

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA ÊNFASE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

**REATORES PARA CONTROLE DO FLUXO DE
POTÊNCIA E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA A
QUALIDADE DE ENERGIA**

Por:
José Vicente de Oliveira Júnior

Monografia de Final de Curso

Orientador: Ivan José da Silva Lopes

Belo Horizonte, Março de 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA ÊNFASE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

**REATORES PARA CONTROLE DO FLUXO DE
POTÊNCIA E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA A
QUALIDADE DE ENERGIA**

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Professor Ivan José da Silva Lopes
Orientador

Belo Horizonte, Março de 2012.

REATORES PARA CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA A QUALIDADE DE ENERGIA

José Vicente de Oliveira Júnior

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Aprovada em ____ de ____ de ____.

Professor Ivan José da Silva Lopes
Orientador

Professor Wallace do Couto Boaventura
Relator

AGRADECIMENTOS

A minha família pela compreensão, paciência, incentivo e apoio;

Ao professor Ivan José da Silva Lopes, orientador deste trabalho, pelas oportunas recomendações dadas durante as atividades.

RESUMO

Esta monografia tem por objetivo apresentar como os reatores a seco com núcleo de ar veem se mostrando eficazes em redes interligadas, com cargas assimétricas em linhas paralelas, resultantes de diferentes impedâncias ou capacidades de linha diferentes em aumentar a capacidade de transmissão da rede sem a construção de novas linhas.

Inicialmente são apresentados os tipos básicos construtivos dos reatores a normas técnicas e uma visão geral da utilização histórica dos reatores a seco com núcleo de ar.

Em seguida a abordagem é focada nas aplicações para reatores onde a tecnologia dos reatores a seco com núcleo de ar tem obtido relevância de mercado em relação a outras tecnologias de equipamentos. Uma visão específica da aplicação de reatores a seco com núcleo de ar utilizados para maximizar a transferência de potência entre linhas paralelas com diferentes impedâncias é apresentada juntamente com três estudos de caso de aplicações bem sucedidas e registradas desta aplicação.

Finalizando, é apresentada uma conclusão onde serão debatidos os resultados conseguidos nos três estudos de caso, os impactos gerais da instalação de um reator no sistema elétrico e a relevância deste equipamento para com a qualidade da energia do sistema elétrico.

Palavras-chave: Reatores a Seco com Núcleo de Ar; Reatores para Controle do Fluxo de Potência.

ABSTRACT

The present work has the objective of presenting how the dry type air core reactors are effective in interconnected networks with asymmetric loads in parallel lines, resulting in different line impedances or different capabilities to increase the transmission capability of the network without building new lines.

First of all, the basic constructive types of reactors, the reference standards and an overview of the historical use for dry type air core reactors are presented.

Then, the approach is focused at the applications where the technology of dry type air core reactors has gained relevant market in comparison with other reactors technologies. A specific vision of the application of the dry type air core reactor, used to maximize power transfer between parallel lines with different impedances, is presented along with three registered cases of successful applications.

Finally, a conclusion is presented where the achieved results in the three cases are discussed; the overall impacts of the installation of a reactor in the electrical system and the relevance of this equipment with the power quality of the electrical system.

Key Words: Dry Type Air Core Reactors; Power Flow Control Reactors.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	8
ABREVIATURAS E SIGLAS	10
CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO	11
1.1 Considerações Iniciais	11
1.2 Aspectos Construtivos	11
1.2 Normalização.....	13
1.3 Background e Perspectiva Histórica.....	14
CAPÍTULO 2 : REATORES A SECO NÚCLEO DE AR.....	15
2.1 Reatores em Derivação.....	15
2.2 Reatores Controlados por Tiristores	17
2.3 Reatores Limitadores de Corrente.....	19
2.4 Reatores para Filtros de Harmônicas.....	21
2.5 Reatores Associados a Bancos de Capacitores.....	22
2.6 Reatores para Fornos a Arco Elétrico.....	23
2.7 Reatores para Ensaios Usados em Laboratórios.....	24
2.8 Reatores para Aplicação em HVDC.....	24
2.9 Reatores para Controle de Fluxo de Potência.....	26
CAPÍTULO 3 : REATORES PARA CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA	29
3.1 Introdução.....	29
3.2 Controle de Fluxo de Carga em Redes de Transmissão.....	29
3.3 Soluções, Teoria e Técnicas para Controle de Fluxo De Carga.....	30
3.4 Características de Reatores Série de Alta Tensão.....	32
3.5 Projeto e Instalação de um Reator a Seco com Núcleo de Ar.....	33
3.6 Estudo de Caso 1: Use of Reactors for Power Flow Control in 110 kV Network... ..	35
3.7 Estudo de Caso 2: High Voltage Series Reactors for Load Flow Control.....	38
3.8 Estudo de Caso 3: Carbon-SpanishFork #I 138kv Line Series Reactors.....	43
CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reator a seco com núcleo de ar e enrolamento aberto	12
Figura 2 – Reator a seco com núcleo de ar e enrolamento encapsulado	12
Figura 3 – Reator com núcleo de ferro imerso o óleo	13
Figura 4 – Conexões típicas para reatores “ <i>shunts</i> ”	16
Figura 5 – Reatores conectados no terciário do transformador	16
Figura 6 – Configuração típica de um SVC	18
Figura 7a – Tensão de Corrente de um TCR	18
Figura 7b – Espectro de Harmônicos das Correntes de um TCR	18
Figura 8 – Reatores Controlados por Tiristor	19
Figura 9 – Reatores Associados a Bancos de Capacitores	22
Figura 10 – Esquema típico de um reator para forno a arco elétrico	23
Figura 11 – Diagrama de um HVDC, ilustrando as aplicações dos reatores.	24
Figura 12 – Configurações típicas de filtros	25
Figura 13 – Chaveamento de um Reator para controle de fluxo de potência	27
Figura 14 – a) Modelo básico de uma rede - b) Diagrama fasorial	31
Figura 15 – Reator a seco com núcleo de ar	33
Figura 16 – Componentes auxiliares de um reator série	34
Figura 17 – Rede de 110kV da Isar-Amperewerke na área das Subestações Neufinsing e Hohenbrunn	36
Figura 18 – Carregamento das linhas, após a perda da linha 3	36
Figura 19 – Reatores a seco com núcleo de ar na SE Landsham	37
Figura 20 – Curva de tendência do custo do equipamento versus perda	39
Figura 21 – Linhas de Transmissão da Verbung-APG 380/220 kV	40
Figura 22 – O fluxo de carga nos três circuitos duplos de 220 kV	41

Figura 23 – Sistema Carbon SpanishFork antes da instalação dos reatores	44
Figura 24 – Sistema Carbon SpanishFork depois da instalação dos reatores	45
Figura 25 – Reatores do sistema Carbon SpanishFork	45

ABREVIATURAS E SIGLAS

VAR – Volt Ampere Reativo

EHV – Extra Alta Tensão

HVDC – High-Voltage, Direct Current

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEC – International Eletrotechnical Commission

SVC – Static VAR Compensator

TCR – Thyristor-Controlled Reactor (Reator Controlado por Tiristores)

BIL – Basic Impulse Level (NBI)

RLC – Reator Limitador de Corrente

PST – Phase shifting transformers

FACTS – Flexible AC transmission system

UPFC – Universal Power Flow Controller

TRV – Transient recovery voltage

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Os reatores/indutores, sejam a seco com núcleo de ar ou imersos em óleo, vêm se mostrando muito eficazes nas aplicações onde se fazem necessários, contribuindo em muito com a qualidade da energia para o sistema elétrico como um todo. Seja para uma aplicação extremamente típica para este equipamento, como limitador de corrente de curto-circuito em média tensão ou como parte de um arranjo um Statcom, os reatores são parte integrante do sistema de potência.

Devido á minha experiência pessoal com os reatores a seco com núcleo de ar, é um fato que esta monografia apresentou-se ligada às aplicações onde a tecnologia de reatores a seco com núcleo de ar é mais utilizada do que as das outras formas de construção dos reatores. A escolha do tema “REATORES PARA CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA E SUAS CONSEQUENCIAS PARA A QUALIDADE DE ENERGIA” como o ponto principal desta monografia se deu principalmente pela ausência de registros desta aplicação para o sistema elétrico brasileiro.

Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais, a normalização aplicável e um background com uma perspectiva histórica para os equipamentos elétricos reatores. No capítulo dois é apresentado as principais aplicações para os reatores a seco com núcleo de ar. No capítulo três será apresentado mais especificamente a utilização de reatores a seco para o controle de fluxo de potência, onde serão apresentados os aspectos básicos para esta pratica e a análise de três estudos de caso de aplicações bem sucedidas e registradas dos reatores a seco com núcleo de ar para controle do fluxo de potência. No capítulo quatro será apresentada uma conclusão onde serão debatidos os resultados conseguidos com a aplicação dos reatores a seco com núcleo de ar para o controle de fluxo de potência e sua relevância com a qualidade de energia.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Reatores, como os capacitores, são básicos nos sistemas de transmissão e distribuição. Dependendo de sua função, os reatores são conectados em série ou em derivação com o sistema, singularmente (reatores limitadores de corrente, reatores “*shunt*”) ou em conjunto com outro componente básico tal como capacitores (reatores para chaveamentos de capacitores “*shunt*”, reatores para descarga de capacitores e reatores para filtros) [18].

Reatores são utilizados para prover reatância indutiva ao sistema de potência para uma vasta variedade de aplicações. Isto inclui: limitadores de corrente de falta, limitadores de “*inrush*” para capacitores e motores, filtros de harmônicos, compensadores de VAR, redução de ripple (reatores de alisamento), bloqueadores de sinal no sistema de potência (bobinas de bloqueio), aterramento de neutro, amortecimento de transientes chaveados, redução de “*flicker*” para aplicações de fornos a arco, dissintonia, balanço de carga e condicionamento de potência. Reatores podem ser instalados nos mais variados níveis de tensão tipo industrial, de

distribuição ou transmissão podendo ser de poucos Amperes até centenas de Amperes com níveis de corrente de falta até dezenas de milhares.

1.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Reatores podem ser do tipo seco ou imerso a óleo. Reatores a seco podem ser construídos com núcleo de ar ou núcleo de ferro [18].

No passado, reatores somente poderiam ser do tipo enrolamento aberto (Figura 1); a sua resistência mecânica é fornecida por um sistema mecânico de fixação que proporciona o isolamento entre as espiras.

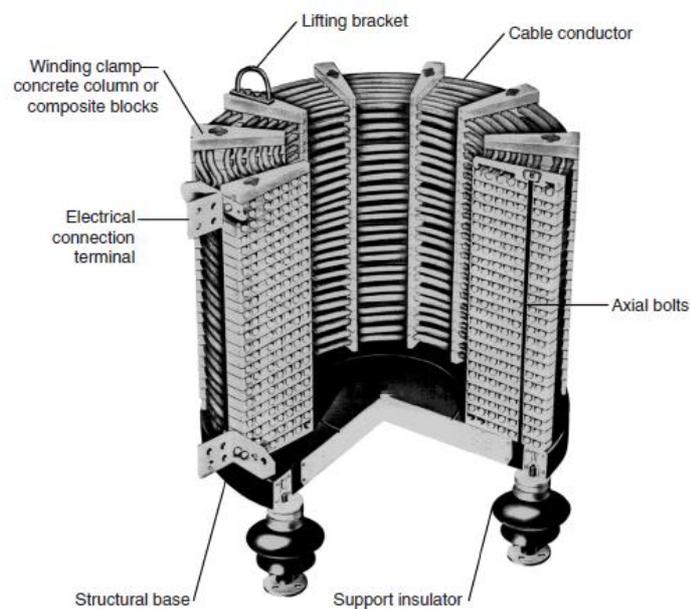


Figura 1. Reator a seco com núcleo de ar e enrolamento aberto; retirada de [18].

Reatores a seco com núcleo de ar modernos possuem seus enrolamentos completamente encapsulados com o isolamento das espiras providos por filmes, fibra ou esmaltes dielétricos (Figura 2).

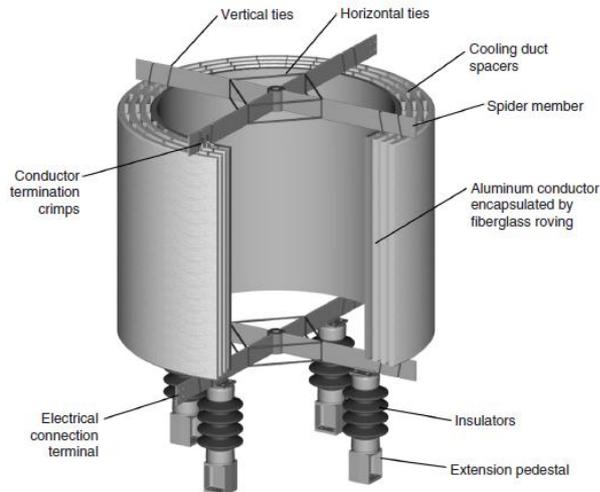


Figura 2. Reator a seco com núcleo de ar e enrolamento encapsulado; retirada de [18].

Reatores imersos em óleo (Figura 3) podem ser construídos com entreferros ou blindagem magnética. Reatores imersos em óleo são principalmente usados para reatores “shunt” em EHV e alguns reatores de alisamento em HVDC. Reatores a seco com núcleo de ferro são usualmente usados em baixa tensão e instalação interna, para aplicações tais como filtragem de harmônicos e condicionamento de potência (di/dt , alisamento, etc.).

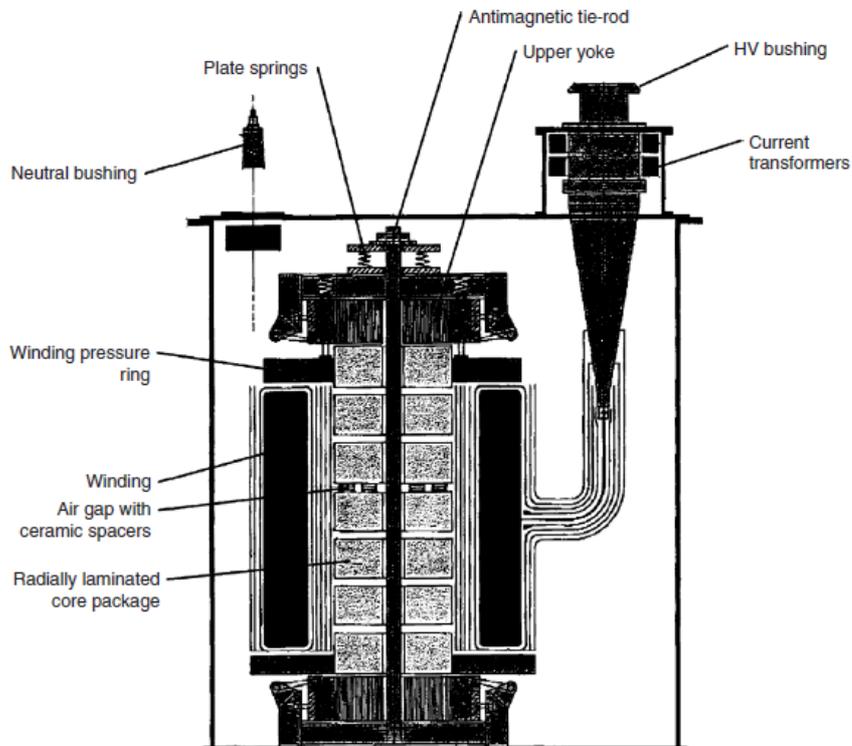


Figura 3. Reator com núcleo de ferro imerso a óleo; retirada de [18].

