

MANOBRA CONTROLADA EM EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO

Sérgio Guarnieri¹; Jair Antônio Longo Junior^{2,5}; Victor Molieri de Oliveira^{3,5}; Mariana Costa Falção^{4,5*}

¹ Engenheiro Eletricista – FITL/AEMS; ² Mestre em Engenharia Elétrica – FEIS/UNESP; ³ Graduação em Engenharia Elétrica – UNESP; ⁴ Mestre em Engenharia Elétrica – FEIS/UNESP; ⁵ Docente das Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS

* autor correspondente: profmarianafalcao@gmail.com

RESUMO

O chaveamento de equipamentos de alta tensão geralmente causa transitórios eletromagnéticos que podem causar danos irreversíveis a esses equipamentos e ao sistema de proteção, já que proteções são sensibilizadas de forma errôneas gerando desligamentos indevidos trazendo prejuízos com indisponibilidade dos equipamentos para o sistema, além de causar desequilíbrios indesejados na rede de distribuição, ocasionados pelas distorções harmônicas geradas durante os distúrbios. A tecnologia do chaveamento controlado em equipamentos de alta tensão visa determinar o momento ideal para a energização de cada ativo, com isso a sua utilização traz benefícios como: redução das correntes transitórias, redução dos riscos de falhas e recomposições mais seguras do sistema elétrico. Com o chaveamento controlado esses transitórios podem ser significativamente reduzidos ou até mesmo eliminados através da utilização de estratégias de controle do chaveamento do disjuntor que manobra o equipamento, pré-determinando-se os instantes de abertura e/ou fechamento dos seus polos. Este artigo apresenta os princípios da tecnologia do chaveamento controlado em equipamentos de alta tensão, dá exemplos de suas aplicações e apresenta os benefícios operacionais provenientes do uso dessa tecnologia.

PALAVRAS-CHAVE: chaveamento controlado; alta tensão; setor elétrico de potência; transitórios eletromagnéticos.

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico de potência (SEP), após a geração da energia elétrica advinda das diversas fontes possíveis, dentre os caminhos até o consumidor segue por linhas de transmissão e passa por subestações para que ocorra a regulação e proteção do sistema (MAMEDE FILHO, 2018).

Subestação consiste em um conjunto de equipamentos (transformadores, reatores, disjuntores, além de outros) e sistemas específicos interdependentes concebidos para atender um

objetivo em comum, servir ao sistema elétrico da melhor maneira possível conforme a necessidade (FRONTIN et al., 2013).

As subestações devem ser providas de sistemas de serviços auxiliares com fontes de alimentação de corrente alternada (CA) e contínua (CC) para funcionamento em condições normais e permitir que em situações de defeitos internos ou externos, os serviços básicos sejam mantidos. O sistema CC estabelecido por bancos de baterias fornecem tensões de 125 Vcc para o sistema de comando e controle. O sistema CA

380/220 Vca é proveniente de fontes de alimentação que podem ser da própria subestação por transformadores próprios e/ou fontes da concessionária local. Esses últimos são responsáveis pela alimentação de motores de acionamentos de comandos motorizados até sistemas de refrigeração de transformadores (MAMEDE FILHO, 2021).

As subestações podem ser classificadas como de transformação (elevadora e abaixadora) e de distribuição. A subestação de transformação elevadora é aquela que eleva o nível de tensão gerada por uma fonte de energia elétrica e se conecta às linhas de transmissão com tensões mais elevadas do que a de origem, como as subestações de usinas hidrelétricas, termoeletricas, eólicas e fotovoltaica. A subestação de transformação abaixadora é responsável pela diminuição da tensão gerada pela fonte, alimenta subestações de menores níveis de tensão. É comumente instalada próximas a centros urbanos para evitar que as linhas de transmissão de tensões elevadas interajam com o meio urbano. A subestação de distribuição é destinada a reduzir ao nível de tensão adequada ao consumidor final, normalmente pertence às empresas de distribuição de energia elétrica e aos consumidores de médio porte. Em geral, são subestações do tipo aéreo, instaladas em postes de concreto ou de ferro, mas também são encontradas na forma subterrânea (MAMEDE FILHO, 2021).

Além dos sistemas de alimentação, é necessária a instalação de um sistema de fornecimento de energia para caráter emergencial; em situações de apagão geral, não há alimentação CA para carregar as baterias e nem para acionar os comandos motorizados. Neste caso, utiliza-se um grupo gerador de emergência (GMG) que é um motor movido a combustível, normalmente diesel acoplado em um gerador capaz de fornecer alimentação para suprir os sistemas CA/CC (BARROS; GEDRA, 2016).

