



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GSE/14
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

**CHAVEAMENTO CONTROLADO DE EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO:
BENEFÍCIOS E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO**

Herivelto de Souza Bronzeado (*)
MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL - MI

Adolpho E. A. L. Calazans **Niraldo M. Valença**
CHESF

Jorge Amon Filho
ELETROBRAS FURNAS S/A

Geraldo Luiz Costa Nicola
ELETROBRAS ELETRONORTE

Ary D'Ajuz
UNIFEI

RESUMO

Os transitórios de manobra de equipamentos ou linhas podem provocar inconvenientes tais como sobretensões temporárias, atuação de pára-raios, envelhecimento precoce de isolamentos não auto-regenerativos, falhas em equipamentos, atuação incorreta da proteção, variações da tensão, degradação da qualidade da energia elétrica, entre outros. Esses transitórios podem ser reduzidos ou eliminados com a utilização da estratégia do chaveamento controlado que atua nos instantes de abertura/fechamento dos polos do disjuntor. Este Informe Técnico apresenta um panorama da tecnologia de chaveamento controlado de equipamentos de alta tensão, descreve as estratégias utilizadas, discute seus benefícios e aplicações, e compartilha experiências adquiridas no uso dessa tecnologia.

PALAVRAS-CHAVE

Manobra de equipamentos; Chaveamento controlado de equipamentos; Mitigação de transitórios eletromagnéticos; Melhoria da qualidade da energia elétrica; Recomposição segura de sistemas elétricos.

1.0 - INTRODUÇÃO

A manobra de banco de capacitores, reatores, linhas de transmissão e transformadores geralmente causa transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Esses transitórios podem provocar diversos inconvenientes à operação do sistema elétrico tais como sobretensões harmônicas temporárias, atuação de pára-raios, envelhecimento precoce de isolamentos não auto-regenerativos, falhas em equipamentos, atuação incorreta dos sistemas de proteção, variações da tensão de suprimento, problemas com a qualidade da energia elétrica suprida e interrupção de cargas sensíveis, entre outros.

A energização de capacitores, por exemplo, provoca altas correntes de energização, em módulo e frequência, exige maior energia dos pára-raios da subestação, causa sobretensões no sistema, erosão nos contatos do disjuntor, sobretensão nos secundários dos transformadores de corrente, estresse dielétrico e mecânico no banco de capacitores e em equipamentos próximos, aumento no potencial da malha de terra e interferências nos cabos de controle e proteção. Também pode causar sobretensões nos terminais remotos de linhas de transmissão bem como nas redes de média e baixa tensão ligadas aos enrolamentos secundários dos transformadores.

Nas manobras de reatores em derivação ocorrem reignições que causam sobretensões, estressam o isolamento do reator e falhas no disjuntor. A componente de corrente contínua das correntes resultante da sua energização pode saturar transformadores de potência próximos.

(*) Edifício Apex Brasil - SBN, Quadra 02, Lote 11, sala 311, 3º subsolo, CEP: 70.040-020 Brasília/DF – Brasil
Tel: (+61) 3414-4233 e (+61) 8115-5995 – Email: bronzeado@ieee.org e herivelto.bronzeado@integracao.gov.br

No caso de transformadores, a sua energização em instantes aleatórios gera correntes de magnetização de altas magnitudes, correntes de *inrush*, as quais podem causar sobretensões harmônicas temporárias no sistema e provocar atuações indevidas dos sistemas de proteção, estresse nos enrolamentos dos transformadores, degradação da qualidade da tensão e do fornecimento de energia elétrica, bem como a saturação de transformadores em operação devido ao fenômeno conhecido como interação simpática [1].

Intrínsecos à operação de sistema elétricos, os curtos-circuitos, bem como os defeitos/falhas em equipamentos não podem ser facilmente evitados. No entanto, **os transitórios de manobras podem ser significativamente minimizados**, de forma a prolongar a vida útil dos ativos quando excedidos os critérios de planejamento e expansão das transmissoras. Uma das tecnologias que vem sendo aperfeiçoada e está se estabelecendo como um método bastante confiável para se reduzir esses transitórios/perturbações é o **chaveamento controlado de equipamentos**, além de disponibilizar às áreas de estudos e engenharia, ferramentas indispensáveis para melhorar o fornecimento da energia elétrica.

Os métodos utilizados para o chaveamento controlado de equipamentos têm como base uma estratégia predefinida para controlar, de forma independente, os instantes de abertura/fechamento dos polos do disjuntor que manobra o equipamento, disponibilizando uma poderosa ferramenta para a melhoria operacional do sistema elétrico, da qualidade da tensão de fornecimento de energia e do desempenho dos disjuntores utilizados nas manobras. A redução dos transitórios de chaveamento também torna mais segura a recomposição do sistema elétrico após uma perturbação, uma vez que haverá uma menor probabilidade de energizações mal sucedidas.

