled Thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
SVC	Static VAR Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator (Compensador Avançado de Reativos)
TC	Transformador de Corrente
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TP	Transformador de Potencial
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
UPS	Uninterruptible Power Supplies

UPFC	Unified Power Flow Controller
UPFC(D)	Unified Power Flow Controller (UPFC para a Distribuição)
UCPC	Universal Custom Power Controller
DSTATCOM	Static Synchronous Compensator (Distribuição)
VSI	Voltage Source Inverter
DEC	Duração da energia cortada
FEC	Frequência da energia cortada

LISTA DE SÍMBOLOS

kV	Quilovolt
m	Metros
V	volt
W	watt
s	Segundos
MW	Megawatts

1 PREÂMBULO

1.1 Introdução

Com o surgimento de novas tecnologias, com base em eletrônica de potência, aplicadas a sistema de transmissão têm-se intensificado as pesquisas de aplicações dessas tecnologias no sistema de distribuição. Visando usos futuros este trabalho procurou identificar duas aplicações, sendo uma delas a compensação série e a outra o controlador de fluxo ativo de potência.

A compensação série é uma solução já conhecida para resolver problemas de regulação e balanceamento da tensão de suprimento. Ainda assim essa tecnologia tem aspectos a serem melhores estudados a fim de torná-la uma alternativa viável para aplicação na Distribuição. Alguns eventos precisam ser examinados como a possibilidade da ocorrência de ressonância do Sistema Elétrico, principalmente para as frequências sub-harmônicas.

Uma nova alternativa é o estudo e a verificação em campo de um controle contínuo da reatância série usando dispositivos com base na eletrônica de potência. Trata-se de um dos conceitos de FACTS (Flexible Alternate Current Transmission System). O equipamento, também denominado UPFC (Unified Power Flow Controller), é composto de um retificador controlado, que ligado à linha, carrega um capacitor; a este capacitor está conectado um inversor que gera uma tensão senoidal com módulo e ângulo preestabelecidos; esta tensão é inserida em série com a linha através de um transformador. Em se tendo controle de módulo e da fase da tensão pode-se fazer esta tensão comportar-se como uma queda em uma reatância série capacitiva ou indutiva [1].

O controle nesta "reatância série" (aumentando/diminuindo) permitirá que a aplicação do conceito de compensação série possa ser efetuada em praticamente qualquer ponto do sistema de distribuição, proporcionando os benefícios do controle contínuo da tensão adicionado ao controle do fluxo de reativos no sistema podendo até mesmo torná-los independentes da corrente.

Em relação ao uso da ligação de alimentadores em paralelo, muitas das obras que são executadas no sistema de distribuição para aumento da confiabilidade do suprimento talvez possam ser evitadas se os alimentadores pudessem operar continuamente em paralelo (em anel). Para permitir essa operação em paralelo outro conceito de FACTS se aplica, porém, necessita ser estudado e verificado em campo. Este conceito encontra-se abordado junto com o UPFC, equipamento com conceito similar ao descrito acima, porém, ao atuar na fase da tensão série injetada na linha, age como um transformador defasador de ajuste contínuo, podendo assim controlar o fluxo entre alimentadores. Sendo o retificador que carrega o capacitor controlável, pode-se agir na fase da corrente no retificador (lado CA) passando a se constituir uma carga reativa controlável [1].

Os desempenhos a regime e em condições transitórias destes equipamentos precisam ser analisados através de simulações com computador e por testes em campo.

Conforme foi visto nas duas aplicações anteriormente citadas, a tecnologia FACTS propicia benefícios para a Expansão da Distribuição dentre os quais, destacam-se:

- Flexibilização do uso da rede;
- Operação de linhas em paralelo;
- 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.

1.2 Escopo

O escopo deste trabalho é a análise da viabilidade técnica da tecnologia FACTS em sistema de distribuição através de simulações em programa digital. É abordado o desempenho de um dispositivo FACTS em dois aspectos de uma rede de distribuição, sendo um deles a utilização da compensação série e o outro a operação de alimentadores em paralelo.

Ressalta-se que não é abordada a viabilidade econômica.

a) Compensador Série Controlado aplicado na Distribuição

O controle da reatância série (aumento ou diminuição) permite compensar a reatância em qualquer ponto do sistema. A aplicação da compensação série controlada na distribuição proporciona os benefícios:

- Controle contínuo da tensão;
- Controle e aumento da capacidade de regulação de tensão na rede de distribuição;
- Controle do fluxo de reativos, independente ou não da corrente do circuito.
- Controle parcial do nível de curto circuito, ao longo do alimentador, o que reduz problemas ligados a partidas de motores, coordenação da proteção, ou

outros ligados a variações momentâneas de tensão provocadas por manobras na rede ou entrada e saída de cargas.

Este aspecto permite obter subsídios para fazer uma avaliação técnica e econômica dos critérios atuais de Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição.

b) Operação de alimentadores em Paralelo

Para permitir a operação em anel de dois alimentadores diferentes é utilizado o conceito do UPFC (Unified Power Flow Controller), controlando-se a fase da tensão (e também o módulo) entre dois pontos da rede.

Este aspecto proporciona os seguintes grandes benefícios para a operação do sistema de distribuição, visto ser previsto sua instalação em linha viva:

- Reduz o nível de interrupções temporárias quando ocorrem manobras na rede;
- Reduz a necessidade de desligamentos de clientes em caso de manutenção da rede;
- O Controle do fluxo de potência entre alimentadores permite que possa ser controlado o carregamento de alimentadores e/ou subestações.

1.3 Apresentação

O trabalho contempla em seu capítulo 1 uma introdução, o objetivo e também a seqüência de apresentação.

Apresenta no capítulo 2 o estado da arte da tecnologia FACTS aplicadas no sistema de distribuição de energia, comentando sobre o seu histórico, da flexibilização dos sistemas de potência, das soluções para esta flexibilização, dos sistemas flexíveis

de transmissão e distribuição, da aplicação da eletrônica de potência, dos controladores FACTS e finalmente de suas aplicações.

No capítulo 3 encontra-se descrito a escolha do tipo do dispositivo FACTS utilizado nas duas aplicações objeto de trabalho, assim como a caracterização do problema referente à representação do dispositivo como compensador série e também como operador de alimentadores em paralelo.

No capítulo 4 são apresentados os modelos utilizados para os sistemas elétricos simulados e também para os sistemas de controles utilizados tanto para a compensação série como a operação de alimentadores em paralelo. Também são apresentados os dados utilizados na simulação de ambos os aspectos e por fim são apresentados os resultados obtidos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e recomendações do trabalho e por fim são listadas as bibliografias utilizadas.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Histórico

Em 1995, impulsionado pelas mudanças proporcionadas no mundo, em virtude da globalização da economia, que exige mercados parecidos, o Brasil iniciou a reestruturação do setor elétrico nacional, simultaneamente com revisões no setor elétrico de países de primeiro mundo como: Canadá, Suécia e outros.

Trabalhos publicados em 1995, como “Evolução do Mercado de Energia Rumo a Competição” [65] e “Introducing Custom Power” [7], são outros exemplos que sinalizaram a necessidade de buscas de novas tecnologias.

Ao criar a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, o governo estabeleceu regras que exigiu das concessionárias o desenvolvimento de pesquisas em eficiência e modernização, otimização de custos, redução de gastos, troca de tecnologia, imaginando que a entrada de capital privado incorporasse a necessidade de aplicação de novas tecnologias.

O crescimento da eletrônica permitiu um avanço acentuado da automação dos processos industriais e exigiu que a energia elétrica fornecida fosse o máximo possível ininterruptível e apresentasse o mínimo possível de distorção surgindo então um novo tipo de consumidor, aquele que possui processos produtivos sensíveis, que exigem tratamento diferenciado quanto ao aspecto da qualidade do fornecimento, demandando então a necessidade do conceito da avaliação da qualidade da energia elétrica.

Tudo isto forçou o crescimento da busca de soluções alternativamente viáveis para as questões relacionadas à expansão do setor elétrico, exigindo uma maior flexibilização das redes nos aspectos operacionais para adequar melhor a qualidade

da energia elétrica à necessidade do consumidor, sinalizando a necessidade de criação de um fornecimento de energia customizado.

Por isto fez-se necessário o aparecimento e evolução constante de tecnologias que permitam o controle das variáveis elétricas envolvidas, como o monitoramento contínuo do fluxo de potência através das linhas, otimizando o uso de equipamentos, garantindo a qualidade da energia fornecida e aumentando a proteção e segurança do cliente.

2.2 Flexibilização de Sistemas Elétricos de Potência

Nos últimos anos, a busca por uma maior flexibilidade dos sistemas de potência tem se justificado pela necessidade dos planejadores e operadores de sistemas em lidarem com sistemas cada vez mais dinâmicos e com menor margem operacional.

Entre as variáveis responsáveis pela busca da flexibilização, podem ser destacadas:

- Incertezas quanto ao futuro em sociedades altamente industrializadas, em termos de previsão de demanda, alocação de carga e aumento nos custos da energia primária;
- Restrições de todos os tipos (políticas, econômicas, financeiras, etc.) que limitam as ações e a escolha das decisões a serem tomadas. Tais restrições desviam os sistemas de sua condição ótima de operação;
- Inovações tecnológicas questionam as soluções tradicionais, porém, tem como consequência perda de robustez, custos mais elevados e equipamentos mais sensíveis.

Embora o conceito de flexibilidade seja bastante geral, no que diz respeito aos sistemas elétricos pode ser definida como “a habilidade dos sistemas de potência

em se adaptarem rapidamente a novas circunstâncias, de modo a operarem permanentemente da melhor forma possível”.

Os futuros sistemas de potência serão caracterizados por uma maior necessidade de flexibilização. Desta forma, a flexibilidade deverá ser considerada não somente na operação, mas principalmente no planejamento dos sistemas.

Nos estudos para a flexibilização dos sistemas, algumas questões devem ser respondidas como, por exemplo, se o planejamento considera aspectos que dêem uma maior flexibilidade aos sistemas, se existem meios de flexibilizar os sistemas a custos competitivos, quanto e quando flexibilizar. Tais questões serão, na medida do possível, respondidas nas próximas seções.

2.3 Soluções para Flexibilização dos Sistemas Elétricos

As tecnologias para as soluções de flexibilização dos sistemas podem ser agrupadas em dois grupos principais: tecnologias primárias e tecnologias secundárias.

2.3.1 Tecnologias primárias (soluções tradicionais)

Entre as tecnologias primárias de flexibilização, existem soluções para a geração e para a transmissão. Dentre as soluções para a flexibilização da geração, destacam-se:

- A operação do sistema a um custo mínimo (ou próximo) de geração em usinas hidroelétricas para cobrir os requerimentos de reserva girante e para suprir picos de demanda, permitindo que usinas termelétricas operem com ótima eficiência.

- A combinação de várias plantas geradoras (incluindo as nucleares) pode ser otimizada e também fazendo provisionamento de pequenas usinas geradoras e turbinas a gás que sejam rapidamente inseridas no sistema.
- Resistores e compensadores de reativos podem ser utilizados para aumentar a margem de estabilidade transitória.

Na transmissão, a flexibilização pode ser atingida através de:

- Os condutores das linhas de transmissão podem ser substituídos por condutores de maior bitola ou mesmo pode-se aumentar o número de condutores por fase.
- Em alguns casos, as estruturas das linhas de transmissão já instaladas podem ser utilizadas para comportar circuitos adicionais.
- Uma linha pode ser construída e inicialmente operada para funcionar com tensão abaixo da nominal.
- Linhas de circuitos múltiplos podem ser construídas com apenas um dos circuitos inicialmente.
- Linhas de transmissão já instaladas podem ser reconfiguradas para aumentar a capacidade do sistema.
- Subestações podem ser construídas com múltiplos barramentos. Chaveamentos levam a uma melhor utilização do sistema e permite maior flexibilização.
- Transformadores defasadores, compensadores estáticos, transformadores com derivações e compensadores série permitem que o sistema seja operado sem que seja necessária a construção de novas linhas para roteamento de fluxo de potência.

- Interconexão entre diversos subsistemas, incluindo conexões em CC (Link DC), aumenta a flexibilidade.

2.3.2 Tecnologias secundárias (soluções computacionais e novas tecnologias)

Avanços das técnicas de simulação permitem análises mais seguras em tempo real seguido por ajustes baseados nos resultados, permitindo o planejamento e operação de sistemas próximos aos limites técnicos. Reguladores de tensão nos geradores modernos do sistema (principalmente aqueles que utilizam a eletrônica de potência) permitem o aumento da potência transferida com risco reduzido de oscilações.

Modelagem térmica de linhas aéreas e cabos subterrâneos também permite uma melhor utilização destes componentes. Chaveamento e proteção de subestações podem ser controlados computacionalmente. As combinações de religamento automático com redução no tempo de desligamento podem evitar a necessidade de novos equipamentos de proteção.

De acordo com as crescentes exigências e dificuldades para a construção e implementação de interconexão elétrica a interação entre as tecnologias primárias e secundárias, aliada ao enorme potencial da tecnologia secundária, irá se tornar mais e mais necessária.

2.4 Sistemas Flexíveis de Transmissão e Distribuição CA

Nos itens anteriores foram apresentados aspectos relativos à flexibilização dos sistemas de energia elétrica. Várias das soluções apresentadas podem ser implementadas a partir da utilização de equipamentos tradicionais. Entre estes equipamentos, estão os chamados controladores de potência e compensadores de reativos, tais como os transformadores defasadores, os compensadores série e shunt (ou em derivação), reatores de núcleo saturado, etc.

No passado, tais equipamentos caracterizavam-se pela utilização exclusiva de componentes passivos (capacitores e indutores), chaveados mecanicamente. Com o avanço da eletrônica de potência, a partir da invenção do transistor no início dos anos cinquenta, os controladores convencionais passaram a utilizar componentes eletrônicos em seus acionamentos. Com a invenção dos tiristores de potência (anos setenta), os controladores começaram a utilizar chaveamentos eletrônicos no acionamento de potência, limitados somente pelos níveis de potência admissíveis por tais componentes eletrônicos.

Posteriormente, surgiram os compensadores controlados e, mais recentemente, os avançados, que serão oportunamente apresentados. No final dos anos oitenta, a flexibilização dos sistemas passou a ser associada aos controladores do sistema que utilizam eletrônica de potência.

Desta forma, criou-se o acrônimo FACTS para identificar os controladores eletrônicos utilizados na flexibilização dos sistemas de corrente alternada, tomando-se o cuidado de deixar de fora a transmissão em corrente contínua.

A seguir, serão apresentadas algumas aplicações da eletrônica de potência aos sistemas de corrente alternada.

2.5 Eletrônica de Potência Aplicada aos Sistemas CA

A eletrônica de potência aplicada aos sistemas de corrente alternada representa um grande avanço sob vários aspectos. Entre as funções desempenhadas por equipamentos que usam componentes eletrônicos podem ser destacadas [1]:

- Conversão de Potência CA-CC, CC-CA, CA-CA;
- Condicionamento da Potência oferecida para filtrar distorções e eliminar variações de tensão;
- Controle de Parâmetros Elétricos tais como corrente, tensão, impedância e ângulo de transmissão;
- Funções de interrupções, transferências e limitações de corrente.

A eletrônica de potência se faz presente, e cada vez mais necessária, em praticamente todos os estágios dos sistemas elétricos modernos, seja na geração, transmissão ou distribuição de potência em corrente alternada. Na geração, pode ser utilizada no controle de frequência e tensão de geradores, tais como os fotovoltaicos e os eólicos, entre outros. Tal aplicação pode também ser útil aos hidrogeradores sujeitos as fortes variações nos níveis de água dos reservatórios.

Na transmissão, os equipamentos eletrônicos apresentam o maior ritmo de desenvolvimento.

Os chamados controladores FACTS são responsáveis por grande parte das pesquisas desenvolvidas pelos centros de pesquisa, concessionárias e fornecedores envolvidos com sistemas elétricos de potência. Controladores FACTS proporcionam maior velocidade e precisão no controle de um ou mais parâmetros dos sistemas de potência. Entre os parâmetros controláveis inclui-se tensão, corrente, ângulo de transmissão, potência ativa e reativa.

Os controladores FACTS são vistos como soluções locais ou, no máximo, nas vizinhanças. Para longas distâncias ou mesmo para sistemas com operação em freqüências distintas, a transmissão em corrente contínua se apresenta como uma solução atrativa. A chamada transmissão HVDC (High Voltage in Direct Current) permite a interconexão de sistemas que possuem diferentes freqüências nominais, mesma freqüência nominal mas diferente controle de freqüências, mesma freqüência nominal e mesmo controle de freqüência, mas, grandes oscilações na potência, longas distâncias para transmissão aérea (acima de 1000 km), subterrânea (acima de 100 km) e submarina (acima de 50 km).

Apesar da grande flexibilidade oferecida pela combinação de transmissão em corrente contínua e alternada, os grandes custos das estações conversoras que compõe a transmissão HVDC continuam sendo o grande limitador de sua maior utilização. Com relação à distribuição, controladores eletrônicos auxiliam as concessionárias a entregar uma energia limpa e confiável aos consumidores. Entre estes controladores inclui-se: relés e disjuntores estáticos, chaves eletrônicas, compensadores estáticos de reativos, religadores estáticos, filtros ativos, reguladores de tensão, etc.

Dada sua dinâmica de desenvolvimento, os controladores FACTS são projetados para eliminar tais restrições e ir ao encontro das necessidades dos investidores, pessoal do planejamento e dos operadores, sem a necessidade de grandes ampliações no sistema. Isto oferece maneiras de otimizar a capacidade da transmissão, com perdas de transmissão mínimas, e também com um mínimo impacto ambiental, além de, naturalmente, contribuir para investimentos menores e custos menores ao longo do tempo.

