

Controle de Manobras de Disjuntores de Alta e Extra Alta Tensão – Benefícios, Desafios e Soluções

Paulo Silva Lima, Camila da Silva Oliveira, e Geraldo Rocha, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Resumo—O objetivo do chaveamento controlado dos equipamentos de potência consiste em reduzir, se não eliminar, os transitórios de tensão e corrente que resultam da energização ou desenergização dos equipamentos através de uma operação do disjuntor. Este artigo analisa o que pode ser obtido com um dispositivo de chaveamento controlado moderno em termos de melhoria da qualidade da energia, protegendo tanto os equipamentos de potência quanto o disjuntor, e melhorando a confiabilidade dos relés de proteção.

Palavras-chave—Chaveamento controlado, transitórios, qualidade da energia, proteção.

I. INTRODUÇÃO

O controle de manobras de disjuntores de equipamentos nas instalações de alta e extra alta tensão é uma maneira efetiva de reduzir os transientes, tanto de tensão quanto de corrente, durante manobras de abertura e fechamento. Entende-se aqui, como controle de manobras o ato de realizar o comando de abertura ou fechamento de cada um dos polos do disjuntor, individualmente, de maneira controlada. Estas ações controladas previnem falhas nos ativos do sistema de potência, além de provocar melhorias substanciais na qualidade da energia.

O artigo apresenta um tutorial sobre controle de manobras de disjuntores em HVAC (high voltage ac) e descreve a teoria e tecnologia de controle de manobras que está em uso atualmente. O trabalho mostra os benefícios deste tipo de controle para transformadores, bancos de capacitores e reatores shunt.

Para obter sucesso no processo de fechamento controlado, o tempo de operação do disjuntor é um fator determinante. Este é influenciado pelas condições do ambiente onde o disjuntor está instalado, o nível de tensão do sistema de serviço e a energia armazenada no mecanismo de atuação do disjuntor.

Para o caso especial do controle de manobra de fechamento dos disjuntores de transformadores de potência, com objetivo de mitigar a corrente de energização transitória, existem diversos fatores que impactam no tempo ótimo de fechamento, como: transformadores monofásicos, transformadores trifásicos, tipo de ligações dos enrolamentos e tipo do núcleo no caso dos transformadores trifásicos. O trabalho discute todos estes fatores e faz recomendações com base em simulações.

Outro ponto crítico para o fechamento controlado de disjuntores de transformadores de potência sem carga é que o fluxo prospectivo criado pela tensão no instante do fechamento deve ser igual ao fluxo residual do transformador. Isto cria a principal dificuldade de realizar o fechamento controlado de transformadores: medir o fluxo residual logo após a abertura do disjuntor. O trabalho mostra uma estratégia para lidar com este fator.

II. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO FECHAMENTO CONTROLADO

O fechamento controlado de um equipamento de potência consiste em acionar o fechamento (“make”) elétrico do contato de um polo do disjuntor em um ângulo no “point-on-wave” (ponto na onda) da tensão desejado. Esta operação reduz ou elimina os transitórios de tensão ou corrente que podem resultar do fechamento de forma aleatória. A natureza dos transitórios de tensão ou corrente depende do tipo de equipamento que está sendo energizado.

A. Tempo Médio de Fechamento do Polo do Disjuntor

O tempo médio de fechamento do polo do disjuntor, ou TC_{close} neste artigo, é o intervalo de tempo médio entre o instante em que o degrau de tensão é aplicado na bobina de fechamento do polo do disjuntor e o instante em que os dois lados dos contatos do polo se tocam (isto é, o fechamento mecânico). Para evitar qualquer influência do arco, o tempo de fechamento do polo do disjuntor é medido com o disjuntor desconectado do sistema. Normalmente, o instante de fechamento (“make”) mecânico é determinado quando a resistência de contato medida for zero.

B. Fatores que Impactam o Tempo de Fechamento

Em operação normal o disjuntor apresenta um pequeno desvio do tempo de fechamento nominal ideal, TC_{close,NOM}. Os impactos nos tempos de fechamento nominais podem ser amplamente caracterizados como provenientes de duas fontes: condições ambientais da instalação e o histórico operacional do disjuntor.

