

# Uma Abordagem Unificada para Chaveamento Controlado dos Equipamentos de Potência

Gabriel Benmouyal, Normann Fischer, Douglas Taylor,  
Mark Talbott-Williams e Ritwik Chowdhury  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Apresentado na  
72nd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference  
Atlanta, Georgia  
2-4 de maio de 2018

Originalmente apresentado na  
44th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2017

Traduzido para o português em agosto de 2019

# Uma Abordagem Unificada para Chaveamento Controlado dos Equipamentos de Potência

Gabriel Benmouyal, Normann Fischer, Douglas Taylor, Mark Talbott-Williams e Ritwik Chowdhury,  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Sumário**—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 de energia, protegendo tanto os equipamentos de potência quanto o disjuntor, e melhorando a confiabilidade dos relés de proteção.

## I. INTRODUÇÃO

As operações de chaveamento representam uma fonte importante de transitórios do sistema de potência. Por exemplo, o chaveamento do banco de capacitores pode criar surtos de corrente e sobretensões. A energização dos indutores de potência pode criar um *offset dc* significativo que, por sua vez, pode saturar os transformadores de potência. A desenergização dos reatores shunt pode causar reignições no disjuntor, as quais podem resultar em falha do equipamento. A energização do transformador gera normalmente correntes de inrush significativas que criam harmônicos nos sinais de tensão e corrente, causam sobretensões harmônicas e podem fazer com que os relés de proteção da linha de transmissão operem incorretamente. A energização das linhas de transmissão com cargas residuais (“trapped charges”) durante um religamento rápido pode causar sobretensões na linha que provocam operação incorreta dos relés.

Um método para reduzir os transitórios de chaveamento na energização ou desenergização de equipamentos elétricos consiste em usar resistores de pré e pós-inserção. No entanto, esta abordagem é dispendiosa porque requer disjuntores que incluam esses resistores. Além disso, os esquemas de proteção precisam levar em conta situações como a falha dos resistores de pré e pós-inserção e serem capazes de ignorar tais falhas de forma oportuna. Outro método que está ganhando popularidade nos últimos anos é a abordagem conhecida como “chaveamento controlado”. O objetivo do chaveamento controlado dos equipamentos de potência é reduzir e possivelmente eliminar esses transitórios, contribuindo dessa forma para proteger os equipamentos de potência, melhorar a qualidade da energia e tornar os dispositivos de proteção mais confiáveis.

A combinação dos disjuntores com características de abertura e fechamento estáveis e tecnologia digital moderna permitiu o desenvolvimento de dispositivos de chaveamento controlado (CSDs: “Controlled Switching Devices”) inteligentes que podem ser aplicados a qualquer tipo de equipamento. O chaveamento controlado é melhor implementado com disjuntores que tenham operação independente dos polos. Estratégias menos eficientes podem

ainda ser criadas com disjuntores com comando tripolar (“gang-operated circuit-breakers”). O objetivo deste artigo consiste em analisar os princípios de chaveamento controlado de diferentes tipos de equipamentos e demonstrar como CSDs inteligentes podem ser aplicados para obter operações dos disjuntores sem transitórios.

## 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  $T_{Close}$  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 [“make”] 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.

Foi comprovado que o tempo de fechamento do polo de um disjuntor permanece quase constante ao longo do tempo. Esta propriedade primordial levou ao desenvolvimento de uma técnica para fechamento controlado dos equipamentos de potência.

### B. Fatores que Impactam no Tempo de Fechamento

Em operação normal, o disjuntor apresenta um pequeno desvio do tempo de fechamento nominal ideal,  $T_{Close_{NOM}}$ . 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 da pressão.

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

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

As três variações da compensação são calculadas a partir da temperatura ambiente medida, tensão de alimentação da bobina de fechamento e pressão. Quando todas as três medições estão em seus valores nominais, todas as três variações da compensação são iguais a zero. Cada uma das três curvas de compensação pode ser armazenada no CSD na forma de tabelas ou curvas aproximadas por segmentos lineares. Antes de uma operação de fechamento,  $TClose$  é determinado ajustando  $TClose_{NOM}$  de acordo com cada uma das três variáveis de compensação, conforme necessário.

## 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  $TClose_{NOM}$  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 conforme [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 de inatividade 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 estimados, o tempo de fechamento final será igual a:

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

## C. Impacto do Prestrike ou Pré-Arco

Para um polo do disjuntor durante uma operação de fechamento, ocorre o fechamento (“make”) elétrico, ou pré-arco, quando a tensão através do contato do polo excede a capacidade de suportabilidade dielétrica do espaço (“gap”) do contato. 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 da inclinação  $S_0$ , o tempo de fechamento elétrico, ou  $t_{elec}$ , pode ser determinado resolvendo (5) para  $t$  [1] [2]:

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

onde:

$V_{brk}(t)$  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  $t_{elec}$  é encontrado na interseção da curva de tensão e da linha da inclinação  $S_0$  e passa pelo ponto  $t_{mech}$  na abscissa.

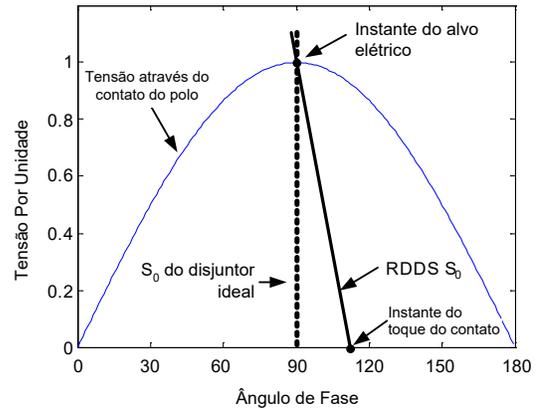


Fig. 1. Característica de *prestrike* em um pico de tensão

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.

## D. Fechamento Monopolar Controlado

Levando em conta o tempo de fechamento dos polos do disjuntor, o fechamento controlado consiste em aplicar o degrau de tensão na bobina de fechamento de forma que o fechamento elétrico do polo ocorra em um ângulo ajustado da tensão de referência. Neste artigo, este ângulo ajustado é denominado  $TCpow$ .

Analisando a Fig. 2, podemos determinar que o número inteiro de ciclos da tensão de referência para implementar uma operação de fechamento pode ser calculado da seguinte forma:

$$NCyc = \text{ceil} [TClose - (TCpow + TCarc) + 1] \quad (6)$$

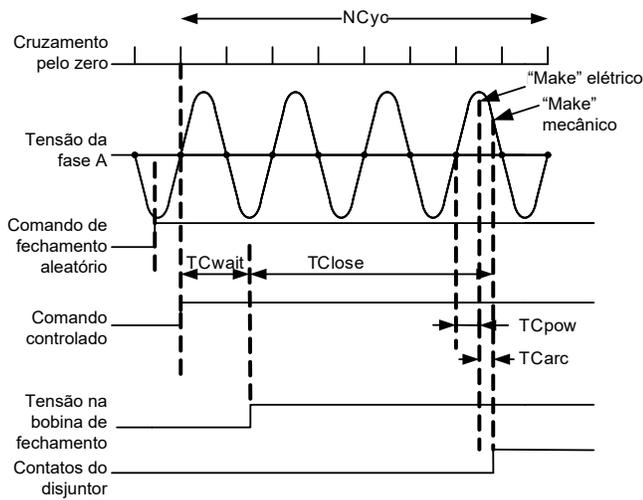


Fig. 2. Princípios da temporização do fechamento monopolar controlado

Em (6), *ceil* é a operação que arredonda para o número inteiro maior e mais próximo. TClose, TCpow e TCarc são três ajustes introduzidos.

Uma vez que NCyc tenha sido determinado, e assumindo que a operação de fechamento começa em um cruzamento pelo zero positivo da tensão de referência, precisamos esperar um intervalo de tempo (TCwait) antes que o degrau de tensão seja aplicado à bobina de fechamento. Em muitas aplicações, algumas das quais estão definidas posteriormente no artigo, é necessário aplicar um retardo adicional (TCdel) no fechamento dos polos do disjuntor. Devido a este retardo adicional, o tempo de espera final pode ser calculado da seguinte forma:

$$TCwait = NCyc - TClose - 1 + (TCpow + TCarc) + TCdel \quad (7)$$

### E. Fechamento Tripolar Controlado

No exemplo anterior do fechamento monopolar controlado, a referência de tempo foi selecionada como o cruzamento pelo zero indo para positivo da tensão de referência. Os mesmos princípios aplicados no fechamento monopolar podem ser facilmente estendidos para o fechamento tripolar, selecionando uma única referência de tempo que é aplicada a todas as três fases. Definimos TCwait.a/A como o tempo de espera para a Fase A com a referência de tempo sendo fixada em relação à própria Fase A. Definimos TCwait.a/B como o tempo de espera para a Fase A com a referência de tempo pertencente à Fase B. Observe que a referência de tempo não precisa necessariamente ser um cruzamento pelo zero. Assumindo que a referência de tempo pertence à Fase A, e considerando uma rotação de fases ABC, o fechamento tripolar controlado pode ser implementado computando os três tempos de espera da seguinte forma:

$$TCwait.a/A$$

$$TCwait.b/A = TCwait.b/B + 1/3 \quad (8)$$

$$TCwait.c/A = TCwait.c/C + 2/3$$

Em (8), todos os parâmetros estão em ciclos, garantindo que os tempos de espera permaneçam independentes da frequência. A Equação (7) permite computar TCwait.a/A, TCwait.b/B e TCwait.c/C porque cada uma das três fases é considerada como independente. A Fig. 3 mostra a relação de fase para todas as três fases, A, B e C, com uma rotação de fases ABC.

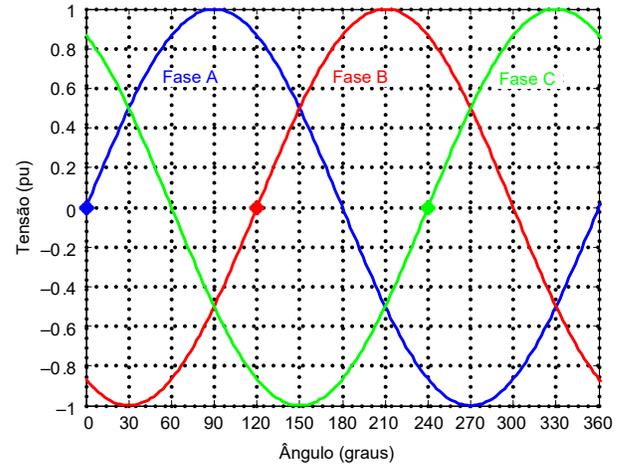


Fig. 3. Relação de fase entre as três tensões de fase com rotação ABC

O fechamento tripolar controlado é implementado aplicando (7) para calcular os três tempos de espera e um equivalente a (8), dependendo da seleção de um ponto de referência de tempo. A Equação (8) é diretamente aplicável se o ponto de referência comum for o cruzamento pelo zero indo para positivo da tensão da Fase A.