2.6 Controladores FACTS “Flexible AC Transmission Systems”

Lançado em 1988 por N. G. Hingorani, a tecnologia FACTS introduziu no setor a idéia da flexibilização do sistema elétrico associado à capacidade do controle direto do fluxo de potência ao nível de transmissão de energia elétrica, através de ferramentas de controle com eletrônica de alta potência, em conversores do tipo HVDC, compensadores estáticos de reativos, filtros ativos, controladores de fluxo de potência, conversores de frequência e sistemas de acionamento CA/CC, viabilizando o casamento direto entre sistemas de corrente alternada e contínua em todos os níveis de tensão e potência.

Esta tecnologia revolucionou os estudos de fluxo de potência, pois permitiu controlar diretamente a reatância equivalente da linha por meio da compensação capacitiva série, sendo que tal compensador pode ser instalado em qualquer um dos extremos da linha, onde já exista uma subestação.

O controle da reatância série do sistema elétrico pode ser entendido como a possibilidade de modificar distâncias elétricas entre os nós elétricos da rede, que permite o controle do direcionamento do fluxo de potência.

O termo “FACTS” abrange diversos sistemas baseados da eletrônica de potência usados para a transmissão CA. Dada a natureza do equipamento da eletrônica de potência, as soluções dos FACTS serão particularmente justificadas nas aplicações que requerem uma ou mais das seguintes qualidades:

- resposta dinâmica rápida;
- habilidade para variações freqüentes na saída;
- saídas ajustáveis.

A maior novidade trazida pela tecnologia denominada FACTS é a adoção de um aspecto mais abrangente dos dispositivos de controle e conversão eletrônica em

todos os níveis de potência. Sendo assim, pode-se considerar que os primeiros dispositivos FACTS foram os retificadores e inversores permitindo uma maior capacidade de transmissão de potência nas linhas de HVDC, como a linha de Itaipu. Os atuais equipamentos baseados em tiristores convencionais possuem limitações relacionadas com a velocidade do processo de chaveamento e perdas excessivas. Portanto, os maiores esforços na área de eletrônica de alta potência estão voltados no aperfeiçoamento da tecnologia de chaves eletrônicas do tipo GTO, MCT e IGBT, que poderão gerar dispositivos para ligar e desligar circuitos com maior rapidez quando comparados com as tecnologias dos tiristores atuais.

Em teoria, um sistema de transmissão pode ser carregado até seus limites térmicos, mas na prática o sistema tem as seguintes restrições: limites da estabilidade da transmissão, limites de tensão.

- Limites de estabilidade da transmissão: limite da potência transmitida nos qual o sistema é capaz de suportar grandes contingências sem alterar sua capacidade de transmissão.

- Limites da tensão: condições para que as tensões do sistema possam ser mantidas, dentro dos desvios permitidos em relação ao valor nominal.

Existe um grande número de controladores FACTS que podem ser aplicados à diferentes necessidades nos sistemas elétricos de transmissão. Através do uso da eletrônica de potência, estes controladores superam algumas limitações inerentes aos controladores mecanicamente controlados, como no caso da velocidade de operação, confiabilidade, controlabilidade, etc.

A utilização dos controladores FACTS proporciona:

- Controle do fluxo de potência de modo a direcionar os fluxos para rotas pré-definidas;

- Aumento da capacidade das linhas de transmissão;
- Prevenção de blecautes através da limitação de corrente e desligamento de linhas críticas;
- Melhoria da produtividade na geração de energia através de uma melhor distribuição de carga entre os geradores;
- Controle da expansão e redimensionamento do sistema;
- Redução do fluxo de potência reativa pelo sistema bem como de “loops” de fluxo;
- Auxílio a manutenção da estabilidade através do amortecimento de oscilações transitórias e/ou subtransitórias.

A faixa de potência dos controladores FACTS pode ir de poucos MVAs a algumas centenas de MVAs.

A seguir serão apresentados alguns exemplos de controladores:

- Capacitor Série Chaveado a Tiristor (TSSC) (Figura 2.1)
- Capacitor Shunt Chaveado a Tiristor (TSC) (Figura 2.2)
- Transformador Defasador com Tap Chaveado a Tiristor (Figura 2.3)

Pode-se dizer que os controladores apresentados nas figuras 2.1, 2.2 e 2.3 utilizam a mais básica das funções dos componentes eletrônicos de potência, que é o chaveamento eletrônico.

Os mesmos controladores, mecanicamente controlados, têm sido usados há várias décadas. Os controladores em si, portanto, não representam novidade tecnológica, que fica por conta do controle das chaves, através da eletrônica de potência.

- Compensador Série Controlado a Tiristor (TCSC) (Figura 2.4)
- Compensador Estático de Reativos (SVC) (Figura 2.5)

O compensador estático de reativos SVC (Static VAR Compensator) já vem sendo utilizado com sucesso há duas décadas, enquanto o TCSC está sendo implementado nos sistemas já existentes. Ao TCSC é atribuída a capacidade de evitar ressonância subsíncrona (de caráter eletromecânico), dado pelo controle quase que linear que permite ao operador buscar uma faixa de operação fora da frequência de ressonância do sistema.

- Compensador Avançado de Reativos (STATCOM) (Figura 2.6)
- Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC) (Figura 2.7)

A maior parte dos controladores avançados se encontram em fase experimental, embora existam protótipos do STATCOM e UPFC funcionando nos EUA, na faixa de centenas de MVar.

Os compensadores avançados se caracterizam pela utilização de conversores estáticos como fonte de tensão controlada em fase e magnitude. Normalmente empregam chaves eletrônicas com capacidade de aceitar comando de desligamento (IGBTs, GTOs, MCTs) que são controlados utilizando modulação PWM (Pulse-width Modulation).

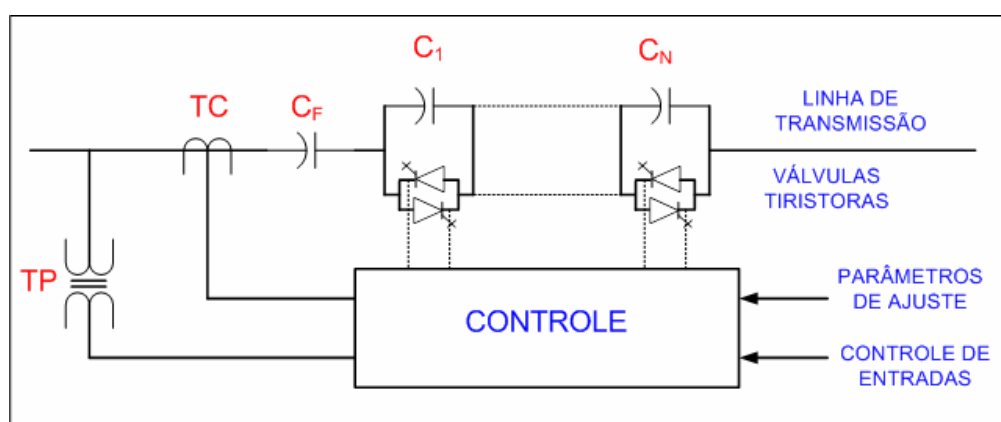


Fig. 2.1 Capacitor série chaveado a tiristor (TSSC)

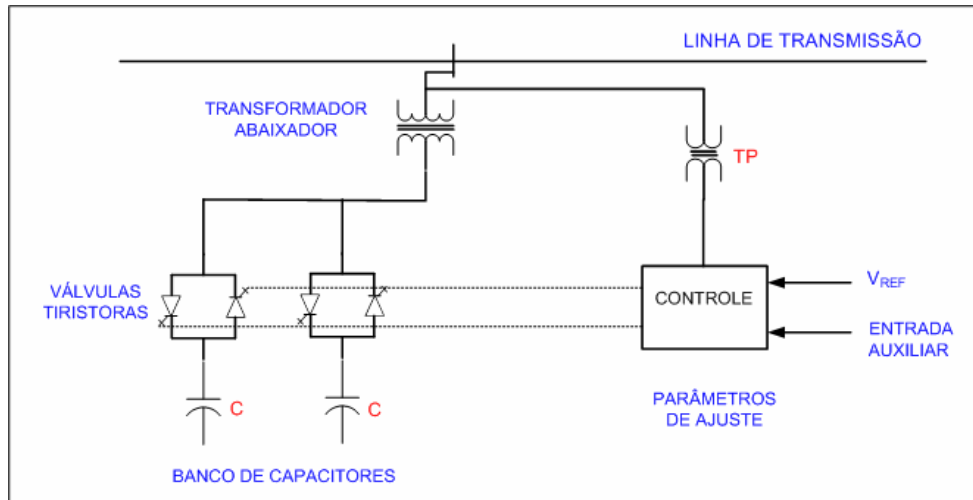


Fig. 2.2 Capacitor shunt chaveado a tiristor (TSC)

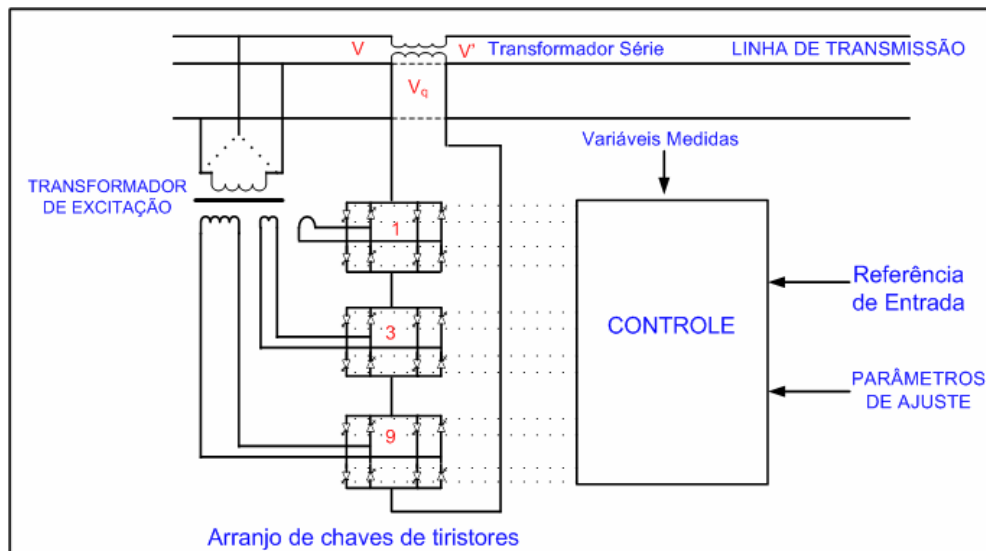


Fig. 2.3 Transformador defasador com tap chaveado a tiristor

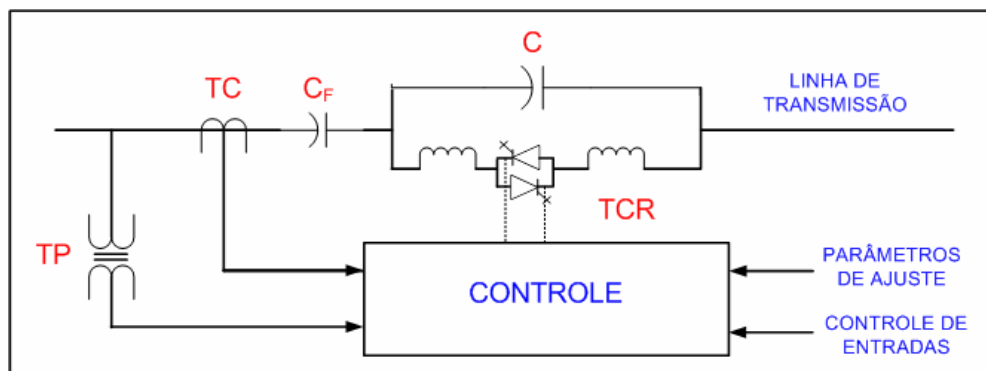


Fig. 2.4 Compensador série controlado a tiristor (TCSC)

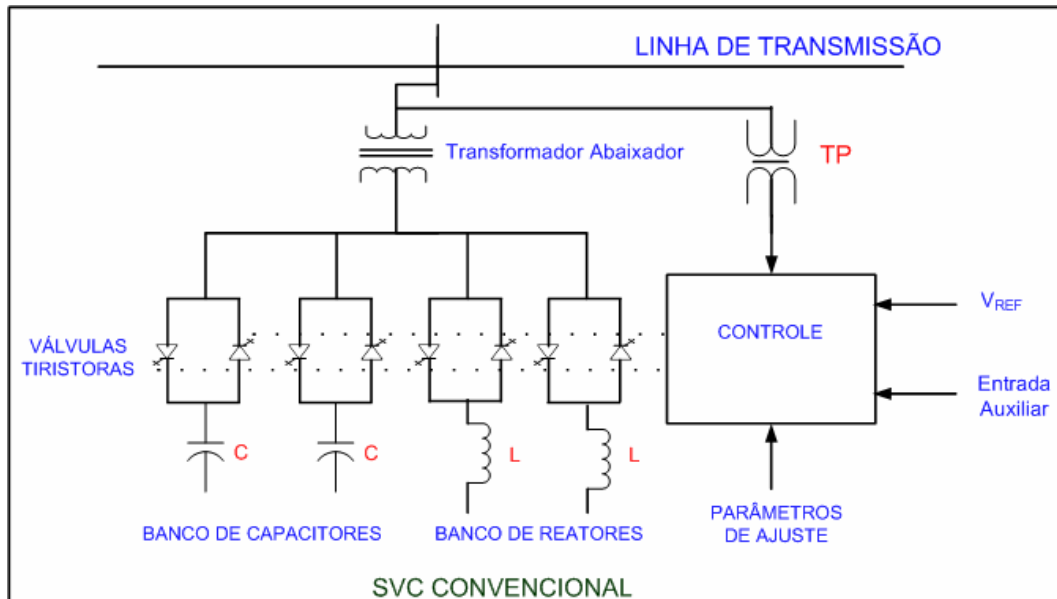


Fig. 2.5 Compensador estático de reativo convencional (SVC)

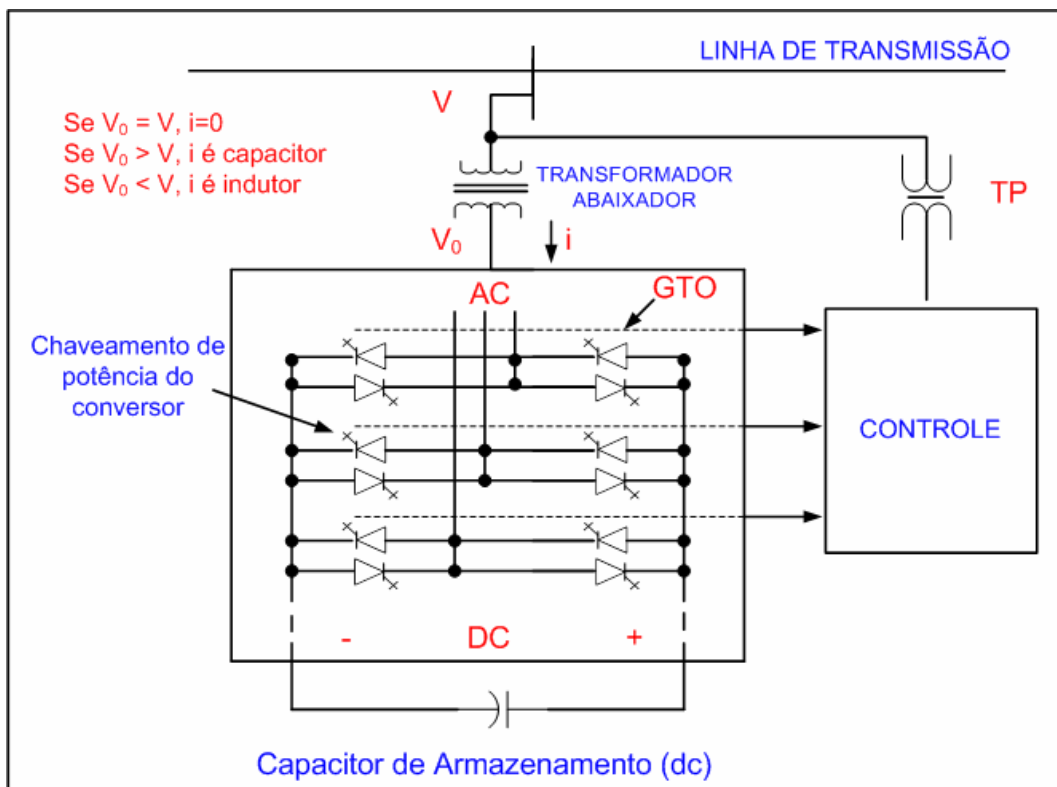


Fig. 2.6 Compensador avançado de reativos (STATCOM)

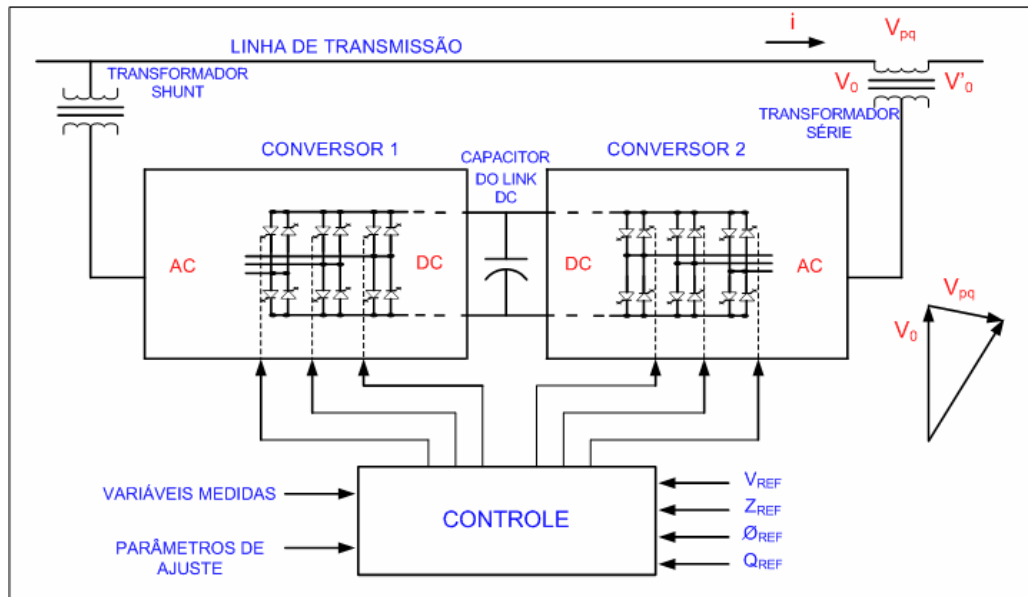


Fig. 2.7 Controlador unificado de fluxo de potência (UPFC)

2.7 Controladores FACTS e suas Aplicações

Os controladores apresentados no item anterior possuem as seguintes atribuições:

- SVC: Controle de tensão, compensação de reativos, amortecimento de oscilações;
- STATCOM: Controle de tensão, compensação de reativos, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória;
- TCSC: Controle de potência, controle de tensão, controle de impedância série, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória;
- Transformador Defasador Chaveado a Tiristor: Controle de potência, controle de tensão, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória;
- UPFC: Controle de potência, controle de tensão, compensação de reativos, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória.