1) Fatores Ambientais

Os seguintes fatores ambientais influenciam o tempo de fechamento do disjuntor e representam o efeito que o ambiente de instalação imediato tem sobre o tempo de fechamento do disjuntor:

- Temperatura ambiente.
- Tensão de alimentação da bobina de fechamento.
- Energia armazenada pelo mecanismo de atuação do disjuntor, expressa como uma medição de pressão.

O tempo de fechamento compensado pode ser expresso matematicamente como a soma de TC_{close,NOM} mais as compensações para todas as três fontes de desvio:

$$TC_{close} = TC_{close,NOM} + \Delta TC_{TEMP} + \Delta TC_{SV} + \Delta TC_{PRES} \quad (1)$$

2) Fatores do Histórico Operacional

Os fatores históricos representam o efeito ao longo do tempo que o histórico operacional do disjuntor tem no tempo de fechamento nominal. Os fatores do histórico operacional que levam ao desvio de TC_{close,NOM} são:

- Desvio no tempo de fechamento nominal após operações de fechamento subsequentes.
- Alteração no tempo de fechamento nominal, dependendo do tempo de inatividade entre duas operações de fechamento.

A compensação baseada nas operações anteriores do disjuntor pode ser expressa matematicamente como [1] [2]:

$$\Delta TC_{PREV} = \sum_{n=1}^N w(n) \cdot [TClose_{meas}(n) - TClose(n)] \quad (2)$$

Em (2), para um total de N operações de fechamento, a diferença entre o tempo de fechamento medido e o tempo de fechamento calculado é executada para cada operação. Esta diferença é multiplicada por um fator de ponderação $w(n)$ para cada operação, onde a soma de todos os N fatores de ponderação $w(n)$ é igual a 1. O resultado da soma em (2) fornece a tendência no desvio do tempo de fechamento nominal. Deve-se ter em mente que a implementação da compensação fornecida por (2) requer a medição precisa do tempo de fechamento em tempo real. A compensação do tempo ocioso pode ser expressa matematicamente como:

$$\Delta TC_{IDLE} = f(T_{IDLE}) \quad (3)$$

Em (3), T_{IDLE} é o tempo decorrido entre a operação anterior e a próxima operação de fechamento. A Equação (3) expressa que a compensação do tempo inativo é simplesmente uma função do tempo decorrido. Após os cinco desvios da compensação terem sido avaliados, o tempo de fechamento final será igual a:

$$TClose = \frac{TClose_{NOM} + \Delta TC_{TEMP} + \Delta TC_{SV} + \Delta TC_{PRES} + \Delta TC_{PREV} + \Delta TC_{IDLE}}{\Delta TC_{PRES} + \Delta TC_{PREV} + \Delta TC_{IDLE}} \quad (4)$$

C. Impacto do Prestrike ou Pré-Arco

Para um polo do disjuntor durante uma operação de fechamento, o fechamento elétrico, ou pré-arco, ocorre quando a tensão através do contato do polo excede a capacidade de suportabilidade dielétrica do espaço ("gap") entre contatos. A medição comum da resistência dielétrica do polo do disjuntor é a taxa de decaimento da suportabilidade dielétrica (RDDS: "Rate of Decay of Dielectric Strength") expressa em kV/ms. A RDDS é assumida como sendo infinita para um disjuntor ideal, desde que os dois lados do contato do polo não se toquem mecanicamente. A Fig. 1 representa a característica de prestrike em um pico de tensão (representado em por unidade [pu]). A partir da Fig. 1 e para uma RDDS de inclinação S_0 , o tempo de fechamento elétrico, ou telec, pode ser determinado resolvendo (5) para t [1] [2]:

$$|V_{bkr}(t)| = S_0 \cdot (t - t_{mech}) \quad (5)$$

onde:

$V_{bkr}(t)$ é a tensão através do disjuntor.

t_{mech} é o instante no qual os contatos do polo se tocam.

A Equação (5) expressa simplesmente que telec é encontrado na interseção da curva de tensão e da linha da inclinação S_0 e passa pelo ponto t_{mech} na abscissa.