No passado, reatores a seco com núcleo de ar (enrolamento aberto) eram limitados a aplicações na classe de tensão de distribuição. Reatores modernos (enrolamento encapsulado) são empregados em todas as faixas de tensão dos sistemas de transmissão e distribuição, incluindo desde EHV (reator serie de alta tensão) a HVDC (reatores filtros, reatores de alisamento (smoothing)).

1.2 NORMALIZAÇÃO

Tanto os reatores a seco com núcleo de ar, quanto os equipamentos bobinas de bloqueio, possuem normas técnicas que provém consideráveis informações, não somente características nominais críticas, características operacionais, tolerâncias e listas de ensaios, mas também linhas gerais para instalação e considerações importantes específicas da aplicação.

Dentre as normas atualmente utilizadas para especificação, projeto e ensaios de reatores citam-se:

IEEE C57.21-2008 (IEEE Standard Requirements, Terminology, and Tests Code for Shunt Reactors Rated Over 500kVA) [1]

IEEE C57.16-1996 (IEEE Standard Requirements, Terminology, and Tests Code for Dry-Type Air Core Series-Connected Reactors) [2]

ANSI/IEEE Std 32-1972 (Reaffirmed 1984) (IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices) [3]

ANSI C93.3-1995 (Requirements for Power-Line Carrier Line Traps) [4]

IEC 60076-6 Edition 1.0 2007-12 (Power Transformers – Part 6: Reactors) [5]

IEC 60353 Second Edition 1989-10 (Line Traps for a.c. power systems) [6]

ABNT NBR 5119 Segunda Edição 28.01.2011 (Reator para Sistemas de Potência - Especificação) [7]

ABNT NBR 7569 NOV/1982 (Reatores para Sistemas de Potência – Método de Ensaio) [8]

ABNT NBR 8119 JUL/1983 (Bobina de Bloqueio – Especificação) [9]

1.3 BACKGROUND

Reatores sempre fizeram parte do sistema de potência. O tipo da tecnologia empregada para várias aplicações tem mudado constantemente baseado na evolução dos projetos e construção ou desenvolvimento de novos materiais. Reatores a seco com núcleo de ar foram tradicionalmente utilizados em aplicações de limitação de corrente devido à inerente linearidade da indutância com relação á corrente. Para esta aplicação, o tipo de fabricação encapsulado é usualmente a escolha mais adequada devido a suas características mecânicas de suportar altas correntes de falta. Inicialmente, reatores série em alta tensão eram do tipo imerso em óleo. Entretanto, no início dos anos 1970 os requerimentos desta aplicação foram alcançados pelos reatores a seco com núcleo de ar. Devido a este desenvolvimento, a última versão da IEEE C57.16-1996 [2], a recomendação padrão para reatores serie, é agora uma recomendação somente para reatores a seco com núcleo de ar. A tecnologia empregada para modernos reatores “*shunts*”, por outro lado, depende do nível de tensão envolvida. Reatores “*shunts*” para transmissão são usualmente imersos em óleo, ao passo que os reatores conectado ao terciário ou ao secundário ou diretamente á linha, em tensões inferiores ou iguais a 230kV, utilizam tecnologia a seco com núcleo de ar ou são imersos em óleo [18].

CAPÍTULO 2: REATORES A SECO COM NÚCLEO DE AR

Neste capítulo é apresentada a gama de aplicações de reatores a seco com núcleo de ar. Por apresentarem um conjunto de características semelhantes, pode-se centralizá-las nas seguintes aplicações.

2.1 REATORES EM DERIVAÇÃO

(COMPENSAÇÃO REATIVA REGIME PERMANENTE)

Reatores em derivação são usados para compensar a potência reativa capacitiva gerada por linhas de transmissão sob carga leve ou cabos subterrâneos. Normalmente, estes reatores são conectados ao terciário de transformadores de potência em sistemas de até 245kV, mas podem também ser conectados diretamente à linha [18].

Linhas de transmissão de alta tensão, quando particularmente longas, geram uma quantidade substancial de energia reativa quando levemente carregadas. Por outro lado, elas absorvem grande quantidade de potência reativa em atraso quando muito carregadas. Como consequência, a menos que a linha de transmissão esteja operando em equilíbrio de potência reativa, a tensão no sistema não pode ser mantida em valores nominais.

$$\text{Balanço de potência reativa} = \text{Total Carregamento da linha (var)} - \text{Indutância da linha (var)} \quad (1)$$

Para atingir um equilíbrio de potência reativa aceitável, a linha deve ser compensada para se obter uma condição operacional. Em condições de carga pesada, o equilíbrio de potência é negativo e a compensação capacitiva (suporte de tensão) é necessária, geralmente fornecida pelo uso de capacitores “*shunt*”. Por outro lado, quando a linha se encontra com carga leve, o equilíbrio de potência é positivo e a compensação indutiva é necessária, geralmente fornecida pelo uso de reatores “*shunt*”. A grande capacitância inerente aos sistemas de transmissão quando levemente carregadas pode causar dois tipos de sobretensão no sistema que pode ser controlada através do emprego de reatores “*shunt*”.

O primeiro tipo de sobretensão ocorre quando o efeito capacitivo sobressai em uma linha levemente carregada. Isto é referido como efeito Ferranti: a tensão de operação aumenta com a distância ao longo da linha de transmissão. A corrente reativa atrasada quando consumida por um reator “*shunt*” reduz a influência capacitiva na linha, portanto, reduz a sobretensão.

Outro tipo de sobretensão é causado pela interação da capacitância da linha com alguma porção de energia reativa indutiva saturável do sistema, a este efeito dá-se o nome de ferorressonância.

Quando se comuta um transformador na linha, a tensão no final da linha pode subir para um valor suficiente para saturar a indutância do transformador. A interação entre esta

indutância e a capacitância da linha pode gerar harmônicos causando sobretensões. A aplicação de um reator “*shunt*” no terciário de um transformador pode reduzir esse tipo de sobretensão, reduzindo a tensão para valores abaixo daquele em que a saturação do núcleo do transformador pode ocorrer. O reator a seco com núcleo de ar fornece também uma baixa indutância não saturável em paralelo com a impedância do transformador.

Na Figura 4 são apresentadas as conexões típicas de reatores nas redes de energia. Os reatores “*shunt*” podem ser conectados diretamente à linha de transmissão a ser compensada. A conexão pode ser no final de uma linha de transmissão ou em um ponto intermediário, dependendo das considerações do perfil de tensão.

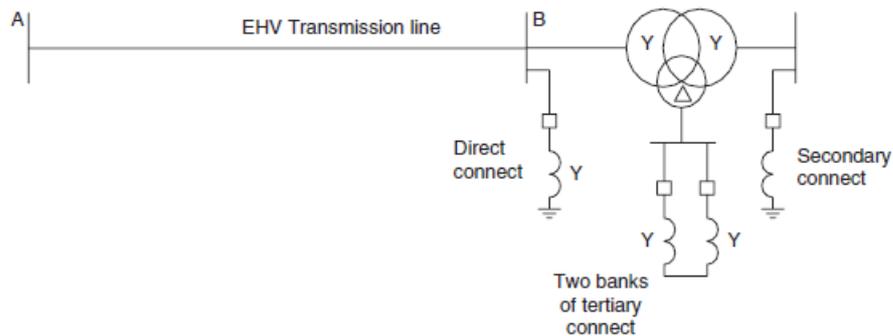


Figura 4. Conexões típicas para reatores “*shunts*”; retirada de [18].

Reatores “*shunts*” podem ser conectados ao sistema de transmissão através do terciário do transformador ligado à linha de transmissão a ser compensado; tipicamente 13.8kV, 34.5kV e 69 kV.

Reatores “*shunt*” conectados ao terciário de um transformador (Figura 5) podem ser do tipo a seco com núcleo de ar ou trifásicos imersos em óleo ou monofásicos imersos em óleo.

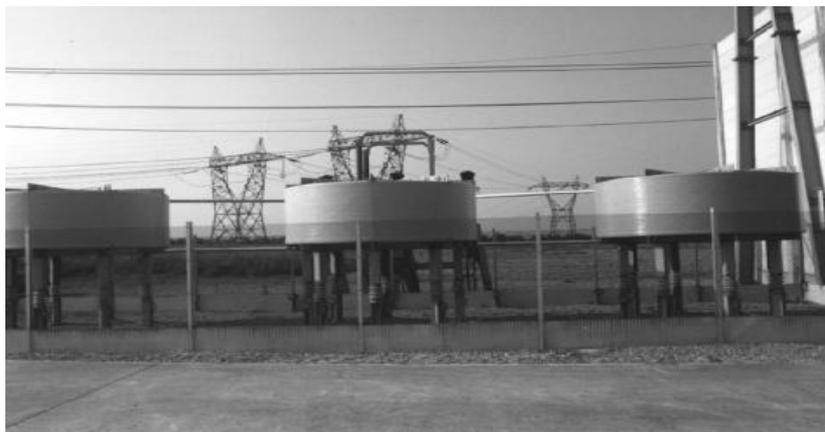


Figura 5. Reatores conectados no terciário do transformador, 20kV, 20MVAr por fase ; retirada de [18].

Reatores “*shunt*” conectados diretamente a linha são geralmente do tipo de construção imersos em óleo.

Reatores conectados no terciário (Figura 5), possuem algumas diferenças operacionais quando comparados com reatores diretamente conectados à linha:

- Reatores “*shunts*” conectados no terciário requerem um esquema de proteção simples;
- Dispositivos de manobra para reatores “*shunt*” conectados no terciário de conexão são mais baratos;
- Reatores “*shunts*” conectados ao terciário podem ser instalados em bancos de forma independente dividindo-se a potência requerida em um número maior de bancos tornando a operação mais flexível e também não impõem uma queda de tensão significativa durante a comutação;
- Apesar de alguns dos benefícios operacionais listados acima, o uso de reatores “*shunts*” conectados ao terciário depende da capacidade de potência disponível no terciário do transformador. Na maioria dos casos, existe capacidade ociosa no terciário que permite a compensação através do uso de reatores “*shunt*” conectada ao terciário. A Figura 5 é uma foto típica de reatores “*shunt*” conectado ao terciário.

No entanto, nos casos em que não há capacidade suficiente de compensação total do lado do terciário, ou por qualquer outro motivo, reatores “*shunt*” conectados ao terciário não podem ser empregados. Uma abordagem alternativa é a conexão de reatores no secundário do transformador. Reatores “*shunts*” conectados ao secundário não vão impor carga extra no transformador uma vez que reatores são conectados durante algumas horas quando a carga é leve ou durante uma temporada de carga leve do ano. Reatores “*shunts*” conectados ao secundário também estão disponíveis nos tipos de construção imersos em óleo ou do tipo seco com núcleo de ar. Para ambas as formas de conexão, ao terciário ou diretamente à linha, a proteção é uma consideração importante. Detalhes sobre práticas de proteção podem ser encontradas no guia da IEEE, "Shunt Reactor Protection Pratics" [10] e também no guia IEEE C37. 109 [11].

2.2 REATORES CONTROLADOS POR TIRISTORES (COMPENSAÇÃO DE REATIVA DINÂMICA)

Com as características operacionais do sistema aproximam-se cada vez mais de seus limites, tais como a estabilidade dinâmica ou de tensão, ou, no caso de grandes cargas industriais dinâmicas, (tais como fornos a arco), surge então a necessidade de compensação dinâmica. Tipicamente, compensadores estáticos de VAR (SVC) são usados para fornecer compensação dinâmica em uma barra, através do uso de microprocessadores, para a manutenção de uma reserva dinâmica de apoio reativa quando há uma necessidade [18].

A Figura 6 ilustra uma configuração típica para um SVC. A Figura 7a mostra a tensão e a corrente em uma fase de um reator controlado a tiristor TCR quando α (ALFA) não é zero. A Figura 7b mostra os espectros harmônicos das correntes, como um percentual da corrente fundamental, gerado pelo TCR para vários ângulos de disparo α (ALFA).

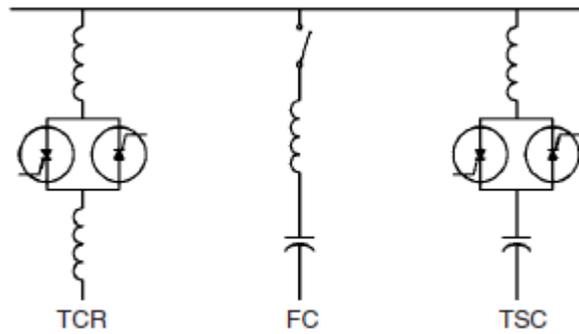


Figura 6. Configuração típica de um SVC; retirada de [18].

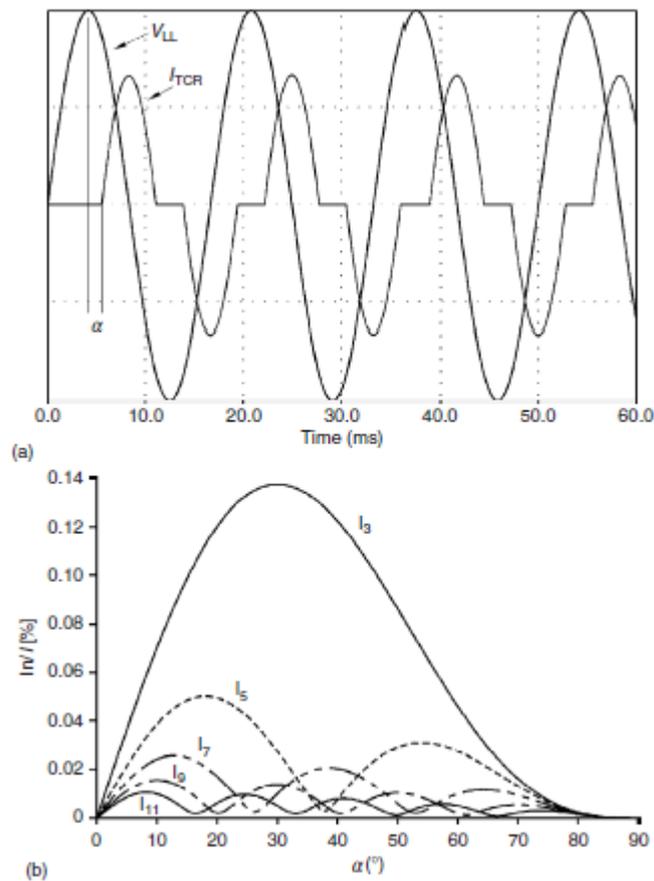


Figura 7. a) Tensão de Corrente de um TCR, b) Espectro de Harmônicos das Correntes de um TCR; retirada de [18].