Além dos controladores FACTS listados acima, existe um grande número de diferentes projetos, na maioria derivados dos anteriormente apresentados.

2.8 Expectativas de Novas Tecnologias

A flexibilização dos sistemas de corrente alternada aparece como uma alternativa atrativa no que diz respeito ao adiamento de grandes investimentos nos sistemas já existentes. Como resultado principal da utilização de controladores FACTS está a utilização mais racional dos sistemas implantados, sem a necessidade de construção imediata de geração adicional e linhas de transmissão, que sem dúvida representam os maiores investimentos num sistema de potência.

Com a franca expansão de mercado dos controladores FACTS, os fabricantes de componentes eletrônicos vêem na eletrônica de potência um grande filão a ser explorado. Desta forma novos componentes eletrônicos tem sido apresentados freqüentemente. Os velhos tiristores de potência em breve darão lugar a componentes com novas tecnologias, com níveis de potência exigidos pelo mercado. Como exemplo atual, os GTOs (gate turn-off thyristors), MCTs (MOS Controlled Thyristors), IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) já se encontram no mercado, oferecendo novas opções nos projetos dos controladores.

Entretanto os altos investimentos aplicados no desenvolvimento das tecnologias FACTS envolveram grandes somas de recursos financeiros, pois o uso de dispositivos eletrônicos de alta potência é fundamental e de difícil implementação técnica. E os estudos para aplicação nos sistemas de EAT (Extra Alta Tensão) não encontraram uma quantidade significativa de aplicações que permitisse o retorno desses investimentos.

A tendência dos próximos anos, devido aos aspectos citados, é de que o sistema de potência seja dotado de recursos para o controle dinâmico do fluxo de potência em todos os níveis, desde a geração até o consumo. Conseqüentemente, deverão ser

implementados novos sistemas de proteção e rotinas de supervisão da operação, prevendo que os parâmetros e a estrutura do sistema poderão variar continuamente. Como opção de avaliação do desempenho dos dispositivos FACTS e buscando um mercado muito maior do que o da transmissão, a tendência é que os fabricantes partam para desenvolvimentos mais direcionados à distribuição.

2.9 Levantamento Bibliográfico

Realizado o Levantamento Bibliográfico, efetuou-se a estruturação do mesmo para identificar os assuntos envolvidos visando sintetizar os aspectos relacionados ao trabalho. Neste sentido, os artigos e bibliografias pesquisadas foram classificados da seguinte forma:

- Introdução e Conceituação
- Qualidade de Energia
- Modelagens
- Soluções de Equipamentos e Controle
- Aplicações
- Protótipos e Experiência de Campo.

2.9.1 Introdução e Conceituação

Os artigos [6], [14], [21], [22], [1], [38], [39] e [40] em geral apresentam os princípios básicos, conceitos e tutoriais, sobre controladores FACTS e a teoria da potência ativa e reativa instantânea, como forma de aumentar a controlabilidade, estabilidade e a capacidade de transferência de potência em sistemas de potência CA. Mostra o aumento da necessidade de controlar a qualidade e confiabilidade da energia

elétrica, que provocou a crescente aplicação dos semicondutores de potência, culminando com a evolução de controladores. Estes dispositivos podem ser aplicados em sistemas equilibrados e desequilibrados, com e sem harmônicos, controlando o fluxo de potência ativa e reativa, tanto para níveis de transmissão como distribuição.

Especificamente na referência [1] são apresentados dispositivos semicondutores de potência, conversores de tensão e corrente, controladores específicos de FACTS incluindo SVC, STATCOM, TCSC, UPFC, além de reguladores de tensão, Phase Shifters, e controladores especiais com comparações detalhadas de seus atributos e desempenho, necessários para entender melhor a aplicação de cada um deles.

2.9.2 Qualidade de Energia

Os artigos [5], [16], [23] e [25] apresentam como as tecnologias FACTS podem melhorar e garantir a qualidade da energia elétrica, visando proteger os consumidores de variações momentâneas de tensão, harmônicos, e demais distúrbios elétricos, levanta questões econômicas considerando o aspecto do Custom Power (fornecimento de energia customizado, voltados para atender as necessidades do cliente). Alguns artigos também fazem considerações sobre a integração destes dispositivos com o sistema ao qual estão conectados.

2.9.3 Modelagens

Os artigos [2], [4], [12], [24], [27], [28], [31], [34], [35], [41], [42], [43], [44], e [52] apresentam vários modelos e ferramentas para simulação, análise e estudo para aplicações de dispositivos que compõem as várias tecnologias FACTS, destacando as técnicas de modelagem de controle CA do DSTATCOM, para operação, controle

e planejamento de redes de distribuição, formas de corrigir anomalias no sistema elétrico e formas de extinguir o arco secundário na abertura de chaves monopolares através de injeção de correntes de compensação instantâneas obtidas através de controle PWM.

2.9.4 Soluções de Equipamentos e Controle

Nos artigos [8], [9], [19], [32], [33], [36], [37], [50], [51], [53], [54], [55], [56], [57] e [58], são demonstrados vários tipos de soluções, baseadas em tecnologias existentes para Custom Power, resolvendo problemas como afundamentos e elevações de tensão e interrupções momentâneas de fornecimento de energia, através de diversas técnicas.

Alguns artigos mostram análises dos custos e benefícios associados a soluções para Custom Power, comentando principalmente os aspectos e as vantagens de soluções através de controladores UCPC (Universal Custom Power Conditioner) e DSTATCOM, na distribuição.

O artigo [33] apresenta uma solução para eletrificação de áreas rurais de baixo custo utilizando conversor eletrônico de potência.

2.9.5 Aplicações

Os artigos [3], [11], [13], [15], [17], [18], [20], [26], [29], [30], [45], [46] e [47] mostram a aplicação dos conceitos de potência instantânea para condicionamento da qualidade da energia fornecida e as respostas dos dispositivos visando mitigar distúrbios presentes no sistema elétrico. Cita os aspectos técnicos que devem ser considerados por fornecedores e usuários, na interface dos Dispositivos de Custom Power com o sistema convencional.

São apresentados vários tipos de dispositivos de potência adaptável, com considerações sobre sua aplicação para diferentes finalidades, e diversas aplicações de DSTATCOM. A título de exemplo, o artigo [11] apresenta duas aplicações da tecnologia FACTS baseada em VSI (Voltage Source Inverter): uma destinada a operação do sistema de transmissão da Vermont Electric Power Company (Essex Substation STATCOM Project), e a outra focada na melhora do nível da qualidade da energia elétrica na distribuição (Seattle Irons & Metals Corporation D-STATCOM Project).

2.9.6 Protótipos e Experiência de Campo

Neste item, que contém os artigos [10], [48] e [49], são apresentados protótipos de componentes de potência adaptável com o intuito de melhorar a qualidade da energia. São também apresentadas experiências de campo da empresa CPFL, com instalações de capacitores séries em sistemas de distribuição.

2.9.7 Observações e Comentários

De uma forma geral os artigos mostraram como a evolução tecnológica dos dispositivos semicondutores tem contribuído para o surgimento de novas formas para o condicionamento da energia elétrica, através dos controladores FACTS para aplicação em Sistemas de Potência CA, incluindo a distribuição. E com isso vislumbram-se novos cenários de aplicações dos mesmos para a distribuição, que pode ser desde a viabilização de fornecimentos customizados de energia elétrica para grupo de consumidores, através do condicionamento de uma rede, ou individual, para uma determinada planta ou máquina em particular.

Vários trabalhos também ressaltam a aplicação da tecnologia UPFC, como sendo um compensador universal, tanto para aplicações na regulação e controle da tensão e carga, como para soluções para problemas de distorções harmônicas e variações bruscas da tensão.

3 APLICAÇÕES

Para as aplicações escolhidas no presente trabalho, a compensação série e a utilização do dispositivo para paralelismo de alimentadores, houve a necessidade de definir um dispositivo FACTS mais adequado para ambas as aplicações, conforme descrito abaixo.

3.1 Escolha do Dispositivo FACTS para utilização nas aplicações

Dentre os tipos de dispositivos descritos no item 2.6, verifica-se que os compensadores shunt tornam-se ineficazes no controle de fluxo de potência quando o sistema opera com uma tensão definida. Neste caso os compensadores série podem desempenhar esta função.

Dentre os compensadores, o que apresenta maiores vantagens é o ramo série do UPFC (figura 2.7), que neste trabalho será denominado UPFC(D), pelas seguintes razões:

- O UPFC(D) entre os compensadores séries citados é o único que efetua a compensação da potência ativa e reativa, os demais compensam somente a parte reativa.
- É capaz compensar a tensão independente da magnitude da corrente de linha, ao passo que os demais possuem uma faixa de controle dependente da corrente de linha.
- O UPFC(D) acoplado ao armazenador de energia (capacitor no “link DC”, figura 2.7) aumenta a efetividade do amortecimento das oscilações de potência.

- 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 - Compensador Série Controlado a Tiristor tem a vantagem de ser muito simples, entretanto não permite um controle contínuo da reatância série;
- O compensador série TSSC - Capacitor Série Chaveado a Tiristor não deve ser usado em locais que requeiram um alto grau de compensação e onde também há a possibilidade de ressonância subsíncrona, mas pode ser utilizado para controle de fluxo e amortecimentos das oscilações de potência onde o tempo de resposta deste controlador não seja crucial.

Considerando que a escolha da tecnologia FACTS será baseada nos itens referentes, a compensação série e também operação de dois alimentadores em paralelos ligados continuamente, concluiu-se que o UPFC(D), atende a ambos os requisitos.

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

3.2 Compensador Série

A caracterização do problema referente à compensação série pode ser verificada conforme a descrição abaixo.

Na Fig. 3.1 encontra-se a representação de um alimentador de distribuição onde se deseja compensar a reatância do mesmo.

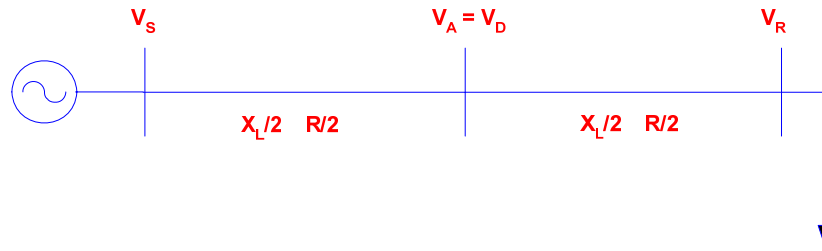


Fig. 3.1 Alimentador de distribuição

Na Fig. 3.2 é ilustrada a representação de um capacitor inserido no meio do alimentador para a devida compensação.

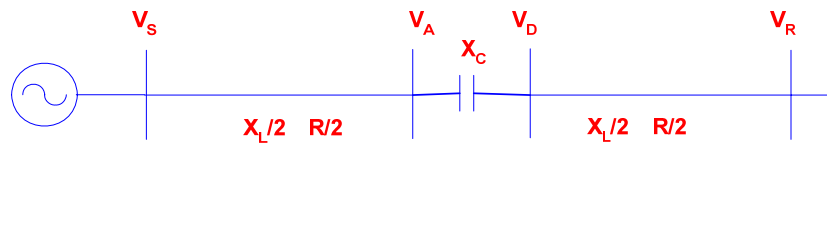


Fig. 3.2 Alimentador de distribuição com capacitor para uma dada compensação

No diagrama da Fig. 3.3 estão representadas as tensões do alimentador antes da inserção do capacitor.

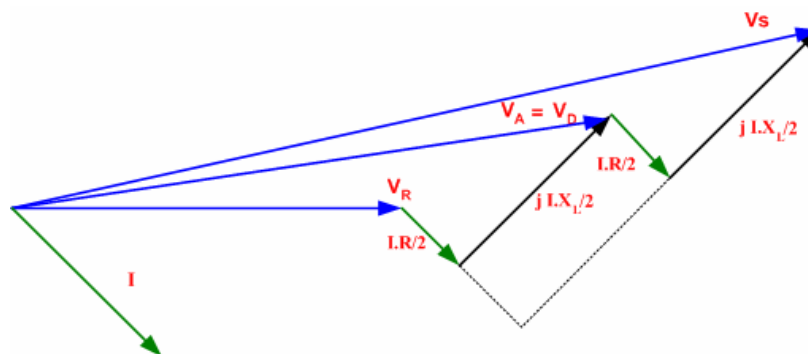


Fig. 3.3 Tensões no alimentador antes da compensação

O diagrama da Fig. 3.4 ilustra o efeito do capacitor inserido no meio do alimentador, para uma compensação de 50%.

Assim com a colocação do compensador (Fig. 3.5 e 3.6), este pode operar injetando tensão no alimentador conforme a equação (3.1).

$$\dot{V}_D = \dot{V}_A - \dot{V}_C \quad (3.1)$$

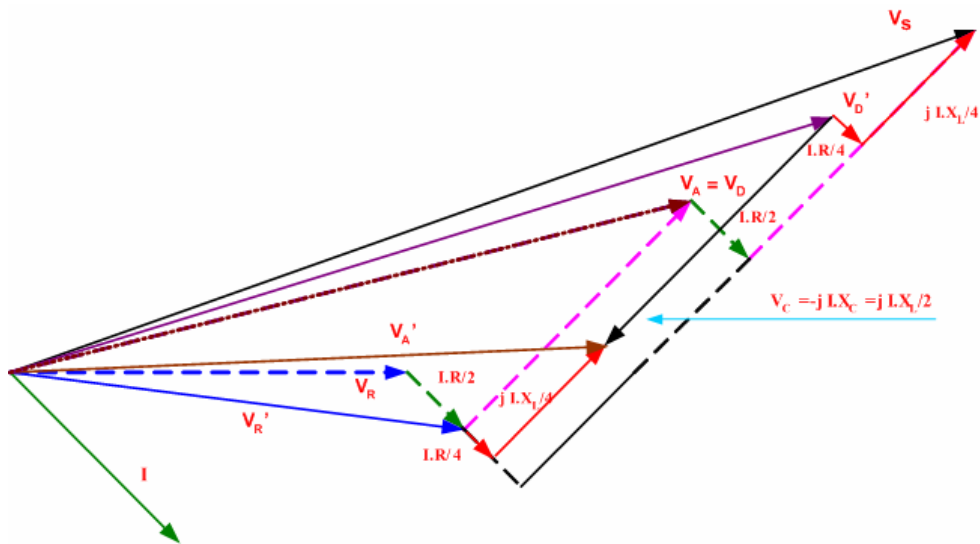


Fig. 3.4 Tensões no alimentador após a compensação

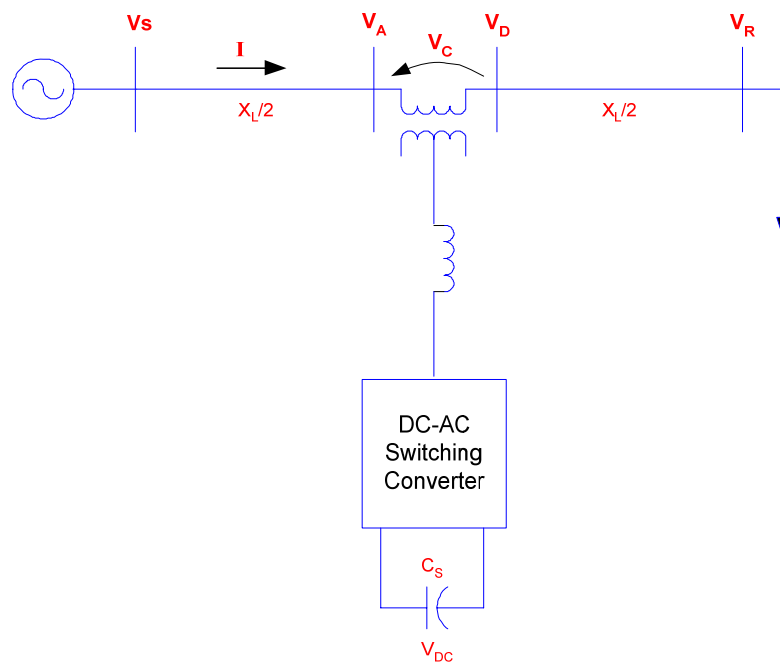


Fig. 3.5 Alimentador de distribuição com o UPFC(D)

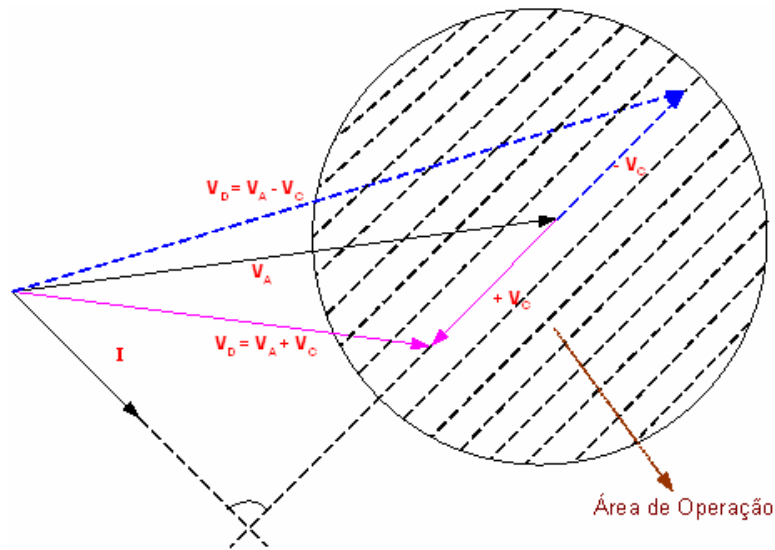


Fig. 3.6 Diagrama fasorial ilustrando a capacidade do UPFC(D)

3.3 Dispositivo para Operação de Alimentadores operando em Paralelo

Normalmente em uma rede de distribuição os circuitos operam no sistema radial. Existem vários pontos no sistema em que é possível efetuar transferência de carga de um circuito para outro. A execução desta manobra no sistema nem sempre é possível de ser efetuada sem um prévio desligamento das cargas dos circuitos. Assim a utilização de um dispositivo que pode efetuar esta operação pode contribuir para melhoria do DEC e FEC do sistema.