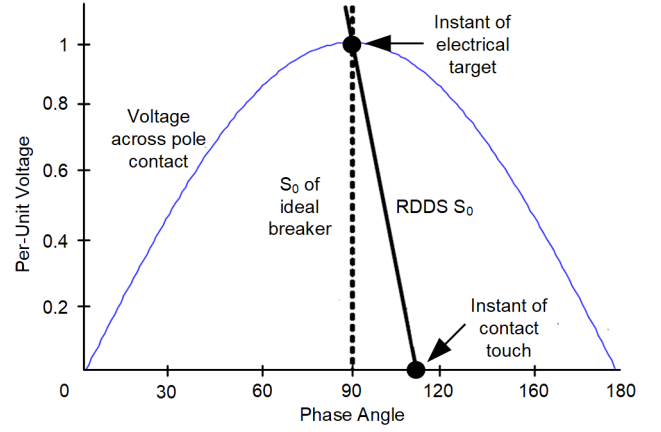


Fig. 1. Característica de prestrike em um pico de tensão

A partir do exposto, podemos ver que quanto maior for a inclinação de RDDS, mais próximos estão t_{elec} e t_{mech} . Para um disjuntor ideal, as duas grandezas são iguais. Para aplicações onde o fechamento é executado em um ângulo no "point-on-wave" da tensão fixo, o ajuste $TCarc$ é introduzido. Isso permite a compensação da correção para a diferença entre os fechamentos ("makes") elétrico e mecânico.

III. REQUISITOS PARA FECHAMENTO CONTROLADO DOS EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA

A. Fechamento Controlado de Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores são os dispositivos mais chaveados do sistema de potência porque eles habilitam o controle de tensão por meio do fornecimento de suporte de potência reativa. A corrente através de um capacitor é proporcional à taxa de variação da tensão através do capacitor; portanto, o objetivo do chaveamento controlado é minimizar a taxa de variação da tensão através do capacitor.

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (6)$$

Antes da energização, a tensão através de um capacitor é tipicamente próxima de zero. Após a desconexão do sistema de potência, os tempos de descarga para bancos de capacitores através de resistores de descarga são da ordem de 5 minutos [3]. Portanto, é seguro assumir que o fechamento controlado de capacitores será iniciado quando a tensão através do capacitor for pequena.

Quando um único banco de capacitores desenergizado é fechado de maneira descontrolada, por exemplo, em um pico de tensão, um surto de corrente significativo flui através do capacitor e a tensão do barramento entra em colapso e vai para zero (a tensão inicial através do capacitor). Existe uma tensão de recuperação transitória subsequente que ultrapassa a tensão nominal do sistema e pode causar uma sobretensão da ordem de 50%, conforme observado nas medições de campo da energização descontrolada do banco de capacitores [4]. Esta sobretensão significativa impõe stress dielétrico em qualquer equipamento conectado ao barramento local. O surto trafega através da linha e pode causar efeitos remotos, tais como sobretensões nas linhas terminadas em um transformador.

B. Fechamento Controlado de Reatores de Potência

Os reatores shunt têm como função limitar sobretensões nas linhas levemente carregadas, especialmente linhas longas que apresentam susceptância shunt significativa [5]. A corrente através de um reator é a área sob a curva de tensão, conforme mostrado em (7), a qual incorre em um offset de quando fechado em uma tensão zero com possibilidade de inrush e saturação do reator. O objetivo do chaveamento controlado é fechar em um pico de tensão, que corresponde a uma corrente igual a zero através do indutor (a corrente inicial antes do fechamento).

$$i_L = \frac{1}{L} \left(\int v_L dt + \lambda_{init} \right) \quad (7)$$

Não consideramos o termo do acoplamento do fluxo inicial (λ_{init}) para reatores porque eles têm projetos de núcleo de ar ou “gapped” e, portanto, armazenam um fluxo residual desprezível, ou nenhum fluxo residual, respectivamente. Quando um banco de reatores é energizado de uma forma descontrolada, por exemplo, em uma tensão zero, o offset de da corrente pode fazer com que os projetos com núcleo “gapped” consumam correntes de inrush significativas. Esta corrente de inrush possui um componente de que normalmente decai de forma lenta (levando mais de um segundo) porque as perdas do reator são tipicamente baixas. O offset de com decaimento lento pode causar operações incorretas do relé devido à saturação do transformador de potência local, além de reduzir a qualidade da energia através da injeção de harmônicos no sistema [4].