Pela variação do ângulo de disparo α (ALFA) do reator controlado por tiristor (TCR), a de corrente absorvida pelo reator pode ser continuamente variada. O reator comporta-se como uma indutância infinitamente variável. Conseqüentemente, o apoio capacitivo fornecido pelo capacitor fixo (FC) e pelos capacitores controlados a tiristores (TSC) pode ser ajustado para a necessidade específica do sistema. A eficiência, bem como o controle de tensão e estabilidade dos sistemas de energia, ganham altos índices de confiabilidade com a instalação de SVCs. O uso de SVCs (Figura 8) também é consagrado em sistemas de potência de cargas industriais.

Exigências de aumento da produção e regulamentos mais rigorosos quanto ao consumo de potência reativa e mitigação de perturbação no sistema de potência podem exigir a instalação de SVCs. Fornos a arco elétrico em siderúrgicas são exemplos típicos de carga industriais que podem causar incômodo aos consumidores pela geração de flicker. Uma instalação típica de uma usina siderúrgica é mostrada na Figura 8. As características dos reatores controlados a tiristor são: 34 kV, 710 A, e 25 MVAR por fase.



Figura 8. Reatores Controlados por Tiristores; retirada de [18].

2.3 REATORES LIMITADORES DE CORRENTE

Reatores limitadores de corrente (RLC) são usados para reduzir os valores da corrente de curto-circuito a níveis compatíveis com a capacidade dos equipamentos conectados no lado da carga do reator. Estes reatores têm hoje grande aplicação, desde os simples alimentadores de distribuição até os reatores de transmissão, ligação entre barramentos e balanceamento de carga de até 800kV e NBI de 2100kV [18].

Reatores limitadores de curto-circuito são usados para controlar os níveis de curto-circuito no sistema elétrico de potência, cobrindo a faixa que vai desde grandes complexos industriais, sistemas de distribuição até sistemas de transmissão HV/EHV.

RLC são primariamente instalados para reduzir a corrente de curto-circuito mecânica e térmica a níveis consistentes com os demais componentes do circuito (especialmente transformadores e disjuntores) e para reduzir quedas de tensão súbitas nas seções das barras

para níveis consistentes com os valores praticados na coordenação de isolamento. Altas correntes de falta nos sistemas de distribuição ou transmissão, se não limitada, podem causar falhas catastróficas dos equipamentos de distribuição a apresentar um sério perigo à saúde da equipe de operação.

Sumariamente, reatores limitadores de corrente são instalados para reduzir a magnitude das correntes de curto-circuito de modo a atingir um ou mais dos objetivos seguintes:

- Redução do carregamento eletromecânico e stress térmico nos enrolamentos dos transformadores, deste modo estendendo a vida útil dos transformadores e equipamentos associados;
- Melhoria na estabilidade da barra primária de tensão durante o evento de uma falta em um alimentador;
- Redução da corrente de falta fase-fase para valores menores que da corrente de falta fase-terra ou vice versa;
- Proteção dos transformadores de distribuição e demais equipamentos a jusante e dispositivos a partir da rápida propagação inicial de transitórios de frente de onda, devido a falhas na operação dos disjuntores;
- Redução da exigência de suportabilidade térmica e dinâmica dos dispositivos de comutação, tais como religadores, seccionadoras e fusíveis limitadores;
- Controle sobre as perdas em regime permanente e do fator de qualidade em qualquer frequência desejada; esta característica é particularmente importante para as redes, onde altas correntes harmônicas devem ser amortecidas sem aumentar as perdas na frequência fundamental;
- Aumento da confiabilidade do sistema;

Reatores limitadores de corrente podem ser instalados em diferentes pontos da rede de energia e, como tal, são normalmente referidos por um nome que reflete a sua localização ou aplicação.

Nomenclaturas mais comuns são:

- Reatores de fase: Instalados em série com linhas;
- Reatores entre barras: usado para unir duas barras de forma independente;
- Aterramento neutro: reatores instalados entre o neutro de um transformador e terra. Reatores para aterramento de neutro são usados para reduzir as correntes de falta para terra;

- Reatores Duplex instalados entre uma única fonte e duas barras. Reatores Duplex são reatores limitadores de corrente formados por duas bobinas enroladas em oposição. Estes reatores propiciam uma reatância baixa em condições normais e uma reatância elevada em condições de falta [18].

2.4 REATORES PARA FILTROS DE HARMÔNICAS

Reatores para filtro de harmônicas são usados em conjunto com capacitores e, às vezes, resistores, formando circuitos sintonizados de correntes harmônicas. Estes reatores podem ser fornecidos com taps de indutância, anéis especiais para controle do fator de qualidade, e podem ser fabricados com tolerâncias controladas [18].

A presença crescente de cargas não lineares e o uso generalizado de aparelhos eletrônicos de comutação em sistemas de potência industriais estão causando um aumento de harmônicos no sistema de energia. As principais fontes de harmônicos são cargas de arco industrial (fornos a arco, aparelhos de solda), conversores de energia para acionamento de motores de velocidade variável, iluminação fluorescente, cargas residenciais, tais como televisores, computadores domésticos, etc.

Dispositivos eletrônicos aplicados em sistemas de transmissão de energia modernos que incluem também sistemas de HVDC, sistemas FACTS, tais como compensadores estáticos SVC, trazem consigo grande conteúdo harmônico.

Harmônicos podem ter efeitos prejudiciais sobre os mais diversos equipamentos, como transformadores, motores, chaves seccionadoras, bancos de capacitores, fusíveis e relés de proteção. Transformadores e motores podem sofrer um aumento das perdas e aquecimento excessivo. Capacitores podem falhar prematuramente, provenientes de um maior aquecimento e aumento do stress dielétrico.

A fim de minimizar a propagação de harmônicos nas redes de distribuição de energia ou no sistema de transmissão, filtros conectados em paralelo (“*shunt*”) são muitas vezes aplicados normalmente perto da origem dos harmônicos. Filtros “*shunt*” na sua concepção são constituídos de uma indutância série (reator de filtro) e capacitância (capacitor de filtro). Se mais de uma ordem harmônica deve ser filtrada, vários conjuntos de filtros de classificação diferentes são aplicados ao mesmo barramento. Filtros mais complexos também são usados para múltipla filtragem harmônica. Mais informações podem ser encontradas na recomendação do IEEE, "Selecting Ratings for Capacitors and Reactors in Application Involving Single Tuned Filters"[12].

2.5 REATORES ASSOCIADOS A BANCOS DE CAPACITORES

Reatores associados a capacitores são projetados para instalação em série com bancos de capacitores em derivação de modo a limitar as correntes de “*inrush*”, correntes de descarga durante curto-circuito e para controlar a frequência de ressonância do sistema após a adição de bancos de capacitores. Estes reatores podem ser instalados em sistemas de até 800kV, e 2100kV de NBI [18].

A aplicação de capacitores de potência em sistemas de transmissão e distribuição tem sido aceita como a solução viável e exequível para suporte de VAR e tensão, correção de fator de potência e problemas de qualidade de potência.

A aplicação de capacitores em sistemas de potência pode criar condições anormais transitórias e de regime, tais como:

- Chaveamento Back-to-back: pode resultar em danos para o dispositivo de chaveamento do capacitor;
- Corrente de falta durante a desenergização do banco: pode danificar outros dispositivos de chaveamento da subestação;
- Sobretensões transitórias no transformador de corrente do banco;
- Criação de um circuito (caminho) de baixa impedância para harmônicas de alta ordem superior no sistema, resultando em sobrecarga harmônica nas latas dos capacitores.

Reatores associados a capacitores são os equipamentos que podem resolver todos os problemas acima. Outros equipamentos tais como disjuntores equipados com resistores ou indutores de pré-inserção ou disjuntores com dispositivo de comutação de onda também podem ser utilizados para resolver os problemas acima. A Figura 9 é uma foto de uma instalação típica utilizando reatores associados a capacitores.



Figura 9. Reatores Associados a Bancos de Capacitores; retirada de [18].

2.6 REATORES PARA FORNO A ARCO ELÉTRICO

Reatores para forno a arco elétrico são conectados em série com o transformador do forno, fazendo com que o sistema de alimentação, considerado essencialmente como de tensão constante, se converta em um sistema de corrente constante. Como resultado, o forno passa a operar, com eficiência maior em até 15% e também em consumo reduzido de eletrodos.

O reator série pode ser instalado no alimentador de média tensão (lado de alta tensão do transformador do forno) de um forno a arco elétrico AC, a fim de melhorar a eficiência, reduzir o consumo de eletrodo do forno, limitar a corrente de curto-circuito (reduzindo assim as forças mecânicas sobre os eletrodos do forno). Reatores podem ser construídos junto (interno) ao transformador do forno ou unidades separadas. Podem ser imersos em óleo ou do seco com núcleo de ar. Normalmente, os reatores são equipados com taps para facilitar o desempenho do forno. A Figura 10 mostra um esquema típico de um reator para forno a arco elétrico.

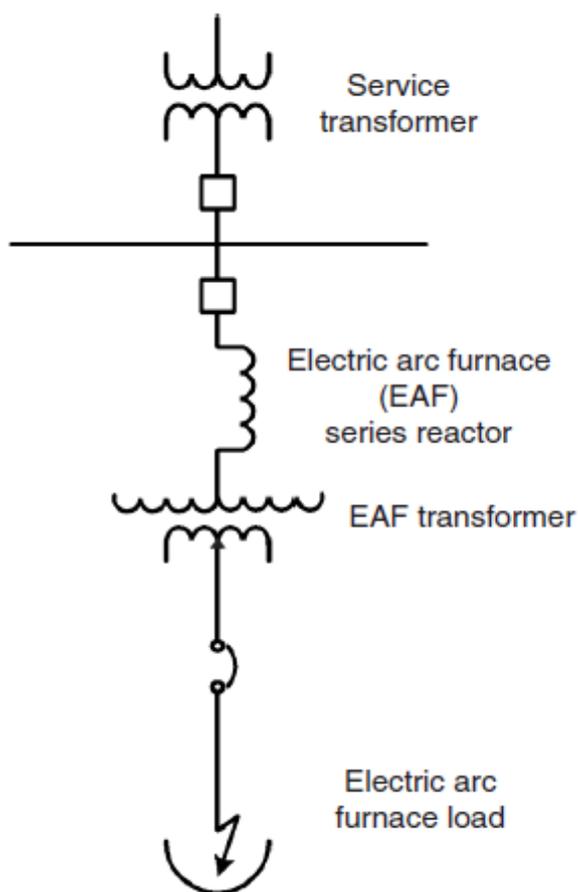


Figura 10. Esquema típico de um reator para forno a arco; retirada de [18].

2.7 REATORES PARA ENSAIOS USADOS EM LABORATÓRIOS

Reatores de teste são usados em laboratórios de alta tensão e alta potência. Aplicações típicas incluem limitação de corrente, testes sintéticos de disjuntores, armazenamento de energia indutiva, linhas artificiais [18].

2.8 REATORES PARA APLICAÇÃO EM HVDC

Em um sistema HVDC, reatores são usados para diversas funções, como mostrado na Figura 11.

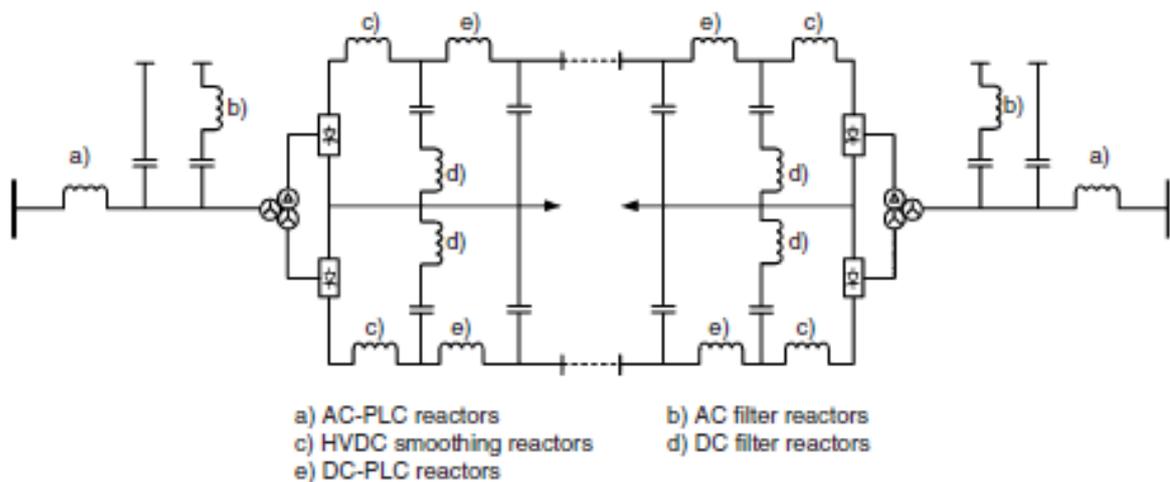


Figura 11. Diagrama de um HVDC, ilustrando as aplicações dos reatores; retirada de [18].

Os reatores de alisamento HVDC são ligados em série com uma linha de transmissão HVDC ou inseridos em um ponto intermediário no circuito DC de um link “back-to-back” para:

- Reduzir os harmônicos do lado DC;
- Reduzir a elevação da corrente causada por falhas no sistema DC;
- Reduzir a intensidade da corrente *ripple* em sistemas de corrente contínua;
- Melhorar a estabilidade dinâmica do HVDC sistema de transmissão;

Estes reatores com potência de até 300MVA_r (equivalente), são necessários em sistemas de transmissão em corrente contínua de alta tensão de até 800kV.

Reatores de filtro (Figura 12) são instalados para a filtragem de harmônicos no lado AC (corrente alternada) e no lado DC (corrente contínua) dos conversores. Filtros CA servem para dois propósitos ao mesmo tempo: fornecimento de potência reativa e redução das correntes harmônicas. Reatores para filtros AC são utilizados em três tipos de configurações de filtro empregando combinações de resistores e capacitores: Filtro de sintonia simples, filtros de dupla sintonia e filtros passa alta. Os filtros de sintonia simples são normalmente projetados para filtrar as harmônicas de baixa ordem no lado CA do conversor. Os filtros de sintonia dupla são projetados para filtrar múltiplas frequências discretas, utilizando um circuito combinado de filtros simples. Um filtro passa altas é essencialmente um único filtro sintonizado amortecido. O amortecimento achata e alarga a resposta do filtro, é mais eficaz na cobertura de harmônicos de alta ordem. Reatores para filtros DC são instalados em paralelo com a linha DC, no lado da linha dos reatores de alisamento. A função desses bancos de filtros DC é reduzir ainda mais as correntes harmônicas na linha DC (Figura 11) [18].