Este artigo tem como objetivo apresentar um panorama da tecnologia de chaveamento controlado de equipamentos de alta tensão, descrever as estratégias utilizadas, discutir os seus benefícios e aplicações, e compartilhar algumas experiências já adquiridas com a utilização dessa tecnologia.

2.0 - PRINCÍPIOS DO CHAVEAMENTO CONTROLADO DE DISJUNTORES

Os métodos convencionais para reduzir o impacto dos transitórios de chaveamento utilizam geralmente resistores ou reatores de pré-inserção, reatores limitadores de corrente, ou pára-raios. A abertura e o fechamento controlado de disjuntores de alta tensão oferecem uma alternativa aos métodos convencionais e vêm se tornando amplamente disponível para manobrar capacitores e reatores em derivação, transformadores e linhas de transmissão, oferecendo vários benefícios técnicos e econômicos. Entre as vantagens do chaveamento controlado estão as reduções de altas correntes de energização em bancos de capacitores e transformadores, das sobretensões harmônicas temporárias, das falhas de equipamentos e da manutenção dos disjuntores.

O chaveamento controlado é uma técnica que utiliza um relé ou um moderno controlador numérico para controlar, de forma independente, o instante ou tempo de fechamento e/ou abertura dos polos de um disjuntor em relação ao ângulo de fase de um sinal de referência de tensão ou corrente. A repetibilidade do tempo de operação do disjuntor e a precisão desejada para o estabelecimento da corrente em um ponto específico da forma de onda situa-se na faixa de ± 1 ms ou menos, e requer que o disjuntor seja construído de modo a prover essa consistência em todas as condições operacionais e ambientais. Alternativamente, o controlador que comanda o fechamento de disjuntores no exato ponto da onda de tensão deve ser capaz de medir as variáveis operacionais tais como o valor da tensão CC na bobina de abertura/fechamento do disjuntor, temperatura do ambiente, o período de tempo em que o disjuntor ficou sem operar, *idle time*, e compensar o efeito destas variações através do sinal temporizado para o fechamento do disjuntor.

2.1 - Abertura controlada

A abertura controlada de um disjuntor refere-se ao controle da separação do contato elétrico em cada polo em relação ao o ângulo de fase da corrente. Controlar o ponto de separação de contato significa determinar o tempo de arco dos contatos com o objetivo de reduzir os desgastes e falhas no disjuntor, além de minimizar os estresses e perturbações no sistema elétrico. O controle é bastante simples, desde que se disponha do tempo de operação do disjuntor, especificamente do tempo entre a energização da bobina de abertura e a separação dos contatos.

O controle da abertura do disjuntor é realizada de forma que a separação de seus contatos se inicie imediatamente após da corrente passar por zero. Com o movimento de separação dos contatos, um arco elétrico é estabelecido e se extingue em um tempo menor que um semi-ciclo, no próximo zero da corrente. Neste momento, os contatos deverão estar separados de forma a proporcionar a máxima rigidez dielétrica, proporcionando ao disjuntor a melhor condição para suportar o restabelecimento da tensão entre os contatos sem a ocorrência de reignição ou reacendimento. **Reignição** é uma ruptura dielétrica que restabelece a corrente ainda dentro do tempo dos 90 graus elétricos de interrupção, normalmente associada às condições térmicas da câmara que não possibilita o restabelecimento dielétrico e, consequentemente, a não extinção do arco elétrico. **Reacendimento** é uma ruptura dielétrica, após os 90 graus, normalmente devido a uma falha na capacidade do restabelecimento dielétrico após a interrupção do arco, que pode resultar em severas consequências para o disjuntor ou sistema associado.

A Figura 1 mostra a seqüência de tempo para uma abertura controlada de um disjuntor [2]. Uma ordem de comando para abertura é emitida de forma aleatória em relação ao ângulo de fase do sinal de referência no instante t_{command} . Essa ordem é retardada pelo controlador por um intervalo de tempo, T_{total} , que é a soma de um intervalo de tempo de atraso intencional de sincronização em relação à referência, T_{cont} , e um determinado intervalo de tempo de espera, T_w . T_{cont} é calculado em relação a um determinado cruzamento por zero da referência, o qual é uma função do tempo de abertura mecânica do disjuntor, T_{opening} , e do ângulo de fase alvo definido pelo momento de “separação elétrica” dos contatos, t_{separate} .