Geralmente, no momento do chaveamento para energização de equipamentos de alta tensão (transformadores e reatores), nas subestações são gerados fenômenos eletromagnéticos transitórios que podem provocar sérios inconvenientes ao sistema elétrico de potência (SEP). Isto pode influenciar negativamente na qualidade da energia, pois os chaveamentos geram correntes harmônicas de 2ª e 3ª ordem que provocam distorções na tensão (BRONZEADO et al., 2014).

O objetivo deste trabalho é descrever os conceitos e benefícios da tecnologia da manobra controlada em equipamentos de alta tensão (transformadores, reatores e disjuntores) para se contornar os fenômenos eletromagnéticos transitórios gerados durante a energização.

Este trabalho baseou-se em pesquisa bibliográfica em livros e artigos nacionais e internacionais indexados na plataforma especializada Google Acadêmico e no sítio eletrônico do Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRE), além de manuais de equipamentos das empresas WEG, ALSTOM e SIEMENS. As palavras chaves utilizadas foram chaveamento controlado, transitórios eletromagnéticos, disjuntores alta tensão, transformadores de potência e reatores de derivação. Priorizou-se dados recentes, porém os mais antigos de relevância foram considerados.

2 CONFIGURAÇÕES BÁSICAS DAS SUBESTAÇÕES

No aspecto construtivo, existem vários tipos de configurações de barramentos em subestações em que os equipamentos (transformadores, reatores, banco de capacitores, disjuntores e chaves seccionadoras) são conectados e manobrados conforme a necessidade do sistema interligado nacional (SIN) comandado pelo operador nacional do sistema (ONS) e regulado pela Agência

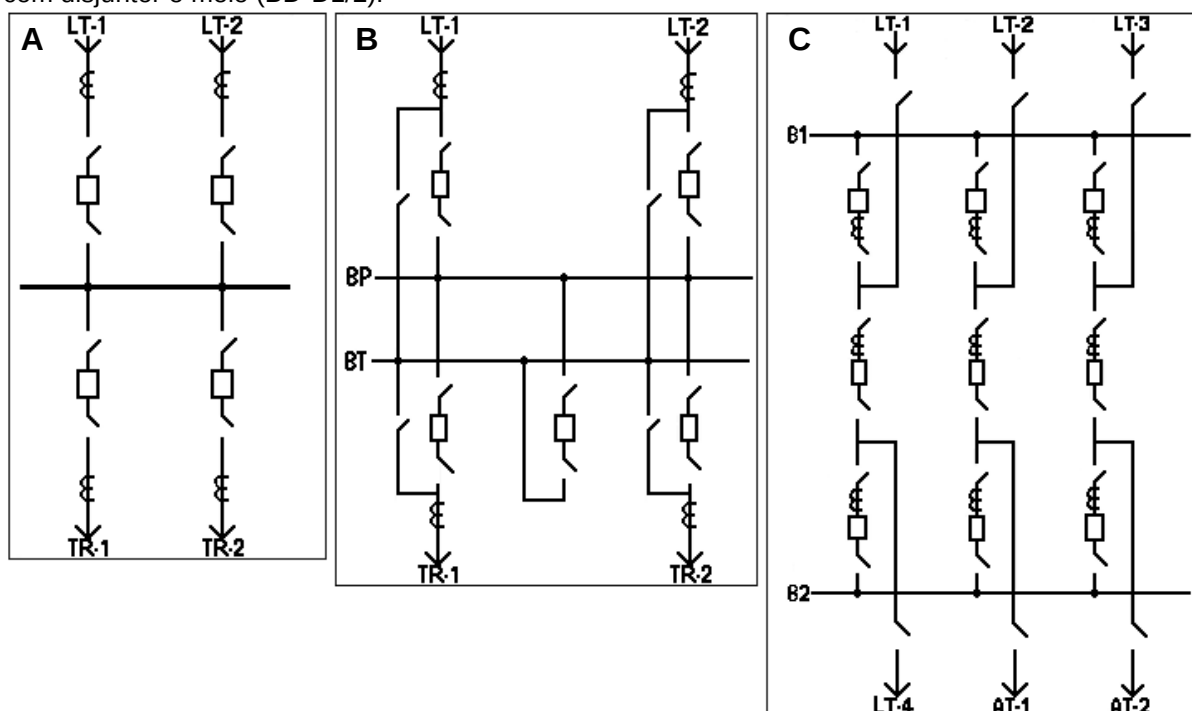
Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (FRONTIN et al., 2013).