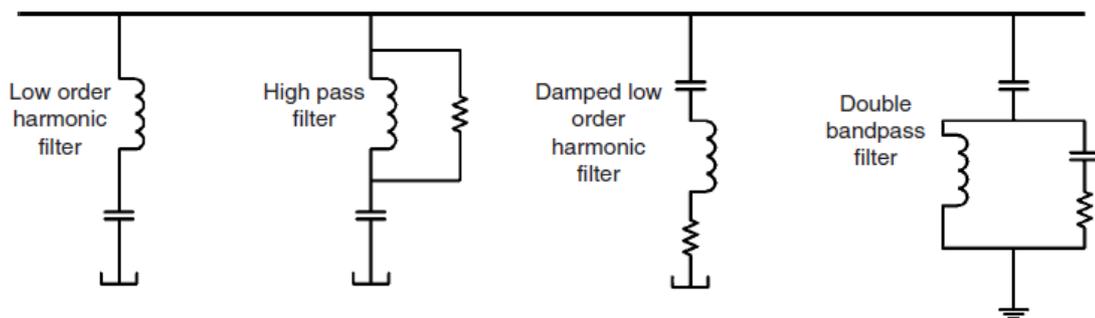


Figura 12. Configurações típicas de filtros; retirada de [18].

2.8 REATORES PARA CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA

Reatores para controle de fluxo de potência são conectados em série, em linhas de transmissão de até 800kV. Estes reatores modificam a impedância da linha, introduzindo uma tensão em quadratura, controlando o fluxo de potência e assegurando a máxima transferência de potência em linhas adjacentes [18].

Dentre as mais recentes aplicações de reatores série no sistema de transmissão, estão os reatores destinados ao controle de fluxo de potência ou suas variantes e mitigação de sobre tensões.

O fluxo de potência através do sistema de transmissão é uma função da impedância e da tensão complexa (magnitude e fase) nos finais da linha. Em sistemas interligados, o controle do fluxo de potência é uma grande preocupação para as concessionárias, porque fluxos de potência não planejados podem dar origem a uma série de problemas tais como:

- Sobrecarga das linhas;
- Aumento das perdas do sistema;
- Redução das margens de segurança;
- Violações contratuais relativas à importação / exportação de energia;
- Aumento do nível de falta além dos suportados pelos equipamentos;

Casos típicos de ineficiência do fluxo de potência e limitações encontradas no sistema de potência moderno podem ser resultado de um ou mais dos seguintes casos:

- Não otimização do paralelismo das impedâncias das linhas de transmissão resultando em uma linha atingindo seu limite térmico bem antes de outra linha, limitando assim a otimização da transferência do fluxo de potência;
- Linhas paralelas com diferentes relações de X/R: uma potência reativa significativa irá fluir na direção oposta do fluxo de potência ativa;
- Altas perdas em linhas quando estas estão fortemente carregadas do que as perdas de linhas paralelas, resultando em perda da capacidade de transferência de potência;
- “*Loops*” de potência (a diferença entre o fluxo de potência planejado e o atual): embora inerente para sistemas interconectados, os “*loops*” de potência podem ser tão severos que podem comprometer a confiabilidade do sistema;

Reatores para fluxo de potência são usados para melhorar o fluxo de potência nas linhas de transmissão através da modificação da impedância de transferência. Como os sistemas das concessionárias crescem e o número de interconexões aumentam, operação das linhas de transmissão paralelas estão se tornando cada vez mais comum em ordem para prover potência adequada para os centros de carga. Além disso, a complexidade das redes de energia contemporânea resultam em situações em que o fluxo de potência atual (por uma determinada linha de uma concessionária) pode ser afetado pelo chaveamento, carregamento e uma condição de interrupção que ocorra em outra área de serviço.

O posicionamento estratégico de reatores para fluxo de potência pode servir para aumentar a máxima de transferência de potência, reduzir as perdas de transferência de potência e melhorar a confiabilidade do sistema. A inserção de reatores para fluxo de potência de alta tensão em um circuito de baixa impedância permitiu que linhas paralelas alcançassem os limites térmicos simultaneamente e por isso aperfeiçoar a máxima transferência de potência por meio de perdas globais reduzidas.

Quando a remoção de fontes de geração ou linhas em uma área afeta o carregamento em outra área, pode-se mitigar este problema com o uso de reatores. Neste caso, o reator série fica normalmente em “*by pass*” e quando o sistema se encontra na condição de contingência este reator é inserido no sistema equilibrando os fluxos novamente.

A Figura 13 mostra os tipos de chaveamento de um reator para controle de fluxo de potência. No sistema, um transformador de corrente é usado para detectar uma condição de sobrecarga na linha. Sobre a detecção de uma condição de sobre corrente o sistema de controle irá executar o dispositivo de “*by-pass*” e inserir o reator em série com a linha de transmissão

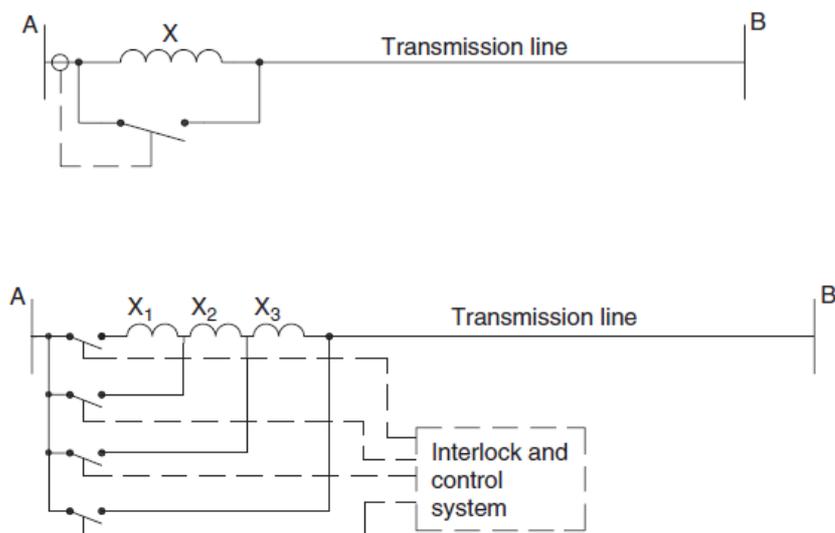


Figura 13. Chaveamento de um Reator para controle de fluxo de potência; retirada de [18].

Com as redes de energia em constantes mudanças, algumas vezes um valor de impedância único não é adequado para todas as diferentes topologias de rede. As topologias de rede podem mudar algumas vezes durante o ano, devido à característica sazonal de carregamento, ou no futuro, como uma consequência do adicionamento de novas gerações, ou cargas para a rede. Para adaptar a estas mudanças, uma solução é o uso de reatores para controle de fluxo de potência com “*taps*” chaveados. A Figura 13-B mostra um reator para controle de fluxo de potência com “*taps*” chaveados usando a “*make and break*” esquema de chaveamento. Este esquema emprega seis chaves com chaveamento sobre carga, que podem alterar a impedância sobre carga, circuitos de controle e intertravamento são usados para evitar chaveamentos não desejáveis.

No capítulo 2 foi apresentado as aplicações mais típicas onde os reatores a seco com núcleo de ar apresentam vantagens técnicas e econômicas em relação a outras tecnologias construtivas de reatores. Com conhecimento mais amplo da tecnologia de reatores a seco com núcleo de ar e o desenvolvimento de novos materiais praticamente todos os aspectos técnicos relativos a reatores podem ser atingidos pelos reatores a seco com núcleo de ar. A tensão nominal nos reatores “*Shunts*” permanece como o principal limite físico a ser vencido para que os reatores a seco com núcleo de ar possam ser apresentar vantagens técnicas e comerciais para todas as classes de equipamentos / aplicações.

A seguir no capítulo 3 é apresentada uma visão específica da aplicação de reatores a seco com núcleo de ar utilizados para maximizar a transferência de potência entre linhas paralelas com diferentes impedâncias e três estudos de caso de aplicações bem sucedidas e registradas desta aplicação.

CAPÍTULO 3: REATORES PARA CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA

Neste capítulo é apresentada a utilização dos reatores a seco com núcleo de ar para controle de fluxo de potência e três estudos de caso onde a aplicação dos reatores a seco com núcleo de ar apresentou vantagem em relação a outras soluções.

3.1 INTRODUÇÃO

A privatização dos mercados de eletricidade é uma tendência em todo o mundo. A mudança da estrutura estatal para o mercado aberto conduz a um aumento significativo na comercialização de energia elétrica. A operação da planta de energia atual é impulsionada por aspectos econômicos, a quantidade de fluxo nas redes é determinada principalmente pela situação econômica e não somente por aspectos técnicos. As condições e requisitos das cargas decorrentes da comercialização de energia no mercado atual podem causar problemas sendo muitas vezes forçada a entrar nas limitações físicas das redes. Além disso, o aumento de transmissão de grandes quantidades de energia elétrica a longas distâncias utilizando diferentes áreas de controle requer mais esforços para coordenar e supervisionar a troca de energia [17].

Um exemplo deste conflito de exploração das redes de transmissão para além dos limites inicialmente previstos tornou-se claramente visível no blackout na Itália em 28 de setembro de 2003. A Itália importava quase 7 GW do exterior, que era equivalente a 24% da demanda total na Itália e, acima de sua geração. O resultado do fluxo de carga empurrou as linhas de interconexão entre a Itália e os seus vizinhos a um estado operacional perto dos limites. Conseqüentemente, o fracasso de uma linha de transmissão interligando, que é tolerável no estado de operação normal, juntamente com o fato de que medidas corretivas não foram tomadas no tempo necessário, uma falha da segunda linha adicional, levou ao isolamento da área de controle italiano que não foi capaz de acompanhar e isolar a área causando um apagão em todo o país. Em geral, há uma série de abordagens para superar ou mitigar os problemas de fluxo de carga, incluindo a instalação de reatores em série em alta tensão (HV) do tipo seco.

3.2 CONTROLE DE FLUXO DE CARGA EM REDES DE TRANSMISSÃO

O problema básico que motiva a necessidade de controle de fluxo de carga em redes de energia elétrica é o fato de que nos mercados desregulamentados de energia, os fluxos de energia contratada, que são orientados para a situação econômica, resultam em gargalos cada vez maiores na rede de transmissão física. Como resultado, procedimentos especiais gerando custos significativos devem ser introduzidos de forma a permitir a operação normal da rede sem violar constantemente às regras de segurança [17].

Outros problemas são causados por:

- Diferentes fluxos de potência aos planejados em pontos de interconexão das redes, que podem ocorrer por muitas razões. Se os sistemas estão operando perto de seus limites, mesmo pequenos desvios já podem levar à condições de operação difícil;
- Transferências de energia causando loops de potência em redes de fronteira subjacente ou ligados, que são às vezes muito difíceis de prever no planejamento operacional, também pode levar a difíceis condições de funcionamento;
- Distribuição irregular de carga das linhas de impedância diferentes entre diferentes áreas de controle podem ocorrer, resultando na limitação da capacidade total de transporte pelo primeiro componente alcançar seu limite de carga térmica e não se baseia em todos os componentes, atingindo os seus limites ao mesmo tempo;

É um objetivo das empresas de energia reforçar o mercado de eletricidade. Por isso estes problemas têm de ser resolvidos - especialmente, a capacidade de transporte disponível tem de ser aumentada. Ao mesmo tempo em que em alguns casos, construção de novas linhas se torna cada vez mais difícil devido aos custos administrativo e ecológico as técnicas de controle de fluxo ganham importância (exemplo: FACTS) permitindo a operação segura das redes existentes em conjunto com o aumento do transporte de energia.

3.3 SOLUÇÕES, TEORIA E TÉCNICAS PARA CONTROLE DE FLUXO DE CARGA

Existem três técnicas básicas para controle ativo de fluxo de potência: transformadores de deslocamento de fase (PST), FACTS (sistemas flexíveis de transmissão AC), e elementos de impedância série, tais como reatores ou capacitores. Enquanto PST são comumente usados em redes de energia em todo o mundo, elementos de impedância e, especialmente FACTS (para controle de fluxo de carga) são usados principalmente em grandes sistemas de transmissão [17].

Alguns princípios básicos são considerados usando um modelo simples de rede. Na Figura 14 mostra duas barras (A & B) interligadas por duas linhas em paralelo. Cada linha possui sua reatância específica (X_1 & X_2). V_A & V_B são as tensões respectivas para as barras A & B. O fluxo de potência está no sentido de A para B e é representado por S_{AB} . O diagrama fasorial mostra que a tensão V_B é igual a V_A menos a queda de tensão provocada pelo produto da reatância e a corrente que circula na linha.

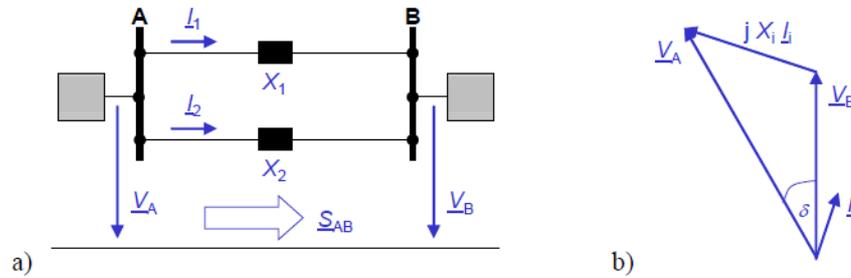


Figura 14. a) Modelo básico de uma rede e b) Diagrama fasorial ; retirada de [17].

Dois áreas de controle são ligadas através de duas linhas com impedâncias X_1 e X_2 . Com resistências e elementos “shunt” negligenciados, e assumindo que as tensões V_A e V_B são fixadas pelas redes conectadas, então a potência ativa transferida de A para B é:

$$P_{AB} = \text{Re}\{S_{AB}\} = P_1 + P_2 \quad \text{with} \quad P_i = \frac{V_A V_B}{X_i} \sin \delta, \quad \delta = \varphi_A - \varphi_B \quad (2)$$

O transformador de deslocamento de fase (PST) influencia o fluxo de potência ativa, alterando o ângulo de fase entre a tensão de entrada e a tensão de saída de uma linha de transmissão, permitindo assim controlar-se a potência ativa que flui pela linha. Enrolamentos específicos das bobinas do transformador permitem mudanças do ângulo de fase para 30° , 60° ou 90° , onde o ângulo de 60° é mais comumente usado. Além disso, a magnitude da tensão também é influenciada com comutadores de taps. Sem mudança de fase, transformadores afetam apenas a magnitude da tensão e em consequência apenas o fluxo de potência reativa é afetado.