C. Fechamento Controlado de Transformadores de Potência Sem Carga

O principal objetivo do fechamento controlado dos transformadores de potência consiste em reduzir ou mesmo eliminar as correntes de inrush que podem acompanhar uma operação de fechamento efetuada de maneira aleatória [6] [7]. Para um sistema monofásico, o princípio básico para fechamento controlado de transformadores sem carga é que o fluxo instantâneo (também chamado de fluxo prospectivo) desenvolvido pela tensão no instante do fechamento deve ser igual ao fluxo residual no núcleo magnético. Este requisito cria a principal dificuldade associada ao fechamento controlado nos transformadores: a necessidade de medir o fluxo residual após a abertura do disjuntor. O fechamento controlado dos transformadores torna-se particularmente atrativo sob o ponto de vista econômico quando as correntes de inrush são a causa de sobretensões potencialmente destrutivas; o fechamento controlado está competindo com soluções como a inserção de resistores de fechamento, a qual é mais cara [8]. Além disso, a eliminação das correntes de inrush do transformador reduz a demanda de potência reativa que acompanha essas correntes, e isto pode prejudicar em alguns casos a estabilidade ou a regulação da tensão do sistema.

IV. ESTRATÉGIA PARA FECHAMENTO CONTROLADO DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

A. Tempo de Fechamento Ideal para um Transformador Monofásico

Consideramos um transformador monofásico e assumimos que a tensão na frequência nominal, F_{nom} , através do enrolamento primário, é fornecida como:

$$v(t) = V_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot F_{nom} \cdot t) \quad (8)$$

O fluxo no estado de regime no núcleo, também chamado de fluxo prospectivo, é fornecido pela integral da tensão ou:

$$\phi(t) = \frac{-V_{max}}{2\pi F_{nom}} \cdot \cos(2\pi \cdot F_{nom} \cdot t) \quad (9)$$

A Fig. 2 mostra a relação de fases entre a tensão da unidade correspondente a (8) e o fluxo da unidade correspondente a (9).

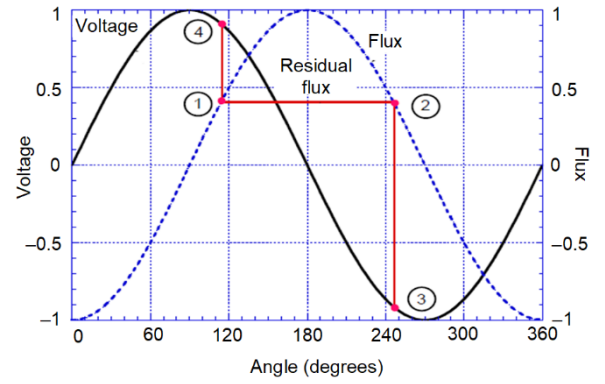


Fig. 2. Relação de fases entre tensão da unidade e fluxo prospectivo da unidade

Assumimos que existe um fluxo residual no núcleo que pode ser o Ponto 1 ou 2 na Fig. 2. Queremos determinar o instante de fechamento no ângulo no “point-on-wave” da tensão de forma que o fluxo induzido no instante de fechamento ideal, t_{opt} , corresponda ao fluxo residual. A partir de (9), o fluxo residual é fornecido por:

$$\phi_{residual} = \frac{-V_{max}}{2\pi F_{nom}} \cdot \cos(2\pi \cdot F_{nom} \cdot t_{opt}) \quad (10)$$

A partir de (10), obtemos:

$$\frac{\phi_{residual} \cdot 2\pi F_{nom}}{-V_{max}} = \cos(2\pi \cdot F_{nom} \cdot t_{opt}) \quad (11)$$

O instante de fechamento é então fornecido por:

$$t_{opt} = \frac{\arccos\left(\frac{\phi_{residual} \cdot 2\pi \cdot F_{nom}}{-V_{max}}\right)}{2\pi F_{nom}} \quad (12)$$

Uma vez que temos:

$$\phi_{max} = \frac{V_{max}}{2\pi \cdot F_{nom}} \quad (13)$$

Finalmente obtemos:

$$t_{\text{opt}} = \frac{\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual}}}{-\phi_{\text{max}}}\right)}{2\pi \cdot F_{\text{nom}}} \quad (14)$$

Em (14), o ângulo no numerador tem que ser expresso em radianos para que o tempo ideal seja expresso em milissegundos no intervalo de 0 a 16.666 ms para uma frequência nominal de 60 Hz. Se agora expressarmos o cosseno inverso em unidades de graus, o ângulo de fechamento no “point-on-wave”, TCpow, é representado com as mesmas unidades:

$$\text{TCpow} = \arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual}}}{-\phi_{\text{max}}}\right) \quad (15)$$

Com o fluxo residual mostrado na Fig. 2, a solução de (15) permite a determinação dos ângulos nos “points-on-wave” da tensão correspondentes aos Pontos 3 e 4 da Fig. 2.