Dentre os principais tipos de configurações de barramentos utilizados em subestações incluem-se os de barra simples, dupla (principal e transferência (BP+T)) e dupla com disjuntor e meio (BD-D1/2) (MAMEDE FILHO, 2018; FRONTIN et al., 2013).

2.1 Barra simples

A barra simples, como o próprio nome já indica, é uma das configurações mais simples (Figura 1A), geralmente atendem sistemas na faixa de 13,8-138 kV e são utilizadas para atender a subestações de distribuição ou industriais para atendimento de cargas específicas (MAMEDE FILHO, 2018).

Figura 1. Ilustração esquemática dos tipos de barramentos utilizados em subestações de transmissão de energia elétrica. A. Barra simples. B. Barra principal e transferência (BP+T). C. Barra dupla com disjuntor e meio (BD-D1/2).



Fonte: Adaptado de FRONTIN et al., 2013.

2.2 Barra principal e transferência (BP+T)

A BP+T é comumente utilizada em subestações de alta tensão (Figura 1B), acima de (230 kV), oferece maior gama de operação, pois é provida de quatro chaves seccionadoras, (i) duas seletoras de barras (em que se define o barramento do circuito a ser operado), (ii) uma seccionadora de linha (responsável por conectar a barra ao equipamento principal) e (iii) chave seccionadora de *bypass* (serve para transferir o equipamento principal para a barra de transferência). A utilização da última propicia a realização de manutenções no disjuntor

principal do circuito sem indisponibilizar o equipamento principal para o sistema (FRONTIN et al., 2013).

2.3 Barra dupla com disjuntor e meio (BD-D1/2)

A BD-D1/2 é usada em casos nos quais a estabilidade e segurança do sistema são fatores primordiais, pois o mesmo possibilita várias conexões sem afetar a disponibilidade dos equipamentos (Figura 1C). Até mesmo em ocorrências de falhas nas duas barras (BD), o sistema se mantém pelo disjuntor e meio (D1/2). Este sistema é altamente eficiente, porém oneroso, uma vez que para

a conexão de seis circuitos, são necessários nove disjuntores (um e meio por vão), nove conjuntos de transformadores de corrente (TC) e vinte e quatro chaves seccionadoras (FRONTIN et al., 2013). A Figura 1 ilustra os tipos de configurações de barramentos acima citados.

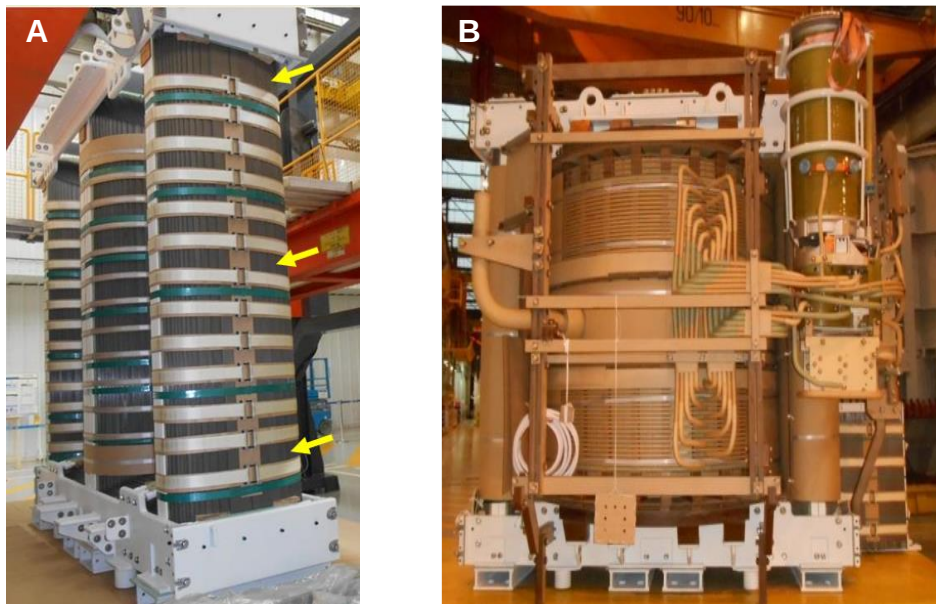
3 PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência é um

dos principais equipamentos que compõe a subestação e é responsável por elevar ou rebaixar a tensão do circuito. Esse processo de transformação é necessário porque, geralmente, a tensão fornecida pelas fontes geradoras de energia elétricas é em torno de 13,8 kV e para transmitir esse nível de tensão até o centro consumidor é necessária a utilização de cabos de grandes bitolas nas linhas de transmissão (MAMEDE FILHO, 2018).