### F. Resumo dos Ajustes do Fechamento Controlado

Para cada fase, dois ajustes relacionados ao disjuntor foram definidos: TClose e TCarc. Para cada fase, dois ajustes relacionados à aplicação também foram introduzidos, ou seja, TCpow e TCdel. Este artigo demonstra que, com um total de 12 ajustes, ou 4 ajustes para cada fase, o fechamento controlado de qualquer equipamento de potência pode ser realizado. A Tabela I fornece as unidades de todos os 4 ajustes.

TABELA I  
UNIDADES DOS AJUSTES DO FECHAMENTO

Ajuste	Definição	Unidades
TClose	Tempo de fechamento dos polos do disjuntor compensado	Milissegundos
TCarc	Diferença entre arco elétrico e contato mecânico	Graus
TCpow	Ângulo de fechamento no "point-on-wave" da tensão	Graus
TCdel	Retardo do fechamento adicional	Ciclos

Na Tabela I, TCpow e TCarc estão em graus e podem ser facilmente convertidos em ciclos. TCclose é o único ajuste com unidades em milissegundos. TCclose pode ser convertido para ciclos usando uma medição da frequência do sistema (FREQ) no instante em que o fechamento controlado é realizado:

$$TC_{close\_cycles} = \frac{TC_{close\_ms} \cdot FREQ}{1,000} \quad (9)$$

A Fig. 4 mostra um exemplo com simulação de um fechamento tripolar em um pico da tensão da respectiva fase com os seguintes ajustes aplicados:

$$\begin{aligned} TC_{close.a} &= 22 \text{ ms} & TC_{close.b} &= 21 \text{ ms} & TC_{close.c} &= 23 \text{ ms} \\ TC_{pow.a} &= 90^\circ & TC_{pow.b} &= 90^\circ & TC_{pow.c} &= 270^\circ \\ TC_{arc.a} &= 10^\circ & TC_{arc.b} &= 10^\circ & TC_{arc.c} &= 10^\circ \\ TC_{del.a} &= 0 \text{ cyc.} & TC_{del.b} &= 0 \text{ cyc.} & TC_{del.c} &= 0 \text{ cyc.} \end{aligned}$$

(10)

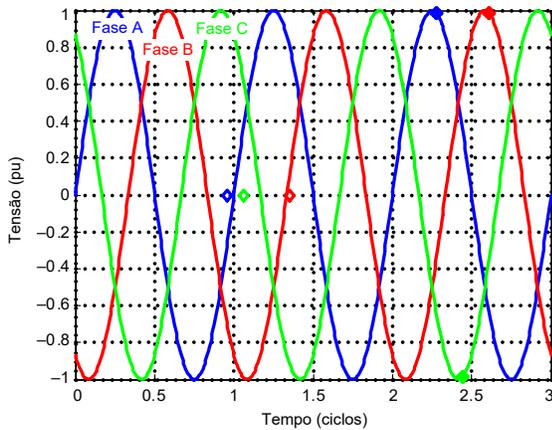


Fig. 4. Exemplo de fechamento tripolar do disjuntor

Em (10), todos os ajustes são referidos em relação a cada fase e são considerados independentes.

Na Fig. 4, a referência de tempo é o cruzamento pelo zero indo para positivo da tensão da Fase A. Os losangos no eixo horizontal representam os tempos de espera para cada um dos três polos em relação à referência de tempo. As estrelas nas formas de onda de tensão representam o instante em que os polos do disjuntor fecham mecanicamente. Observe que esses instantes aparecem ligeiramente após os picos da forma de onda devido ao ajuste introduzido TCarc de 10 graus para todas as três fases.

### III. REQUISITOS PARA FECHAMENTO CONTROLADO DOS EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA

#### A. Fechamento Controlado dos Bancos 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.

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (11)$$

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.

Devido à prevalência de capacitores no sistema de potência moderno, não é incomum ter múltiplos bancos de capacitores em um determinado barramento. Se um banco de capacitores for energizado numa configuração “back-to-back” com outro banco conectado e energizado no mesmo barramento, a corrente de surto transitória pode ser significativamente maior com correntes circulantes de um banco para o outro.

#### B. Fechamento Controlado dos 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 (12), a qual incorre em um *offset dc* 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 zero através do indutor (a corrente inicial antes do fechamento).

$$i_L = \frac{1}{L} \left( \int v_L dt + \lambda_{init} \right) \quad (12)$$

Não consideramos o termo do acoplamento do fluxo inicial ( $\lambda_{init}$ ) 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 dc* da corrente pode fazer com que os projetos com núcleo “gapped” produzam correntes de inrush significativas. Esta corrente de inrush possui um componente *dc* que normalmente decai de forma lenta (levando mais de um segundo) porque as perdas do reator são tipicamente baixas. O *offset dc* 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 dos 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 dos 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.

### D. Fechamento Controlado das Linhas de Transmissão Sem Carga

O principal objetivo do fechamento controlado aplicado nas linhas de transmissão sem carga consiste em reduzir ou eliminar as sobretensões das ondas viajantes que podem ser induzidas na linha com fechamento aleatório. Diferentes estratégias de fechamento controlado podem ser definidas, dependendo se a linha de transmissão, no instante do fechamento, contém ou não carga residual, e se a linha de transmissão é ou não compensada [1] [2]. O princípio básico consiste em fechar o disjuntor no instante em que o ângulo no “point-on-wave” (ponto na onda) da tensão da fonte é igual ao ângulo no “point-on-wave” da tensão na linha de transmissão. Isso evita o desenvolvimento de um degrau de tensão que, por sua vez, provoca ondas viajantes na linha.

O caso mais comum é o fechamento controlado de uma linha de transmissão sem nenhuma carga residual e sem compensação; é suficiente fechar em um ângulo no “point-on-wave” da tensão igual a zero.

O fechamento controlado de uma linha de transmissão com carga residual torna-se particularmente crítico quando esquemas de religamento de alta velocidade estão implantados [9]. O fechamento controlado consiste, então, no fechamento em uma tensão correspondente à polaridade da carga residual. Para implementar este esquema, o CSD tem que memorizar a polaridade da carga residual no instante da abertura dos polos do disjuntor.

O fechamento controlado das linhas de transmissão com compensação do reator shunt é o mais difícil de implementar; a combinação da capacitância equivalente da linha e do reator cria um circuito ressonante. Quando os polos do disjuntor são abertos, uma tensão é desenvolvida na linha na frequência do

circuito ressonante. Para implementar o fechamento controlado apropriado, é necessário que no instante do fechamento do polo do disjuntor, a tensão no lado da fonte ou do barramento seja igual à tensão do circuito ressonante no lado da linha. A dificuldade consiste no prognóstico desta última.

## IV. ESTRATÉGIA PARA FECHAMENTO CONTROLADO DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

### A. Tempo de Fechamento Ideal para um Transformador Monofásico

Consideramos o transformador monofásico da Fig. 5 e assumimos que a tensão na frequência nominal,  $F_{nom}$ , através do enrolamento primário, é fornecida como:

$$v(t) = V_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot F_{nom} \cdot t) \quad (13)$$

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

$$\phi(t) = \frac{-V_{max}}{2\pi F_{nom}} \cdot \cos(2\pi \cdot F_{nom} \cdot t) \quad (14)$$

A Fig. 6 mostra a relação de fase entre a tensão na fase correspondente a (13) e o fluxo na fase correspondente a (14).

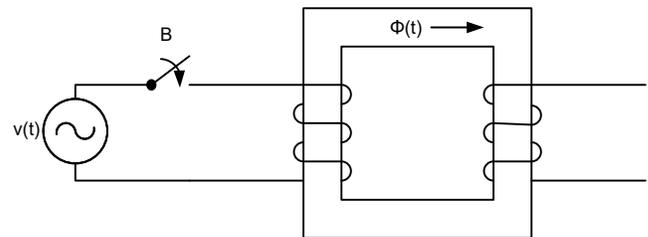


Fig. 5. Transformador monofásico

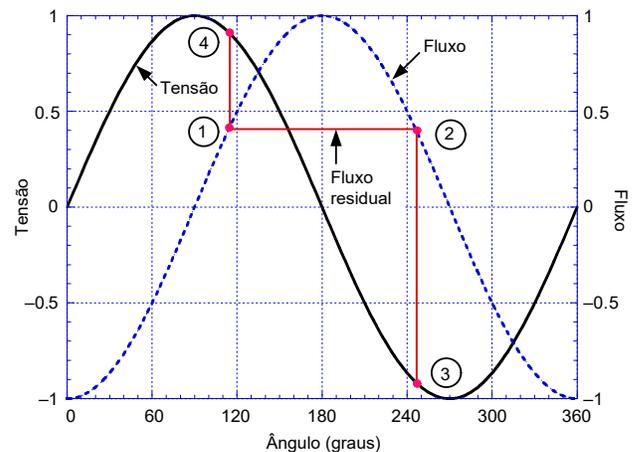


Fig. 6. Relação de fase entre a tensão na fase e o fluxo prospectivo na fase

Assumimos que existe um fluxo residual no núcleo que pode ser o Ponto 1 ou 2 na Fig. 6. 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 (14), o fluxo residual é fornecido por:

$$\phi_{residual} = \frac{-V_{max}}{2\pi F_{nom}} \cdot \cos(2\pi \cdot F_{nom} \cdot t_{opt}) \quad (15)$$

A partir de (15), obtemos:

$$\frac{\phi_{\text{residual}} \cdot 2\pi F_{\text{nom}}}{-V_{\text{max}}} = \cos(2\pi \cdot F_{\text{nom}} \cdot t_{\text{opt}}) \quad (16)$$

O instante de fechamento é então fornecido por:

$$t_{\text{opt}} = \frac{\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual}} \cdot 2\pi \cdot F_{\text{nom}}}{-V_{\text{max}}}\right)}{2\pi F_{\text{nom}}} \quad (17)$$

Uma vez que temos:

$$\phi_{\text{max}} = \frac{V_{\text{max}}}{2\pi \cdot F_{\text{nom}}} \quad (18)$$

Finalmente obtemos:

$$t_{\text{opt}} = \frac{\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual}}}{-\phi_{\text{max}}}\right)}{2\pi \cdot F_{\text{nom}}} \quad (19)$$

Em (19), 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:

$$\text{TCpow} = \arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual}}}{-\phi_{\text{max}}}\right) \quad (20)$$

Com o fluxo residual mostrado na Fig. 6, a solução de (20) permite a determinação dos ângulos nos “points-on-wave” da tensão correspondentes aos Pontos 3 e 4 da Fig. 6. A prática de engenharia histórica dita a seleção do ângulo menor correspondente ao Ponto 4.