Neste sentido a utilização do dispositivo FACTS UPFC(D) pode contribuir para interligação dos circuitos sem a necessidade de desligamento, inclusive podendo controlar do fluxo de potência entre os alimentadores.

Na Figura 3.7 ilustra representação de um UPFC(D) inserido entre os alimentadores para o devido controle de fluxo de potência. Este dispositivo pode se comportar como um capacitor ou reator variável, dependendo do módulo e da fase da tensão injetada. Neste trabalho serão estudados somente os casos em que o UPFC(D) irá operar como capacitor ou reator variável.

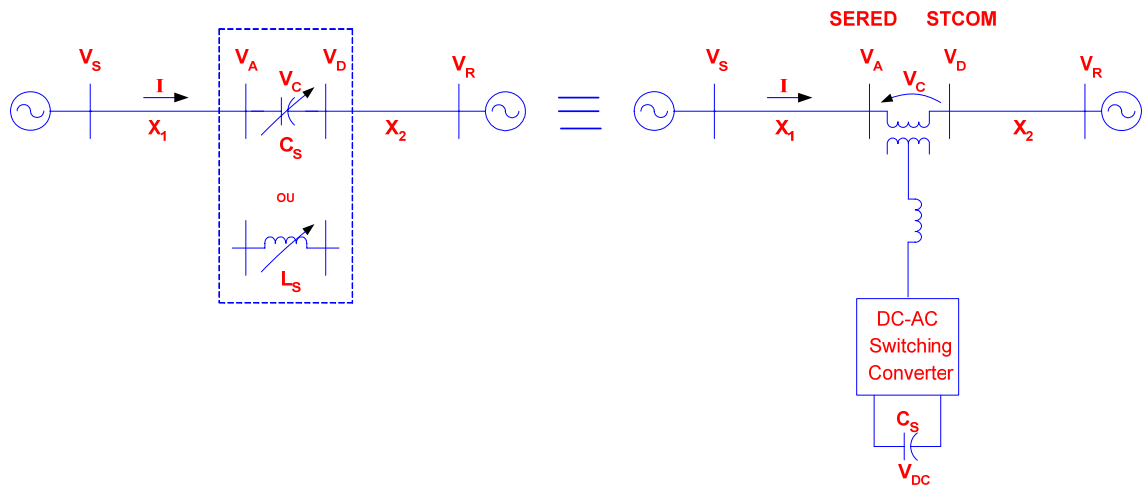


Fig. 3.7 Alimentadores conectados através de um UPFC(D) para controle do fluxo de potência

No diagrama da Figura 3.8 estão representadas as tensões do alimentador antes da inserção do UPFC(D). Para este diagrama, o dispositivo foi inicialmente curto-circuitado para poder determinar o fluxo entre os alimentadores antes de sua atuação. Para esta ilustração as perdas ($R_{\text{ALIMENTADORES}} = 0$) e as cargas intermediárias dos alimentadores foram desconsideradas para facilitar a compreensão do funcionamento do UPFC(D).

O fluxo de potência nesta condição é dado por P_1 , sendo:

$$P_1 = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2} \sin \delta \quad (3.2)$$

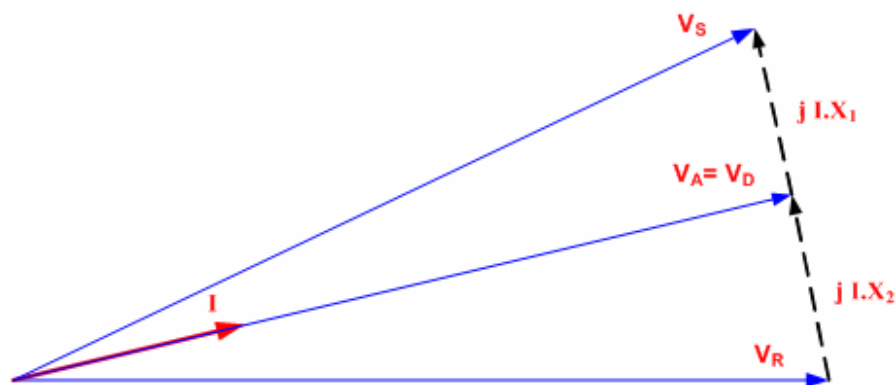


Fig. 3.8 Tensões nos alimentadores antes da atuação do UPFC(D)

O diagrama da Figura 3.9 ilustra o efeito do UPFC(D) inserido entre os alimentadores, para um fluxo de potência ativa positivo, mas como o ângulo δ é fixado pelo sistema, tem-se $P_2 < P_1$ (sentido de VS para VR). Para esta condição o dispositivo atua como um reator e o fluxo de potência P_2 é dado por:

$$P_2 = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2 + X_{equip}} \text{sen } \delta = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2 + X_L} \text{sen } \delta \quad (3.3)$$

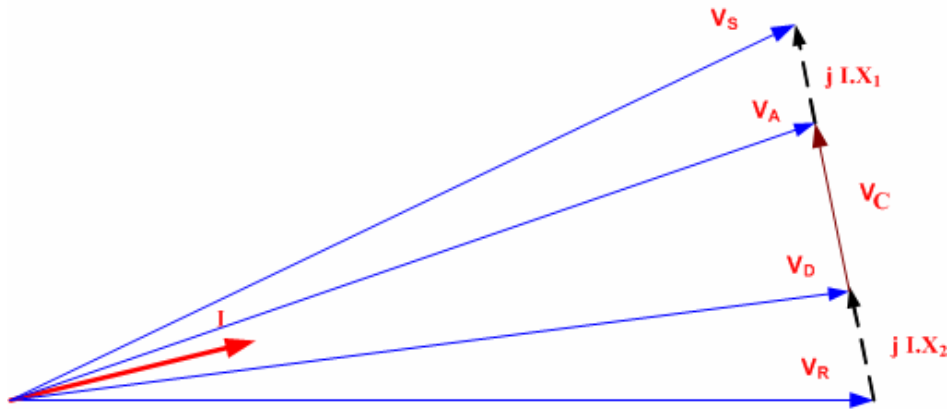


Fig. 3.9 Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como reator e para um fluxo de potência ativa positivo

No diagrama da Figura 3.10, é ilustrado o efeito do UPFC(D) inserido entre os alimentadores, para um fluxo de potência ativa positivo P_3 e como o ângulo δ é fixado pelo sistema, tem-se $P_3 > P_1$ (sentido de VS para VR). Para esta condição o dispositivo atua como um capacitor e o fluxo P_3 é dado por:

$$P_3 = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2 - X_{equip}} \text{sen } \delta = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2 - k(X_1 + X_2)} \text{sen } \delta \quad (3.4)$$

$k =$ % de compensação da reatância do alimentador

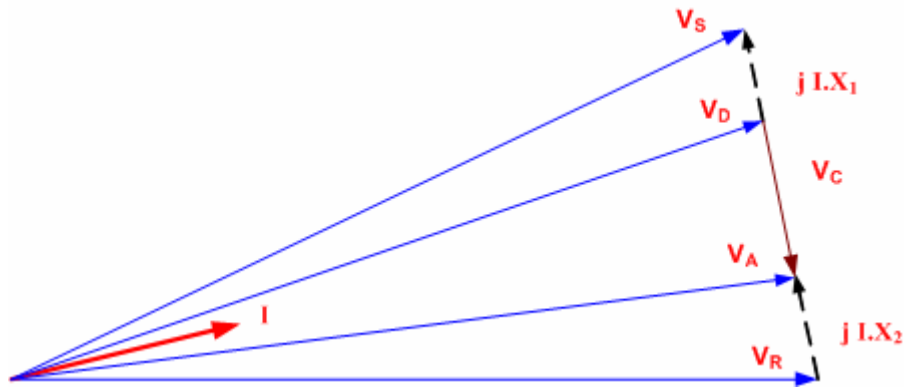


Fig. 3.10 Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor e ainda para um fluxo de potência ativa positivo

No diagrama da Figura 3.11, é ilustrado o efeito do UPFC(D) inserido entre os alimentadores, para um fluxo máximo P_4 e como o ângulo δ é fixado pelo sistema. Para esta condição tem-se $k=1$ e o dispositivo atua como um capacitor. O fluxo P_4 é dado por:

$$P_4 = \frac{V_S V_R}{\sim 0} \text{sen} \delta \Rightarrow \infty \qquad P_4 = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2 - 1(X_1 + X_2)} \text{sen} \delta \Rightarrow \infty \qquad (3.5)$$

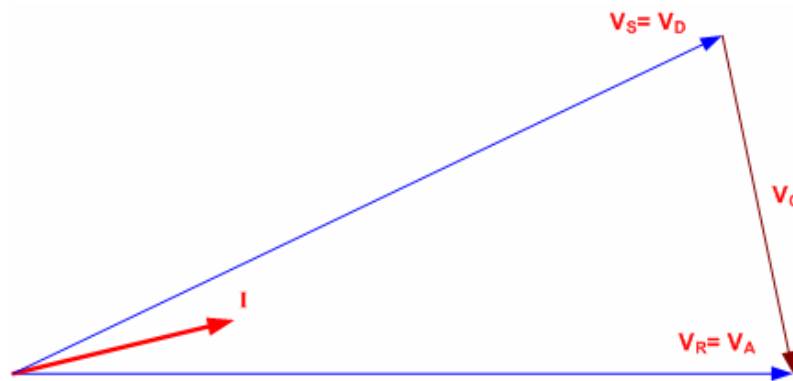


Fig. 3.11 Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor para um fluxo máximo de potência ativa

No diagrama da Figura 3.12, é ilustrado o efeito do UPFC(D) inserido entre os alimentadores, para um fluxo de potência ativa P_5 negativa, ou seja, o fluxo de potência está no sentido de V_R para V_S . Para esta condição como o ângulo δ

também é fixado pelo sistema o dispositivo deve atuar como um capacitor. O dispositivo injeta uma tensão proporcional à $X_1+X_2+\Delta X_C$, sendo que ΔX_C corresponde a um incremento na reatância capacitiva necessária para estabelecer o fluxo de potência no valor P_5 . A expressão do fluxo é dada por:

$$P_5 = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2 - X_{equip}} \text{sen } \delta = \frac{V_S V_R}{X_1 + X_2 - (X_1 + X_2 + \Delta X_C)} \text{sen } \delta \quad (3.6)$$

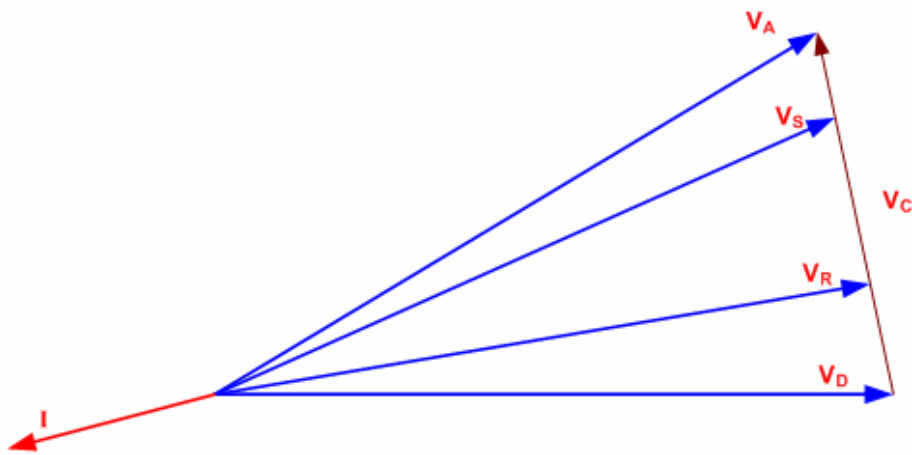


Fig. 3.12 Tensões nos alimentadores após a inserção do UPFC(D) como capacitor para um fluxo de potência ativa negativo

Observa-se que para as condições apresentadas acima, o UPFC(D) não injeta potência ativa no sistema. Isto significa que a tensão injetada deverá estar defasada da corrente de $\pm 90^\circ$. Para defasagens diferentes de $\pm 90^\circ$ haverá a injeção de potência ativa pelo dispositivo.

Detalhes adicionais sobre a representação dos diagramas podem ser verificados em [63].

Na figura 3.13 (similar à figura 3.6) apresenta-se o diagrama fasorial nas barras onde está o compensador.

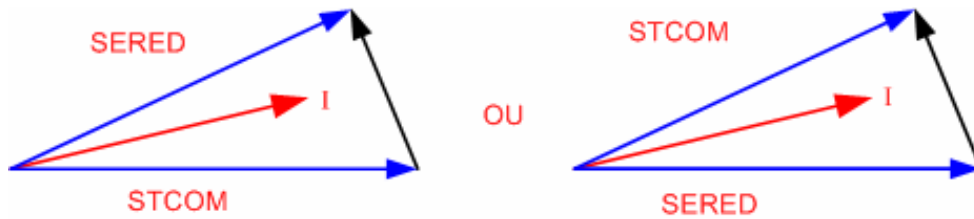


Fig. 3.13 Tensões nos alimentadores

Ao introduzir uma queda de tensão equivalente a queda sobre um capacitor aumenta-se a potência transferida. Caso a queda seja equivalente à queda sobre o indutor diminui-se a potência transferida.

O efeito pode, pois ser conceituado através da equação:

$$P = \frac{E_{TAQ} * E_{ND}}{X_{TAQ-ND} + X_C} \text{sen}\delta \quad (3.7)$$

E_{TAQ} , E_{ND} : tensões internas nos equivalentes em Taquaral e Notre Dame conforme indica na figura 4.10 da página 49;

X_{TAQ-ND} : reatância entre as duas tensões dos equivalentes;

X_C reatância de compensação (capacitiva ou indutiva)

Na figura 3.14 apresenta-se a potência transferida em função de X_C .

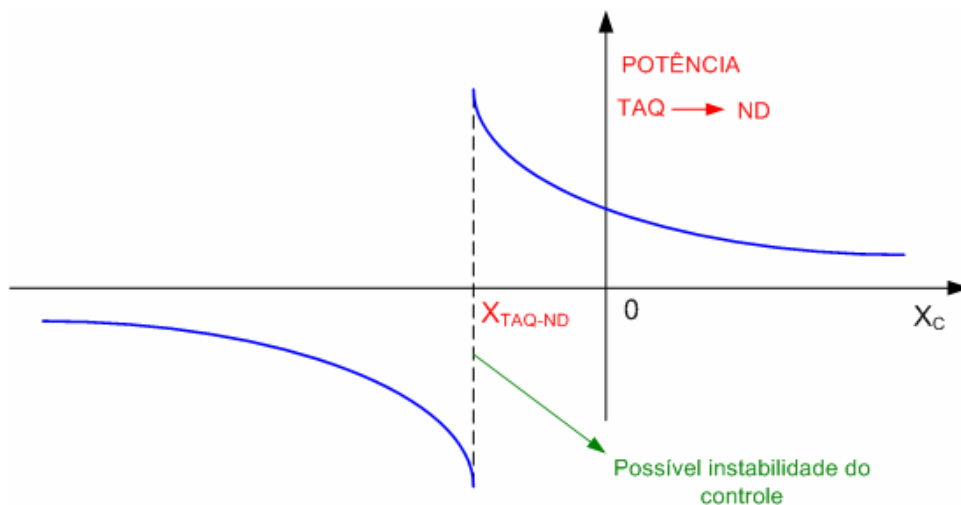


Fig. 3.14 Tensões nos alimentadores

Verifica-se que quando $X_{TAQ-ND} = X_C$ tem-se o valor da potência tendendo a mais ou menos infinito indicando neste ponto, uma possível instabilidade do controle do sistema.