Figura 2. Núcleo de um transformador durante o processo de fabricação.

A. Núcleo do transformador antes de receber as bobinas. As setas indicam três localizações das lâminas de aço silício montadas B. Núcleo do transformador com as bobinas devidamente montadas.



Fonte: Extraído do Manual do equipamento ALSTOM, 2015.

O funcionamento do transformador de potência tem como base, o princípio de transferência de energia elétrica entre duas bobinas (ou enrolamentos) pelo fenômeno da indução eletromagnética. A aplicação de uma tensão no enrolamento primário do transformador dá início a uma corrente que circula pelo núcleo (corrente a vazio), que por sua vez, dá origem a um fluxo magnético alternado que fica armazenado no núcleo. Como o fluxo percorre dois enrolamentos, origina as forças eletromotrizes (E1 e E2, Figura 4), desta forma há

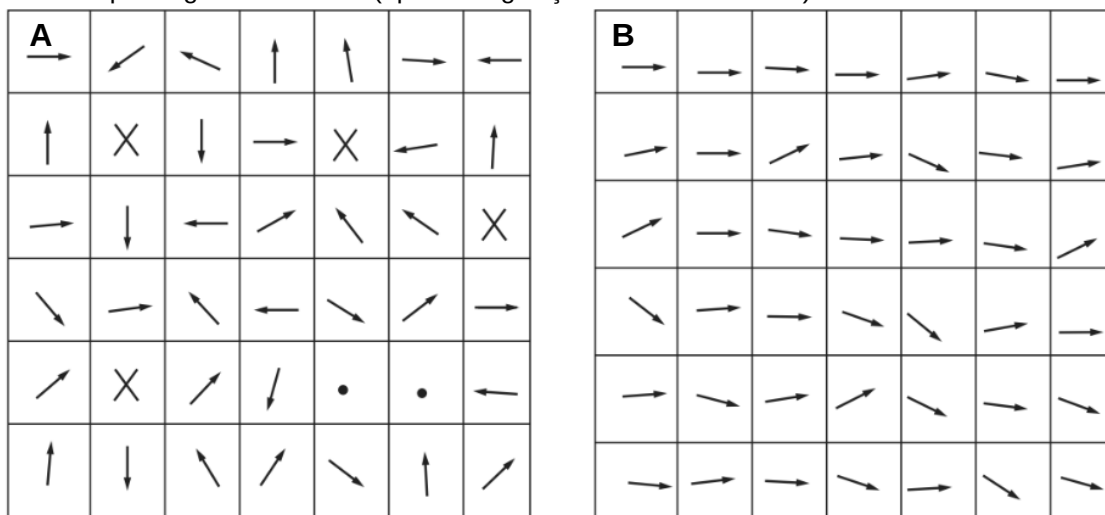
transformação de tensões na razão direta de acordo com as espiras dos enrolamentos do transformador (MILASCH, 1984).

Em geral, durante a montagem do núcleo do transformador (Figura 2), lâminas de chapas de aço silício com espessuras de 0,25-0,5 mm são acopladas de modo que os grãos magnéticos (ou domínios magnéticos) sejam alinhados em uma direção específica, assim há melhor eficiência do fluxo magnético e redução das perdas magnéticas no núcleo do transformador provocadas pela impe-

dância de magnetização (UMANS, 2014). A Figura 2A ilustra o núcleo de um transformador sem as bobinas em que é possível visualizar as lâminas de aço silício montadas; para enfatizar, três

localizações dessas estão evidenciadas pelas setas amarelas. A Figura 2B mostra as bobinas montadas em volta do núcleo.

Figura 3. Orientação dos domínios magnéticos. A. Domínios magnéticos orientados aleatoriamente (antes da energização do transformador). B. Domínios magnéticos alinhados de um campo magnético externo (após energização do transformador).