### B. Exemplo de Fechamento de um Transformador Monofásico

O transformador monofásico representado na Fig. 7 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. 8. O disjuntor é modelado como uma chave ideal.

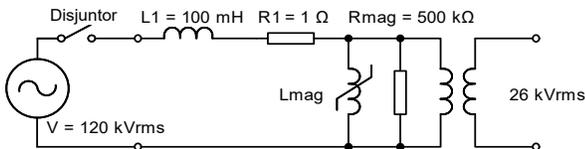


Fig. 7. Modelo do transformador monofásico

O disjuntor da Fig. 7 foi aberto no instante 68 ms. O fluxo residual do transformador é mostrado na Fig. 9b como sendo 211.7 Wb. O fluxo máximo é medido como 447.48 Wb. A partir de (20), o ângulo de fechamento no “point-on-wave” da tensão ideal é calculado como:

$$\text{TCpow} = \arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual}}}{-\phi_{\text{max}}}\right) = \arccos\left(\frac{211.7}{-447.88}\right) = 118.21^\circ \quad (21)$$

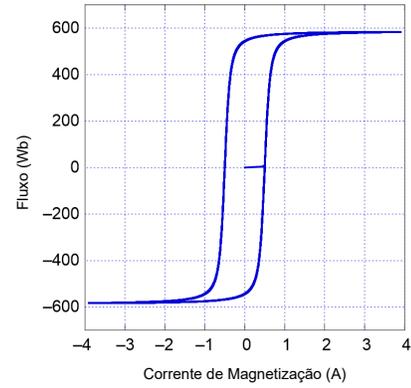


Fig. 8. Característica de histerese do transformador

A Fig. 9 apresenta a tensão, fluxo e corrente de magnetização com fechamento controlado correspondente ao TCpow da (21). Obviamente, a corrente de magnetização permanece pequena e não há corrente de inrush. A Fig. 10 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.

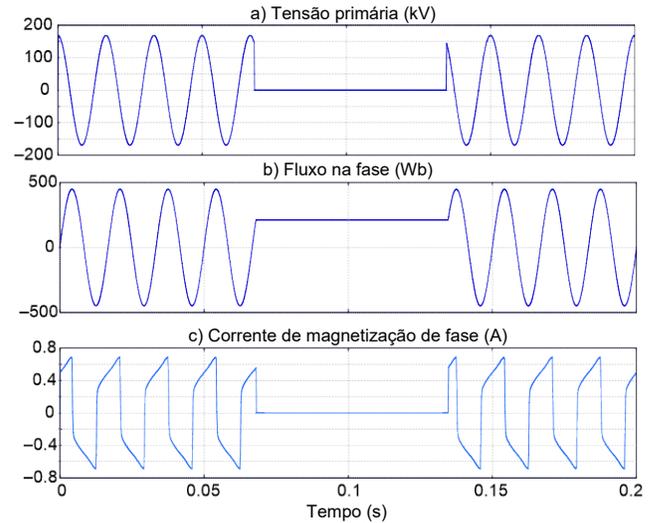


Fig. 9. Chaveamento controlado do transformador monofásico

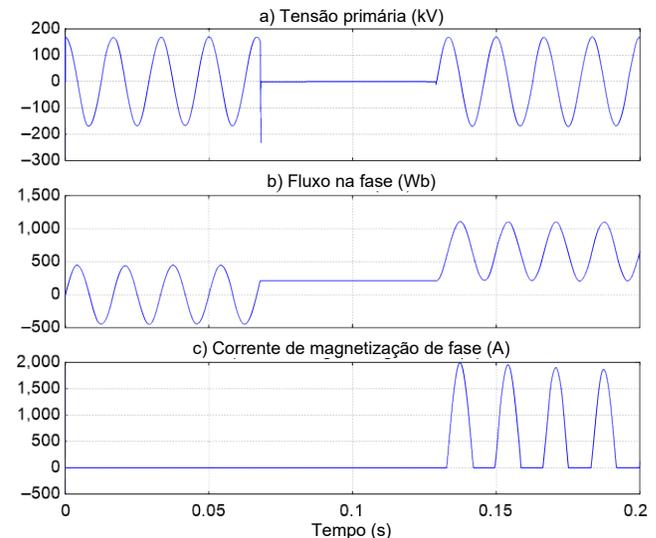


Fig. 10. Chaveamento aleatório do transformador monofásico

### C. Determinação do Fluxo Residual

Para poder usar (19) ou (20), 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, conforme mostrado na Fig. 11. Iniciando a integração exatamente no máximo (ou mínimo) da tensão, eliminamos qualquer “constante bias” no valor da integral. A integração pode ser interrompida quando a tensão vai para zero.

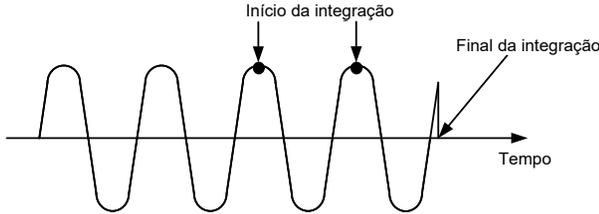


Fig. 11. Início da integração na forma de onda da tensão

A integração contínua pode ser expressa como:

$$\phi_{\text{residual}} = \int_{t=0}^{t=t_0} v(t) \cdot dt \quad (22)$$

Em (22),  $t = 0$  corresponde a uma tensão máxima ou mínima pelo menos um ciclo antes da abertura do polo, e  $t = t_0$  corresponde ao instante em que a tensão foi para zero após a abertura do disjuntor.

Assumindo que a integração numérica é executada com uma frequência de amostragem ( $F_{\text{samp}}$ ) para os valores instantâneos da tensão, a regra trapezoidal de integração pode ser aplicada conforme mostrado na (23):

$$\phi_{\text{residual}} = \sum_{n=1}^{n=N-1} \left( \frac{v_n + v_{n+1}}{2} \right) \cdot \frac{1}{F_{\text{samp}}} \quad (23)$$

Os mesmos princípios se aplicam à integração numérica;  $n = 1$  tem que corresponder a uma tensão máxima ou mínima um ciclo pelo menos antes da abertura do polo, e  $n = N-1$  corresponde a algumas amostras após a tensão ter ido para zero. Uma medição de tensão precisa pode ser obtida a partir de um transformador de potencial magnético.

### D. Questões Associadas aos Capacitores de Equalização

#### 1) Impacto dos Capacitores de Equalização no Sistema

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. 12, onde  $C1$  é o capacitor de equalização resultante de mais de um capacitor em série.

Como existe uma capacitância de dispersão entre o circuito primário do transformador e a terra, representado por  $C2$  na Fig. 12, 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 ( $F_{\text{nom}}$ ) 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 forem 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.

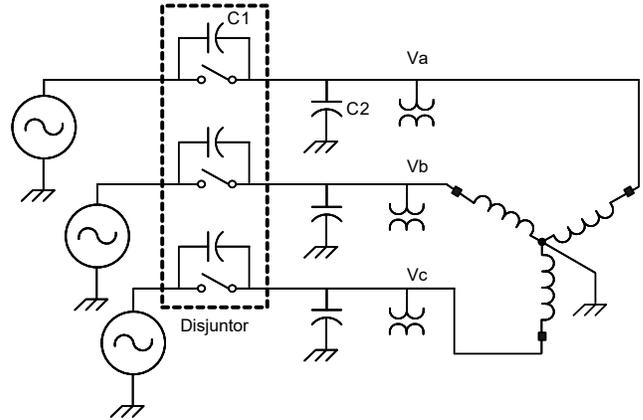


Fig. 12. Localização do capacitor de equalização equivalente  $C1$

#### 2) Exemplo com Transformador Monofásico

Um capacitor de equalização é adicionado ao sistema monofásico da Fig. 7. Conforme mostrado na Fig. 13, vamos assumir que  $Z(s)$  é a impedância de entrada do transformador e  $V(s)$  a tensão da fonte; quando o disjuntor for aberto, a tensão  $VT(s)$  no primário do transformador será submetida a um transitório que é determinado pela função de transferência definida em (24). A tensão transitória  $VT(s)$  tem agora que ser integrada para obter o fluxo.

$$VT(s) = \frac{C1}{C1 + C2 + \frac{1}{sZ(s)}} V(s) \quad (24)$$

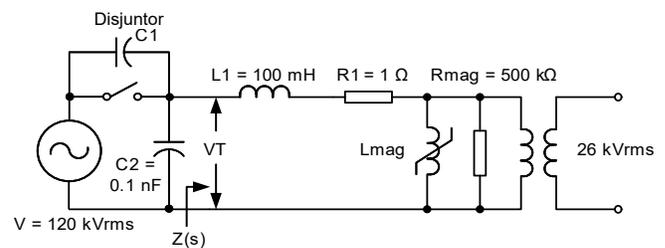


Fig. 13. Polo do disjuntor com capacitor de equalização equivalente

Para ter uma compreensão do efeito dos capacitores de equalização na trajetória do fluxo, o disjuntor foi aberto no instante 66.5 ms e a tensão integrada para obter o fluxo, com valores de  $C1$  como 0, 4, 6 e 8 nF e um valor constante de  $C2$  de 0.1 nF. As trajetórias do fluxo são mostradas na Fig. 14. Obviamente, à medida que o valor do capacitor de equalização aumenta, o fluxo sofre uma redução de seu valor final. Antes que o valor médio final seja atingido, a trajetória do fluxo

aparece como uma exponencial em decaimento com uma constante de tempo que é reduzida à medida que  $C1$  aumenta. Para valores maiores de  $C1$ , o fluxo final exibe uma “micro-oscilação” constante.