Deve-se ressaltar que, na prática, em função da alta resistência observada nas linhas de distribuição esta tendência não acontece.

Observa-se também que para obtenção do zero de potência na interligação o valor de X_C deverá tender para menos ou mais infinito.

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Como reportado anteriormente, neste capítulo serão simulados:

- FACTS atuando como compensação série;
- FACTS para permitir a operação de alimentadores em paralelo.

4.2 FACTS atuando como Compensação Série

4.2.1 Sistema Elétrico para simulação do FACTS atuando como Compensação Série

Para as simulações que serão apresentadas foram adotados valores de um caso real de parâmetros do sistema elétrico e valores típicos para o sistema de controle.

A simulação do dispositivo atuando como capacitor série foi efetuada utilizando-se a configuração do sistema elétrico da CPFL para a alimentação do sistema SABESP de Franca conforme a Fig. 4.1 cuja carga é composta por dois conjuntos de motores de indução trifásicos que acionam o sistema de bombeamento de uma estação de água.

O primeiro conjunto é formado por três motores com potência de 1700 kVA ligados à barra STCOM, o segundo conjunto constituído de três motores com potência de 1350kVA cada, ligados à barra BEE-1.

A partida dos motores é efetuada de forma alternada. Verificou-se que a condição de maior solicitação no sistema é a partida do último motor (1350kVA), apesar de ser o de menor potência. Assim a simulação da partida efetuada foi aquela em que já

estão operando 5 motores em regime permanente (2 conectados à barra BEE-1 e 3 à barra STCOM).

Observa-se que os motores foram simulados de forma simplificada, utilizando-se de chaveamento de impedância, uma vez que o objetivo principal foi verificar a atuação do dispositivo FACTS atuando como um capacitor.

A Fig. 4.1 mostra o diagrama unifilar do sistema simulado. A partir da esquerda para a direita observam-se os seguintes componentes: fonte ideal; equivalente da geração GER-SE; primeiro trecho do alimentador SE-BCAP; carga capacitiva em BCAP; segundo trecho do alimentador BCAP-SERED; transformador de injeção SERED-STCOM; 3 motores em STCOM; terceiro trecho do alimentador STCOM-BEE-1 e 3 motores em BEE-1.

A partir do secundário do transformador de injeção têm-se os seguintes componentes: filtro LC (L_{filtro} e C_{filtro}); pontes H (com 4 chaves ch1 a ch4); capacitor com tap central (link CC); retificador controlado e fonte ideal para carregamento do capacitor.

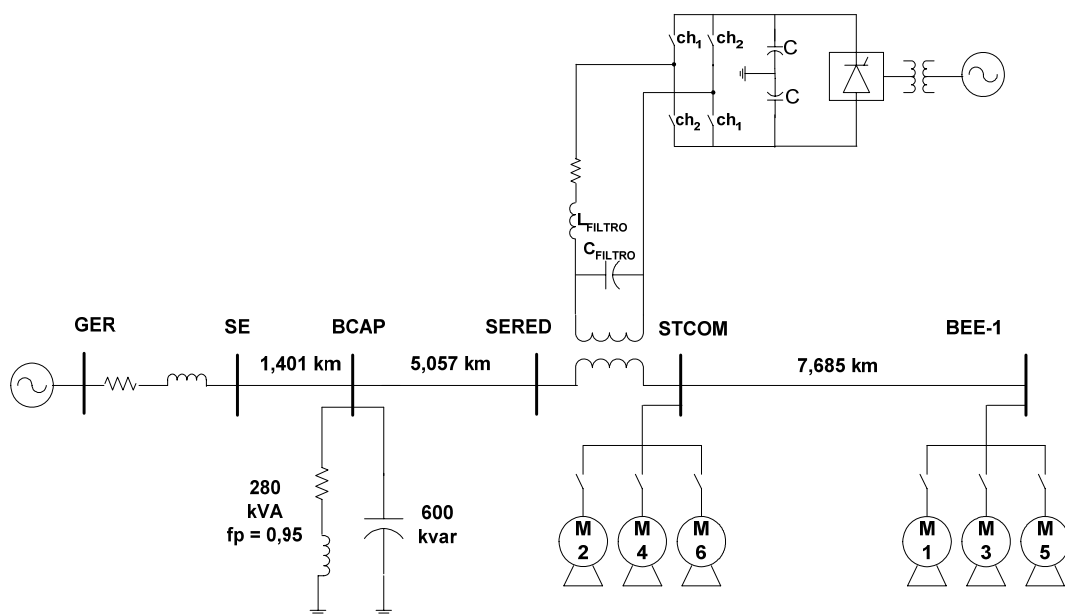


Fig. 4.1 Diagrama unifilar do Sistema Simulado

Os parâmetros do sistema são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados do sistema simulado

Equivalente da geração	Linha aérea (alimentador)
$V = 13,8 \text{ kV}$	$r_o = 0,34661 \text{ } \Omega/\text{km}$
$R_1 = 0,0322 \text{ } \Omega$	$x_o = 2,22274 \text{ mH/km}$
$X_1 = 1,1911 \text{ } \Omega$	$r_1 = 0,170300 \text{ } \Omega/\text{km}$
	$x_1 = 0,330529 \text{ } \Omega/\text{km}$

Os parâmetros do FACTS utilizados na simulação são apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Novamente, é importante ressaltar que os valores utilizados na modelagem do compensador série são valores típicos.

Tabela 4.2 - Dados do Inversor

Portadora	10000 V _{pico a pico}
Freq. Chaveamento	10 kHz

Tabela 4.3 - Dados Capacitor do Link CC

Capacitância (C_1 fig.4.2)	5 mF
Tensão de pico	10000 V

Tabela 4.4 - Dados do Filtro do Inversor

Capacitância (C_2 fig.4.2)	75,5 μF (*)
Indutância (L_f fig.4.2)	5 mH (*)

(*) Valores ajustados de forma a se obter melhores formas de onda na saída

Tabela 4.5 - Dados do Transformador Série

V = 13,8 / 13,8 kV
S = 30 MVA
Z% = 5%

4.2.2 Modelo do FACTS atuando como Compensação Série

Na Fig. 4.2 encontra-se apresentado o FACTS e o sistema de controle do compensador com os seguintes conjuntos:

- filtro passa baixo; amostragem de sinal, cálculo do módulo e fase da fundamental da corrente nas fases (I_a , θ_a ; I_b , θ_b ; I_c , θ_c);
- bloco de cálculo da seqüência positiva resultando (I_{pos} , θ_{pos});
- bloco de cálculo da queda capacitiva equivalente;
- blocos do PWM (pulse width modulation);
- blocos com ponte H e filtro;
- blocos com transformador de injeção de tensão série.

Desta forma a partir das correntes amostradas em SERED, calcula-se pelo algoritmo de Mann-Morrison [64], utilizado em proteção digital, a parcela da componente fundamental das correntes I_a , I_b , I_c e a seqüência positiva correspondente à queda tensão desejada (X^*I) a ser injetada no alimentador.

4.2.3 Resultados

Para a configuração adotada, de maior solicitação no sistema com a partida do último motor (M6) com os demais motores em regime permanente, foi verificado inicialmente o desempenho do sistema antes da introdução da compensação.

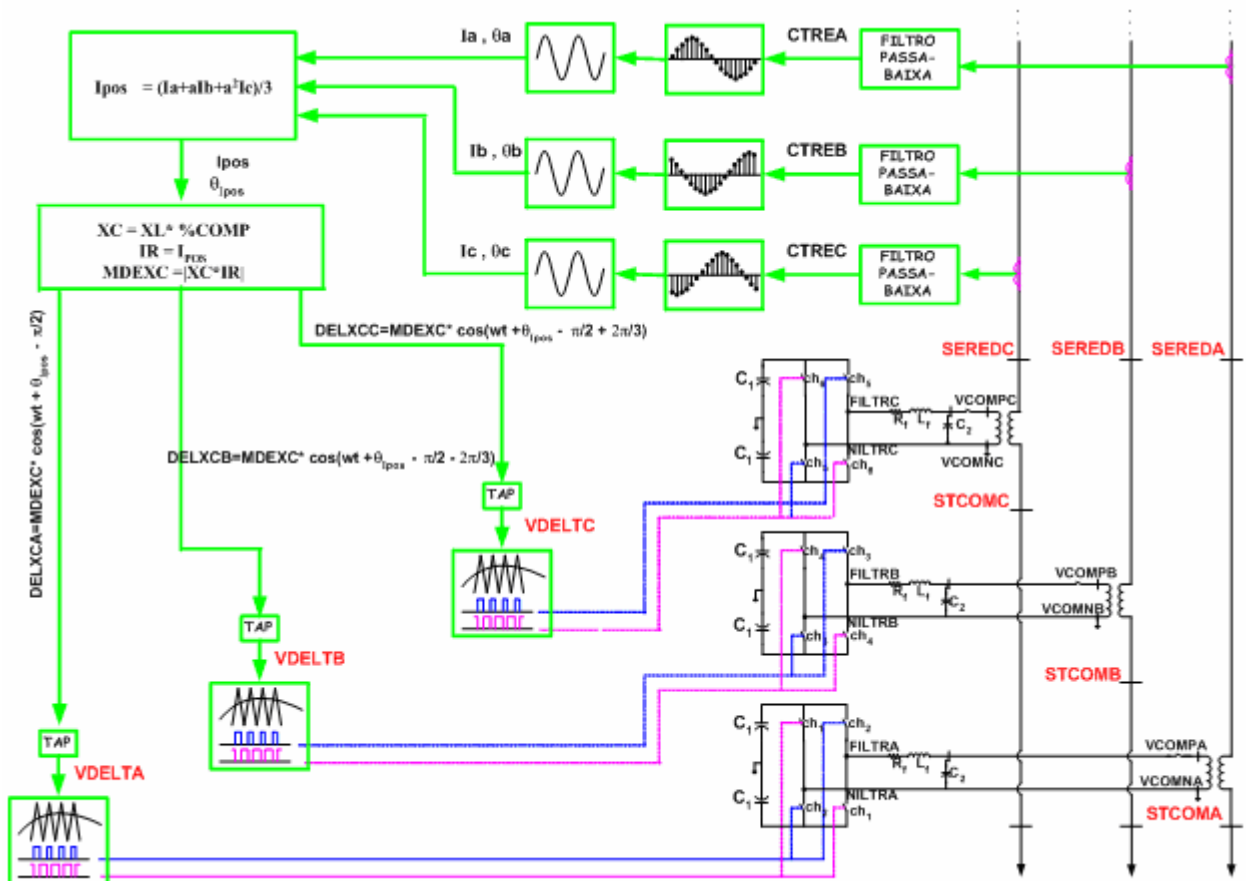


Fig. 4.2 Sistema de controle das chaves

4.2.3.1 Resultados Obtidos sem o FACTS (D)

A Fig. 4.3 mostra nos instantes iniciais da simulação a corrente de partida do motor e a corrente total no alimentador antes da compensação.

A Fig. 4.4 mostra o perfil da tensão no sistema durante a partida do motor. As tensões nas barras do sistema podem ser vistas com maior detalhe na Fig. 4.5 da qual se pode observar que as tensões nas barras SERED e STCOM são coincidentes, devido à ausência do compensador. Na Tabela 4.6 são mostrados os valores de tensão nas barras do sistema antes da compensação.

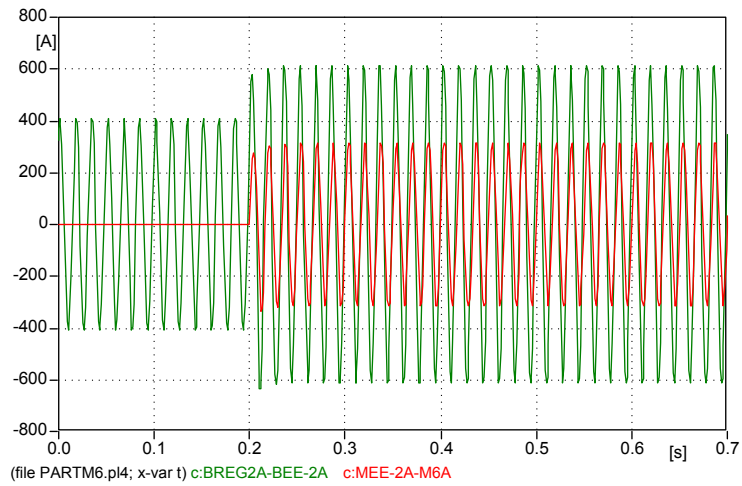


Fig. 4.3 Correntes do motor e alimentador do sistema simulado sem a compensação

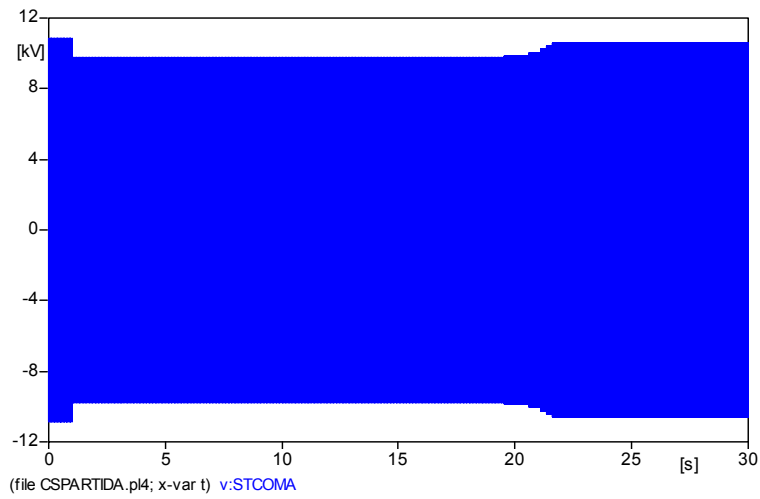
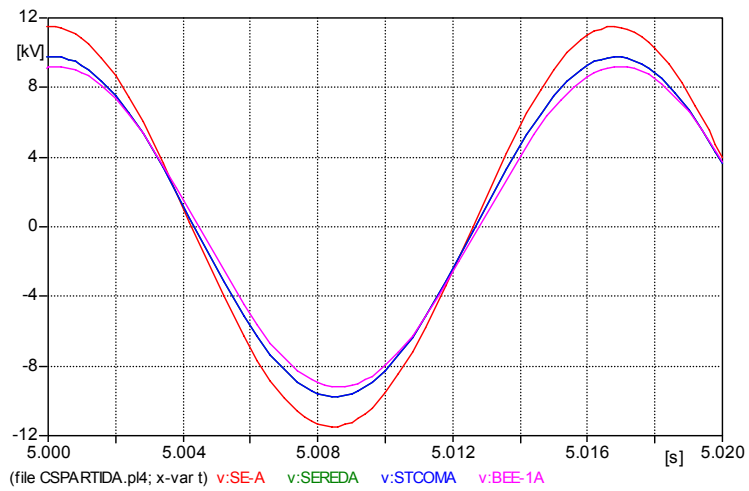


Fig. 4.4 Perfil de Tensão Durante Partida do Motor sem a compensação



(SEREDA = STCOMA)

Fig. 4.5 Tensões nas barras do sistema simulado sem a compensação

Tabela 4.6 - Tensão Fase-Terra nas Barras do Sistema sem o compensador

BARRA	PRÉ-PARTIDA		NO INÍCIO DA PARTIDA		REGIME APÓS PARTIDA	
	kV _{pico} Φ-T	pu	kV _{pico} Φ-T	pu	kV _{pico} Φ-T	pu
SE	11,82	1,049	11,48	1,019	11,75	1,043
BCAP	11,62	1,031	11,12	0,986	11,53	1,023
STCOM	10,83	0,961	9,73	0,864	10,61	0,942
BEE-1	10,22	0,907	9,21	0,817	9,98	0,887

4.2.3.2 Resultados Obtidos com o FACTS

Para a verificação do desempenho do FACTS como compensador série foi simulado o dispositivo de forma a compensar 100% da reatância do alimentador, ou seja:

$$X_C = 100\% X_L = 5,704 \Omega$$

Para esta análise a partida do motor ocorreu em $t=0,2s$ e a inserção do compensador em $t=0,5s$ para identificar melhor a atuação do compensador.

A Fig. 4.6 mostra a corrente de partida do motor com a atuação do compensador. Observa-se que no instante 0,5s ocorre um aumento na corrente em consequência do aumento da tensão provocada pela inserção do compensador. As tensões nas barras podem ser vistas na Fig. 4.7 da qual se observa em comparação com a Fig. 4.5, a ocorrência da elevação das tensões nas barras STCOM e BEE-1.

Deve-se ressaltar que as curvas obtidas para este caso apresentam-se ligeiramente onduladas, devido à frequência de chaveamento do inversor do UPFC(D).

Na Tabela 4.7 são ilustrados os valores das tensões nas barras com a atuação do compensador já nos instantes iniciais da partida do motor.