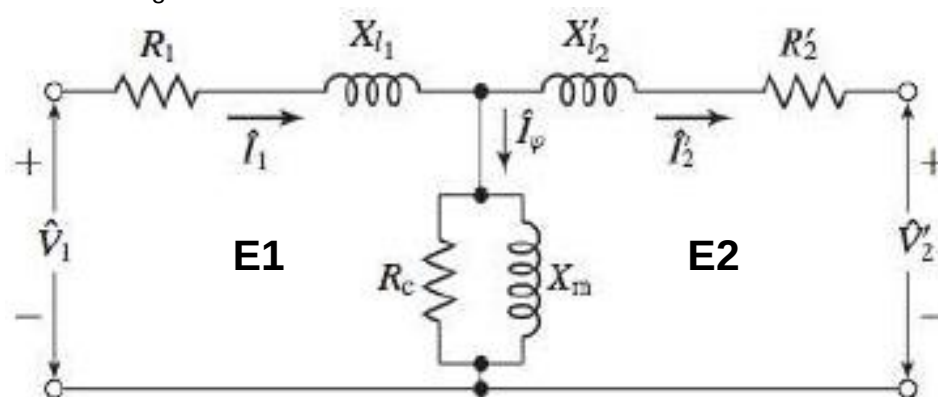


Fonte: Extraído de Chapman, 2013.

A Figura 3 mostra o esquema da distribuição dos vetores dos domínios magnéticos no interior do material ferromagnético (lâminas de aço silício) antes (Figura 3A) e após (Figura 3B) o transformador ser energizado. Assim que o fluxo magnético percorre o núcleo, os domínios que estão orientados no mesmo sentido do fluxo inicial atraem os que estão em outro sentido, assim todos tendem a se orientar no mesmo sentido.

Ao se desenergizar o transformador, o fluxo externo é removido, porém os domínios magnéticos não voltam para as posições iniciais, e tendem a permanecer alinhados (efeito histerese, Figura 5); isso faz com que o núcleo permaneça parcialmente magnetizado (fluxo residual, ponto c da Figura 5) (CHAPMAN, 2013).

Figura 4. Diagrama equivalente de um transformador real. Os significados das simbologias estão descritos no texto.



Fonte: Extraído de UMANS, 2013.

A Figura 4 apresenta o diagrama de um transformador real em que R_1 e R'_2 são definidas como as resistências dos enrolamentos primários e secundários. X_{l1} e X_{l2} representam as indutâncias de dispersão, R_c é referido à resistência de magnetização do núcleo do transformador que, juntamente com X_m constituem o ramo de excitação do circuito equivalente; a combinação de R_c e X_m pode ser definida como a impedância de magnetização (UMANS, 2013).

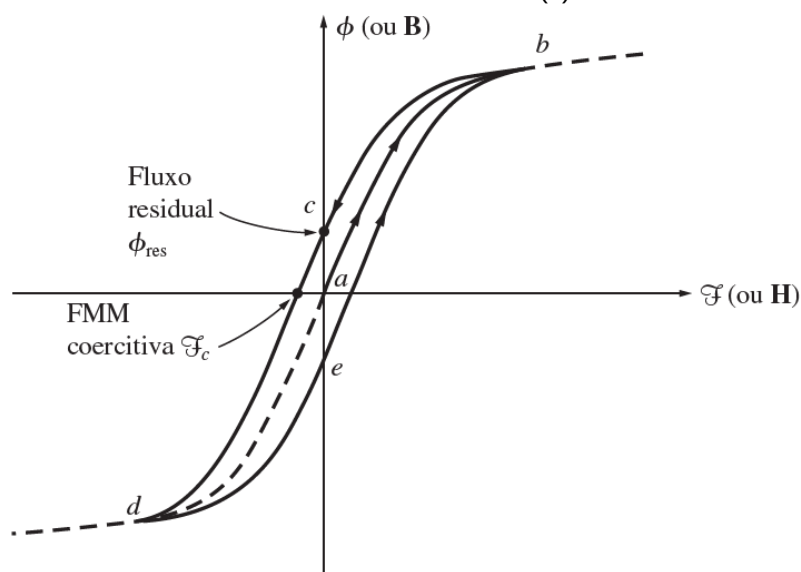
O surgimento de correntes de magnetização está fundamentado na passagem de um fluxo de corrente externo que atravessa o enrolamento primário do transformador. Os níveis de magnetização (ou correntes de *inrush*) são determinados pela curva de histerese dos materiais ferromagnéticos; essa corrente tende a se distorcer conforme a material sai do estado de repouso e atinge a região de saturação (Figura 5). O comportamento geral de um núcleo magnético é descrito em termos da sua magnetização e da intensidade do campo magnético

externo (SAMIR, 2022; CHAPMAN, 2013).