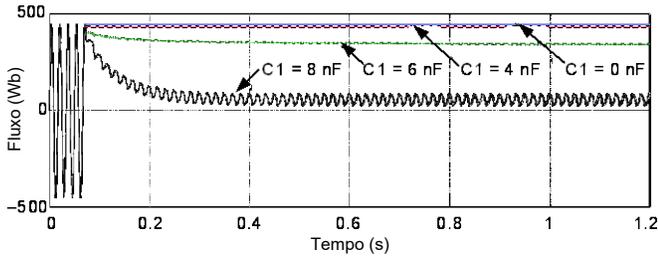


Fig. 14. Trajetórias do fluxo com  $C1$  variando de 0 até 8 nF

Com o capacitor de equalização ajustado em 8 nF, foi feita uma tentativa para implementar uma operação de fechamento controlado em torno do instante 0.6 s, onde o fluxo médio estabilizou no seu valor final. A média da micro-oscilação foi calculada como sendo 56.45 Wb, e o fluxo máximo foi calculado como sendo 448.2 Wb. A Equação (20) foi usada para calcular o ângulo de fechamento no “point-on-wave” ideal:

$$TC_{pow} = \arccos\left(\frac{56.45}{-448.2}\right) = 97.24^\circ \quad (25)$$

O fechamento controlado foi efetuado com este valor de ângulo obtido da (25), e o resultado é mostrado na Fig. 15. Analisando a Fig. 15, podemos ver que a corrente de inrush foi eliminada. Para uma verificação mais completa e abrangente, uma operação de fechamento aleatório foi realizada com um valor de  $TC_{pow}$  igual a  $6.52^\circ$ . Uma corrente de inrush substancial foi criada, conforme mostrado na Fig. 16.

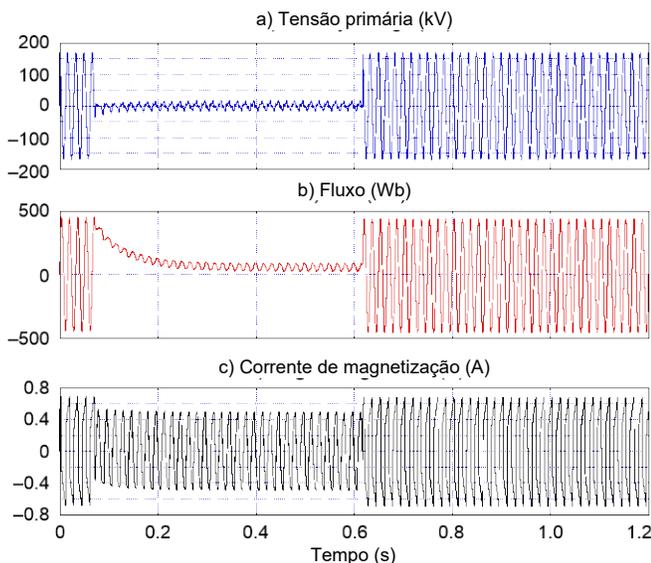


Fig. 15. Tensão primária, fluxo e corrente de magnetização com fechamento controlado

Este exemplo demonstra que o chaveamento controlado de um transformador pode ser executado mesmo com a presença de capacitores de equalização que acarretam micro-oscilações, desde que a integração da tensão tenha sido prolongada o suficiente após a abertura do disjuntor para obter o valor médio

final do fluxo residual. Neste caso, as dificuldades são relativas à caracterização da constante de tempo do decaimento do fluxo e do nível das micro-oscilações residuais. Os resultados apresentados nesta seção estão bem de acordo com as pesquisas mais recentes [11] [12] [13], e as questões associadas aos capacitores de equalização ainda estavam sendo investigadas quando este artigo foi escrito.

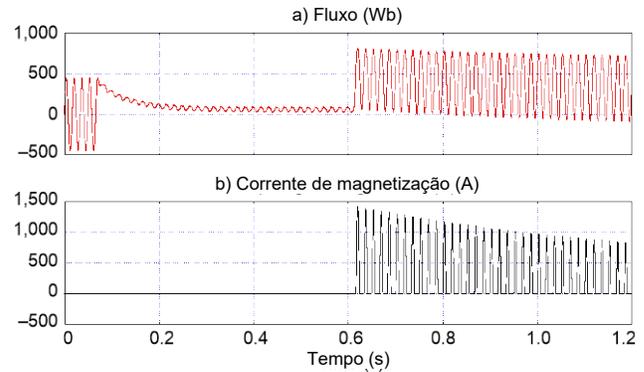


Fig. 16. Fluxo primário e corrente de magnetização com fechamento aleatório

### 3) *Resumo dos Impactos dos Capacitores de Equalização*

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. CONFIGURAÇÕES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS E ESTRATÉGIAS DE FECHAMENTO CONTROLADO

### A. *Transformadores Trifásicos Com Núcleos Independentes*

Os caminhos magnéticos relativos 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, conforme mostrado na Fig. 17.

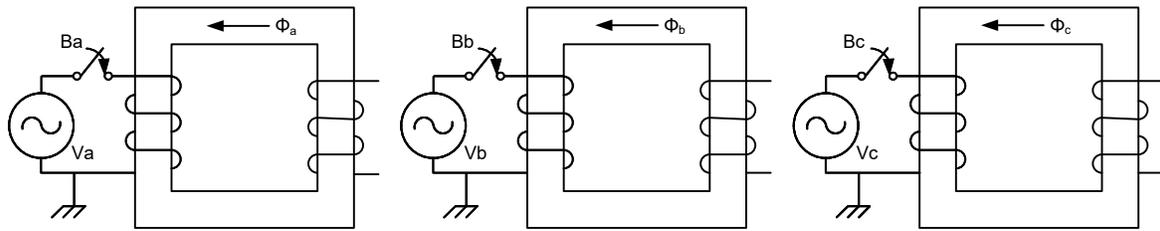


Fig. 17. Transformadores trifásicos com núcleos magneticamente independentes

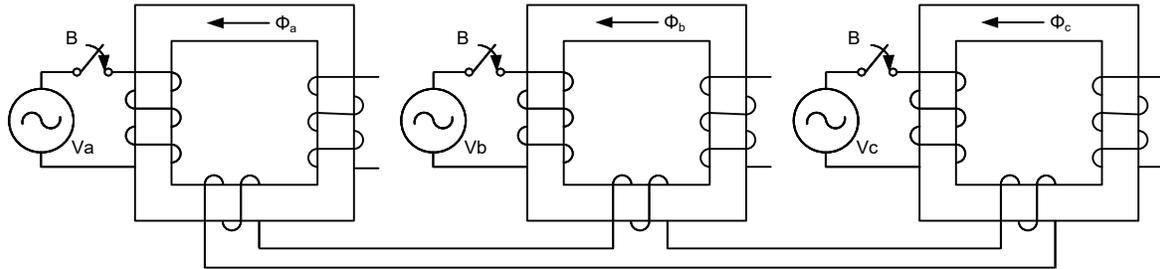


Fig. 18. Transformadores monofásicos com enrolamentos terciários conectados em delta

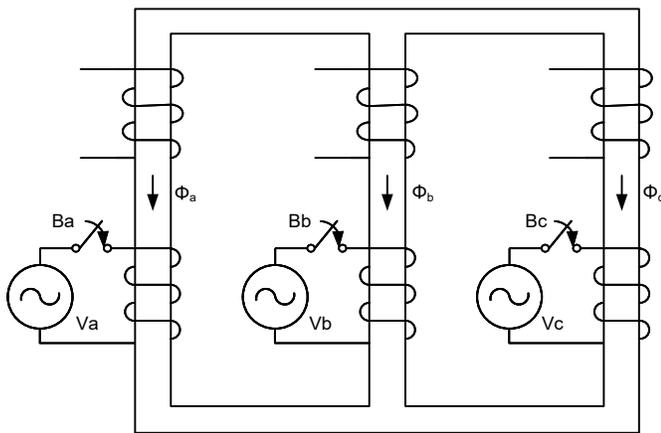


Fig. 19. Transformador trifásico com núcleo de três pernas

### B. Transformadores Trifásicos Com Núcleos Dependentes

Os caminhos magnéticos relativos 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.

Várias situações criarão transformadores trifásicos com núcleos dependentes. A Fig. 18 mostra três transformadores monofásicos onde um enrolamento terciário conectado em delta adicional foi acrescentado. Devido aos enrolamentos conectados em delta, a soma dos três fluxos em todos os três núcleos é automaticamente igual a zero. A presença de uma tensão de fase criará fluxos iguais nos outros dois núcleos de forma que sua soma seja igual e oposta ao fluxo no núcleo alimentado pela tensão única. A Fig. 19 mostra um transformador com núcleo de três pernas criando automaticamente núcleos magneticamente dependentes; a presença de qualquer uma das tensões de fase criará fluxos nas outras duas pernas. Observe que a soma dos três fluxos nos transformadores trifásicos magneticamente dependentes é sempre zero em quaisquer estados de regime ou transitório [6]

[7] [14]. Na mesma perspectiva, e independentemente da estrutura do núcleo magnético, um transformador trifásico com qualquer conjunto de enrolamentos conectados em delta estará incluído na classe de transformadores com núcleos dependentes

### C. Caso dos Transformadores Trifásicos Com Núcleos Magneticamente Independentes

A estratégia para o fechamento controlado de transformadores trifásicos com núcleos magneticamente independentes é simples e direta porque cada fase é um transformador monofásico. A estratégia consiste das seguintes etapas:

- Cálculo do fluxo residual em cada núcleo magnético em uma base por fase após a abertura.
- Cálculo de  $TC_{pow}$  para cada fase, conforme (20).
- Fechamento de cada polo do disjuntor por fase de forma independente, seguindo as medições do  $TC_{pow}$  calculado. Assumir que  $TC_{del}$  para cada fase é igual a zero.

Esta estratégia está mostrada na Tabela II. Praticamente, existe apenas uma configuração do transformador que leva aos núcleos magneticamente independentes: transformadores monofásicos com conexão em estrela aterrada em ambos os enrolamentos primário e secundário.

### D. Caso dos Transformadores Trifásicos Com Núcleos Magneticamente Dependentes

Dois situações precisam ser abordadas com núcleos magneticamente dependentes:

- Transformadores trifásicos com enrolamentos primários conectados em estrela aterrada.
- Transformadores trifásicos com enrolamentos primários conectados em delta ou estrela flutuante.

Em ambas as situações, a estratégia de fechamento com retardo tem sido normalmente aplicada. Ela é descrita na próxima subseção.