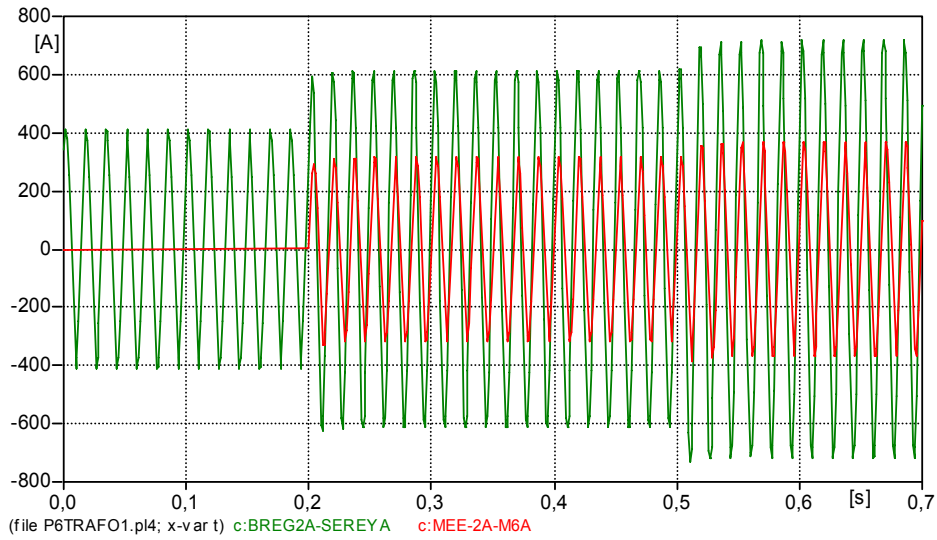


Fig. 4.6. Correntes do motor e alimentador do sistema simulado
Motor partindo no instante $t= 0,2s$ e compensador inserido em $t=0,5s$

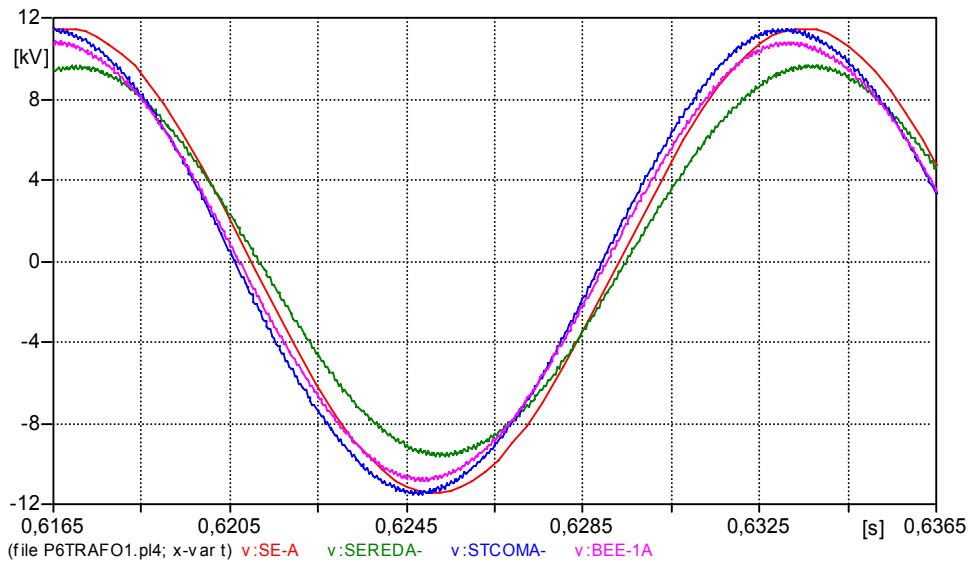


Fig. 4.7 Tensões nas barras do sistema simulado
Motor partindo no instante $t= 0,2s$ e compensador inserido em $t=0,5s$

Tabela 4.7 - Tensão fase-terra, nas barras do sistema, com a atuação do compensador nos instantes iniciais da partida

BARRA	PARTIDA COM COMPENSADOR	
	$kV_{\text{pico}} \Phi\text{-T}$	ρu
SE	11,47	1,018
BCAP	11,06	0,982
STCOM	11,47	1,018
BEE-1	10,83	0,962

4.2.3.3 Resultados Obtidos com o Capacitor Fixo

A título de comparação, foi verificado também o caso com a presença de um capacitor fixo, sendo o mesmo projetado para compensar 100% da reatância do alimentador. Para esta análise também a partida do motor ocorreu em $t=0,2s$ e a inserção do capacitor em $t=0,5s$.

A Fig. 4.8 mostra a corrente de partida do motor com a inserção do capacitor. As tensões nas barras podem ser vistas na Fig. 4.9 da qual se observa em comparação com a Fig. 4.5, a ocorrência da elevação das tensões nas barras STCOM e BEE-1.

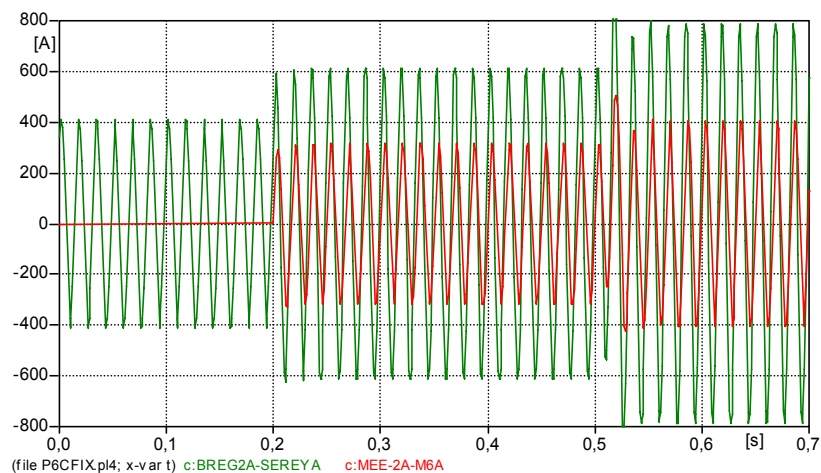


Fig. 4.8 Correntes do motor e alimentador do sistema simulado Motor partindo no instante $t= 0,2s$ e capacitor inserido em $t=0,5s$

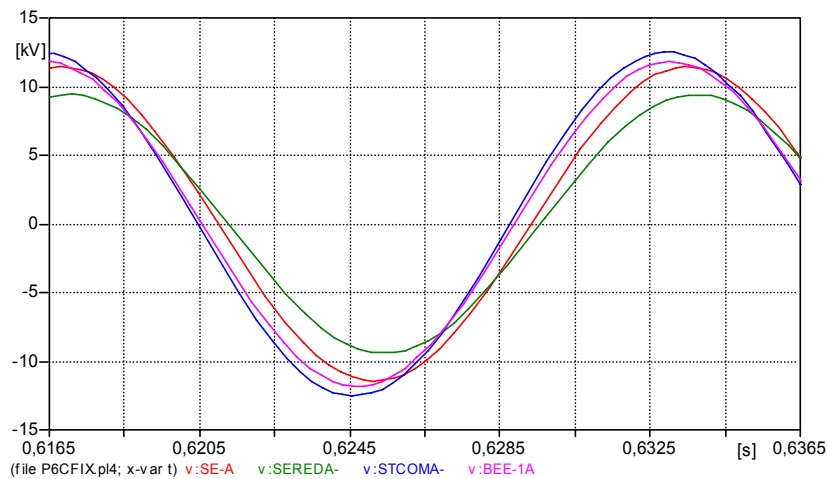


Fig. 4.9 Tensões nas barras do sistema simulado
 Motor partindo no instante $t=0,2s$ e capacitor inserido em $t=0,5s$

Na Tabela 4.8 são ilustrados os valores das tensões nas barras com a inserção do capacitor nos instantes iniciais da partida do motor.

Tabela 4.8 - Tensão fase-terra, nas barras do sistema, com a inserção do capacitor nos instantes iniciais da partida

BARRA	PARTIDA COM CAPACITOR	
	$kV_{\text{pico}} \Phi-T$	pu
SE	11,45	1,016
BCAP	11,01	0,977
STCOM	12,52	1,112
BEE-1	11,81	1,048

4.2.3.4 Queda de tensão no transformador e na impedância do filtro

Constata-se das tabelas 4.7 e 4.8 que os valores obtidos com o compensador são ligeiramente inferiores aos obtidos com o capacitor fixo.

Esta diferença é proveniente da queda de tensão provocada pelo transformador série e também pela impedância do sistema de filtro utilizado no compensador.

Portanto, para UPFC(D) deverá ser previsto uma realimentação para compensação desta queda de tensão.

4.2.3.5 Análise dos Resultados

Dos resultados obtidos pode-se constatar que:

- O compensador tem um desempenho semelhante ao do capacitor fixo, porém, apresenta ligeiras oscilações que são provenientes do chaveamento do inversor, ver figuras 4.7 e 4.9;
- Observa-se das Tabelas 4.7 e 4.8 e das Figuras 4.7 e 4.9 que os valores de tensão das barras STCOM e BEE-1 são menores quando da utilização do dispositivo em estudo. Isto se deve ao fato do compensador série introduzir uma reatância adicional (reatância do transformador injeção) no circuito ao qual ele está conectado e que precisaria ser cancelada adicionalmente. Isto não foi feito, pois os casos obtidos já demonstram a ação correta do FACTS.

4.3 FACTS para permitir a operação de alimentadores em paralelo

4.3.1 Sistema elétrico para simulação do FACTS para permitir operação de alimentadores em paralelo

Neste item serão apresentados os dados utilizados para este estudo.

A simulação do dispositivo atuando entre os alimentadores como um controlador de fluxo foi efetuado utilizando-se a configuração do sistema elétrico do sistema de distribuição da CPFL em Campinas apresentado na Figura 4.10 cujo sistema é

composto pelos alimentadores TAQ-09 e NDA-11 que atendem ao Shopping Galleria e região e operam aberto no ponto NA.

O alimentador TAQ-09 tem sua origem na SE 138kV Taquaral e o alimentador NDA-11 tem sua origem na SE 138kV Notre Dame. Observa-se que ambas as SE's 138kV são alimentadas pela SE 138kV Tanquinho (Figura 4.10).

As cargas do sistema e sua localização encontram-se indicadas na Figura 4.11. Para este estudo foi adotado para todas as cargas, um fator de potência de 0,95.

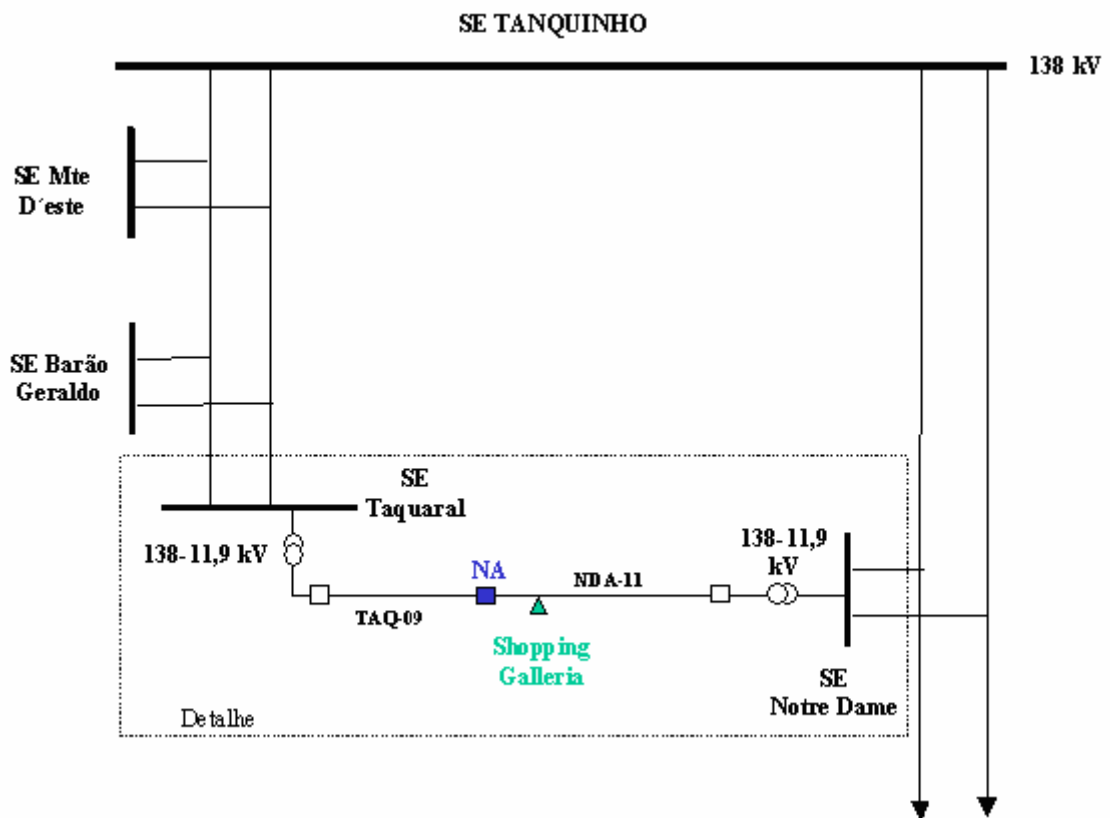


Fig. 4.10 Diagrama unifilar do SE de alimentação do sistema de transmissão 138 kV

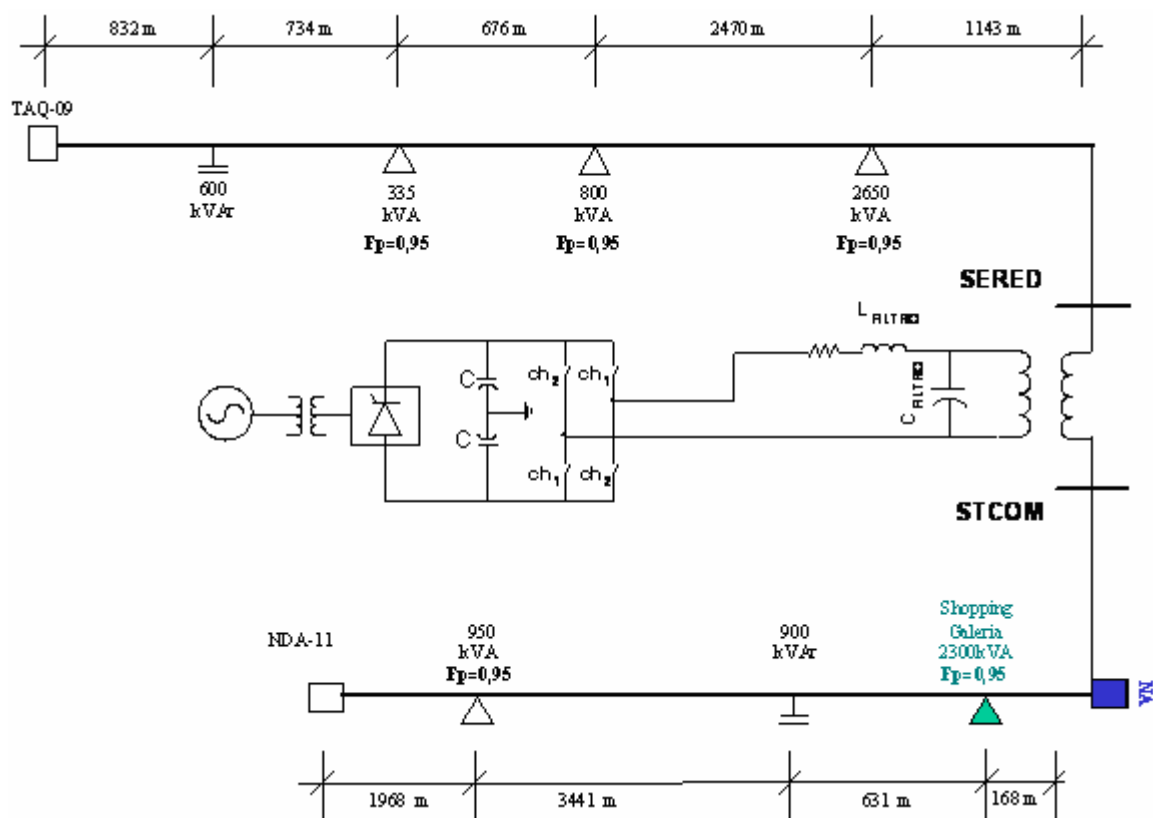


Fig. 4.11 Diagrama unifilar do Sistema Elétrico Simulado com as respectivas cargas

Os parâmetros do sistema são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Dados do sistema simulado

Equivalente da geração		Alimentadores aéreos - cabo CAA 477 MCM
TAQUARAL	NOTRE DAME	$r_o = 0,6058 \Omega/\text{km}$
$V = 11,9 \text{ kV}$	$V = 11,9 \text{ kV}$	$x_o = 1,5706 \Omega/\text{km}$
$R_1 = 0,0202 \Omega$	$R_1 = 0,0199 \Omega$	$r_1 = 0,133 \Omega/\text{km}$
$X_1 = 0,9205 \Omega$	$X_1 = 0,8887 \Omega$	$x_1 = 0,3901 \Omega/\text{km}$

Os parâmetros do FACTS utilizados na simulação são apresentados nas Tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13. Novamente, é importante ressaltar que os valores utilizados na modelagem do equipamento são valores típicos.