Os caminhos do fluxo magnético, desde o estado de repouso até a região de saturação do material, são percorridos de $\underline{a}$ até $\underline{b}$ (Figura 5), porém quando a corrente é cortada, o fluxo volta por um caminho diferente, de $\underline{b}$ a $\underline{d}$ (Figura 5), devido à histerese, (capacidade que os domínios magnéticos têm em se manter magnetizados). O ponto intermediário $\underline{c}$, denominado fluxo residual, é a região em que o núcleo do equipamento tende a permanecer magnetizado. A desmagnetização total é possível pela aplicação de um pequeno fluxo de campo magnético coercivo de polaridade oposta (SANTOS, 2005).

Logo após o transformador ser desenergizado, há efeitos do fluxo residual presente no núcleo, visualizados pela curva de histerese (ponto $\underline{c}$ da Figura 5), porém de medição direta extremamente complexa. Assim, é realizada de maneira indireta pela análise do gráfico obtido com o auxílio de um osciloscópio.

Figura 5. Ciclo de histerese. Do ponto de vista dos materiais ferromagnéticos, os caminhos do fluxo magnético são do estado de repouso ao de saturação ($\underline{a}$ - $\underline{b}$); corte do fluxo ($\underline{b}$ - $\underline{d}$), porém com permanência de um fluxo residual intermediário ($\underline{c}$).



Fonte: Extraído de Chapman, 2013.

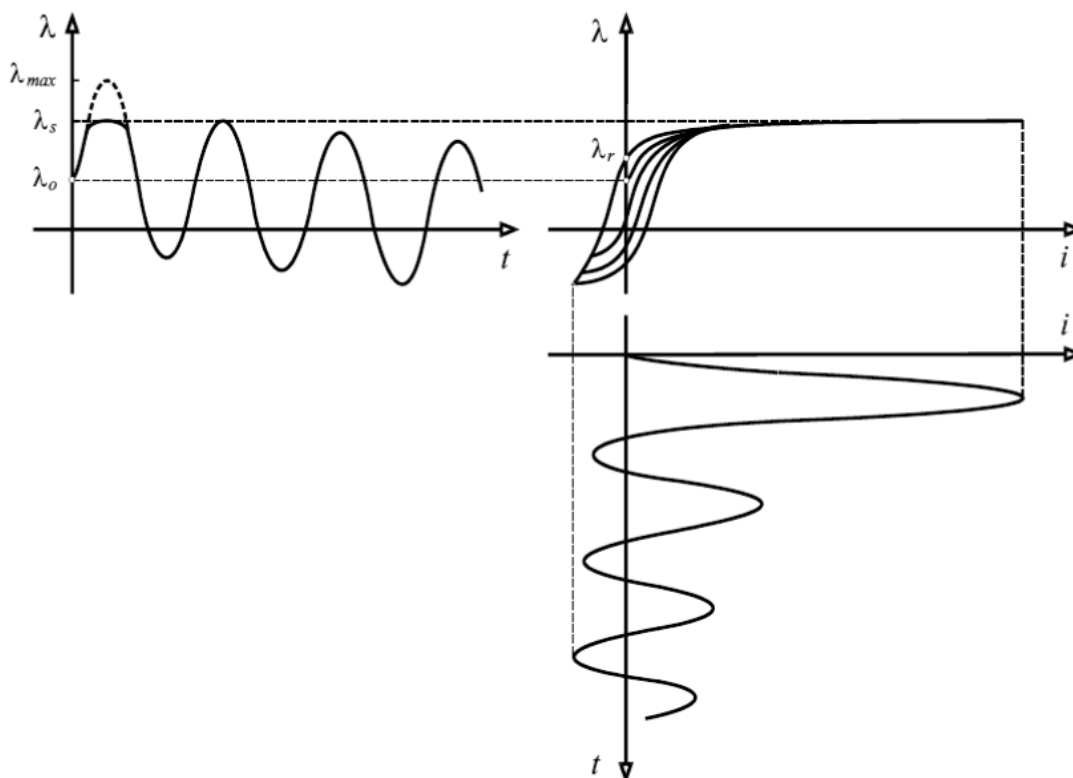
Durante os primeiros instantes da energização de um transformador, os