TABELA II  
INSTANTES DO FECHAMENTO COM TCPOW IDEAL PARA TRANSFORMADORES COM NÚCLEOS INDEPENDENTES

Configuração	TCpow.a	TCpow.b	TCpow.c	TCdel.a	TCdel.b	TCdel.c
Yg-Yg (independentes)	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.a}}}{-\phi_{\text{max.a}}}\right)$	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.b}}}{-\phi_{\text{max.b}}}\right)$	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.c}}}{-\phi_{\text{max.c}}}\right)$	0	0	0

TABELA III  
ÂNGULO DE FECHAMENTO COM TCPOW IDEAL QUANDO DO FECHAMENTO DE TRANSFORMADORES EM ESTRELA ATERRADA

	Fluxo Máximo	TCpow.a	TCpow.b	TCpow.c	TCdel.a	TCdel.b	TCdel.c
1	A	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.a}}}{-\phi_{\text{max.a}}}\right)$	60°	300°	0	0.5 • N	0.5 • N
2	B	300°	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.b}}}{-\phi_{\text{max.b}}}\right)$	60°	0.5 • N	0	0.5 • N
3	C	240°	120°	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.c}}}{-\phi_{\text{max.c}}}\right)$	0.5 • N	0.5 • N	0

### E. Estratégia de Fechamento Com Retardo para Energização de Transformadores Trifásicos

A estratégia com retardo para energizar transformadores trifásicos com núcleos magneticamente dependentes foi definida pelo Dr. John H. Brunke em [6]. Esta estratégia tem sido praticamente aplicada de forma universal desde que foi definida [8] [11] [13]. Ela consiste das seguintes etapas:

- Fechamento da fase com o fluxo residual máximo no ângulo no “point-on-wave” calculado ideal de acordo com (20). Após um retardo de  $N$  meio-ciclos, os fluxos residuais nas duas outras fases vão desaparecer e um estado de regime correspondente aos fluxos prospectivos será atingido.
- O instante ideal para fechamento das duas fases remanescentes corresponde ao instante em que os respectivos fluxos são iguais. Isso leva ao tempo de fechamento ideal quando a tensão da primeira fase fechada for zero. Observe que neste instante, a soma dos fluxos nas duas fases remanescentes é igual e oposta ao fluxo da fase que foi fechada primeiro.

Teoricamente, qualquer fase, independentemente de seu fluxo residual, pode ser fechada em primeiro lugar. A vantagem de fechar a fase com o maior fluxo residual consiste em reduzir o stress dielétrico porque o polo do disjuntor é fechado em uma tensão mais baixa.

#### 1) Aplicação em Transformadores Trifásicos Com Enrolamentos Primários Conectados em Estrela Aterrada

No fechamento de transformadores trifásicos com enrolamentos primários conectados em estrela aterrada, o fechamento com retardo pode ser aplicado. O fechamento com retardo envolve as seguintes etapas:

- Cálculo do fluxo residual no núcleo magnético de cada fase após a operação de abertura.
- Seleção da fase com o máximo fluxo residual e escolha das três medições de TCpow e três de TCdel, conforme indicado na Tabela III.

Na Tabela III, assumimos que a Fase A tem o máximo fluxo residual calculado. Começamos fechando o polo da Fase A com

o TCpow.a calculado sem retardo para que o TCdel.a seja exibido como zero. As Fases B e C precisam então ser fechadas simultaneamente com um retardo quando os respectivos fluxos forem iguais. Com uma rotação de fases ABC, o instante em que os dois fluxos serão iguais nas Fases B e C corresponde ao instante em que os ângulos nos “points-on-wave” da tensão são respectivamente 60° e 300°. Estes são os dois números mostrados na Tabela III. Como os dois polos das Fases B e C têm que ser fechados com um retardo, TCdel.b e TCdel.c são mostrados como sendo um múltiplo  $N$  de meio-ciclos.  $N$  deve ser selecionado de forma que após o retardo, os fluxos transitórios nos núcleos magnéticos desapareçam e o estado de regime seja atingido.

A justificativa para o fechamento em primeiro lugar da Fase B ou C na Tabela III é a mesma que aquela para o fechamento em primeiro lugar da Fase A.

#### 2) Aplicação em Transformadores Trifásicos Com Enrolamentos Primários Conectados em Delta ou Estrela Flutuante

A estratégia para o fechamento de transformadores com enrolamentos primários conectados em delta ou estrela flutuante (ver Fig. 20) está resumida na Tabela IV e é também uma aplicação do princípio do fechamento com retardo. Neste caso, não podemos começar fechando uma única fase porque nenhuma corrente vai circular e nenhum fluxo será criado.

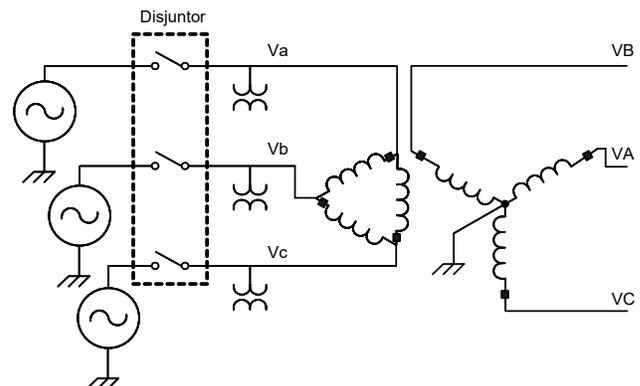


Fig. 20. Enrolamentos conectados em delta no primário com enrolamentos conectados em estrela aterrada no secundário

TABELA IV  
TCPOW PARA FECHAMENTO IDEAL QUANDO DO FECHAMENTO DE TRANSFORMADORES CONECTADOS EM DELTA OU ESTRELA FLUTUANTE

	Fluxo Máximo	TCpow.a	TCpow.b	TCpow.c	TCdel.a	TCdel.b	TCdel.c
1	A-B	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.ab}}}{-\phi_{\text{max.ab}}}\right) + \text{DCCA}$	$\text{TCpow.a} - 120^\circ$	$270^\circ$ (TCpow.a $\leq 150^\circ$ ) $90^\circ$ (TCpow.a $> 150^\circ$ )	0	0	$0.5 \cdot N$
2	B-C	$270^\circ$	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.bc}}}{-\phi_{\text{max.bc}}}\right) + \text{DCCA}$	$\text{TCpow.b} - 120^\circ$	$0.5 \cdot N$	0	0
3	C-A	$\text{TCpow.c} + 240^\circ$	$270^\circ$	$\arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.ca}}}{-\phi_{\text{max.ca}}}\right) + \text{DCCA}$	0	$0.5 \cdot N$	0

TABELA V  
INSTANTES DO FECHAMENTO COM TCPOW IDEAL PARA TRANSFORMADORES COM FLUXO RESIDUAL ZERO

	Configuração	TCpow.a	TCpow.b	TCpow.c	TCdel.a	TCdel.b	TCdel.c
1	Yg-Yg (independentes)	$90^\circ$	$90^\circ$	$270^\circ$	0	0	0
2	Yg* (dependente)	$90^\circ$	$60^\circ$	$300^\circ$	0	$0.5 \cdot N$	$0.5 \cdot N$
3	Y*, D*	$60^\circ$	$300^\circ$	$270^\circ$	0	0	$0.5 \cdot N$

\* Arranjo primário, independentemente da configuração do secundário ou terciário.

TABELA VI  
INSTANTES DO FECHAMENTO COM TCPOW IDEAL PARA CAPACITORES E REATORES

	Equipamento	Configuração	TCpow.a	TCpow.b	TCpow.c	TCdel.a	TCdel.b	TCdel.c
1	Capacitores shunt	Yg	$0^\circ$	$0^\circ$	$180^\circ$	0	0	0
2	Capacitores shunt	Y, D	$30^\circ$	$0^\circ$	$150^\circ$	0	0	0
3	Reatores (independentes)	Yg	$90^\circ$	$90^\circ$	$270^\circ$	0	0	0
4	Reatores	Y, D	$60^\circ$	$300^\circ$	$270^\circ$	0	0	$0.5 \cdot N$

Precisamos começar fechando duas fases simultaneamente. O fluxo residual correspondente tem que ser calculado para as tensões fase-fase correspondentes. Como exemplo, o fluxo residual relativo às Fases A e B tem que ser calculado como:

$$\phi_{\text{residual.ab}} = \int_{t=0}^{t=t_0} [v_a(t) - v_b(t)] \cdot dt \quad (26)$$

Aplicando (20), obtemos o ângulo de chaveamento no “point-on-wave” relativo ao fluxo diferencial das Fases A-B:

$$\text{TCpow.ab} = \arccos\left(\frac{\phi_{\text{residual.ab}}}{-\phi_{\text{max.ab}}}\right) \quad (27)$$

Analisando a Fig. 21, podemos ver que um ângulo de  $-30^\circ$  deve ser adicionado ao TCpow.ab de forma a obter o ângulo de chaveamento em relação à Fase A:

$$\text{TCpow.a} = \text{TCpow.ab} - 30^\circ \quad (28)$$

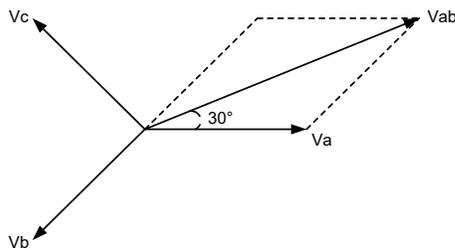


Fig. 21. Correção do ângulo entre conexão delta e estrela

De acordo com a nomenclatura mostrada na Tabela IV, definimos um ângulo de compensação da conexão delta (DCCA: “Delta Connection Compensating Angle”) de forma que, neste caso, o DCCA seja igual a  $-30^\circ$ :

$$\text{TCpow.a} = \text{TCpow.ab} + \text{DCCA} \quad (29)$$

Assim como na Tabela III, após os três fluxos residuais diferenciais terem sido calculados, precisamos selecionar aquele com o valor máximo.

#### F. Caso dos Transformadores Trifásicos Sem Fluxo Residual

Independentemente de os núcleos serem magneticamente independentes ou não, e independentemente da conexão dos enrolamentos primários, o ângulo de fechamento ideal no fechamento de um transformador trifásico com fluxo residual zero pode ser derivado da Tabela II, Tabela III e Tabela IV ajustando sistematicamente o ângulo de fechamento ideal calculado TCpow em  $90^\circ$  ou  $270^\circ$  quando requerido porque o fluxo residual é zero. Os resultados são mostrados na Tabela V. Como um exemplo, a Linha 1 da Tabela V corresponde aos núcleos magneticamente independentes da Tabela II onde TCpow.a e TCpow.b são ajustados em  $90^\circ$  e TCpow.c é ajustado em  $270^\circ$ . Em outro exemplo, a Linha 2 da Tabela V corresponde à Tabela III, onde a Fase A arbitrariamente tem o fluxo máximo e, portanto, TCpow.a é ajustado em  $90^\circ$ . Todos os outros ajustes da Tabela III, ou seja, TCpow.b, TCpow.c, TCdel.a, TCdel.b e TCdel.c não foram alterados.

#### VI. ESTRATÉGIAS DE FECHAMENTO CONTROLADO PARA BANCOS DE CAPACITORES E REATORES SHUNT

As estratégias de fechamento controlado para capacitores e reatores shunt foram abordadas em [4] e estão resumidas na Tabela VI.