FACTS - especialmente no tipo mais geral, o UPFC (Universal Power Flow Controller) - permite uma ampla gama de controle dos fluxos de potência ativa e reativa. UPFCs podem influenciar a magnitude de tensão, o ângulo de transmissão e impedância da linha. Além disso, usando eletrônica de potência, FACTS podem reagir muito rapidamente permitindo também o controle de aspectos dinâmicos.

Elementos de impedância série, tais como reatores e capacitores, também permitem o controle de fluxo de potência ativa de maneira simples, alterando a impedância das linhas de conexão. Usando a equação 2 acima pode se ver facilmente que se as reatâncias de linha simétrica $X_1 = X_2$ resultam em uma transmissão de energia simétrica ($I_1 = I_2$ e $P_1 = P_2 =$

PAB / 2). A instalação de um reator de série na linha 1 aumenta X_1 . Usando a condição para fasores de linha $jX_1 I_1 = I_2 j X_2$, é óbvio que o I_1 atual decresce com a relação entre as reatâncias - o "controle de fluxo de carga" implica em maior transmissão de potência para a linha 2.

3.4 CARACTERÍSTICAS DE REATORES SÉRIE DE ALTA TENSÃO

Um reator série pode ser um dispositivo eficaz para implementar a capacidade de transmissão de energia. A impedância necessária do reator é facilmente determinada por estudos do sistema. Reatores série podem ser inseridos de forma permanente para melhorar o compartilhamento de carga entre as linhas de impedância diferentes, ou, temporariamente, para aliviar o carregamento das linhas críticas sob condições operacionais específicas [18].

O custo relativamente baixo junto com os curtos prazos de implementação, bem como facilidade de transporte fazem dos reatores série particularmente atraentes quando o problema de fluxo de carga é uma condição de curto ou médio prazo que deverá ser resolvida, como por exemplo a futura construção de uma nova linha. Um período de tempo inferior a 6-8 meses após a aprovação do projeto de energização já viabiliza a utilização de reatores série. Como descrito anteriormente reatores podem ser tanto do tipo seco ou a imerso em óleo. Devido a suas características de projeto e sua rentabilidade, reatores a seco com núcleo de ar tornaram-se a tecnologia preferida para muitas aplicações. A tecnologia de reatores a seco com núcleo de ar tem sido aplicada para um grande número de projetos de controle de fluxo de carga em sistemas e subsistemas de transmissão. As principais características dos reatores núcleo de ar comparados aos imersos em óleo com núcleo ferromagnético são:

- Indutância linear. Como não existe um núcleo de ferro e, portanto nenhum efeito de saturação magnética, a impedância de reator a seco com núcleo de ar é constante a partir de níveis mínimos de corrente para corrente de falta. Esta característica $L \propto I$ linear faz dele um candidato ideal para ser usado como um reator série para controle de fluxo de carga;
- Ausência de óleo isolante. Uma vez que reatores a seco não possuem um sistema de isolamento de óleo, não há perigo de incêndio e outras preocupações ambientais. Além disso, nenhum sistema de coleta de óleo deve ser implementado, pois não há óleo que pode vazar para o chão e nenhum equipamento auxiliar para a supervisão de óleo se faz necessário;
- Isolamento para a terra. O isolamento para terra é simples fornecidos por isoladores suporte;
- O campo magnético externo. Devido à ausência de um núcleo magnético ou uma blindagem magnética o reator a seco com núcleo de ar produz um campo magnético

externo. No entanto, a intensidade do campo cai muito rapidamente com o aumento da distância do reator, uma vez que um indutor possui uma característica dipolo magnético e o campo decai com a terceira potência da distância;

3.5 PROJETO E INSTALAÇÃO DE UM REATOR A SECO COM NÚCLEO DE AR

A Figura 15 mostra um detalhe de componentes de um reator a seco com núcleo de ar.

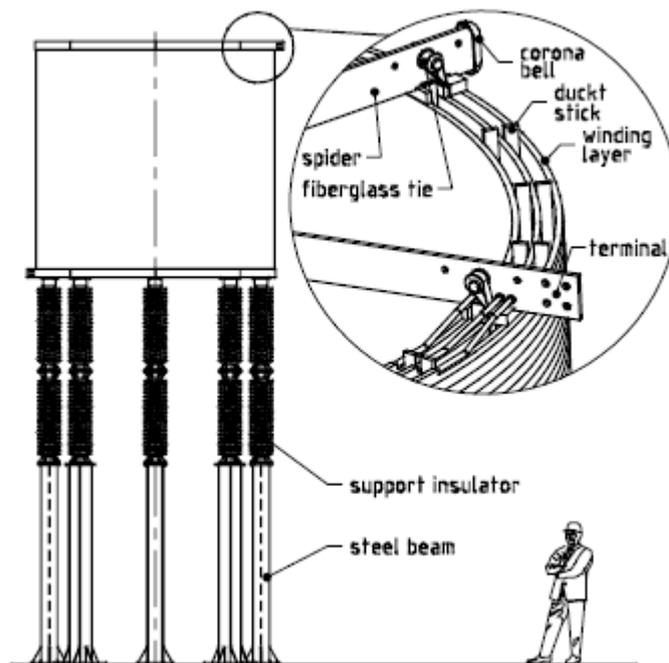


Figura 15. Reator a seco com núcleo de ar; retirada de [17].

A lista a seguir apresenta as características principais de construção de reatores de alta tensão do tipo seco com núcleo de ar [17]:

- O enrolamento do reator consiste de certo número de camadas concêntricas de enrolamento, todas eletricamente conectadas em paralelo nas suas extremidades por solda nas estruturas metálicas de fixação (cruzetas);
- Os condutores de alumínio que formam as camadas do enrolamento são isolados através de isolantes elétricos sólidos, encapsuladas por fibra de vidro impregnada em resina epóxi;
- O número de camadas e suas respectivas espiras são selecionados com base de requerimentos de corrente e indutância;

- A altura do enrolamento é projetada de modo que o stress de tensão axial implica em valores de tensão superficial pequenos, comparados aos valores típicos de stress superficial aplicados em isoladores;
- A tensão entre espiras em condições de operação nominal (regime) são bem abaixo dos níveis em que uma descarga superficial pode ocorrer;
- As camadas do enrolamento são radialmente espaçadas por fibra de vidro com alta rigidez mecânica "espaçadores" que formam dutos naturais de refrigeração para as camadas do enrolamento;
- A cruzeta superior e inferior do enrolamento é presa por amarrações de fibra de vidro localizadas ao longo do enrolamento;
- Os reatores são montados em um conjunto de isoladores suporte e pode incluir também vigas metálicas para fornecer distâncias adicionais no entorno do reator. Calotas anticorona ou anéis podem ser fornecidos para a blindagem das cruzetas;

Reatores a seco com núcleo de ar são por concepção unidades monofásicas, onde um conjunto de três unidades forma um conjunto trifásico. Componentes auxiliares, tais como disjuntores de by-pass, capacitores de controle de TRV (tensão de restabelecimento transitória) e pára-raios, usualmente acompanham a aplicação. O diagrama de uma linha na Figura 16 ilustra o arranjo de um reator em série e seus possíveis componentes auxiliares em uma subestação.

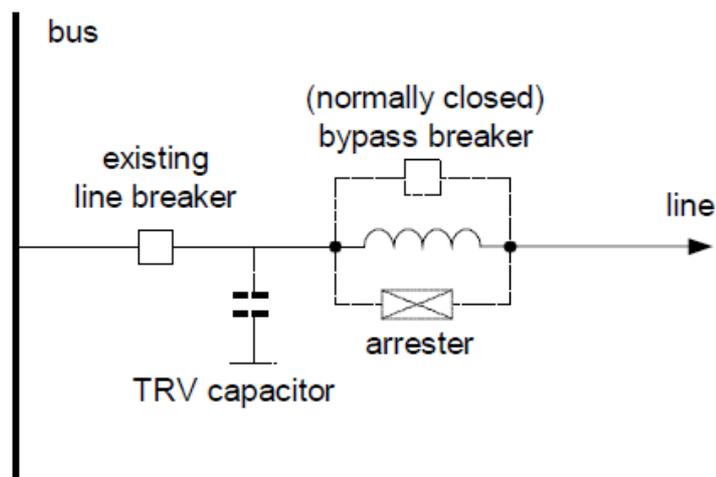


Figura 16. Componentes auxiliares de um reator série; retirada de [17].

A instalação de um reator série vai ter um impacto sobre o disjuntor existente. Geralmente, o reator tende a aumentar a taxa de elevação da Tensão de Recuperação Transitória (TRV) aparecendo no lado da linha do disjuntor, para faltas no lado da linha do

reator. Isso pode requerer a adição de um capacitor para reduzir a taxa de elevação do TRV. Normalmente, o capacitor é conectado de linha para terra no lado da linha do disjuntor, mas também pode ser conectado em paralelo com o reator. Se reatores são destinados para a operação sob condições de carga específicas, então eles serão equipados com um disjuntor em estado normalmente fechado, sendo que estes disjuntores irão retirar o reator quando a linha estiver operando em condições normais. Quando a linha se encontra sob condições críticas o disjuntor de desvio é aberto e então o reator é inserido no sistema. Uma vez que o disjuntor de desvio não é instalado para condições de faltas claras, uma chave que opera sob carga também pode ser usada ao invés de disjuntores.

Embora os reatores série sejam adequadamente protegidos pelo pára-raios de linha, podem ser utilizados também pára-raios adicionais instalados em paralelo com o enrolamento dos reatores. A tensão nominal do pára-raios é determinada para estar em conformidade com a queda de tensão que aparece entre os terminais do reator em condições de curto-circuito. Em alguns projetos reator com “*taps*” são preferidos para fornecer alguma flexibilidade de ajuste para condições futuras do sistema. “*Taps*” em reatores a seco com núcleo de ar de grandes potências nominais são normalmente conseguidos através de bobinas individuais, que são ligados em série e empilhados formando uma fase. A variação da reatância e o número de “*taps*” dependem das necessidades do projeto.

A seguir, são apresentadas três experiências reais, sendo duas delas na Europa (Alemanha e Áustria) e uma nos EEUU da utilização de reatores a seco com núcleo de ar para aumentar a capacidade de transferência de potência em linhas paralelas com diferentes impedâncias entre si.

3.6 ESTUDO DE CASO 1: USO DE REATORS PARA CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA EM UMA REDE DE 110KV

O exemplo utilizado consiste em uma parte da rede de 110 kV do Sistema da Isar-Amperwerke localizado na Alemanha. A linha de 110 kV Isar-Amperwerke AG, expandiu-se de 500 km em 1960 para cerca de 2100 km no presente. Devido a menor taxa de crescimento da demanda de novas cargas, juntamente com o aumento de problemas para se obter a permissão para construir novas linhas aéreas, as empresas de energia elétrica tiveram de tomar medidas para aumentar a capacidade de transmissão da rede existente. Linhas existentes podem ser reforçadas através da instalação de condutores maiores. Outra possibilidade de aumentar capacidade é a inserção de reatores, semelhantes aos utilizados para limitar as correntes de curto-circuito. A adição de reatores, tais como reatores série, em redes malhadas cujas linhas paralelas apresentam diferentes impedâncias ou diferentes capacidades resultam no aumento da impedância de carregamento de linhas fortemente carregadas. A parcela de suas respectivas cargas é distribuída para partes vizinhas da rede.

Para a análise de uma parte da rede da Isar-Amperewerke devemos considerar a ilustração da Figura 17. O ponto em consideração era uma parte da rede a leste da cidade de Munique, na área das subestações Neufinsing Hohenbrunn, servindo uma área de 500 km², com aproximadamente cerca de 150 MW. Com a perda da linha 3, a capacidade de carga limite máxima da linha 1 foi alcançada. Linha 2 e 4 exibidas no mesmo tempo apresentam uma reserva de carga considerável (Figura 18).

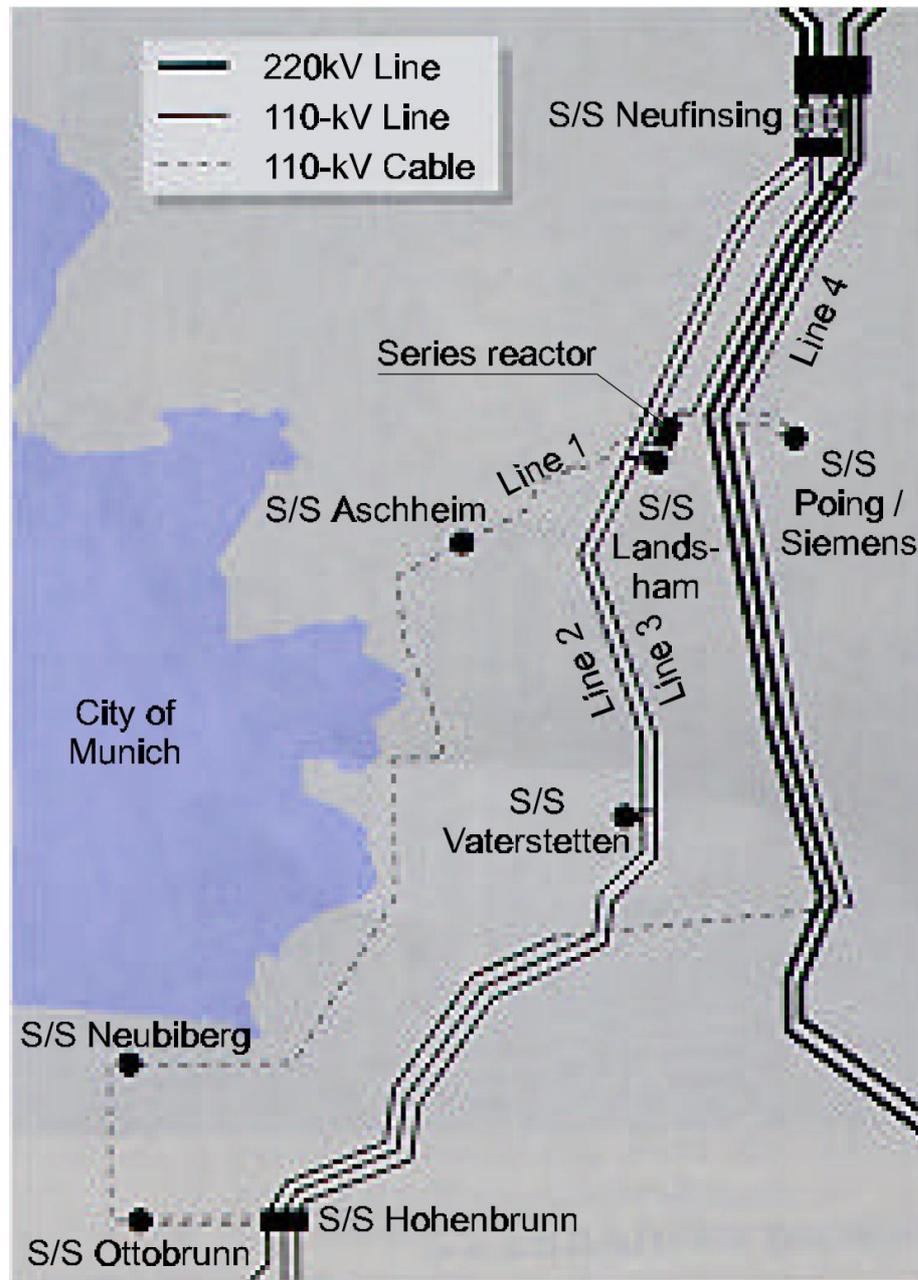


Figura 17. Rede de 110kV da Isar-Amperewerke na área das Subestações Neufinsing e Hohenbrunn ; retirada de [16].