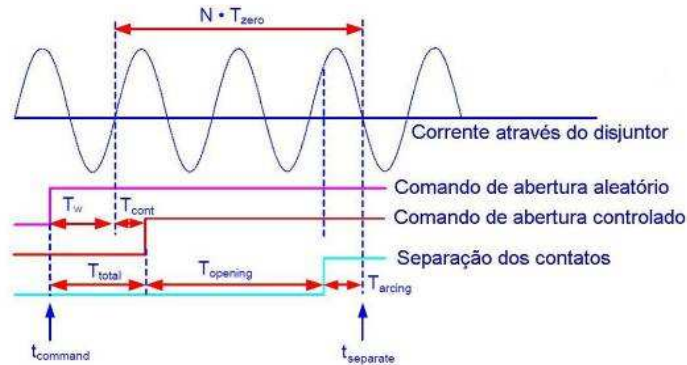


Figura 1 : Exemplo de seqüência dos intervalos de tempos para a abertura controlada de um disjuntor

$$T_{\text{total}} = T_w + T_{\text{cont}} \quad (1)$$

$$T_{\text{cont}} = N \cdot T_{\text{zero}} - T_{\text{arcing}} - T_{\text{opening}} \quad (2)$$

O controle preciso do t_{separate} , que é o instante da separação mecânica dos contatos em relação ao próximo zero de corrente no qual ocorre a extinção do arco, define efetivamente o tempo de arco, T_{arcing} . O tempo de abertura mecânica do disjuntor, T_{opening} , é o intervalo de tempo entre a energização da bobina de abertura e o início da separação mecânica dos contatos do disjuntor. $N \cdot T_{\text{zero}}$ é um número inteiro de meio-ciclos necessário para se obter um valor positivo de T_{cont} mostrado na Figura 1.

2.2– Fechamento controlado

O fechamento controlado de um disjuntor refere-se ao controle do ponto de condução de corrente em cada pólo do disjuntor com respeito ao ângulo de fase da tensão de referência. A Figura 2 mostra a seqüência de tempo para um fechamento controlado de um disjuntor [2]. Disjuntores utilizados para estas aplicações devem ser construídos de modo a proporcionar uma certa consistência na repetição das operações de fechamento. O controlador monitora a tensão da fonte e tem ela como referência para realizar a operação do fechamento controlado.

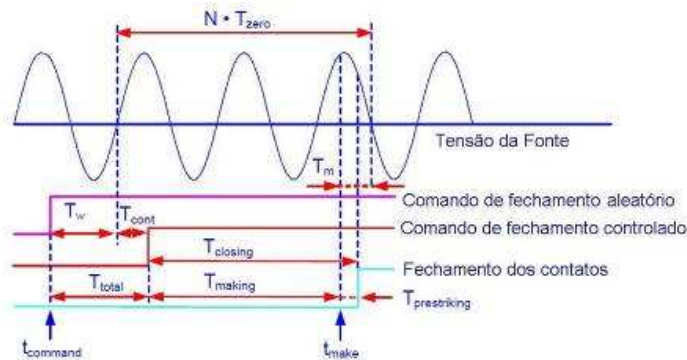


Figura 2 : Exemplo da seqüência dos intervalos de tempo para o fechamento controlado de um disjuntor

A Figura 2 refere-se ao fechamento de uma carga indutiva, onde o instante de fechamento ótimo se dá no pico da tensão, assumindo que o tempo de pré-reacendimento é inferior a um semi-ciclo. O comando de fechamento é emitido aleatoriamente em relação ao ângulo de fase do sinal de referência num instante, t_{command} . O controlador atrasa o comando de fechamento por um tempo, T_{total} , que é a soma de um tempo de sincronização intencional de atraso, T_{cont} , e um determinado intervalo de tempo de espera, T_w . T_{cont} é determinado pelo tempo de fechamento mecânico do disjuntor, o tempo de pré-reacendimento, $T_{\text{prestricking}}$, e o ângulo de fase alvo do instante do fechamento real dos contatos (*making instant*).

O intervalo de tempo de atraso, T_{cont} , em relação a um determinado cruzamento pelo zero da tensão de referência é calculado considerando o tempo de fechamento do disjuntor, T_{closing} , e o tempo de pré-reacendimento, $T_{\text{prestriking}}$. A corrente começa a fluir no instante do fechamento elétrico dos contatos, t_{make} , com o correspondente intervalo de tempo T_m sendo definido a partir do instante t_{make} em relação ao próximo cruzamento da tensão por zero.

O tempo de fechamento, T_{closing} , é o intervalo de tempo entre a energização da bobina de fechamento do disjuntor e o instante de fechamento mecânico dos seus contatos. O tempo de pré-reacendimento, $T_{\text{prestriking}}$, é o intervalo de tempo que decorre entre o instante de “*prestrike*” e toque mecânico dos contatos. O tempo de fechamento elétrico do disjuntor, T_{making} , é o intervalo de tempo entre a energização da bobina de fechamento e o instante em que a corrente começa a fluir, t_{make} , ou seja, quando os contatos se fecham eletricamente.

$$T_{\text{total}} = T_w + T_{\text{cont}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_{\text{cont}} &= N \cdot T_{\text{zero}} - T_m - (T_{\text{closing}} - T_{\text{prearcing}}) \\ &= N \cdot T_{\text{zero}} - T_m - T_{\text{making}} \end{aligned} \quad (4)$$

Em geral, o controlador leva em conta as variações do tempo de operação e das características de pré-reacendimento do disjuntor. O tempo de operação do disjuntor e a sua dependência às condições ambientais e operacionais, bem como o seu comportamento de pré-reacendimento, são particulares para cada tipo de disjuntor.