Para capacitores shunt conectados em estrela aterrada,  $TC_{pow}$  é  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , conforme indicado na Tabela VI. Para um arranjo em delta ou estrela flutuante, o fechamento tem que ser primeiro efetuado em duas fases simultaneamente de forma que a tensão nas fases selecionadas seja zero no instante do fechamento. Na Tabela VI, o fechamento é feito primeiro nas Fases A e C quando a tensão através das duas fases é zero, correspondendo a  $TC_{pow.a} = 30^\circ$  e  $TC_{pow.c} = 150^\circ$ . Uma vez que as Fases A e C tenham sido fechadas, a tensão no lado do banco de capacitores do disjuntor da Fase B flutua em um valor de  $0.5 \cdot (VA + VC)$ . Esta tensão tem a polaridade oposta de  $VB$ , e o disjuntor pode, portanto, ser fechado quando  $VB$  estiver em um cruzamento pelo zero. A Fase B é então fechada em  $TC_{pow.b} = 0^\circ$ .

O fechamento controlado dos reatores shunt é similar ao fechamento controlado dos transformadores. Assumindo que os circuitos magnéticos do reator de fase são independentes, e considerando um fluxo residual zero e um arranjo em estrela aterrada, a estratégia é fornecida na terceira linha da Tabela VI.  $TC_{pow}$  para todas as fases é  $90^\circ$  ou  $270^\circ$ . A estratégia é idêntica àquela da Linha 1 da Tabela V para um transformador com fluxo residual zero. Se os reatores shunt forem conectados em estrela aterrada, os circuitos magnéticos forem dependentes, e assumindo novamente um fluxo residual zero, a estratégia é a mesma que aquela aplicada para transformadores e fornecida pela Linha 2 da Tabela V. Para reatores shunt com um arranjo em delta ou estrela flutuante e ainda com fluxo residual zero, a estratégia consiste em aplicar a abordagem de fechamento com retardo para transformadores porque os circuitos magnéticos não são mais independentes. Conforme mostrado na Linha 4 da Tabela VI, as Fases A e B têm que ser fechadas nos instantes em que a tensão nas Fases A-B estiver no seu máximo. A Fase C é então fechada com um retardo. Esta estratégia é idêntica àquela da Linha 3 da Tabela V e aplicável a transformadores com fluxo zero.

Nos casos anteriores, foi assumido um fluxo residual zero. Se, excepcionalmente, houver reatores shunt com fluxo residual, as mesmas estratégias definidas na Tabela II, Tabela III e Tabela IV são aplicáveis, dependendo da configuração.

## VII. EXEMPLO DE UMA SIMULAÇÃO NO SOFTWARE EMTP DA ESTRATÉGIA DE FECHAMENTO DE TRANSFORMADORES COM RETARDO

O transformador monofásico da Fig. 7 foi usado para construir um transformador trifásico com enrolamentos conectados em estrela aterrada no primário e enrolamentos conectados em delta no secundário, conforme mostrado na Fig. 22.

Para implementar o fechamento controlado, a estratégia da Tabela III foi aplicada. O disjuntor foi aberto no instante 42 ms. Após a abertura do disjuntor, a fase com o maior fluxo tem que ser determinada. A Fig. 23 mostra os fluxos de fase primários. Obviamente, a Fase B tem o maior fluxo residual. O ângulo de fechamento ideal para a Fase B é calculado como:

$$TC_{pow.b} = \arccos\left(\frac{\phi_{residual.b}}{-\phi_{max.b}}\right) = \arccos\left(\frac{410.7}{-448.35}\right) = 156.35^\circ \quad (30)$$

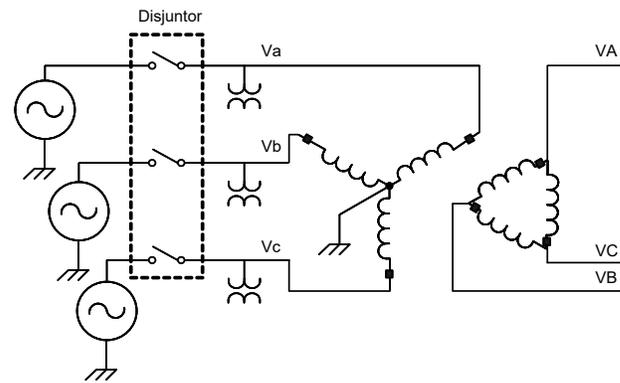


Fig. 22. Enrolamentos em estrela aterrada no primário com enrolamentos conectados em delta no secundário

Seguindo a indicação da Tabela III, o fechamento controlado será realizado com os seguintes ajustes:

$$\begin{aligned} TC_{close.a} &= 0 \text{ ms} & TC_{close.b} &= 0 \text{ ms} & TC_{close.c} &= 0 \text{ ms} \\ TC_{pow.a} &= 300^\circ & TC_{pow.b} &= 156.35^\circ & TC_{pow.c} &= 60^\circ \\ TC_{arc.a} &= 0^\circ & TC_{arc.b} &= 0^\circ & TC_{arc.c} &= 0^\circ \\ TC_{del.a} &= 3 \text{ cyc.} & TC_{del.b} &= 0 \text{ cyc.} & TC_{del.c} &= 3 \text{ cyc.} \end{aligned} \quad (31)$$

Em (31), todos os tempos de fechamento são ajustados em 0 ms porque estamos usando uma chave ideal na simulação do EMTP, e todos os três ajustes de  $TC_{arc}$  foram ajustados em 0 ciclo.  $TC_{del.a}$  e  $TC_{del.c}$  foram ajustados em 3 ciclos.

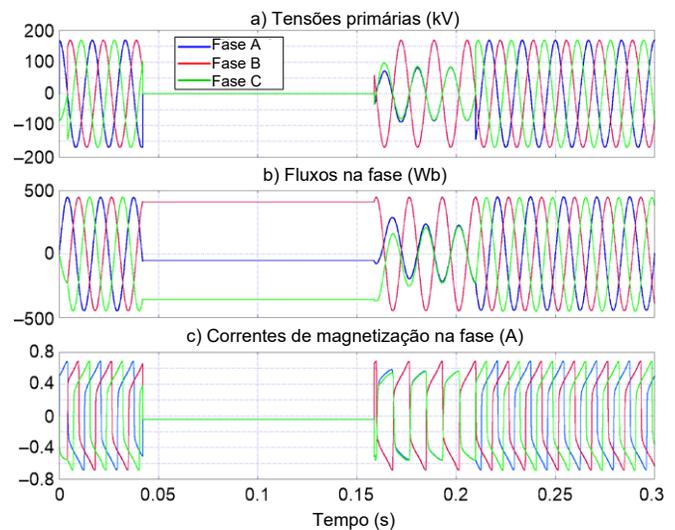


Fig. 23. Tensões primárias, fluxos e correntes de magnetização de fase durante o fechamento controlado

Após o fechamento controlado, os fluxos e as correntes de magnetização de fase são mostradas na Fig. 23b e Fig. 23c, respectivamente. Analisando a Fig. 23b e a Fig. 23c, podemos ver que as correntes de inrush foram eliminadas.

A Fig. 24b e a Fig. 24c mostram os fluxos e as correntes de magnetização de fase, respectivamente, após uma operação de fechamento aleatório. As correntes de inrush são agora da ordem de alguns milhares de amperes para a Fase B em particular.

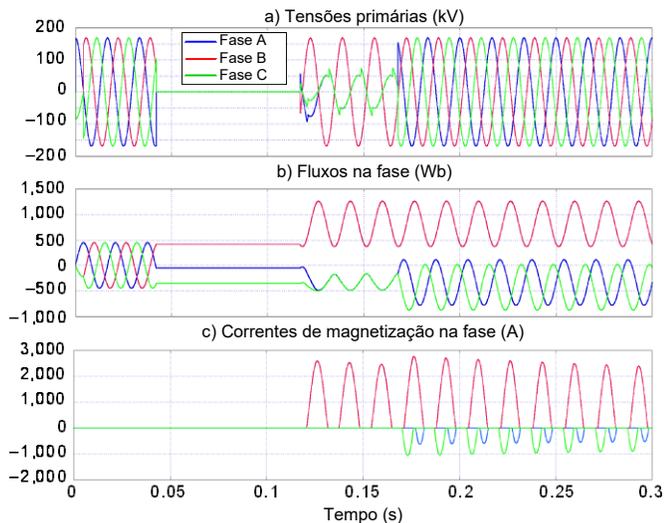


Fig. 24. Tensões primárias, fluxos e correntes de magnetização de fase durante o fechamento aleatório

### VIII. ESTRATÉGIAS DE FECHAMENTO CONTROLADO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Conforme discutido na Seção III, Subseção D, o objetivo do fechamento controlado em linhas de transmissão sem carga é minimizar a tensão imposta através dos contatos do disjuntor imediatamente antes do instante do fechamento. A diferença de tensão no disjuntor imediatamente antes do instante da energização fornece a fonte da onda viajante de tensão que se propaga na linha de transmissão através da indutância e capacitância distribuída da linha. Quando esta onda viajante de tensão atinge o circuito aberto na extremidade remota da linha, a onda de tensão é totalmente refletida, resultando em um efeito de duplicação da tensão. O instante de fechamento do pior caso ocorre quando a carga residual na linha de transmissão leva a uma magnitude da tensão  $dc$  de 1 pu na linha e o disjuntor é fechado no instante em que a magnitude da tensão da fonte atrás do disjuntor é 1 pu com a polaridade oposta da tensão da linha. Essas condições podem resultar em uma onda viajante de tensão de 2 pu, e a extremidade da linha remota pode, teoricamente, ser submetida a uma sobretensão de 4 pu. Claramente, sobretensões severas podem resultar em danos aos equipamentos submetidos a esta condição anormal.

Ilustramos a diferença entre chaveamento controlado e não controlado usando a simulação de uma linha de transmissão sem carga, mas com carga residual, durante um evento de religamento monopolar de alta velocidade. O sistema é representado na Fig. 25. O polo da Fase A é aberto em um mínimo da tensão negativa. Para implementar o religamento de alta velocidade, reduzindo ao mesmo tempo a sobretensão transitória, o polo da Fase A deve ser fechado quando a tensão da fonte estiver em um mínimo negativo.