elevados valores de fluxo saturam o núcleo para pequenas variações de

comprimentos de onda (λ) e podem ocorrer grandes variações de corrente (i) (Figura 6). Normalmente, a característica (λ - i) do transformador é representada pela interação da curva de saturação com o fluxo externo. O fluxo residual (remanescente) presente no núcleo do transformador determina a magnitude da corrente de *inrush* no momento de uma manobra de religamento. Conforme a trajetória descrita no plano λ - i , o valor $\lambda_{\text{máx.}}$ não é atingido, pois λ está limitado

pelo nível de saturação (λ_S). Se a taxa de crescimento do fluxo imposto pela fonte apresentar mesmo sinal do fluxo residual no núcleo, a saturação pode ser atingida com maior intensidade, resultar em maior assimetria de λ e em valores mais altos de pico de corrente de magnetização (i). Se os sinais de λ forem opostos ao fluxo remanescente (λ_r), a corrente de *inrush* (magnetização) é atenuada (Figura 6; GUERRA, 2018).

Figura 6. Ondas de fluxo e de corrente de magnetização durante energização do transformador.



Fonte: Extraído de Guerra, 2018.

4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS REATORES DE DERIVAÇÃO

Os reatores de derivação têm função de reduzir ou até mesmo anular os efeitos da reatância capacitiva capaz de gerar sobretensões no sistema; isso ocorre naturalmente pelo efeito Ferranti, que faz com que a tensão de operação aumente com a distância ao longo da linha de transmissão. Esse efeito evolui por meio das elevadas capacitâncias

provenientes da interação entre os condutores e o solo (MOURA, et al., 2019).

A instalação de reatores de derivação tem função de absorver o excesso de potência reativa capacitiva do sistema de transmissão para reduzir e manter a tensão em níveis adequados para o sistema elétrico de potência (FRONTIN, et al., 2013).

O reator, assim como o transformador, é constituído de enrolamentos com núcleo magnético, logo o seu funcio-

namento também é baseado no princípio do eletromagnetismo. Assim que a corrente elétrica flui pelo circuito elétrico, é estabelecido um campo magnético que consome o excesso de potencial, dissipa-o em forma de calor, sendo que a potência reativa capacitiva consumida é proporcional ao quadrado da tensão. Logo, quando a tensão aumenta ou diminui, a potência reativa também é proporcional ao quadrado da tensão (MOURA et al., 2019).

A Figura 7 ilustra as fases de

construção do núcleo do reator que tem sua coluna principal constituída pela combinação alternada de segmentos de aço magnético (laminados radialmente) e espaçadores de cerâmicas (comumente denominados de entreferro ou *gaps* de ar) (FRONTIN et al., 2013). Essa montagem propicia uma estrutura mais compacta que propicia o núcleo a direcionar o fluxo magnético com mais facilidade, o que resulta em diminuição das distorções eletromagnéticas e menores perdas por aquecimento.

Figura 7. Núcleo de um reator durante o processo de fabricação. A. Segmento de material ferromagnético. B. Camada de espaçadores posicionadas e C. Montagem completa de um segmento do núcleo, em seguida são repetidas as camadas até se atingir o dimensionamento previsto.



Fonte: Extraído de Frontin et al., 2013.

Figura 8. Núcleos de um reator para uso em tensão nominal de 230 kV com isolamento a óleo mineral.



Fonte: Extraído de WEG, 2010.

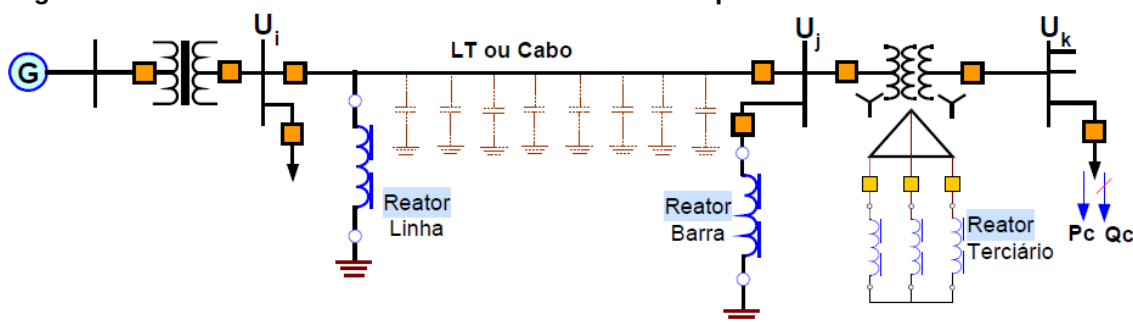
Essa configuração também fornece resistência mecânica à estrutura do núcleo e garante que em casos de