3.0 CHAVEAMENTO CONTROLADO DE EQUIPAMENTOS

3.1. Chaveamento controlado de banco de capacitores em derivação

Os bancos de capacitores são manobrados com bastante frequência nos sistemas de potência. Os transitórios de corrente e tensão criados pelo chaveamento de capacitores causam sobretensões em locais remotos e afetam, em particular, transformadores nas extremidades de linhas. Quando existem outros capacitores no mesmo barramento do banco que está sendo energizado, operação *back-to-back*, as altas correntes transitórias inerentes são indesejáveis, particularmente por induzir tensões nos cabos de controle e potenciais de passo e de toque. O fechamento controlado do banco de capacitores atenua as correntes transitórias de energização.

A Figura 3 mostra as formas de onda das tensões e correntes na energização controlada de um banco de capacitor, com o fechamento dos polos do disjuntor ocorrendo próximo aos zeros da tensão de cada fase. Observa-se que os transitórios nas correntes de energização são relativamente baixos, com as correntes atingindo o seu valor nominal em cerca de um ciclo após a energização, em todas as três fases.

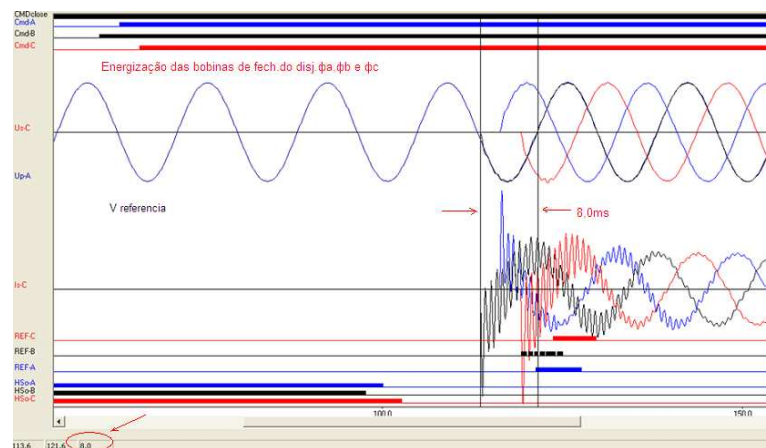


Figura 3 – Formas de onda das tensões e correntes na energização controlada de um banco de capacitores.

3.2. Chaveamento controlado de transformadores

A energização convencional de transformadores é realizada através do fechamento aleatório dos polos do disjuntor, com as tensões do sistema elétrico sendo aplicadas nos enrolamentos do transformador também em instantes aleatórios. Como consequência, os fluxos magnéticos inicialmente produzidos nos enrolamentos, serão, em geral, assimétricos, provocando um sobrefluxo no núcleo do transformador, saturando-o, e, portanto, gerando altas correntes de magnetização (corrente de *inrush*). Dependendo da sua duração, magnitude e grau de desequilíbrio entre as fases, as correntes de *inrush* podem causar sérios inconvenientes no sistema elétrico e no próprio transformador. Como exemplo desses impactos tem-se: sobretensões harmônicas temporárias, atuação indesejada do sistema de proteção, afundamentos momentâneos de tensão, estresse eletromecânico nos enrolamentos do transformador, etc.

Uma das soluções para mitigar essas altas correntes de energização é a aplicação da energização controlada do transformador, cuja estratégia de controle consiste no fechamento elétrico dos polos do disjuntor em instantes de tempo tal que a tensão a ser aplicada nos enrolamentos restabelecesse o fluxo magnético no transformador como se o mesmo tivesse permanecido energizado, ou seja, o fluxo a ser gerado no transformador após a sua energização teria que coincidir com o do fluxo prospectivo que estaria sendo gerado no transformador pela tensão do sistema caso ele permanecesse energizado. A Figura 4a ilustra um dos instantes de condição ótima para energizar transformadores sem a ocorrência de altas correntes de energização, com o fluxo sendo gerado a partir do fluxo residual, seguindo o comportamento do fluxo prospectivo, como se o transformador estivesse em regime permanente. Lembrar que a tensão aplicada está adiantada 90 graus do fluxo indicado.

A Figura 4b ilustra um instante de uma energização não controlada, onde o fluxo gerado no transformador está longe de coincidir com o fluxo prospectivo, gerando um sobrefluxo no transformador e, conseqüentemente, altas correntes de energização.