Portanto, o fechamento controlado simulado deve ter os seguintes ajustes:

$$\begin{aligned} T_{Close.a} &= 0 \text{ ms} \\ T_{Cpow.a} &= 270^\circ \\ T_{Carc.a} &= 0^\circ \\ T_{Cdel.a} &= 0 \text{ cyc.} \end{aligned} \quad (32)$$

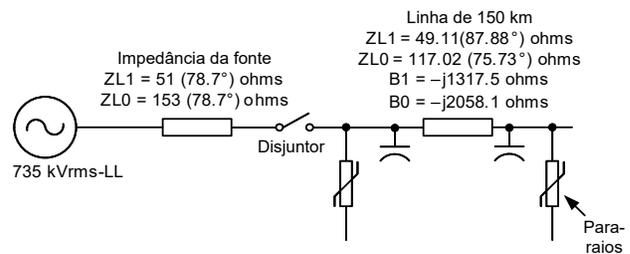


Fig. 25. Linha de transmissão de 735 kV

A Fig. 26 representa os resultados da simulação de um fechamento controlado. O gráfico da tensão na Fase A da linha na extremidade da fonte (lado esquerdo) é mostrado na Fig. 26a. O gráfico da tensão na Fase A da linha na extremidade remota com circuito aberto (lado direito) é mostrado na Fig. 26b. As oscilações de tensão de 60 Hz na Fase A, presentes em ambos os terminais da linha durante o período de polo aberto, são devidas ao acoplamento das Fases B e C. As correntes através dos para-raios da linha, no lado esquerdo e direito, são mostradas na Fig. 26c e Fig. 26d, respectivamente. A partir desses gráficos, podemos concluir que as sobretensões das ondas viajantes na linha são mínimas e bem controladas. O para-raios conduz uma quantidade pequena de corrente devido à ligeira sobretensão experimentada pela Fase A durante o período de polo aberto causada pelo acoplamento das Fases B e C.

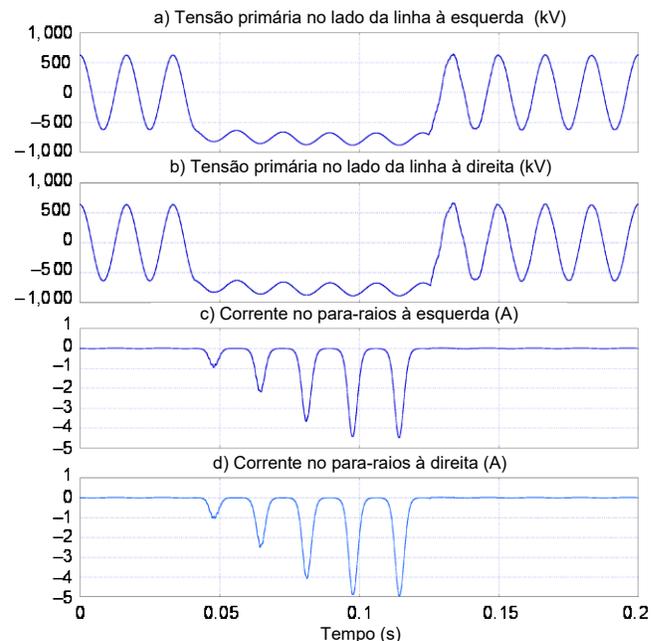


Fig. 26. Fechamento controlado na linha de transmissão com carga residual

A Fig. 27 representa os resultados da simulação de um fechamento aleatório com o fechamento em um cenário do pior caso correspondente a um pico positivo da tensão da fonte. Os gráficos resultantes da Fig. 27 são da mesma ordem que na Fig. 26. A partir da Fig. 27a e Fig. 27b, podemos concluir que as sobretensões das ondas viajantes na linha em ambos os terminais da linha são significativas e forçam os para-raios para uma condução plena, conforme mostrado na Fig. 27c e

Fig. 27d. Comparando os níveis de condução dos para-raios, lado esquerdo e direito, podemos ver que o terminal da linha do lado direito (circuito aberto) tem mais do que o dobro do nível de condução do que o terminal da linha do lado esquerdo, indicando a sobretensão mais severa, conforme esperado.

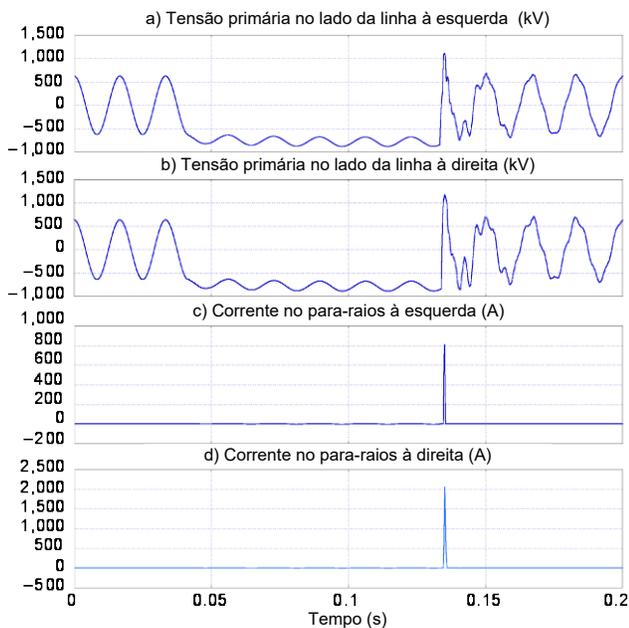


Fig. 27. Fechamento aleatório na linha de transmissão com carga residual

Uma situação da vida real apresentando alguma semelhança com o exemplo é fornecida em [9]; o religamento de alta velocidade foi realizado em uma linha de transmissão de 345 kV conectada a uma extremidade de um barramento com um para-raios conectado. Após a sobretensão no terminal da linha causada pelo chaveamento aleatório durante a operação de religamento, o para-raios foi forçado a conduzir. O relé diferencial baseado em corrente que protege o barramento viu a corrente fluindo para o para-raios como uma falta interna e operou incorretamente.

A dificuldade do fechamento controlado preciso das linhas de transmissão consiste em prognosticar corretamente a tensão  $dc$  da linha imediatamente antes do instante da energização da linha. Em casos de carga residual, a carga residual pode decair ao longo do tempo e a taxa depende de vários fatores [15]. Com reatores shunt, a tensão da linha será submetida a uma ressonância natural assim que os polos do disjuntor abrirem e será muito difícil prever corretamente. Devido a esses desafios, a abordagem de uma concessionária para energização controlada da linha assume que cada fase tem carga residual zero e energiza as fases em cruzamentos pelo zero da tensão consecutivos [4]. Sem o conhecimento da carga residual na linha, esta estratégia fornece um ótimo desempenho da energização da linha limitando a diferença de tensão no disjuntor ao considerar todos os valores possíveis da tensão  $dc$  da linha.

## IX. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA ABERTURA CONTROLADA

Durante uma operação de abertura, após a separação mecânica dos contatos do polo, um arco estará presente através

dos dois lados do contato até que seja autoextinto quando a corrente que flui através do polo atingir zero.

O principal objetivo da abertura controlada do disjuntor é evitar a reignição que pode ser prejudicial tanto para o disjuntor quanto para os equipamentos devido às sobretensões associadas a esta condição [1] [2]. Isto é particularmente verdadeiro quando da desenergização de reatores shunt. Como a tensão está adiantada da corrente por quase  $90^\circ$ , se os dois lados do contato do polo se afastarem quando a corrente está próxima de zero, uma tensão máxima será imposta no contato do polo quando a distância for a mínima. É desejável, portanto, evitar esta situação, de forma que a separação do contato ocorra antes que a corrente atinja zero. Conforme mostrado na Fig. 28, um tempo de arco mínimo,  $T_{amin}$ , tem que ser permitido antes da extinção do arco na corrente igual a zero para que a reignição seja evitada para a maioria dos disjuntores. Isso estabelece que a abertura do polo tenha que ocorrer dentro da zona definida como uma janela livre de reignição na figura. Considerando a corrente através do equipamento como o sinal de referência, a abertura controlada permite impor a separação do contato em um ângulo no “point-on-wave” da corrente pré-definido.

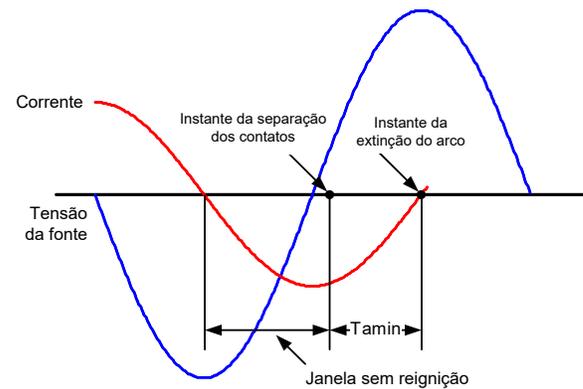


Fig. 28. Princípio do tempo de arco mínimo

### A. Tempo Médio de Abertura do Polo do Disjuntor

O tempo médio de abertura do polo do disjuntor, ou  $T_{Open}$  neste artigo, é o intervalo de tempo entre o instante em que o degrau de tensão é aplicado na bobina de abertura do polo e o instante em que os dois lados do contato do polo se afastam mecanicamente.

Assim como ocorre no tempo de fechamento do polo do disjuntor e para evitar qualquer influência do arco, o tempo de abertura do polo do disjuntor é medido com o disjuntor desconectado do sistema. Normalmente, o tempo de abertura é medido entre o instante em que o degrau de tensão é aplicado na bobina de abertura e quando a resistência de contato vai para o infinito.

### B. Fatores que Impactam no Tempo de Abertura

Em operação, espera-se que o tempo de abertura real,  $T_{Open}$ , desvie do tempo de operação nominal ideal  $T_{OpenNOM}$ . Os mesmos cinco fatores que impactam no valor do tempo de fechamento nominal,  $T_{CloseNOM}$ , vão afetar o tempo de abertura nominal,  $T_{OpenNOM}$ .

### 1) Impactos dos Fatores Ambientais

Conforme efetuado com (1) para o tempo de fechamento, o tempo de abertura compensado é ajustado baseando-se no impacto da temperatura ambiente, tensão de alimentação da bobina de abertura e qualquer medição de pressão de acordo com o princípio de atuação do polo do disjuntor. O tempo de abertura compensado pode ser expresso como:

$$T_{Open} = T_{Open_{NOM}} + \Delta T_{O_{TEMP}} + \Delta T_{O_{SV}} + \Delta T_{O_{PRES}} \quad (33)$$

As mesmas técnicas usadas para armazenar as curvas de compensação descritas para o tempo de fechamento podem ser igualmente usadas para o tempo de abertura.