A razão para a grande parte da carga transferida para a linha 1 (e consequente compartilhamento da carga desproporcional) foi a baixa impedância da linha da Neufinsing para Hohenbrunn, através das subestações: Aschheim Neubiberg e Ottobrunn. A subsequente sobrecarga na linha poderia ter sido resolvida com a construção de uma linha adicional, que teria sido a quinta linha entre Neufinsing e Hohenbrunn. No entanto, teria sido uma solução muito cara. Nesta situação, Isar-Amperewerke decidiu-se sobre uma abordagem diferente. Por meio da instalação de reatores com núcleo de ar, a impedância da linha 1 foi mais do que duplicada. O que resultou que todas as linhas restantes quando expostas, mesmo no caso de distúrbios, em uma uniformidade de compartilhamento da carga. (Figura 18).

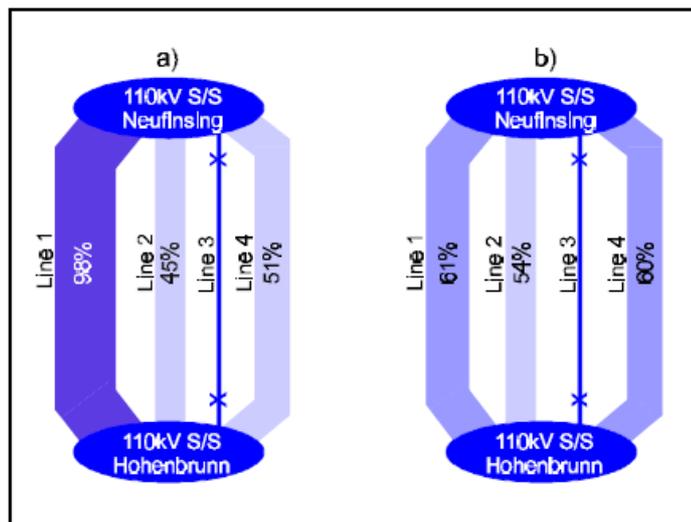


Figura 18. Carregamento das linhas, após a perda da linha 3 - a) sem Reatores - b) com Reatores ; retirada de [16].

Os reatores foram concebidos em série como fase única, a tecnologia empregada foi reatores a seco com núcleo de ar, uma indutância de 19 mH e uma capacidade de corrente média de 600 A. As dimensões aproximadas de 2.4 metros de altura e um diâmetro externo de 1.3 metros (Figura 19).



Figura 19. Reatores a seco com núcleo de ar na SE Landsham; retirada de [16].

O ponto de transição entre a linha aérea proveniente de Neufinsing S / S e o cabo que continua para Aschheim Hohenbrunn S / S (na Subestação Landsham) foi o ponto escolhido para instalação. Devido à economia de espaço com o uso da configuração de instalação triangular, que era perto do pórtico de entrada, a localização dos selos de extremidade do cabo puderam permanecer inalteradas. Pára-raios, que estão localizados entre os cabos e os reatores, são utilizados para proteção contra sobre tensões.

O aumento desejado na impedância resultou em uma série de outros "Efeitos colaterais", que exigiu avaliação (exemplos: TRV; regulação de tensão; níveis de curto circuito, etc.). No entanto, os cálculos demonstraram que nem o campo eletromagnético, nem o comportamento alterado na reflexão na conexão linha Cabo / aéreo resultarão em condições inaceitáveis de operação. Devido ao uso de reatores série na rede de 110 kV entre Neufinsing S / S e Hohenbrunn S / S, a eficiência na capacidade de reserva da linha foi criada, o que permitiu garantir o fornecimento, sem qualquer sobre carregamento da rede por mais de 4 anos (1996 foi o ano de implementação da solução dos reatores).

3.7 ESTUDO DE CASO 2: REATORES SERIE EM ALTA TENSÃO PARA O CONTROLE DO FLUXO DE CARGA

Dentro da rede de transmissão austríaca, o efeito da liberalização conduziu a um número de gargalos causados por alterações no fluxo de carga devido ao novo regime de energia da planta. Para garantir uma reserva no funcionamento da rede Power Grid Verbund-austríaca (APG), o operador do sistema austríaco de transmissão (TSO), teve de aplicar medidas com custos elevados de gestão dos congestionamentos (CM), como remanejamento da geração de energia das estações produtoras. Em uma etapa posterior, a APG construiu novas linhas aéreas 380 kV para superar as situações de gargalo, mas como a construção de novas linhas foi adiada por extensos procedimentos de autorização e forte oposição por parte do público, a APG foi forçada a tomar medidas CM até que novas linhas puderam entrar em operação. Foi avaliada uma série de abordagens para superar ou mitigar os problemas de fluxo de carga, incluindo a instalação de reatores em série de alta tensão (HV) do tipo seco.

Os reatores requeridos forneceram uma impedância de 50 Ω . Eles foram instalados em série com uma linha de transmissão de 220 kV. Os dados básicos são fornecidos na Tabela 1.

Tabela 1 . Dados básicos.

Tensão Nominal do Sistema	220kV, 50Hz
Reatância Nominal	50 Ω
Corrente Nominal	800 A
Corrente de Curto-circuito Térmica	2.65kArms 1 seg.
Nível de Impulso Atmosférico	1050kVp

Um projeto de um reator a seco com núcleo de ar baseado nestes dados teve como sua principal característica a queda de tensão entre os terminais do reator em condições normais de operação e pela elevação de temperatura causada ao isolante quando circula pelos condutores a corrente nominal. Devido à baixa relação da corrente de curto em relação à corrente nominal (3.3 vezes) a corrente de curto-circuito não influencia o projeto do enrolamento. Outros fatores, entretanto, como limitações físicas impostas pela produção e transporte também foram considerados. Baseado nos dados previamente especificados o reator foi projetado utilizando um isolante sólido com classe de temperatura tipo F, o que resultou em uma bobina de 2,7 m de altura e 3 m de diâmetro exterior. A massa do reator dependeu das perdas do enrolamento selecionada. Assumindo um valor típico de perdas por fase (com referência a 75 ° C de temperatura média) na ordem de 90 kW, a massa de uma única fase, incluindo isoladores suporte foi de cerca de 8 toneladas por fase.

Para uma determinada relação de diâmetro x altura utilizando um determinado isolante elétrico, o reator pode ser projetado para diferentes perdas nominais. Isto é conseguido variando o numero de camadas e seção transversal dos condutores elétrico. A Figura 20 mostra a variação do custo do equipamento em função das perdas. Assumindo-se um fator de perdas capitalizado (Em EUR / kW) específico para a aplicação, a curva de tendência dos custos permite uma seleção ideal das perdas do reator para atingir o custo mínimo do ciclo de vida.

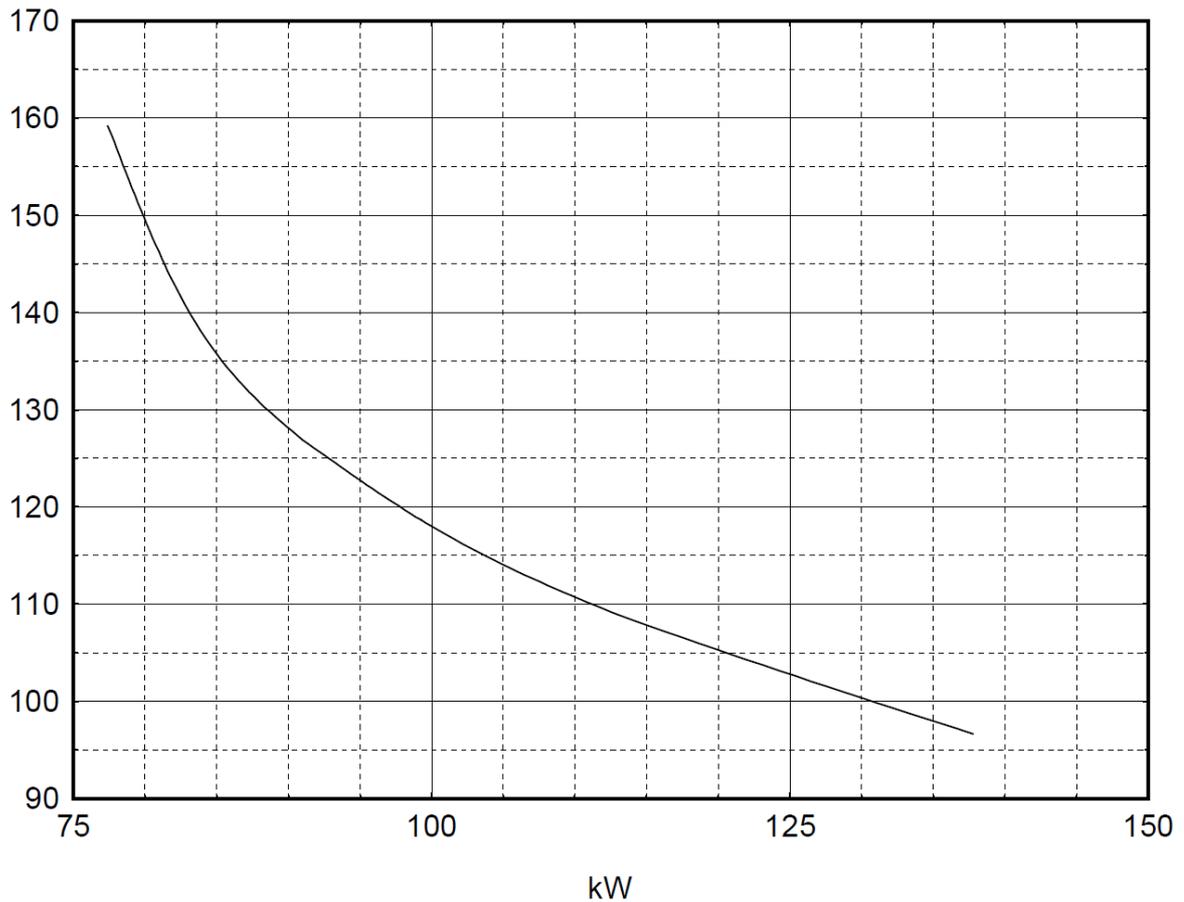


Figura 20. Curva de tendência do custo do equipamento versus perda (valores por fase, incl. isoladores suporte) ; retirada de [17].

Devido ao regime de operação do sistema de potência da APG, o mesmo apresentava graves congestionamentos na sua rede de transmissão, especialmente entre o norte e a região sul (Figura 21). A conexão entre as duas regiões era fornecida por três linhas de circuito duplo com quase 50 anos de idade. Fortes diferenças no equilíbrio do balanço de potência com um excedente de até 1900 MW na Região Norte e um déficit de cerca de 1.400 MW Região Sul, combinada com os fluxos de potência externos (incluindo os “*Loops*” de potência não intencionais), levaram a uma sobrecarga das linhas muito além do critério de segurança (n-1). Sem medidas CM, o critério de segurança (n-1) nas linhas de 220 kV de norte para o sul era ultrapassado por longos períodos com tendência a chegar ao limite térmico de operação das linhas. Restrições operacionais, a retirada de operação de usinas térmicas ineficientes na Região Sul e a construção em curso de plantas de energia eólica (até 1000 MW) na Região Norte aumentaram em um segundo instante os pontos de congestionamento em um futuro próximo. Além de medidas CM, a limitação dos fluxos de energia aumentando a impedância das linhas do norte para sul com reatores série foi um método eficaz para atenuar os congestionamentos. Com as características técnicas dos reatores série mencionadas anteriormente, os possíveis efeitos sobre a rede da APG foram analisados por estudos de fluxo de carga.

A Figura 21 mostra a rede de transmissão 380/220 kV da Verbund-APG. As linhas de 220 kV de norte a sul são as linhas sujeitas a problemas de congestionamento. As linhas de 380 kV são marcadas com linhas pontilhadas. Este alto carregamento das linhas só é tolerável em conexão com o dispositivo automático de desligamento, que foi instalado em acordo com o CENTREL-TSOs - se o fluxo de carga em linhas específicas atingir 115% do limite térmico, linhas de interconexão para República Checa e Hungria são automaticamente desligadas em uma sequência pré-definidas. A instalação de reatores série leva a um aumento das impedâncias de linha que é tecnicamente comparável com um aumento na extensão das linhas de transmissão existentes. Essa variação na rede resulta em uma limitação do fluxo nas linhas, com o objetivo de alcançar níveis aceitáveis de fluxos de carga.