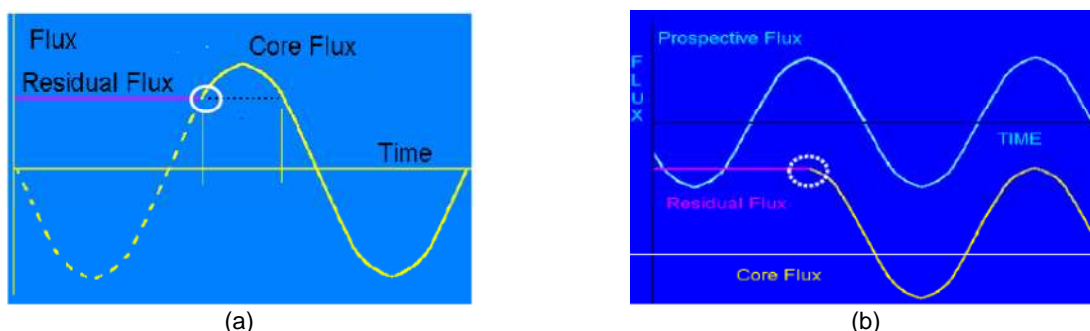


Figura 4 – (a) Fluxo magnético gerado em uma energização controlada; (b) Sobrefluxo magnético gerado em uma energização não controlada.

A Figura 5 mostra as formas de onda das correntes de energização nos enrolamentos de 230 kV e as tensões nos terminais de 138 kV em um transformador de 100 MVA, 230 kV/138 kV, submetido aos ensaios de chaveamento controlado. A Tabela 1 mostra a descrição de cada um dos ensaios realizados. Para efeito de comparação, as magnitudes das correntes na Figura 5 estão mostradas em uma mesma escala de magnitude, tendo como base o maior valor de pico de corrente (1110 A) registrado no Test 9.

Tabela 1

Ensaio	Descrição
Test 1	Energização do transformador com controle dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor, mas <u>sem a informação de fluxo residual</u> (considerado nulo).
Test 3	Energização do transformador <u>com controle</u> dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor e <u>considerando o fluxo residual</u> medido.
Test 5	Energização do transformador <u>com controle</u> dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor e <u>considerando o fluxo residual</u> medido.
Test 7	Energização do transformador <u>com controle</u> dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor e <u>considerando o fluxo residual</u> medido.
Test 9	Energização do transformador <u>sem controle</u> dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor.

Uma análise das formas de onda das tensões no Test 1 indica que o primeiro polo fechado do disjuntor foi o da fase A e, na sequência, os outros dois polos foram fechados praticamente no mesmo instante, aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ciclo após do fechamento do primeiro polo. Neste caso, apesar do chaveamento ter sido controlado, o valor do fluxo residual no transformador não foi considerado. No Test 3, a energização do transformador foi controlada, com os instantes de fechamento dos polos do disjuntor ajustados para considerar o fluxo residual medido. Neste caso, as correntes de *inrush* no transformador apresentaram valores insignificantes, não sendo detectadas pelo instrumento de medição, indicando que não houve saturação do núcleo do transformador. Isto pode ser confirmado também pelas formas de onda das tensões de 138 kV, as quais, praticamente, não apresentaram distorções. Comportamento praticamente similar ocorreu nos ensaios Test 5 e Test 7, indicando a robustez da estratégia utilizada para o chaveamento controlado de transformadores [3].

No Test 9, onde o transformador foi energizado sem o controle dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor, com as correntes de *inrush* apresentando altas magnitudes, com o pico da fase C atingindo mais de 1.100 A, aproximadamente 250% do pico da corrente nominal do transformador, indicando altos níveis de saturação do transformador. Pelas formas de onda das tensões de 138 kV, o disjuntor de 230 kV fechou seus polos praticamente no mesmo instante.