B. Exemplo de Fechamento de um Transformador Monofásico

O transformador monofásico representado na Fig. 3a foi modelado no software do programa de transitórios eletromagnéticos (EMTP) [10]. A característica de histerese da indutância de magnetização não linear está representada na Fig. 3b. O disjuntor é modelado como uma chave ideal.

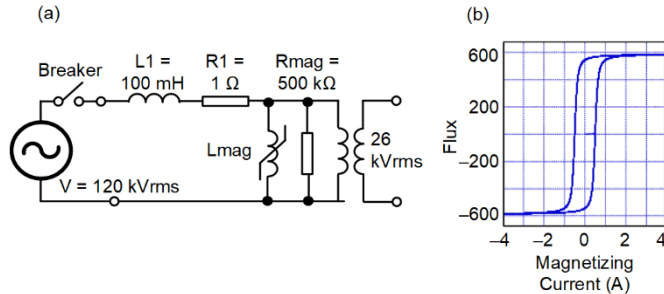


Fig. 3. Modelo do transformador monofásico (a); curva de histerese (b)

O disjuntor da Fig. 3 foi aberto no instante 68 ms. O fluxo residual do transformador é mostrado na Fig. 4b como sendo 211.7 Wb. O fluxo máximo é medido como 447.48 Wb. A partir de (16), o ângulo de fechamento no “point-on-wave” da tensão ideal é calculado como:

$$\text{TCpow} = \arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual}}}{-\phi_{\text{max}}}\right) = \arccos\left(\frac{211.7}{-447.88}\right) = 118.21^\circ \quad (16)$$

A Fig. 4a apresenta a tensão, fluxo e corrente de magnetização com fechamento controlado correspondente ao TCpow da (16). Obviamente, a corrente de magnetização permanece pequena e não há corrente de inrush. A Fig. 4b mostra as mesmas grandezas com fechamento aleatório usando o ajuste de TCpow em 0°. A corrente de magnetização agora salta para mais de 2000 A.

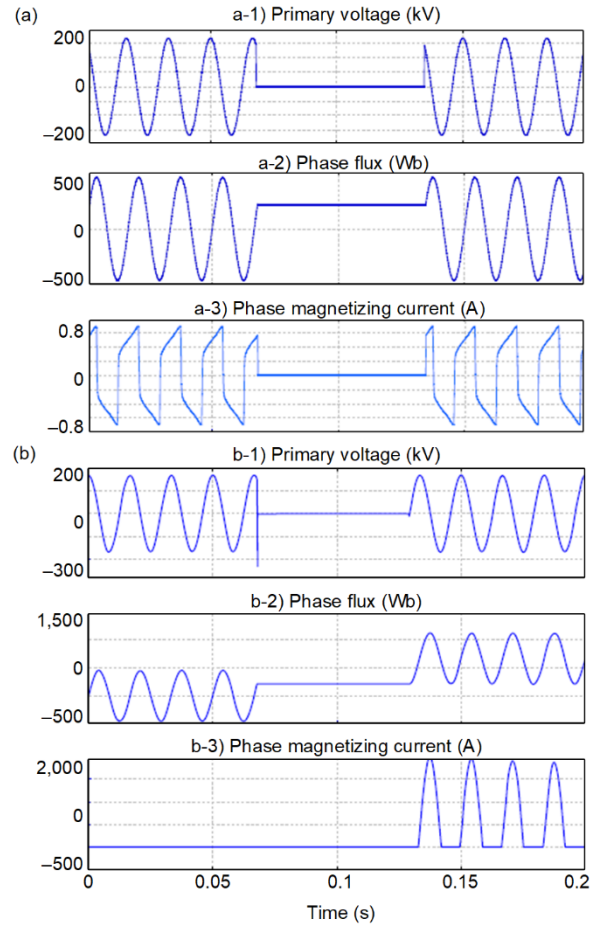


Fig. 4. Chaveamento (a); controlado do transformador monofásico (b) aleatório do transformador monofásico