High voltage transmission grid of VERBUND-APG

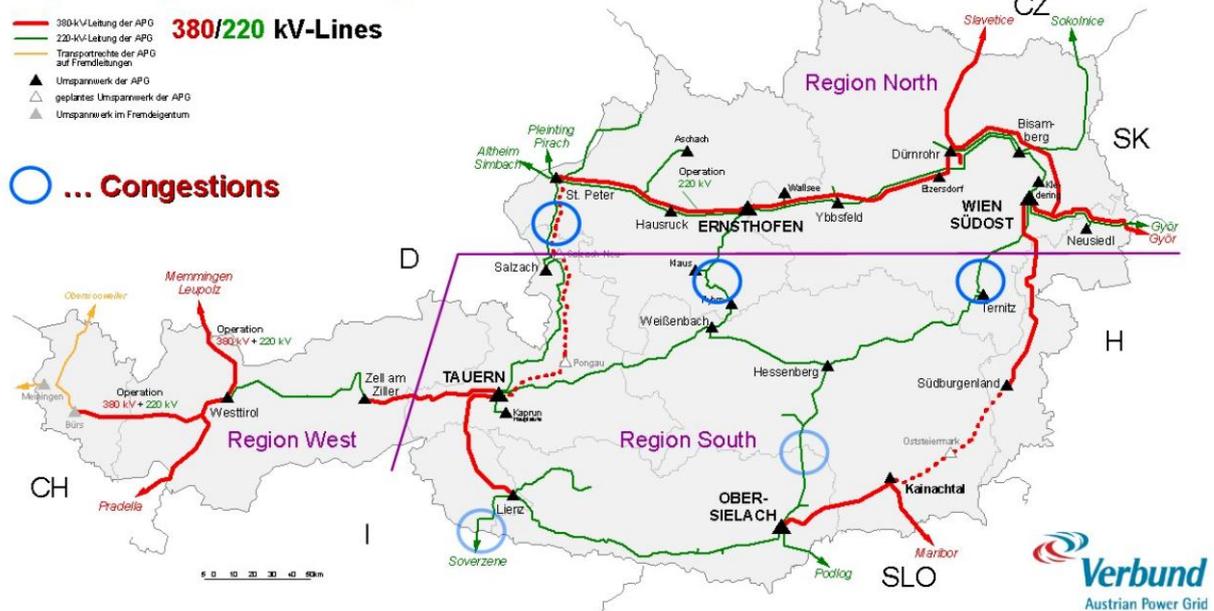


Figura 21. Linhas de Transmissão da Verbund-APG 380/220 kV ; retirada de [17].

Para investigar o impacto do uso de reatores série em uma linha real, reatores série foram instalados para fins de cálculo em uma condição de fluxo de carga instantâneo (caso base) da rede da APG. Em uma primeira etapa reatores série com uma impedância de 50Ω foram instalados em ambos os circuitos da linha de 220 kV de circuito duplo Ernsthofen - Weissenbach. Baseado em uma situação típica de carga elevada (caso base), um cálculo foi feito para analisar os efeitos e desvios a partir do caso base. Um alívio das linhas Ernsthofen-Weissenbach foi atingido, deslocando o fluxo principalmente para os ramos adjacentes das linhas de 220kV de St. Peter - Salzach e Wien Südost - Ternitz com uma ligeira redução do fluxo total do norte para o sul e interior da Áustria (Figura 22). Devido à existência de três circuitos de linhas duplas paralelas de 220 kV pouco robustas do norte para o sul no interior da Áustria, a instalação de reatores série em apenas uma linha, não é suficiente para atenuar o congestionamento. Em uma segunda etapa, a instalação de reatores série para cada circuito de todas as três linhas de 220 kV de St Peter -Salzach, Ernsthofen - Weissenbach e Wien Südost - Ternitz foi simulado.

Em uma terceira etapa, conexão série de dois reatores (cada 50Ω) por circuito e linha foi simulada. A Figura 22 apresenta os resultados de todos os cálculos (da primeira simulação até a terceira) descrevendo a possível redução da carga em cada linha e o fluxo resultante de norte para o sul em cada linha dependendo da instalação de reatores série. Os resultados dos cálculos de fluxo de carga com base na instalação de reatores série estão na mesma ordem de grandeza das reduções do fluxo de carga possíveis com a aplicação de medidas de despacho das cargas. Considerando-se os enormes custos com a aplicação de medidas de re-

despacho das cargas, esta medida fornece uma alternativa CM proporciona benefícios adicionais.

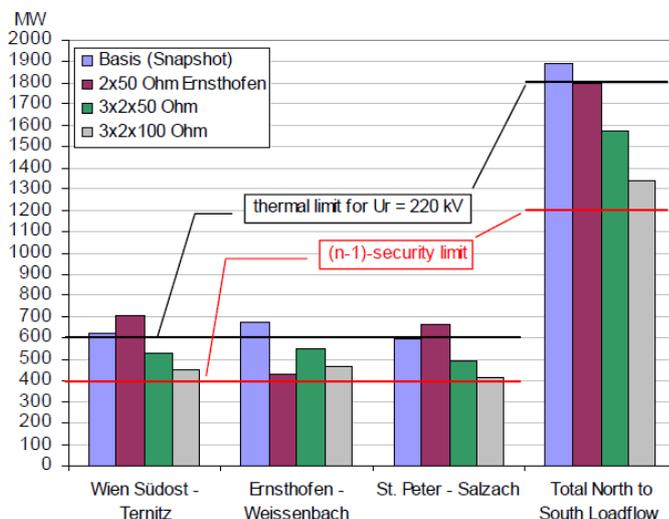


Figura 22. Fluxo de carga nos três circuitos duplos de 220 kV; retirada de [17].

Além da queda de tensão elevada em todos os reatores, o terceiro passo da simulação com uma conexão de dois reatores ($2 \times 50 \Omega$) série para cada circuito indicou também que os ângulos de tensão excediam 35° . Este efeito foi bastante analisado e indica possíveis limites para o funcionamento da rede. O resultado do estudo na rede é que o fluxo de carga do norte ao sul, no interior da Áustria pode ser reduzido com um sucesso limitado através da instalação de reatores série HV. Devido ao aumento da impedância da linha dentro da rede austríaca, o fluxo de carga foi deslocado para linhas adjacentes nos países vizinhos. A parte sul da Áustria é cada vez mais suprida por fluxos de energia oriundos da parte ocidental da Áustria e da Eslovênia. Estes efeitos foram discutidos com os TSOs vizinhos e precisaram ser consideradas no cálculo da capacidade de transferência de rede entre países vizinhos (caso contrário, os loops de potência iriam ocorrer). Através da aplicação de reatores série constitui-se uma nova possibilidade interessante e eficaz para aliviar os gargalos na rede de transmissão da APG. Especialmente em combinação com outras medidas, tais como o uso de transformadores com opção de mudança de fase e condições especiais de comutação dentro da rede, a instalação de reatores (comutáveis) série torna-se um opção atrativa para controle de fluxo de energia.

A comparação dos custos do re-despacho das centrais elétricas, comparados ao custo de investimento para reatores série fornece uma boa razão para considerar a instalação de reatores série enquanto a extensão da rede de 380 kV não pode ser realizada. Um benefício adicional foi uma redução significativa das perdas de transmissão, evitando o alto carregamento das linhas de 220kV linhas existentes.

As linhas de conexão de 220kV entre o norte e o sul do operador do sistema Verbund-Austrian Power Grid estavam em algum momento extremamente sobrecarregadas. Para reduzir o fluxo de potência a APG necessitava aplicar medidas significativas até que as novas linhas de 380kV estivessem comissionadas. Esta foi a razão pela qual APG fez os primeiros estudos considerando o uso de reatores série HV em sua rede como uma solução alternativa.

Comparados com outras tecnologias, como PST e FACTS, o controle de fluxo de potência através de reatores série oferece muitas vantagens. Como os custos de investimento são bastante baixos e a um tempo de retorno curto, reatores série seriam uma alternativa interessante para a gestão dos congestionamentos em caso de estrangulamentos que serão finalmente removidos com a construção de novas linhas de transmissão.

Controle de fluxos de carga deve ser predominantemente utilizado para reduzir os “*loops*” de potência e congestionamento de linhas. No entanto, deve-se salientar que o aumento da impedância das linhas em uma rede local através do uso de reatores séries pode impor restrições adicionais - também em linhas paralelas.

3.8 ESTUDO DE CASO 3: CASO CARBON-SPANISH FORK #1 REATORES SERIE EM UMA LINHA DE 138KV

As linhas de transmissão encarregadas de escoar a energia do sistema Carbon para a área SpanishFork consistem de duas linhas em 138kV que ficam localizadas no estado de Utah nos EEUU. A Linha # 1 foi construída em 1923 com condutor 4/0 de cobre, e a Linha # 2 foi construído em 1957 com um condutor de CAA 795. Além disso, a linha Carbon-Upalco-Ashley de 138 kV interliga a área de Carbon com a região leste do estado de Utah. No entanto, o fluxo na linha é sempre de leste a oeste, e como tal esta linha é uma fonte de potência que deve também ser transferida do sistema para SpanishFork.

A potencia nominal da Linha # 1 é de 75 MVA e a da Linha # 2 é de 208 MVA, com temperatura de referência de 35°C. Quando a temperatura ambiente é inferior ao valor de 35°C, estas linhas podem operar com potência maiores. Contudo, devido aos ajustes dos relés de proteção térmica o fluxo de potência não pode exceder o SPOL (curto período de sobrecarga “*Short period overload*”). O SPOL das Linhas # 1 e # 2 são respectivamente 113 e 254 MVA. Antes da instalação do reator série, o fluxo de Carbon para Spanish Fork se dividia naturalmente 40% sobre a Linha # 1 e 60% na Linha # 2, mas a capacidade térmica total das duas linhas estava dividida 26% a 74%. O fluxo na Linha # 1 excedia sua capacidade contínua de 75 MVA sempre que o fluxo de Carbon para Spanish Fork excedia 180 MVA limitando assim sua a capacidade de transferência em dias quentes.

Para esta condição, a Linha # 1 poderia ser efetivamente aberta e a capacidade de transferência aumentada porque a limitação em seguida, tornar-se-ia os 208 MVA da Linha # 2. Menor temperatura ambiente resultava em capacidades mais elevadas de transferência, mas a transferência tinha que ser mantida de forma segura abaixo de 250 MW, devido ao SPOL da Linha # 1 quando ambas as linhas estavam em serviço, ou seguramente abaixo de 240MW por causa do SPOL da Linha #2 quando a Linha #1 estivesse aberta. Para as condições de interrupção de linha, a capacidade de transferência do sistema de transmissão 138 kV Carbon para Spanish Fork baseava-se na perda simultânea de ambas as linhas. Por causa da diferença significativa na capacidade térmica das duas linhas a perda da Linha #2, quando o fluxo total de Carbon para Spanish Fork excedia 140 MW, resultava em um evento em cascata que levava a perda da Linha #1.

Fluxos de reativos e regulação de tensão também eram problema quando se aumentava o fluxo de Carbon para Spanish Fork. Devido a uma relação X/R muito baixa, o sentido do fluxo reativo na Linha #1 era de Spanish Fork para Carbon. As relações X / R das Linhas #1 e #2 eram 1.4 e 5.7 respectivamente. Com um fluxo total de 180 MW de Carbon para Spanish Fork o fluxo líquido reativo era de 59 MVAR, saindo de SpanishFork e 34 MVAR entrando em Carbon. A maior parte do fluxo reativo estava na Linha #1. Conseqüentemente, o sistema 138kV de SpanishFork não somente fornecia as perdas reativas de Carbon para SpanishFork,

mas também fornecia fluxo reativo entrando na área de Carbon onde este fluxo tinha que ser absorvida pela estação geradora de Carbon.

As perdas no sistema de transmissão de 138 kV de Carbon para SpanishFork pioravam muito com o aumento do fluxo na Linha #1. As perdas, como uma porcentagem do fluxo de Carbon para SpanishFork , começavam em 4.1% em condições de transferência (100 MW), e ultrapassavam 10% em condições de transferências máximos (250 MW). Devido à pequena bitola dos condutores até 70% das perdas ocorriam na Linha # 1. Em anos anteriores, transferências de energia excediam 140 MW na maior parte do tempo, e geralmente um pico abaixo de 220 MW.

No final de 1991, recebeu-se a confirmação de que uma nova geração de 50 MW em Sunnyside, Utah entraria em operação e a sua interconexão com o sistema elétrico seria pelo sistema de transmissão radial de Carbon. Esta geração aumentaria em 50MW o fluxo de transmissão de Carbon para SpanishFork. Como o sistema de transferências existente de Carbon para SpanishFork já atingia os limites de transferência em condições normais, foi feito análises de varias alternativas. A alternativa mais barata foi adicionar um reator a seco com núcleo de ar em série com a Linha #1 para equilibrar os fluxos entre as linhas com base na capacidade térmica de cada linha.

A Figura 23 abaixo mostra a Linha #1 atingindo o limite de transmissão quando a potencia a ser transferida atingia 180MW.

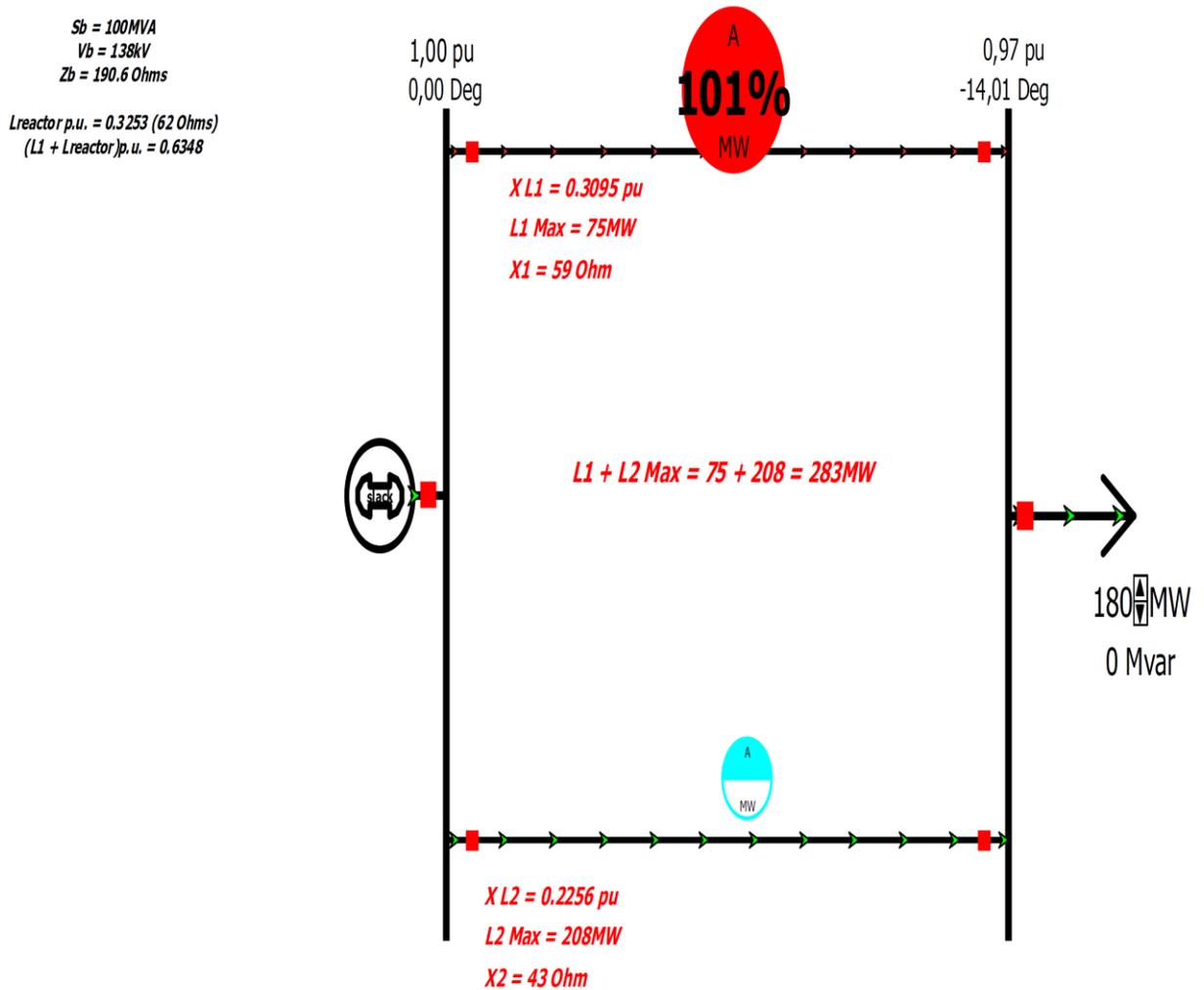


Figura 23. Simulação Power World.