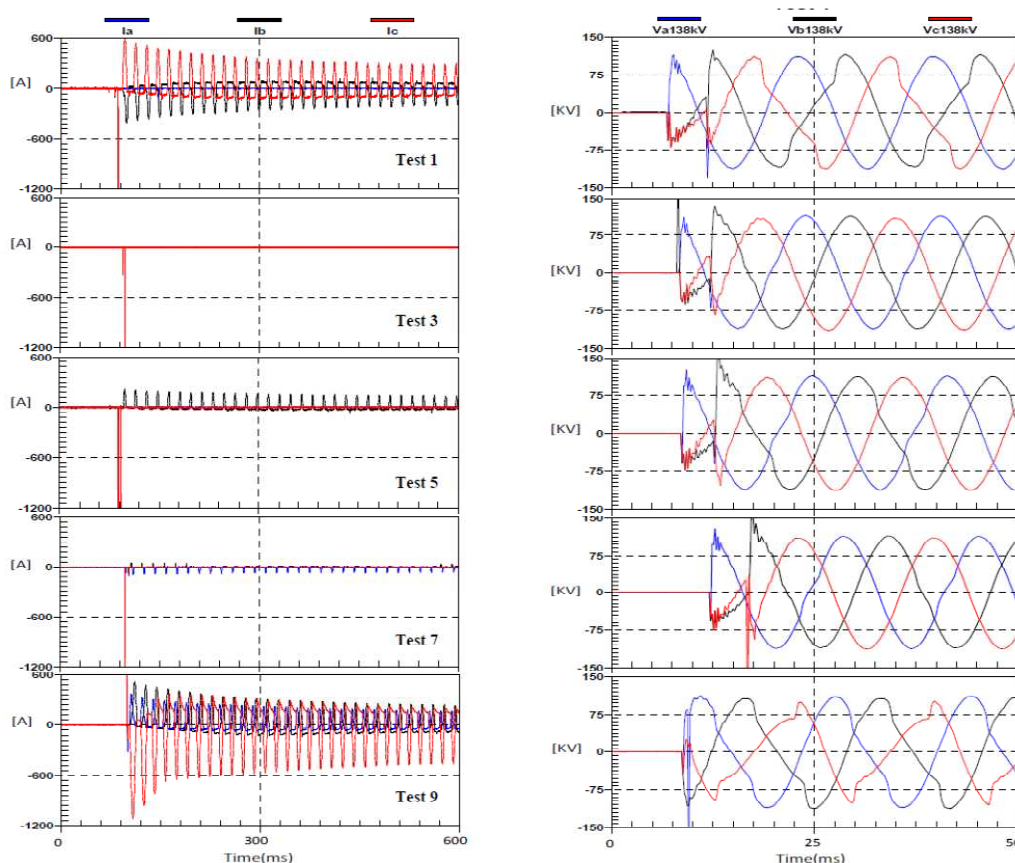


Figura 5 - Formas de onda das correntes de energização nos enrolamentos de 230 kV e das tensões nos terminais de 138 kV de um transformador de 100 MVA, 230 kV/138 kV, submetido aos ensaios de chaveamento controlado

3.3. Chaveamento controlado de reator em derivação ("shunt")

O desligamento de reatores de derivação gera sobretensões transitórias devido ao corte da corrente indutiva no reator antes da sua passagem pelo zero natural e ocorre em todos os desligamentos de cargas indutivas, em maior ou menor grau de severidade, e quando a tensão de restabelecimento entre os contatos do disjuntor excede a rigidez dielétrica do meio de extinção [4]. Neste caso, é a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento que pode danificar o isolamento dos enrolamentos.

A manobra controlada de abertura de reatores em derivação reduz praticamente à zero a probabilidade de reignições através do ajuste do instante de abertura mecânica de cada polo do disjuntor um pouco depois da passagem da corrente pelo zero natural, de forma a aumentar o tempo de arco. Isto permite uma suficiente separação mecânica entre os contactos do disjuntor no instante em que o arco elétrico é extinto, tornando o valor da característica dielétrica fria do disjuntor suficientemente elevado para garantir que não haja reignições, embora tempos de arco mais longos aumentem as sobretensões de corte de corrente. Esta aplicação é muito utilizada para a manobra apenas de abertura de reatores em derivação do sistema da Eletrobras Furnas desde os anos 80.

3.4. Chaveamento controlado de linhas de transmissão

Um fator primordial no projeto de linhas de transmissão é o nível esperado dos surtos de manobra. No futuro, a capacidade de limitar os surtos de manobra para os níveis inferiores com o chaveamento controlado poderá oferecer algumas vantagens de custo significativas. É importante ressaltar que o chaveamento controlado neste caso requer um controlador que possa determinar o estado da tensão na linha e ajustar o tempo de disjuntor de forma a compensar a diferença com a tensão do sistema. Como na medição do fluxo residual em transformadores, a determinação do tensão em uma linha de transmissão não é uma tarefa simples.

4.0 BENEFÍCIOS DO CHAVEAMENTO CONTROLADO

Os benefícios técnicos e econômicos do chaveamento controlado de equipamentos incluem fundamentalmente a mitigação dos transitórios eletromagnéticos, a melhoria da qualidade da energia elétrica, o aumento da certeza de sucessos nas manobras de recomposição do sistema elétrico, a melhoria no desempenho do disjuntor manobrado, a redução do custo de manutenção de equipamentos e a extensão da vida útil de equipamentos.

4.1 Redução dos transitórios eletromagnéticos e o estresses dielétricos nos equipamentos

4.2 Melhoria da qualidade da energia elétrica e redução da saída intempestiva de cargas sensíveis

O chaveamento controlado de bancos de capacitores e transformadores reduz significativamente a magnitude das correntes de energização transitórias e, conseqüentemente, as sobretensões harmônicas temporárias no sistema elétrico, minimizando os diversos inconvenientes e estresses dielétricos decorrentes dessas sobretensões.

4.3 Redução dos desgastes da câmara dos disjuntores

O chaveamento não controlado do disjuntor provoca desgaste nos componentes internos de suas câmaras de extinção devido à ocorrência de reignições durante o processo de interrupção da corrente, ou do pré-arco, durante as manobras de fechamento, quando se estabelece, transitoriamente, as correntes de energização de grande intensidade. Os principais componentes afetados são os contatos principais, contatos de arco e bocais de sopro [5]. Esses desgastes são influenciados pela intensidade dos transitórios e a sua frequência de ocorrência. Em alguns casos, os desgastes podem exigir manutenções frequentes dos disjuntores, inviabilizando a sua continuidade operacional, onerando a sua manutenção e, em função da indisponibilidade dos ativos, requerendo a sua substituição.