Tabela 4.10 - Dados do Inversor

Portadora	10000 V _{pico a pico}
Freq. Chaveamento	10 kHz

Tabela 4.11 - Dados Capacitor do Link CC

Capacitância (C ₁ fig.4.12)	5 mF
Tensão de pico	10000 V

Tabela 4.12 - Dados do Filtro do Inversor

Capacitância (C ₂ fig.4.12)	5 μF (*)
Indutância (L _f fig.4.12)	5 mH (*)

(*) Valores obtidos da referência [66]

Tabela 4.13 - Dados do Transformador Série

V = 13,8 / 13,8 kV
S = 10 MVA
Z% = 18%

4.3.2 Modelo do FACTS atuando para permitir a operação de alimentadores em paralelo

Na Figura 4.12 encontra-se apresentado o FACTS com os seguintes conjuntos:

- filtro passa baixo; amostragem de sinal, cálculo do módulo e fase da fundamental da corrente (I , θ);
- bloco de cálculo da seqüência positiva resultando (I_{pos} , θ_{pos});
- bloco de cálculo da queda reativa equivalente;

- bloco do PWM (pulse width modulation);
- blocos com ponte H e filtro;
- bloco do transformador de injeção de tensão série.

A partir das correntes amostradas em SERED, calcula-se pelo algoritmo Mann-Morrison [64], utilizado em proteção digital, a componente fundamental e as fases das correntes I_a , I_b e I_c . Com o valor do módulo da tensão correspondente a potência desejada e a fase da corrente defasada de $\pm 90^\circ$, obtêm-se a tensão a ser injetada pelo dispositivo.

4.3.3 Resultados Obtidos para o FACTS atuando para permitir alimentadores operando em paralelo

Os resultados foram divididos em dois grupos em virtude do comportamento do fluxo na interligação, que em torno do valor de zero de potência pode apresentar uma instabilidade. No primeiro grupo aqueles referentes ao zero do fluxo na interligação e o segundo grupo de fluxo variável.

4.3.3.1 Resultados Obtidos Zerando o Fluxo na Interligação

Para a configuração adotada, um primeiro passo foi efetuar a simulação zerando a potência na interligação dos alimentadores. Para tal o compensador deverá injetar uma tensão com fase negativa e módulo igual à queda de tensão nos dois trechos do alimentador.

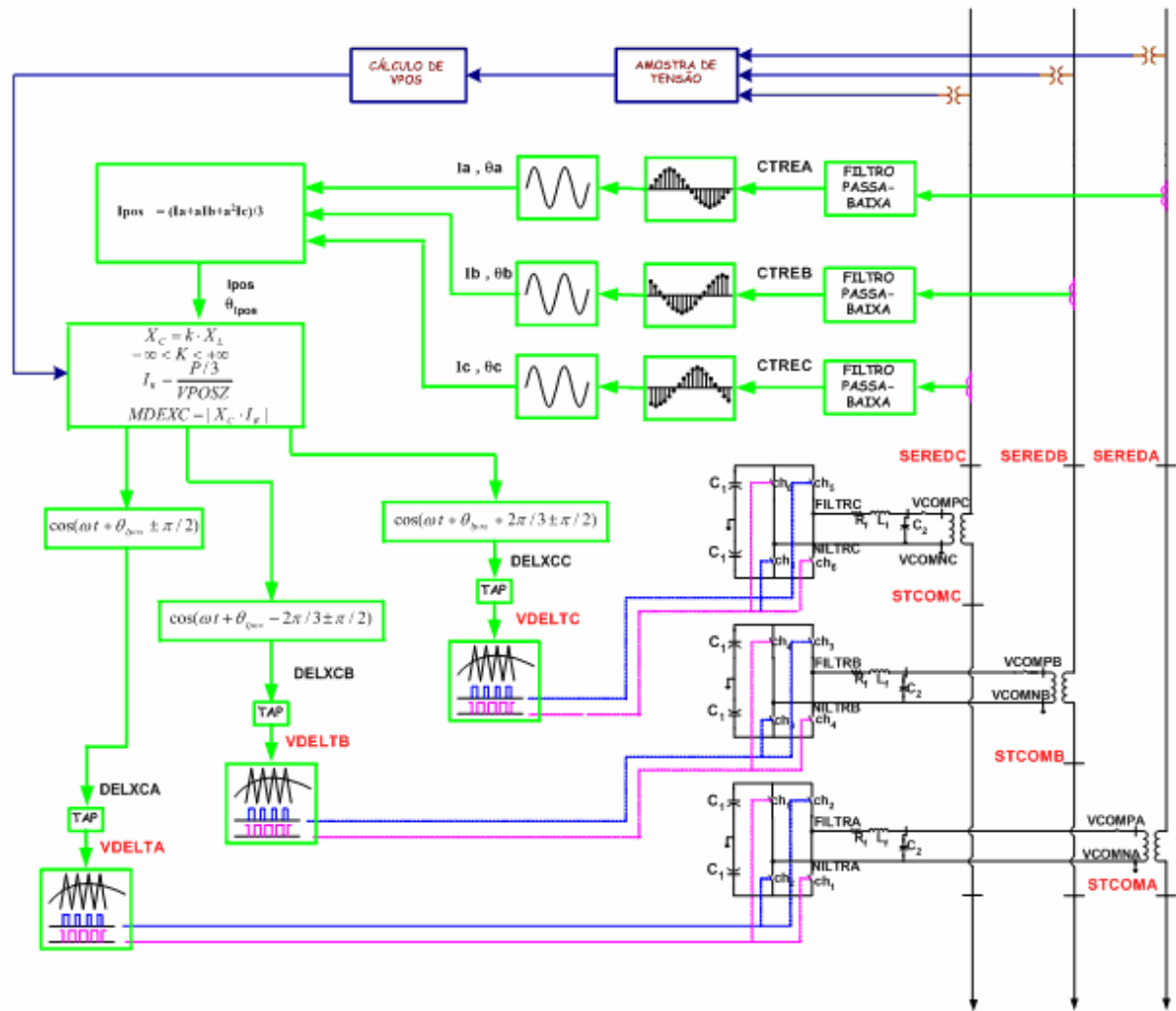


Fig. 4.12 Sistema de controle das chaves

A Figura 4.13 apresenta as tensões nos terminais do compensador. Observa-se que as tensões encontram-se praticamente em fase, devido ao fato que nos sistemas de distribuição as defasagens angulares das tensões das barras do sistema de transmissão (138kV) são pequenas.

Na Figura 4.14 encontram-se os valores de corrente na interligação. Observa-se que as mesmas tendem a zero.

A Figura 4.15 encontra-se apresentado o valor da potência na interligação. A mesma observação do item anterior também é válida para o caso da potência.

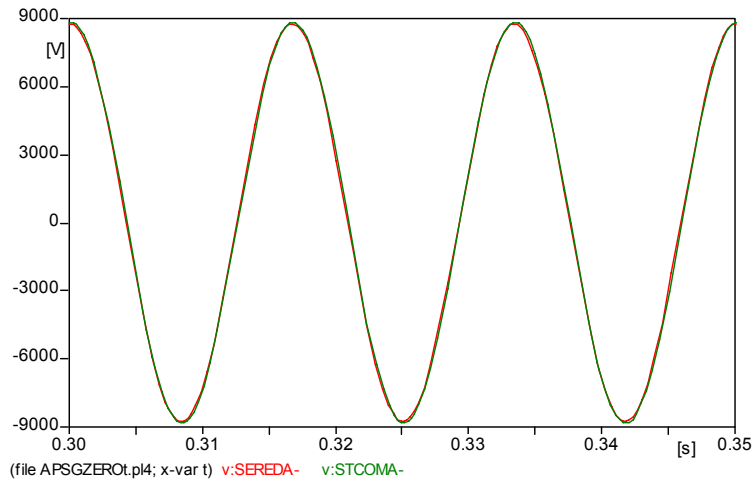


Fig. 4.13 Tensão fase A antes (SEREDA) e após (STCOMA) o UPFC(D)

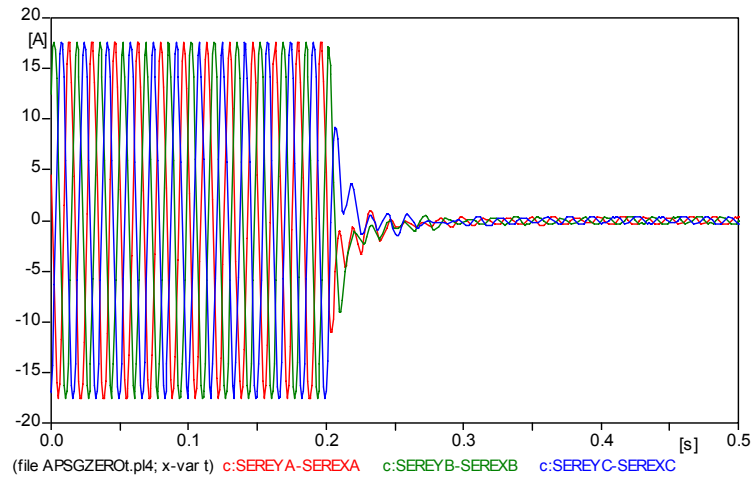


Fig. 4.14 Corrente na Interligação

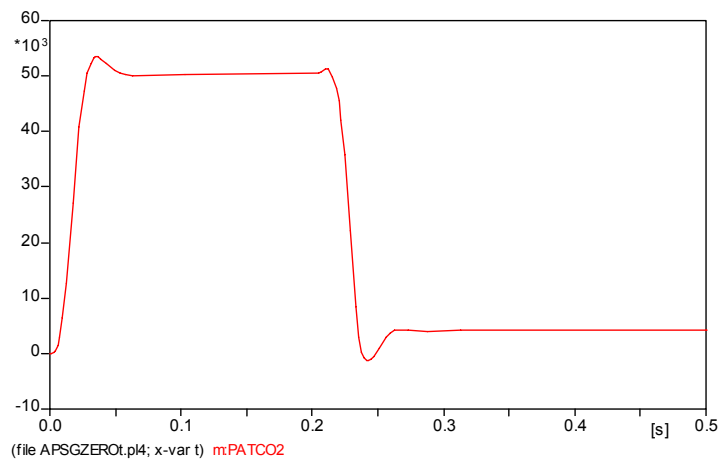


Fig. 4.15 Potência na interligação

4.3.3.2 Resultados Obtidos para outras condições de fluxo

Para a verificação do desempenho do UPFC(D) como controlador de fluxo foram simulados os casos de forma a permitir os seguintes níveis de fluxo de potência ativa na interligação dos alimentadores: 3MW, 2MW, 1 MW, -1MW, -2 MW e -3MW.

OBS. O sentido de fluxo é considerado positivo no sentido de SERED para STCOM.

Observa-se que estes valores foram escolhidos em virtude da soma das cargas de cada um dos alimentadores serem de aproximadamente 3 MW.

Observa-se também que para esta análise a alteração dos valores dos fluxos ocorre a partir de $t=0,2$ s, ou seja, a partir do início da operação do dispositivo.

A Figura 4.16 mostra o perfil das potências ao longo do tempo. Deve-se ressaltar que devido às impedâncias dos trechos de alimentadores e também das cargas intermediárias no sistema a potência desejada é atingida através de iterações.

Verifica-se também que haverá a necessidade de um ajuste fino para se obter exatamente a potência desejada. Este ajuste não foi implementado.

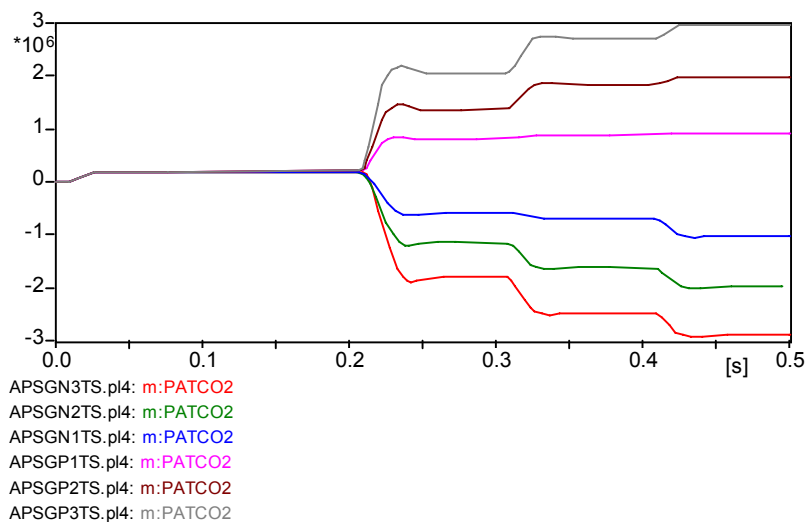


Fig. 4.16 Perfil das Potências na Interligação

A título de ilustração, para as potências de +3MW e -3MW são mostradas a seguir as curvas das tensões injetadas pelo UPFC(D) com as respectivas correntes na interligação.

A Figura 4.17 mostra a tensão injetada para o caso de P=3MW. Observa-se que a mesma está adiantada de +90° em relação à corrente. Nestas condições, conforme pode ser verificado na figura 3.9, a tensão STCOM está adiantada com relação à SERED (Figura 4.18).

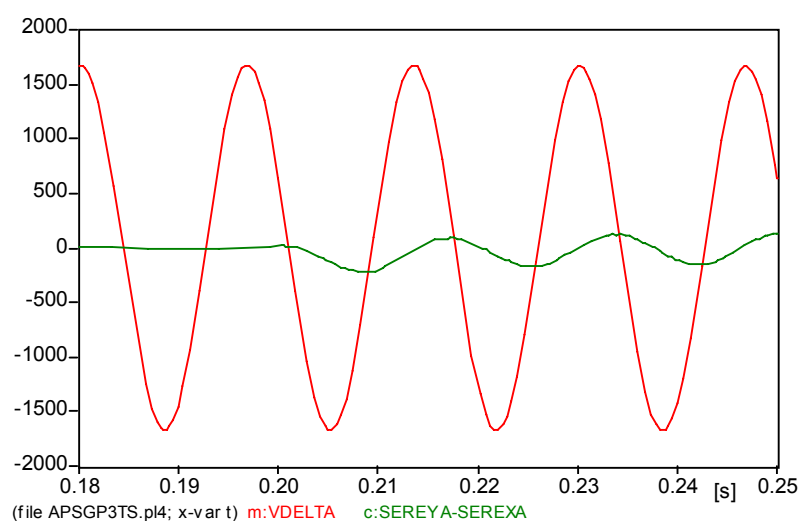


Fig. 4.17 Tensão injetada pelo compensador e corrente na interligação para P= 3MW

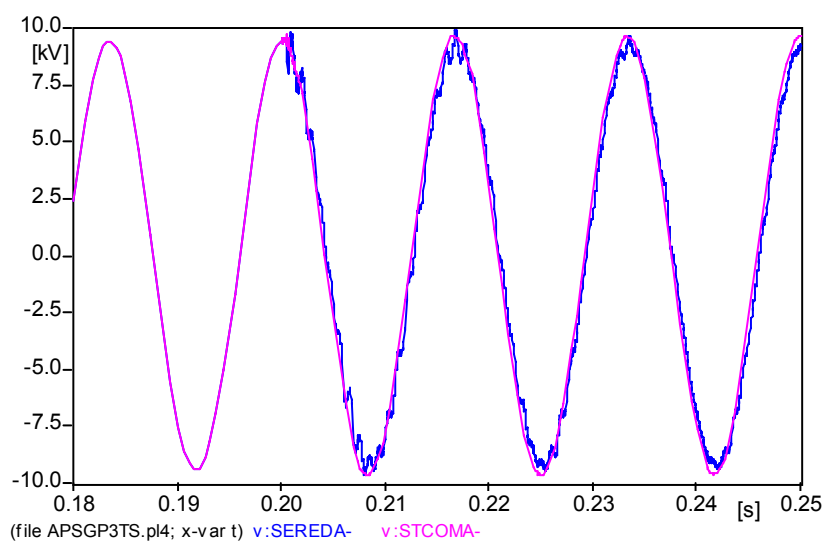


Fig. 4.18 Tensões nas barras de interligação para P=3 MW

Deve-se ressaltar que as curvas obtidas para este caso apresentam-se ligeiramente onduladas, devido ao transitório provocado pela inserção do dispositivo UPFC(D) no instante 0,2s.

A Figura 4.19 mostra a tensão injetada para o caso de $P = -3\text{MW}$. Observa-se que a mesma está adiantada de $+90^\circ$ em relação à corrente. Nestas condições, conforme pode ser verificado na figura 3.12, a tensão STCOM deverá estar atrasada com relação à SERED (Figura 4.20).