C. Determinação do Fluxo Residual

Para poder usar (14) ou (15), é necessário ter uma medição prévia do fluxo residual. Isso pode ser obtido integrando a tensão através do enrolamento de fase, com início um ou dois ciclos antes da abertura do disjuntor. Iniciando a integração exatamente no máximo (ou mínimo) da tensão, eliminamos qualquer constante no valor da integral. A integração pode ser interrompida quando a tensão vai para zero. Uma medição de tensão precisa pode ser obtida a partir de um transformador de potencial magnético.

D. Impactos Associados aos Capacitores de Equalização

Os capacitores de equalização (“grading capacitors”) podem ser instalados através das câmaras de interrupção dos polos do disjuntor com o objetivo de distribuir uniformemente a tensão através dessas câmaras. Isto é representado na Fig. 5, onde C1 é o capacitor de equalização resultante de mais de um capacitor em série.

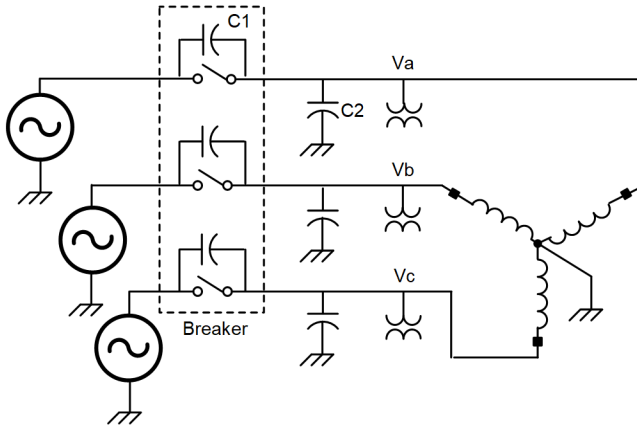


Fig. 5. Localização do capacitor de equalização equivalente C1

Como existe uma capacitância de dispersão entre o circuito primário do transformador e o terra, representado por C2 na Fig. 5, um divisor de tensão é criado pelos capacitores C1 e C2 em paralelo com a impedância de entrada do transformador $Z(s)$. O resultado deste divisor de tensão é que uma tensão residual vai existir através de C2 quando o polo do disjuntor estiver aberto e tensões na frequência nominal (F_{nom}) serão impostas nos enrolamentos primários do transformador. Se não houver capacitores de equalização presentes através do disjuntor, a integração da tensão pode ser interrompida praticamente após o disjuntor abrir e a tensão ir para zero. Se houver capacitores de equalização, a integração da tensão tem que continuar após o disjuntor ser aberto até que o fluxo atinja um valor médio no estado de regime final. Além disso, quando os polos do disjuntor são abertos, o circuito do divisor de tensão criará um transitório de tensão que vai mudar a trajetória do fluxo residual do núcleo do transformador após a tensão ter sido integrada.

Os capacitores de equalização instalados nas câmaras de interrupção do disjuntor do transformador adicionam complexidades à questão do chaveamento dos transformadores. Eles afetam a resposta transitória da tensão no primário do transformador e, conseqüentemente, a trajetória do fluxo após a abertura do disjuntor. A constante de tempo do decaimento do fluxo juntamente com a magnitude da micro-oscilação remanescente não pode ser prevista com antecedência e tem que ser medida no local em tempo real. Conseqüentemente, a duração da integral da tensão após o disjuntor ter sido aberto tem que ser determinada experimentalmente. Cada configuração do disjuntor do transformador precisa ser analisada separadamente através de medições experimentais.

É interessante observar que pelo menos uma empresa concessionária de energia dos EUA assume que os capacitores de equalização instalados nos respectivos disjuntores levarão a uma condição de fluxo residual zero no núcleo do transformador após o disjuntor ser aberto [4]. Parece que esta situação particular não pode ser generalizada.