A Figura 24 abaixo mostra as duas linhas atingindo o máximo da transferência de potência 283MW após a instalação dos reatores em série com a linha

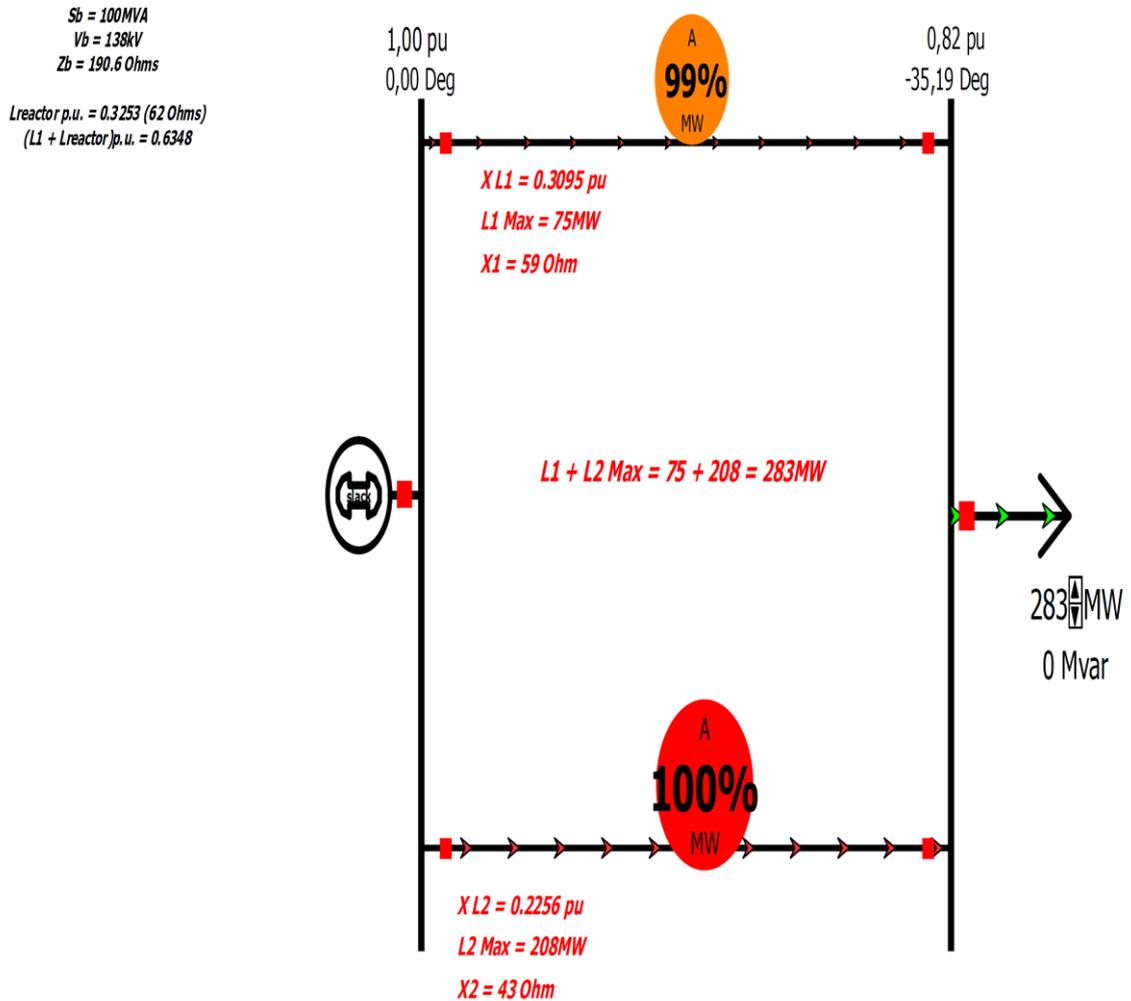


Figura 24. Simulação Power World.

Cada reator tal como ilustrado na Figura 25, possui 3 metros de altura, 2.4 metros de diâmetro, pesa 7700 quilos, são montados 1.8 metros acima do solo sobre colunas de isoladores. A indutância de cada reator é de 164 mH, o que equivale a 62 ohms a 60 Hz. O isolamento entre terminais é de 650kVp e de fase para terra de 650kVp. A corrente nominal dos reatores é de 460 Amperes (ligeiramente maior do que a classificação SPOL da Linha #1).



Figura 25. Reator Carbon-Spanish Fork; foto divulgação Trench Limited [19].

Ao adicionar os reatores em série com a linha #1, a reatância da Linha #1 passou a ser de 2,8 vezes a reatância da Linha # 2. Considerando que, a capacidade térmica da Linha # 2 é de 2,8 vezes a capacidade térmica da Linha # 1. A reatância adicional faz com que o fluxo de Carbon para SpanishFork divida-se entre as linhas com base na capacidade térmica de cada linha, permitindo assim maximizar a capacidade de transferência do sistema de transmissão (Ver Figura 24).

Com a instalação dos reatores, o fluxo de Carbon para SpanishFork agora divide 26% sobre a Linha # 1 e 74% na Linha # 2, ou seja na mesma proporção da divisão da capacidade térmica entre o linhas. Antes da instalação dos reatores os limites normais e de SPOL da Linha #1 eram atingidos quando fluxo total de Carbon para SpanishFork atingia 180MW e 250 MW respectivamente. Agora as Linhas #1 e #2 atingem seu limite térmico quando o fluxo total de Carbon para SpanishFork atinge 283 MW. A Capacidade adicional é disponível quando a temperatura ambiente é inferior a 35°C. Esta capacidade de transferência adicional é fundamental na manutenção da produção da usina de Carbon e o cumprimento das obrigações contratuais com os dos proprietários da geração de Utah.

Os fluxos reativos e regulação de tensão melhorarão com a instalação dos reatores série. Quando uma linha de transmissão tem uma relação X / R baixa, um componente reativo significativo seguirá na direção oposta à do fluxo de potência ativa. O fluxo reativo que chega a estação SpanishFork é 42 Mvar. A linha consome cerca de 8 Mvar e entrega 34 Mvar para Carbon, apesar de que a tensão em Carbon ser maior do que em SpanishFork. A adição dos

reatores série aumentou a relação X/R da Linha #1 para 3.3 comparados com os 1.4 sem a adição dos reatores série.

A condições de interrupção da capacidade de transferência do sistema de transmissão de 138kV da Carbon para SpanishFork é novamente a perda simultânea de ambas as linhas. A perda da Linha #2 que passou para 180 MW (140 MW sem os reatores série) resulta no desligamento em cascata da Linha #1 isto é devido à diferença significativa na capacidade térmica das duas linhas. Os reatores série reduziram as perdas no sistema de transmissão de 138kV de Carbon para SpanishFork. As perdas no sistema de transmissão de 138 kV de Carbon para SpanishFork são agora 29% menores do que antes da instalação dos reatores. O impacto da redução de perdas é significativo tendo em conta o aumento das transferências de potência.

O valor em dólares de economia de energia é dependente de qual cenário de transmissão de energia se usa como base. A economia de energia sobre o sistema Carbon para SpanishFork tende a ser maior durante condições de carga pesada do sistema. Assumindo que esta economia de energia por si só vale um mínimo de 13 mils / kWh. A economia durante um período de 1 ano está entre \$ 429.000 e 496.000. Os 13 mils / kWh são um valor conservativo porque o fluxo total e as perdas do sistema de Carbon para Spanish Fork são bastante elevadas durante o verão. Há muitas horas durante o ano que o valor de 35 a 40 mils / kWh poderia ser aplicado. Para fins de comparação, o custo de implementação do reator série foi de aproximadamente \$ 827.000.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões sobre a utilização dos reatores a seco com núcleo de ar no sistema de potência e a possibilidade em alguns casos de se equilibrar as impedâncias de linhas paralelas aumentando-se assim a potência total a ser transferida nestas linhas.

Foram apresentados três estudos de caso de utilização bem sucedida de reatores a seco com núcleo de ar onde rearranjo de impedâncias nas linhas de transmissão através de reatores trouxe um ganho significativo na capacidade de transmissão destas linhas. Dois casos na Europa (Alemanha e Áustria) e um nos EEUU. Os casos da Europa, pode-se perceber que por se tratar de uma solução barata e de rápida implementação, os reatores, mesmo não sendo a solução final para o problema de distribuição dos fluxos de potência em linhas paralelas tornaram atraentes até que investimentos maiores (construção de novas linhas) puderam ser feitos. No caso dos EEUU a necessidade do aumento de transferência de potência pode ser viabilizada equilibrando-se as impedâncias de duas linhas de transmissão com impedâncias diferentes de forma a atingir a capacidade máxima de transferência de potência de cada linha ao mesmo tempo.

Neste contexto, foi visto que como uma função básica, quando inserimos um reator em série numa linha de transmissão provemos uma impedância para limitar a corrente de falta ou redistribuir os fluxos na rede de acordo com a nova configuração de impedâncias. Quando utilizados para redistribuir os fluxos, os reatores funcionam como se estivéssemos aumentando o comprimento da linha. Por isso em uma nova configuração de impedâncias teremos linhas fisicamente paralelas, mas com respostas diferentes devido ao acréscimo da nova impedância. Assim como os reatores limitadores de curto-circuito em EHV as questões de perdas; regulação de tensão; TRV, e o impacto da relação X/R sobre os disjuntores devem ser analisada.

Provavelmente, o uso de reatores a seco com núcleo de ar para o controle do fluxo de potência se mostrará mais atraente em sistemas muito malhados, onde o crescimento do consumo anual de energia não requer extensos investimentos no sistema como um todo ou ainda que estes investimentos possam ser adiados por algum tempo. Adiantos estes, que podem trazer benefícios econômicos por si só em se postergar estes investimentos ou ainda investimentos que requerem tempo para aprovações, por exemplo, de entidades civis ou ambientais. Em sistemas elétricos que já tiveram seu desenvolvimento em épocas anteriores onde atualmente, com pequenas intervenções, é possível dar uma sobre vida ao sistema até que estes novos investimentos sejam mesmo inadiáveis, esta aplicação tem-se mostrado bastante eficiente.

A qualidade da energia do sistema elétrico é sempre o foco que deve ser almejado pelos operadores do sistema elétrico. É de suma importância que os operadores tenham conhecimento de todas as alternativas que possam ser utilizadas para que a qualidade da energia fornecida aos consumidores seja cada vez maior. Devido às restrições cada vez maiores à construção de novas linhas (sejam elas econômicas ou ambientais), novas técnicas estão sendo implementadas para aumentar a quantidade de energia transferida entre dois pontos utilizando linhas já existentes. Foi objetivo de este trabalho apresentar como uma alternativa, o rearranjo das impedâncias de linhas de transmissão paralelas utilizando-se reatores a seco com núcleo de ar. Assim como os PST e as tecnologias FACTS (FSC; SVC; STATCOM... etc.), a possibilidade do rearranjo de impedâncias através do uso de reatores a seco com núcleo de ar deve ser considerada pelos operadores do sistema; pois dependendo das condições do circuito e do tempo para implantação de soluções definitivas, os reatores a seco com núcleo de ar poderão ser utilizados poderão aumentar a quantidade de energia transferida e assim proporcionar uma maior qualidade da energia do sistema elétrico como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IEEE C57.21-2008 (IEEE Standard Requirements, Terminology, and Tests Code for Shunt Reactors Rated Over 500kVA)
2. IEEE C57.16-1996 (IEEE Standard Requirements, Terminology, and Tests Code for Dry-Type Air Core Series-Connected Reactors)
3. ANSI/IEEE Std 32-1972 (Reaffirmed 1984) (IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices)
4. ANSI C93.3-1995 (Requirements for Power-Line Carrier Line Traps)
5. IEC 60076-6 Edition 1.0 2007-12 (Power Transformers – Part 6: Reactors)
6. IEC 60353 Second Edition 1989-10 (Line Traps for a.c. power systems)
7. ABNT NBR 5119 Segunda Edição 28.01.2011 (Reator para Sistemas de Potência - Especificação)
8. ABNT NBR 7569 NOV/1982 (Reatores para Sistemas de Potência – Método de Ensaio)
9. ABNT NBR 8119 JUL/1983 (Bobina de Bloqueio – Especificação)
10. ANSI/IEEE C37.109-1988 (IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors)
11. IEEE C37.109-2006 (Protection Shunt Reactors)
12. IEEE C37.109-2006 (Selecting Ratings for Capacitors and Reactors in Application Involving Single Tuned Filters')
13. M. R. Sharp, Trench Limited, R. G. Andrei J. C. Werner, American Electric Power; A Novel Air-Core Reactor Design To Limit The Loading Of A High Voltage Interconnection Transformer Bank
14. Bonheimer, D., Lim, E., Dudley, R.F., and Castanheira, A., A Modern Alternative for Power Flow Control, IEEE=PES Transmission and Distribution Conference, Sept. 22–27, 1991, Dallas, TX, 1991.
15. G. Wolf, P.E , Senior Member, IEEE, J. Skliutas, Member, IEEE, G. Drobnyak, Member, IEEE, and M. De Costa; Alternative Method of Power Flow Control Using Air Core Series Reactors
16. Richard Eckerle and Armin Friedrich, Isar-Amperewerke AG, Munich
Translated from German into English by Wilhelm Endfellner and Richard Dudley (Trench),
Use of Reactors for Power Flow Control in 110 kV Network

17. K. PAPP Trench Austria GmbH; G. CHRISTINER H. POPELKA Verbund-APGAG M. SCHWAN FGH e.V. Mannheim, High Voltage Series Reactors for Load Flow Control

18. Richard F. Dudley, Michael Sharp, Antonio Castanheira, Behdad B. Biglar Trench Limited; Chapter 10 Reactors of Electric Power Transformer Engineering (Second Edition); Edited by James H. Harlow

19. Bill Hall, Pacificorp; Carbon-Spanish Fork #1 138kv Line Series Reactors