Em síntese, o uso do chaveamento controlado reduz os transitórios eletromagnéticos, a ocorrência de reignições ou reacendimentos na câmara de extinção, o desgaste dos componentes da câmara por ação elétrica e não influencia o desgaste mecânico, que depende do número de operações.

4.4 Melhoria do desempenho do disjuntor durante a interrupção de correntes na região dielétrica

4.5 Redução da operação inconveniente dos sistemas de proteção

Existem indícios de atuação da proteção de sobretensões na subestação onde bancos de capacitores são manobrados ou em subestações próximas. A atuação do relé de sobretensão pode ocorrer em função de possíveis ressonâncias entre os elementos do sistema em sintonia com a frequência da corrente de energização dos bancos.

4.6 Maior segurança na recomposição do sistema elétrico.

A probabilidade de uma ocorrência de operação indesejável da proteção fica ainda maior num processo de recomposição do sistema, tendo em vista que o sistema degradado normalmente tem um baixo amortecimento frente aos transitórios eletromagnéticos e tende ficar mais vulnerável às ressonâncias e fenômenos transitórios não muito amortecidos. Com o chaveamento controlado minimiza-se a ocorrência de ressonâncias e transitórios elevados nos equipamentos que favorecem o processo de recomposição. Eventuais impecilhos durante uma recomposição de uma configuração predefinida, demanda a busca de alternativas, atrasa a recomposição e causa perda de receita à Transmissora inclusive quanto à Parcela Variável.

4.7 Aumento da expectativa de vida dos equipamento do sistema elétrico

4.8 Redução do risco de falhas de equipamentos

Além de desgastes prematuros dos contatos de disjuntores, os altos valores de correntes, tanto de módulo quanto de frequência, têm sido objeto de diversos estudos relacionando esses fenômenos a possíveis danos no isolamento não autoregenerativos.

4.9 Eliminação dos resistores de pré-inserção

A adição de resistor de pré-inserção em disjuntor existente requer a inclusão de uma câmara auxiliar e um custo adicional de 25 a 30%. Por esse motivo, o resistor normalmente é disponibilizado na aquisição ou durante a fase de fabricação do disjuntor. O chaveamento controlado substitui, com menor custo, o resistor de pré-inserção.

4.10 Diminuição da manutenção dos equipamentos,

Ocorrem em função maior intervalo nas intervenções dos equipamentos pela manutenção ou em *retrofit*.

4.11 Redução da perda de receita das transmissoras

O chaveamento controlado reduz perdas de receita por indisponibilidade de ativos na Rede Básica e perdas relativas à Parcela Variável em decorrência de desligamentos ou um atrasos na recomposição do sistema em função de indisponibilidade de ativos ou em energização mal sucedida devidos aos transitórios eletromagnéticos causados pelas manobras convencionais de equipamentos.