V. ESTRATÉGIA DE FECHAMENTO CONTROLADO PARA TRANSFORMADORES, REATORES E CAPACITORES DE ACORDO COM A CONFIGURAÇÃO

Os caminhos magnéticos relacionados aos três enrolamentos de fase de um transformador trifásico são magneticamente independentes quando o fluxo em um dos três caminhos não depende de nenhum dos outros dois fluxos. A única situação em que transformadores trifásicos têm núcleos magneticamente independentes é quando três transformadores monofásicos são energizados separadamente através de três fontes de tensão.

Os caminhos magnéticos relacionados aos três enrolamentos de fase de um transformador trifásico são magneticamente dependentes quando o fluxo em um dos três caminhos depende das tensões através dos outros dois enrolamentos de fase. Diversas situações criarão transformadores trifásicos com núcleos dependentes e nestes casos a estratégia de fechamento com retardo tem sido normalmente aplicada. A Tabela I resume o momento de fechamento ideal para as diversas configurações dos enrolamentos dos transformadores de potência, bancos de capacitores e reatores [4].

TABELA I
INSTANTES DO FECHAMENTO COM IDEAL PARA TRANSFORMADORES COM FLUXO RESIDUAL ZERO, BANCOS DE CAPACITORES E REATORES

Equipamento	Configuração	A-Ph	B-Ph	C-Ph
Capacitor Shunt	Yg	0	120	60
	Y	30	120	30
	D	30	120	30
Reactor Shunt	Yg	90	210	150
	Y	60	60	150
	D	60	60	150
Transformador	Yg-Yg	90	210	150
	Yg-D or Y-g-Yg-D	90	180	180
	Y-D	60	60	150
	D-D, D-Yg or D-Y	60	60	150

VI. REGISTRO DE MANOBRA REAL

A Fig. 6 mostra o exemplo de uma manobra não controlada de disjuntor de um transformador de potência de 500 kV, com configuração Yg-D. Pode-se observar que existe uma alta corrente de Inrush, com valor de pico de aproximadamente 1500 A para a fase B e 1000 A para a fase A. A taxa de amostragem do dispositivo que registrou a oscilografia é de 10 kHz.

A Fig. 7 mostra a energização deste mesmo transformador, porém agora utilizando um dispositivo de controle de fechamento. Pode-se observar a fase A é a primeira a fechar, no momento em que a tensão passa pelo valor de pico (90°). Após 1 e 1/4 e ciclo do fechamento da fase A ocorre o fechamento simultâneo das fases B e C, quando a tensão da fase A está passando pelo zero, do positivo para negativo (180°). A máxima corrente de inrush registrada na manobra controlada é da ordem de 60 A.

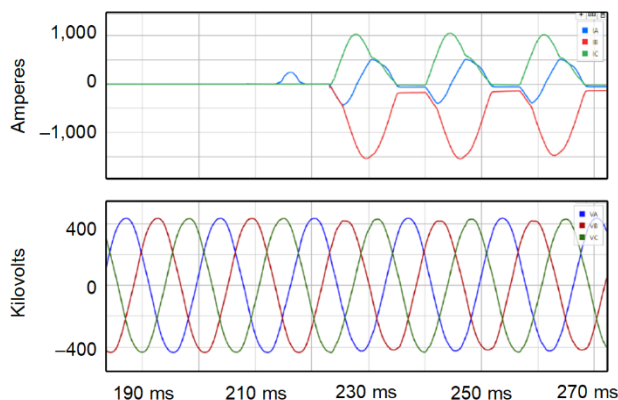


Fig. 6. Manobra não controlada de disjuntor de transformador de 500 kV

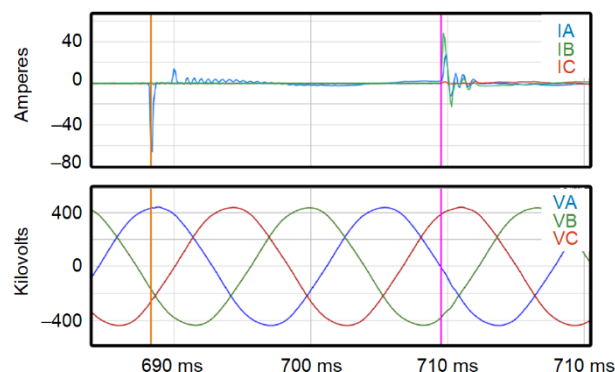


Fig. 7. Manobra controlada de disjuntor de transformador de 500 kV

VII. CONCLUSÃO

A variação dos tempos de abertura e fechamento do disjuntor com parâmetros ambientais (temperatura ambiente, tensão de alimentação da bobina e pressão do dispositivo de atuação) pode ser compensada usando tabelas armazenadas ou funções matemáticas dessas variações. Existem correções similares para compensação baseadas em operações anteriores e compensação do tempo de inatividade.