### 2) Impactos dos Fatores Históricos

Usando o mesmo princípio de cálculo do desvio operacional como aquele expresso em (2), a compensação baseada nas operações de abertura anteriores pode ser implementada como o desvio ponderado entre os tempos de abertura esperado e real, utilizando (34):

$$\Delta T_{O_{PREV}} = \sum_{n=1}^N w(n) \cdot [T_{Open_{meas}}(n) - T_{Open}(n)] \quad (34)$$

Assim como na (3) usada para fechamento, a compensação do tempo de inatividade para as operações de abertura pode ser implementada como uma função do tempo inativo gasto usando (35):

$$\Delta T_{O_{IDLE}} = f(T_{IDLE}) \quad (35)$$

Após as cinco compensações terem sido estimadas, o tempo de abertura final será igual ao tempo de abertura nominal ajustado pelas compensações:

$$T_{Open} = T_{Open_{NOM}} + \Delta T_{O_{TEMP}} + \Delta T_{O_{SV}} + \Delta T_{O_{PRES}} + \dots + \Delta T_{O_{PREV}} + \Delta T_{O_{IDLE}} \quad (36)$$

### C. Abertura Monopolar Controlada

A abertura controlada consiste em acionar a separação dos contatos do polo em um ângulo no "point-on-wave" da corrente de referência desejado. Se este ângulo estiver suficientemente longe do próximo cruzamento pelo zero, a suportabilidade dielétrica do contato será alta o suficiente quando o arco extinguir de forma que a possibilidade de *restrike* ou reignição será mínima. Levando em conta o tempo de abertura do polo do disjuntor, a abertura controlada consiste em aplicar o degrau de tensão na bobina de abertura de forma que a abertura mecânica do polo ocorra em um ângulo ajustado da corrente de referência. Neste artigo, este ângulo ajustado é denominado  $T_{Oarc}$ . Após a abertura mecânica, o arco resultante será autoextinto no próximo cruzamento pelo zero da corrente de referência. Observando a Fig. 29, o número total de ciclos da corrente de referência para implementar a operação de abertura é computado como:

$$NO_{cyc} = \text{ceil}(T_{Open} + T_{Oarc}) \quad (37)$$

Em (37),  $T_{Open}$  e  $T_{Oarc}$  são dois ajustes introduzidos.

Uma vez que  $NO_{cyc}$  tenha sido determinado, e assumindo que a operação de abertura começa em um cruzamento pelo zero positivo da corrente de referência, temos que aguardar um intervalo de tempo ( $T_{Owait}$ ) antes que o degrau de tensão seja aplicado à bobina de abertura.  $T_{Owait}$  é computado como:

$$T_{Owait} = NO_{cyc} - T_{Open} - T_{Oarc} \quad (38)$$

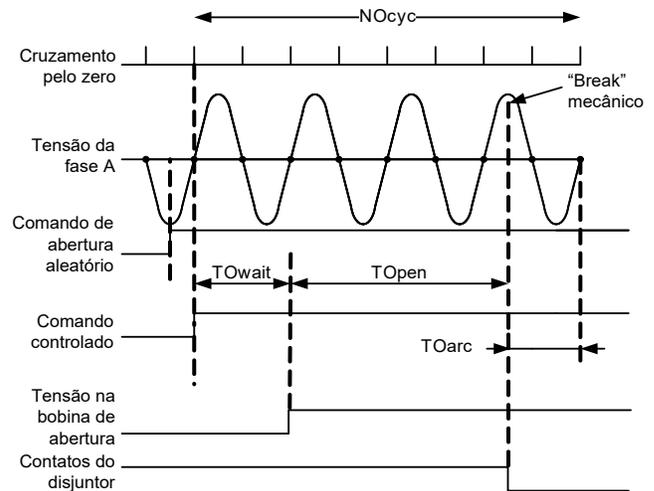


Fig. 29. Princípios da temporização da abertura monopolar controlada

### D. Abertura Tripolar Controlada

Conforme efetuado para o fechamento tripolar controlado, os princípios para abertura monopolar introduzidos no parágrafo anterior podem ser estendidos para abertura tripolar aplicando-se o mesmo procedimento: selecionando uma referência de tempo única que será aplicada a todas as três fases. Definimos  $T_{Owait.a/A}$  como o tempo de espera para a Fase A com a referência de tempo sendo fixada em relação à própria Fase A. Definimos  $T_{Owait.b/A}$  como o tempo de espera para a Fase B com a referência de tempo pertencente à Fase A. Observe que a referência de tempo não tem que ser necessariamente um cruzamento pelo zero. Assumindo que a referência de tempo pertence à Fase A, e considerando uma rotação de fases ABC, o fechamento tripolar controlado pode ser implementado computando os próximos três tempos de espera da seguinte forma:

$$\begin{aligned} T_{Owait.a/A} \\ T_{Owait.b/A} &= T_{Owait.b/B} + 1/3 \\ T_{Owait.c/A} &= T_{Owait.c/C} + 2/3 \end{aligned} \quad (39)$$

A Equação (38) permite calcular  $T_{Owait.a/A}$ ,  $T_{Owait.b/B}$ , and  $T_{Owait.c/C}$  porque cada uma das três fases é considerada independente. A abertura tripolar controlada é implementada aplicando (38) para calcular os três tempos de espera autorreferenciados e um equivalente a (39), dependendo da seleção de um ponto de referência de tempo comum. A Equação (39) é diretamente aplicável se o ponto de referência comum for o cruzamento pelo zero positivo da corrente da Fase A.

### E. Estratégias de Abertura Controlada

A Tabela VII apresenta um conjunto de ajustes  $T_{Oarc}$  para diferentes equipamentos de potência aplicados por uma empresa concessionária norte-americana de grande porte [4].

Olhando a Fig. 29, observe que de acordo com a convenção deste artigo, a origem para a medição de  $T_{Oarc}$  é o segundo cruzamento pelo zero positivo do último ciclo da corrente de referência e a medição é positiva indo para a esquerda.

TABELA VII  
ÂNGULO DE ABERTURA TOARC IDEAL

Equipamento	Configuração	TOarc.a	TOarc.b	TOarc.c
Capacitores shunt	Yg	270°	270°	90°
Capacitores shunt	Y, D	270°	300°	60°
Reatores	Yg	270°	270°	90°
Reatores	Y, D	270°	300°	60°
Transformadores	Yg-Yg	270°	270°	90°
Transformadores	Yg	270°	270°	90°
Transformadores	Y, D	270°	300°	60°

## X. CONCLUSÃO

A estabilidade das características do disjuntor ao longo do tempo permite a implementação do chaveamento controlado dos equipamentos de potência. O chaveamento controlado dos equipamentos de potência é melhor implementado com disjuntores que tenham operação independente dos polos.

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 e armazenada para utilização na forma de tabelas 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 que estão 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.

A abertura controlada dos equipamentos de potência permite a eliminação da reignição ou *restrike* destrutivos do disjuntor.

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 prolongada no tempo após a abertura dos polos do disjuntor.

## XI. REFERÊNCIAS

- [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 2002.
- [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/>.
- [11] E. Portales and Q. Bui-Van, “New Control Strategy of Inrush Transient During Transformer Energization at Touloustouc Hydropower Plant Using a Double-Break 330-kV Circuit Breaker,” proceedings of the International Conference on Power System Transients, New Orleans, LA, September 2003.
- [12] Y. Corrodi, K. Kamei, H. Kohyama, and H. Ito, “Influence of a Circuit Breaker’s Grading Capacitor on Controlled Transformer Switching,” *IEEE Transactions on Power and Energy*, Vol. 130, Issue 5, May 2010, pp. 484–490.
- [13] E. Portales, Y. Fillion, and A. Mercier, “Transformer-Controlled Switching Taking Into Account Residual Flux – Modeling Transformers for Realistic Results in System Studies,” proceedings of the Cigré International Symposium Recife, Pernambuco, Brazil, April 2011.
- [14] J. H. Brunke and K. J. Fröhlich, “Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. Part II: Application and Performance Considerations,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, Issue 2, April 2001, pp. 281–285.
- [15] J. E. Beehler, “Weather, Corona, and the Decay of Trapped Energy on Transmission Lines,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 83, Issue 5, May 1964, pp. 512–520.

## XII. BIOGRAFIAS

**Gabriel Benmouyal**, P.E., recebeu seu BAsC em engenharia elétrica e seu MASc em engenharia de controle da Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canadá. Em 1978, ele ingressou na IREQ, onde suas principais áreas de atividade foram a aplicação de microprocessadores e técnicas digitais para sistemas de proteção e controle de subestações de transmissão e geração. Em 1997, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como *principal engineer* de pesquisas. Gabriel é engenheiro profissional registrado na Província de Québec e membro sênior do IEEE e atende ao Power System Relaying Committee desde maio de 1989. Ele detém mais de seis patentes e é autor ou coautor de diversos artigos técnicos nas áreas de proteção e controle de sistemas de potência e processamento de sinais.

**Normann Fischer** recebeu um Diploma Superior em Tecnologia, com louvor, da Technikon Witwatersrand, Johannesburg, África do Sul, em 1988; um BSEE, com louvor, da University of Cape Town em 1993; um MSEE da University of Idaho em 2005; e um PhD da University of Idaho em 2014. Ele ingressou na Eskom como técnico de proteção em 1984 e foi engenheiro de projetos sênior no departamento de projetos de proteção da Eskom por três anos. Em 1996, ele foi trabalhar na IST Energy como engenheiro de projetos sênior. Em 1999, Normann ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., onde atualmente ocupa a posição de *fellow engineer* na divisão de pesquisas e desenvolvimento. Ele foi engenheiro profissional registrado na África do Sul e membro do South African Institute of Electrical Engineers. Atualmente, ele é membro sênior do IEEE e membro da American Society for Engineering Education (ASEE).

**Douglas Taylor** recebeu seu BSEE e MSEE da University of Idaho em 2007 e 2009, respectivamente. Desde 2009, ele trabalha na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. e atualmente é um engenheiro de pesquisas líder na divisão de pesquisas e desenvolvimento. O Sr. Taylor é engenheiro profissional registrado no estado de Washington e é membro do IEEE. Seus principais interesses são relativos à proteção do sistema de potência e análise do sistema de potência. Ele é autor de vários artigos técnicos e detém uma patente.

**Mark Talbott-Williams** recebeu seu BSEE da Washington State University em 2014. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2014 e ocupa a posição de engenheiro de sistemas de potência na divisão de pesquisas e desenvolvimento. Ele é membro do IEEE.

**Ritwik Chowdhury** recebeu seu diploma de engenharia da University of British Columbia e seu mestrado em engenharia da University of Toronto. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2012, onde ocupou a posição de engenheiro de aplicação e atualmente trabalha como engenheiro de pesquisas. Ele é autor de vários artigos técnicos sobre proteção e controle de sistemas de potência. Seus interesses incluem a análise e controle de geradores e respectivos sistemas, chaveamento controlado e proteção de linhas e geradores. Ele é membro do IEEE.