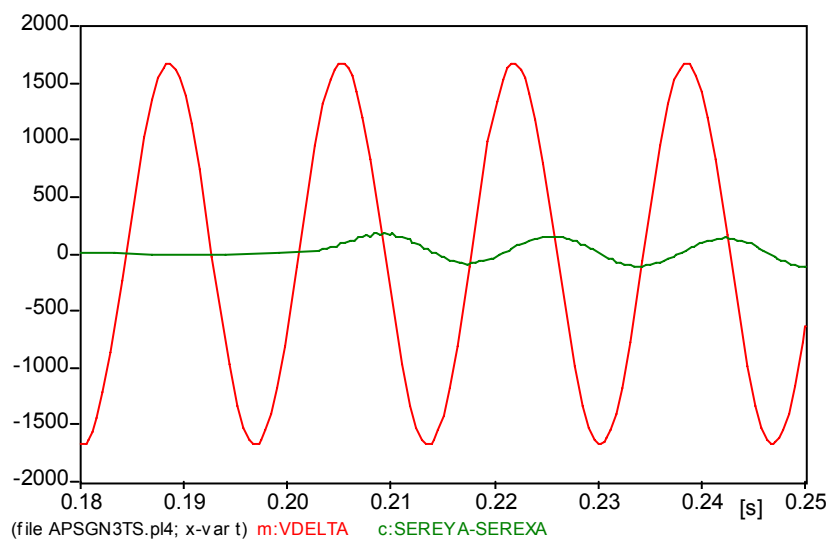


Fig. 4.19 Tensão injetada pelo compensador e corrente na interligação para $P = -3\text{MW}$

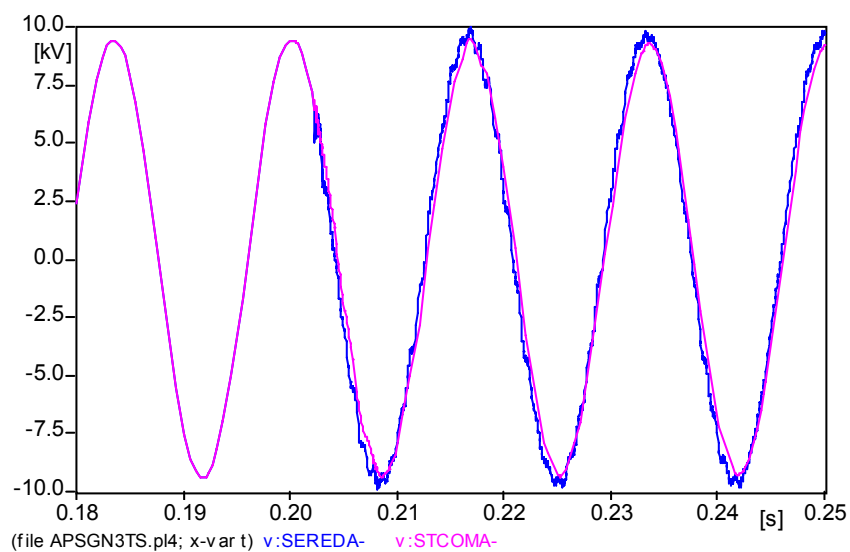


Fig. 4.20 Tensões nas barras de interligação para $P = -3\text{MW}$

Na Figura 4.21 encontram-se representadas as tensões em STCOM (fase A) para as condições de fluxo na interligação de $P = -3 \text{ MW}$ e $P = +3 \text{ MW}$. Verifica-se que para o caso de fluxo negativo a tensão está atrasada em relação à tensão com o fluxo positivo, conforme apresentado nas Figuras 3.10 e 3.12.

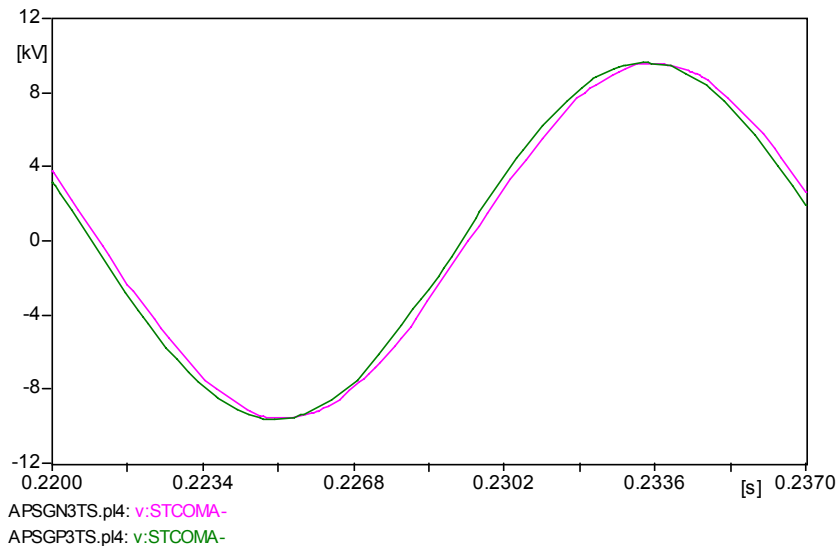


Fig. 4.21 Tensão em STCOM (fase A) para $P = -3 \text{ MW}$ e $P = +3 \text{ MW}$

4.3.3.3 Análise dos Resultados

Dos resultados obtidos pode-se constatar que:

- O compensador UPFC(D) para as condições simuladas (UPFC(D) não fornece potência ativa, isto é, com injeção de tensão defasada da corrente de $\pm 90^\circ$) tem um desempenho semelhante ao do capacitor ou indutor variável, porém, apresenta ligeiras oscilações que são provenientes do transitório devido à entrada do dispositivo no sistema (filtro LC de saída).
- Apesar do sistema de controle das chaves ainda estar operando em malha aberta, observa-se que o UPFC(D) simulado apresenta uma atuação efetiva no controle do fluxo entre os alimentadores em questão.
- Ressalta-se a dificuldade da obtenção do zero de potência nas simulações.

5 RESUMO, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Compensação Série

Os resultados obtidos indicam que a utilização do dispositivo proposto apresenta uma atuação efetiva na compensação série.

Observa-se também que o compensador série introduz uma reatância adicional no circuito (reatância do transformador injeção) o que leva a valores menores de tensão com relação aos valores obtidos com a inserção do capacitor série.

5.2 Operação de Alimentadores operando em Paralelo

Os resultados obtidos indicam que a utilização do dispositivo proposto apresenta uma atuação efetiva no controle do fluxo entre os alimentadores em questão.

Observa-se também que o controle de fluxo apresenta uma particularidade que é a instabilidade do dispositivo UPFC(D) no ponto de inversão da potência. Este problema deverá ser alvo de pesquisa posterior.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Hingorani, N.G., Gyugyi, L., **"Understanding FACTS - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems"** - IEEE Press, 2000.
- [2] Lara, O.A., Acha, E., **"Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC"** - IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 17, N°. 1, January 2002.
- [3] Nilsson, S., **"Special Application Considerations for Custom Power Systems"**- Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, Volume: 2 , 31 Jan-4 Feb 1999.
- [4] Martinez, J.A., **"Modeling of Custom Power Equipment Using Electromagnetic Transients Programs"** - Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on Volume: 3, 1-4 Oct. 2000.
- [5] Stump, M.D., Keane, G.J., Leong, F.K.S., **"The Role of Custom Power Products in Enhancing Power Quality at Industrial Facilities"** - IEEE, 1998 - IEEE Catalogue No: 98EX137.
- [6] Osborne, M.M., Kitchin, R.H., Ryan, H.M., **"Custom Power Technology in Distribution System - An Overview"** - Reliability, Security and Power Quality of Distribution Systems, 1992, IEE North Eastern Centre Power Section Symposium, 5 Apr 1995.
- [7] Hingorani, N.G., **"Introducing Custom Power"** - Spectrum, IEEE, Volume: 32, June 1995.
- [8] Woo, S.M., Kang, D.W., Lee, W.C., Hyun, D.S., **"The Distribution STATCOM for Reducing the Effect of Voltage Sag and Swell"** - Industrial Electronics

Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE, Volume: 2, 29 Nov.-2 Dec. 2001.

- [9] Miles, F.M., **“An Analysis of Dual-Source Strategies for Custom Power Supplies”** - Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE, Volume: 1, 6-10 Feb. 2000.
- [10] Xu, L., Anaya-Lara, O., Agelidis, V.G., Acha, E., **“Development of Prototype of Custom Power Devices for Power Quality Enhancement”** - Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on , Volume: 3, 1-4 Oct. 2000.
- [11] Reed, G.F., Croasdaile, T.R., Paserba, J.J., Williams, R.M., Takeda, M., Jochi, S., Morishima, N., Aritsuka, T., Hamasaki, Y., Yonehata, Y., Amakasu, S., Takamiya, K., **“Applications of Voltage Source Inverter (VSI) Based Technology for FACTS and Custom Power Installations”** - Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on , Volume: 1 , 4 -7 Dec. 2000.
- [12] Pohjanheimo, P., Lakervi, E., **“Steady State Modeling of Custom Power Components in Power Distribution Networks”** - Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 23-27 Jan. 2000.
- [13] Gilbert, L., **“Alternate Sourcing of Custom Power Supplies. Is it a Responsible Investment of Valuable Resources?”** - Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996, Eleventh Annual, Volume: 1, 3-7 March 1996.
- [14] Sundaram, A., Mehta, H., Tahiliani, V., **“Custom Power - EPRI’s Response to Power Quality Issues”**- Southcon/94. Conference Record, 29-31 March 94.

- [15] Tanneau, G., Boudou, D., **“Custom Power Interface”** - Conference Publication No. 482, CIRED2001, 18-21 June 2001, IEEE 2001.
- [16] Mehta, H., Tahiliani, V.H., Sullivan, J.E., **“Custom Power: An Opportunity for Energy Conservation”** - Electricity Distribution, 1993. CIRED, 12th International Conference on, vol. 5, 17-21 May 1993.
- [17] Venkataramanan, G., Johnson, B.K., Sundaram, A., **“An AC-AC Power Converter for Custom Power Applications”** - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- [18] Newman, M.J., Holmes, D.G., **“A Universal Custom Power Conditioner (UCPC) with Selective Harmonic Voltage Compensation”** - IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the] Volume: 2, 5-8 Nov. 2002.
- [19] Zhan, C., Ramachandaramurthy, V.K., Arunlampalam, A., Fitzer, C., Barnes, M., Jenkins, N., **“Universal Custom Power Conditioner (UCPC) with Integrated Control”** - Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, Volume: 3, 28 Jan.-1 Feb. 2001.
- [20] Changjang, Z., Manchung, W., Yu, H., Yingduo, H., Liangbing, Z. **“Universal Custom Power Conditioner (UCPC) in Distribution Networks”**-IEEE, 1999.
- [21] Gilbert, L., **“Future Power: Standard or Custom?”** - Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on, Volume: 2, 27-29 July 1999.
- [22] Rabinowitz, M., **“Power Systems of the Future (Part 2)”** – Power Engineering Review, IEEE, Volume: 20, March 2000.

- [23] Middlekauff, S.W., Collins, E.R., **“System and Customer Impact: Considerations for series Custom Power Devices”** - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.
- [24] Madrigal, M., Acha, E., **“Modeling of Custom Power Equipment Using Harmonic Domain Techniques”** - Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on , Volume: 1 , 1-4 Oct. 2000
- [25] Chang, C.S., Ho, Y.S., Loh, P.C., **“Voltage Power Enhancement with Power Electronics’ Based Devices”** – Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 23-27 Jan. 2000.
- [26] Marcos, M.M., Gomes, J.C., **“Electric Power Quality – The Strong Connection with Power Electronics”** - IEEE Power and Energy Magazine, September/October 2003, pag. 18-25.
- [27] Clouston, J., Sundaram, A., Woodley, N.H., **“Custom Power: The Utility Solution To Distribution Power Quality”** – Electricity Today , June 1997
- [28] Chen, S., Jóos, G., **“Series and Shunt Active Power Conditioners form Compensating Distribution systems Faults”**. – Electrical and Computer Engineering, 2000 Canadian Conference on , Volume: 2 , 7-10 March 2000 Pages:1182 - 1186 vol.2
- [29] Aredes, M., Heumann, K., Watanabe, E.H., **“An Universal Active Power Line Conditioner”** - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, October 1998.
- [30] Basu, M., Das, S.P., Dubey, G.K., **“Performance Study of UPQC-Q for Load Compensation and Voltage Sag Mitigation”** - IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference, Volume: 1, 5-8 Nov. 2002.

- [31] Sybille, G., Giroux, P., **“Simulation of FACTS controllers using the MATLAB Power System Blockset and Hypersim real-time simulator”** - IEEE PES, Winter Meeting, New York, January 2002.
- [32] Zhan, C., Wong, M., Wang, Z., Han, Y., **“DSP Control of Power Conditioner for Improving Power Quality”** – Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 23-27 Jan. 2000.
- [33] Thiel, S., Mostert, C., Enslin, J.H.R., **“Universal Power Electronic Solution to Low-Cost Rural Electrification”** - AFRICON, 1996, IEEE AFRICON 4th, Volume: 1, 24-27 Sept. 1996.
- [34] Jung, S., Kim T., Moon, S., Han B., **“Analysis and Control of DSTATCOM for a Line Voltage Regulation”** - Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, Volume: 2, 27-31 Jan. 2002.
- [35] Chen, S., Jóos, G., **“Rating Issues of United Power Quality Conditioner for Load Bus Voltage Control in Distribution Systems”** - Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, Volume: 2, 28 Jan.-1 Feb. 2001.
- [36] Robert, A., **“Supply Quality Issues at the Interface between Power System and Industrial Consumers”** - Harmonics and Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference on, Volume: 1, 14-16 Oct. 1998.
- [37] Taylor, G.A., **“Power Quality Hardware Solutions for Distributions Systems”** - Reliability, Security and Power Quality of Distribution Systems, 1992., IEE North Eastern Centre Power Section Symposium on the , 5 Apr 1995.
- [38] Watanabe, E.H., Barbosa, P.G., Almeida K.C., Taranto, G.N., **“Tecnologia FACTS - Tutorial”** - SBA Controle & Automação Vol.9 no.1 / Jan., Fev., Mar. e Abril de 1998.

- [39] Watanabe, E.H., Aredes, M., **"Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS"** - Tutorial in the CBA 98 (XII Brazilian Automatic Control Conference), Uberlândia, Brazil, September 14-18, 1998.
- [40] Oliveira, M.M., **"Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of AC Power Systems"** - Doctoral Dissertation, Stockholm: KTH, 2000.
- [41] Jardini, J.A., Honda, J.T., Arango, H., **"Correção de anomalias em redes elétricas através da injeção de correntes de compensação instantânea"** - SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 1997, São Lourenço. 1997. V.2.
- [42] Jardini, J.A., Honda, J.T., Arango, H., **"Modelo de filtro ativo baseado em inversores trifásicos de potência PWM"** - ENCUESTRO REGIONAL LATINO AMERICANO DE LA CIGRE, 1997, Puerto Iguazu. 1997.
- [43] Honda, J.T., **"Controle de desequilíbrios, fator de potência e harmônicas em sistemas elétricos de potencia por injeção de correntes de compensação"** - 2000. Tese (Engenharia Elétrica [SP-Capital]) Universidade de São Paulo, (Orientador) José Antonio Jardini.
- [44] Silva F.A.T., **"Viabilidade Técnica de Abertura Monopolar Permanente em Linhas de Transmissão Extra Alta Tensão"** - 1999. Tese Engenharia Elétrica - Universidade de São Paulo, Orientador: José Antonio Jardini.
- [45] Agrawal, B. L., et al., **"Advanced Series Compensation (ASC) Steady-State, Transient Stability and Subsynchronous Resonance Studies,"** - Proceedings of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Conference, Boston, MA, May 1992.

- [46] Gyugyi, L., et al., "**Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines**," - IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, nº 1, January 1997.
- [47] 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.
- [48] Camargo, J., "**Aplicação de Capacitores Série na Distribuição**" - XI SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - Blumenau – 1992.
- [49] Camargo, J., "**A Experiência da CPFL na Aplicação de Capacitores Série**" - Encontro do CIER - Florianópolis - 1.993.
- [50] Fujita, H., Watanabe, Y., Akagi, H., "**Control and Analysis of a Unified Power Flow Controller**" - IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, NO. 6, November 1999.
- [51] Babu, C.H.S., "**Control of a Unified Power Flow Controller (UPFC) - A Simulation Study using Matlab e Simulink**" - Doctoral Dissertation, University of Calicut, Kerala, 2002.
- [52] Bakhshai, R., Joos, G., Jin, H., "**EMTP Simulation of Multi-Pulse Unified Power Flow Controllers**" - Canadian Conference On Electrical and Computer Engineering (CCECE'96) IEEE, 1996.
- [53] Tambey, N., Kothari, M.L., "**Unified Power Flow Controller (UPFC) Based Damping Controllers for Damping Low Frequency Oscillations in a Power System**" - Annual Paper Meeting held at Ranchi on November 1, 2002.
- [54] Ghandhari, M., "**Control Lyapunov Functions: A Control Strategy for Damping of Power Oscillations in Large Power Systems**" - Doctoral Dissertation, Stockholm: KTH, 2000.

- [55] 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
- [56] 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.
- [57] Paserba, J.J., Reed, G.F., Takeda, M., Aritsuka, T., "**FACTS and Custom Power Equipment for the Enhancement of Power Transmission System Performance and Power Quality**" - Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VII SEPOPE), Curitiba, Brazil, May 21-26, 2000.
- [58] Ghosh, A., Jindal, A.K., Joshi, A., "**Operation and Control of a DSTATCOM in the Presence of Non-Integer Harmonics**" - 2003 - IEEE.
- [59] Paschoareli, D.Jr, "**Introdução aos Sistemas Flexíveis e Controladores FACTS**" - Março de 2003, DEE-FEIS/UNESP.
- [60] Ribeiro, P.F., "**Mini Curso de Curso de FACTS**" - IV-SBQEE, agosto 2001.
- [61] Deckmann, S.M., Pomilio, J.A., "**Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**" - publicação FEE 02/98, Fev/98, Unicamp.
- [62] Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., "**Power Electronics: Converters, Applications and Design**" - Ed. John Wiley & Sons, 2^a. ed. 1995.
- [63] Mihalič R. "**Power flow control with controllable reactive series elements**" - IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 5, September 1998, pp 493-498.

- [64] Mann B. J., Morrison I. F., **"Digital calculation of impedance for transmission line protection"** - IEEE, PAS-90, n.1, Jan/Fev 1971, pp. 270-279.
- [65] Puerta J. F., Arceluz J. F., **"Evolução do Mercado de Energia Rumo à Competição"** - Eletricidade Moderna -1995.
- [66] Ahn S. U., Jardini J. A., Matakas L., Komatsu W., Masuda M., Silva F. A. T., Galassi M., Ortiz F., **"Mini-DVR - Dynamic Voltage Restorer with Functions of Reactive Compensation and Active Harmonic Filter"** - T&D 2004 – São Paulo.