O fechamento controlado dos equipamentos de potência pode eliminar ou reduzir transitórios de tensão ou corrente indesejáveis presentes durante uma operação de fechamento aleatório. Ele melhora a qualidade da energia, ajuda a proteger os equipamentos e melhora a confiabilidade dos relés de proteção.

O fechamento controlado dos transformadores pode ser efetuado de forma sistemática para qualquer configuração do transformador usando quatro ajustes de fechamento para cada uma das três fases. Isso exige a determinação do fluxo residual em cada uma das três fases após uma operação de abertura. Os capacitores de equalização estão adicionando um complicador a este cálculo porque a integração das tensões de fase pode ter que ser estendida no tempo após a abertura dos polos do disjuntor.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cigré WG 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers. 1st Part," ELECTRA, No. 183, April 1999, pp. 65–96.
- [2] Cigré WG 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers. 2nd Part," ELECTRA, No. 185, August 1999, pp. 36–61.
- [3] IEEE Standard C37.012-2014, Application for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers.
- [4] D. Goldsworthy, T. Roseburg, D. Tziouvaras, and J. Pope, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits," proceedings of the 34th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2007.
- [5] E. Nashawati, N. Fischer, B. Le, and D. Taylor, "Impacts of Shunt Reactors on Transmission Line Protection," proceedings of the 38th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2011.
- [6] J. H. Brunke, "Elimination of Transient Inrush Currents when Energizing Unloaded Power Transformers," Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich 1998.
- [7] J. H. Brunke and K. J. Fröhlich, "Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. Part I: Theoretical Considerations," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, Issue 2, April 2001, pp. 276–280.
- [8] A. Mercier, E. Portales, Y. Fillion, and A. Salibi, "Transformer Controlled Switching Taking Into Account the Core Residual Flux: A Real Case Study," Paper 13-201, proceedings of the Cigré General Session, Paris, France, August 2012.
- [9] J. Iler and R. McDaniel, "High-Speed Reclosing, Switching Surges, and Bus Differential Protection Security – A Case Study," proceedings of the 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2017.
- [10] "EMTP-RV," POWERSYS, <http://www.emtp-software.com/>.

IX. DADOS BIOGRÁFICOS

Paulo Lima é formado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Itajubá em 2012 e especialista em Automação de Sistemas Elétricos pelo INATEL em Santa Rita do Sapucaí em 2015. Desde 2012 faz parte da equipe de engenharia da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) e desde 2018 atua como coordenador da equipe de Engenharia de Aplicação e Suporte Técnico da SEL Brasil. É instrutor da Universidade SEL e autor de diversos artigos técnicos nas áreas de transmissão, distribuição e geração de energia elétrica.

Camila Oliveira possui o título de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas Elétricos de Potência – UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá), 2012. Durante a graduação, desenvolveu projetos nas áreas de Restabelecimento Automático de Subestações Elétricas e Simulação Digital em Tempo Real. Participou do Programa de Estágio e Trainee na Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), onde trabalha até hoje como Engenheira de Aplicação e Vendas. Atua hoje na área de desenvolvimento de soluções de Proteção e Controle de Sistemas de Potência, com foco em sistemas de transmissão e distribuição. Adicionalmente, ministra treinamentos de filosofias de proteção na Universidade SEL.

Geraldo Rocha é formado em Engenharia Elétrica pela UNESP (Universidade Estadual Paulista de Bauru, Brazil) em 2001 e especialista em proteção de sistemas elétricos de potência pela UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Trabalhou como engenheiro de proteção e automação na CPFL Geração de Energia S.A., onde suas responsabilidades incluíam manutenção, comissionamento, especificação e estudos de proteção e automação para usinas hidroelétricas. Juntou-se à Schweitzer Engineer Laboratories em 2007 como Engenheiro de Aplicação em e desde 2017 é gerente regional de vendas e marketing. É autor de diversos artigos publicados em seminários e conferências no Brasil.