5.0. CONCLUSÕES

1. Chaveamento descontrolado de banco de capacitores, reatores, linhas de transmissão e transformadores cria transitórios eletromagnéticos que podem causar falhas de equipamentos, problemas com a qualidade da energia elétrica e operações incorretas dos sistemas de proteção.
2. Melhorias recentes na tecnologia de chaveamento controlado produziram uma variedade de dispositivos que são capazes de fazer o controle preciso do tempo de operação de disjuntores.
3. A eficácia do chaveamento controlado depende de vários fatores, o mais importante dos quais é a consistência/repetibilidade do tempo de operação do disjuntor. Disjuntores com um desvio nos tempos de operação (isto é, dispersão estatística) de menos que ± 1 ms e com altas taxas de redução da suportabilidade dielétrica são os mais adequados para aplicações de chaveamento controlado.
4. Os benefícios do chaveamento controlado são imediatos e duradouros. Como a tecnologia de chaveamento controlado está amadurecendo, a flexibilidade, confiabilidade, facilidade de uso e custo global de sua implementação nos disjuntores atualmente em operação irão, cada vez mais, melhorar, beneficiando a operação do sistema elétrico nacional.
5. As empresas de transmissão tem aplicado com certa cautela a estratégia do chaveamento controlado em seus sistemas para reduzir os transitórios decorrentes das manobras de equipamentos, melhorar a qualidade de energia e aumentar a expectativa de vida dos ativos do sistema de energia. Isto se dá devido ao conservadorismo nas empresas, associadas a pouca difusão dessa tecnologia no Brasil.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] H. Bronzeado, R. Yacamini, "Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients", IEE Proceedings on Science, Measurement and Technology, Vol. 142, No. 4, July 1995;
- [2] D. Goldsworthy, T. Roseburg, D. Tziouvaras and J. Pope, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits", by Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 20070912 • TP6288.
- [3] H. S. Bronzeado, S. O. Pinto, Per Jonsson, J. C. de Oliveira and M. L. R. Chaves, "Transformer Inrush is Over: An Experience with a 100MVA, 230/138 kV Three-phase Transformer Controlled Energizing", The *International Conference on Power System Transients - IPST*, Kyoto, Japão, 2009.
- [4] P.C. Fernandez, C. Ribeiro Zani, P.C. Vaz Esmeraldo e J. Amon Filho, "Use of controlled switching systems in power system to mitigate switching transients trends and benefits - Brazilian experience", CIGRÉ Session, Paris, 2002
- [5] A. Calazans, J. N. de Lima, N. Valença, H. S. Bronzeado, "Improving System and Equipment Performance by Controlled Switching", Paper No. A3-202, Cigrè Session 42, Paris, France, agosto 2010.
- [6] 01CIGRE WG 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers; Guide for Application," Part 1: ELECTRA, No 183, pp 43-73, April 1999, Part 2: ELECTRA, No 185, pp. 37-57, August 1999.
- [7] H. Ito, "Controlled switching technologies, state-of-the-art," Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia - Pacific. IEEE/PES, vol. 2, pp. 1455–1460, 2002.
- [8] CIGRE TF 13.00.1," Controlled Switching a State of the Art Survey," Part 1: ELECTRA, No 162, pp. 65-97, October 1995. Part 2: ELECTRA, No 164, pp. 39-61, February 1996.
- [9] J. H. Brunke and K. J. Fröhlich, "Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching," *IEEE Electric Power Systems Research-Selected Topics in Power System Transients*, pp. 642-649, May 2006.
- [10] A. Mercier, E. Portales, Y. Filion, and A. Salibi, "Transformer control switching taking into account the core residual flux – a real case study," Paper No. 13-201, Cigre 2002 Session, Paris, France.
- [11] CIGRE WG 13.07, Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers – Benefits and Economic Aspects, ELECTRA, No 217, pp. 37-47, December 2004.
- [12] S. M. Wong, L. A. Snider, and E. W. C. Lo, "Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker," *International Conference on Power System Transients*, New Orleans, USA, 2003.
- [13] C. D. Tsirekis and N. D. Hatziaargyriou, "Control of Shunt Capacitors and Shunt Reactors Energization Transients" *International Conference on Power System Transients*, New Orleans, USA, 2003.

2.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Herivelto de Souza Bronzeado: nasceu em Remígio/PB, 2 de abril de 1953. Graduação em Engenharia Elétrica pela UFPB (1975), hoje UFCG - Universidade Federal de Campina Grande. M.Sc. em *Power Engineering* pela *University of Aberdeen*, Escócia (1993). Trabalhou por mais de 35 anos na CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, de 1975 a 2010. Membro do CIGRÉ e do IEEE. Atualmente trabalha no MI - Ministério da Integração Nacional como Coordenador-Geral de Obras Eletro-Mecânicas do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF.



Adolpho Eugênio de Andrade Lima Calazans: nasceu em Garanhuns/PE. Recebeu seu B.Sc. em Engenharia Elétrica (1981) pela UFPE - Universidade Federal de Pernambuco e o M.Sc. em Ciências da Engenharia (2004) pela UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá. Trabalha na CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco desde 1981. No período de 1996 a 2009 foi Gerente da Divisão de Manutenção de Equipamentos de Manobra e desde 2009 trabalha na Engenharia do Proprietário do HVDC da IE Madeira - Interligação Elétrica do Madeira. Membro do CIGRÉ.

Niraldo Magalhães Valença: nasceu em Recife/PEI em 21 de março de 1957. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, pós-graduação em Gestão da Manutenção na UFPE em 2007. Trabalha na Chesf desde 1985. Gerente da Divisão de Manutenção de Equipamentos de Manobras - DOMM.

Jorge Amon filho: nasceu no Rio de Janeiro/RJ em 8 de Agosto de 1952. Recebeu seu B.Sc. (1975) e seu M.Sc. (1986) em Engenharia Elétrica pela PUC-RJ. Trabalha em FURNAS Centrais Elétricas desde 1976. Gerente da Divisão de Estudos para Equipamentos do Departamento de Planejamento de Transmissão, desde 1998. Membro do CIGRÉ e membro Sênior do IEEE.

Geraldo Luiz Costa Nicola: nasceu em 1951, São Paulo/SP. Graduou-se em 1977 em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília - UnB, e atua na Eletrobras Eletronorte desde 1977, na expansão da transmissão, projeto de subestações, equipamentos, compensação de reativos e novos empreendimentos em corrente alternada e HVDC 600 e 800 kV.

Ary DÁjuz: nasceu no Rio de Janeiro em 1953, graduado em Engenharia Elétrica pela UGF (1977) e mestrado em Sistemas de Potência pela COPPE/UFRJ (1988). Trabalhou na Internacional de Engenharia, Furnas, Eletronorte e atualmente trabalha para o ONS e faz o curso de doutorado na UNIFEI. Membro do CIGRÉ.