estresses mecânicos devido a forças axiais não se deforme (CIGRE, 2013). A Figura 8 mostra o núcleo de um reator

montado. Assim como no transformador de potência, a construção do reator também necessita do uso de chapas de aço silício de espessura mínima para melhor distribuição do fluxo magnético, diminuição de perdas por correntes parasitas e de aquecimentos localizados. Deste modo, é possível aumentar as dimensões do *gap*, possibilitar densidade de fluxo mais alta e permitir a utilização do núcleo em reatores de derivação de alta potência (COELHO, 2010).

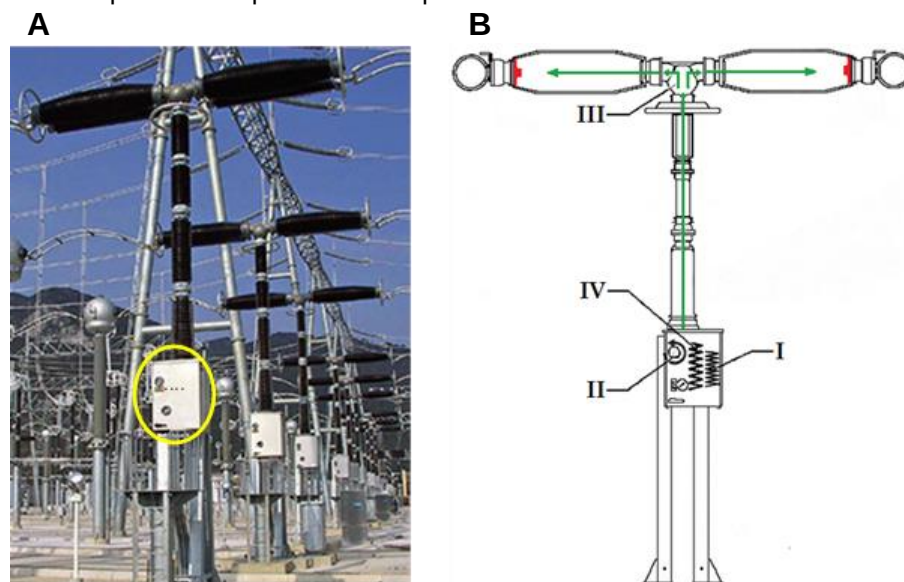
A Figura 9 ilustra um diagrama simplificado de um sistema elétrico de potência que utiliza reatores de derivação, cujas instalações podem ser conectadas à linha de transmissão, barramento da subestação ou a um terciário de um autotransformador. Os reatores podem ser do tipo manobráveis (operados por um disjuntor) ou permanentes (interligados diretamente às linhas de transmissão) (CIGRE BRASIL, 2013).

Figura 9. Retores instalados em um sistema elétrico de potência.



Fonte: Extraído de Frontin et al., 2013.

Figura 10. Disjuntor de alta tensão. A. Disjuntores (modelo GL-317) com comando a mola do fabricante ALSTOM instalados em uma subestação. B. Esquema detalhado do sistema de acionamento dos contatos do disjuntor e seus respectivos responsáveis acoplamentos mecânicos.



Fonte: A. Extraído de ALSTOM, 2011. B. Extraído de ALSTOM, 2005.

5 PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO DISJUNTOR

O disjuntor é o equipamento responsável pela energização (chavea-

mento) dos transformadores e reatores e interrupção em menor tempo possível de um surto no sistema elétrico. A Figura 10A ilustra disjuntores (modelo GL-317) que utilizam comando a mola (destaque

em amarelo) do fabricante ALSTOM instalados em uma subestação. O mesmo dispõe de contatos fixos (Figura 10B – detalhe em vermelho) e móveis (Figura 10B – detalhe em verde); estes se movimentam por meio de articulações mecânicas (Figura 10B – III) acionadas por molas independentes de abertura (Figura 10B – IV) e de fechamento (Figura 10B – I), todos acoplados pelo eixo de transmissão (Figura 10B – II). As manobras de fechamento e de abertura levam ao descarregamento de sua respectiva mola; neste momento, o sistema de carregamento é automaticamente acionado e a mola se torna apta para uma próxima manobra (MAMEDE FILHO, 2013; ALSTOM, 2011).

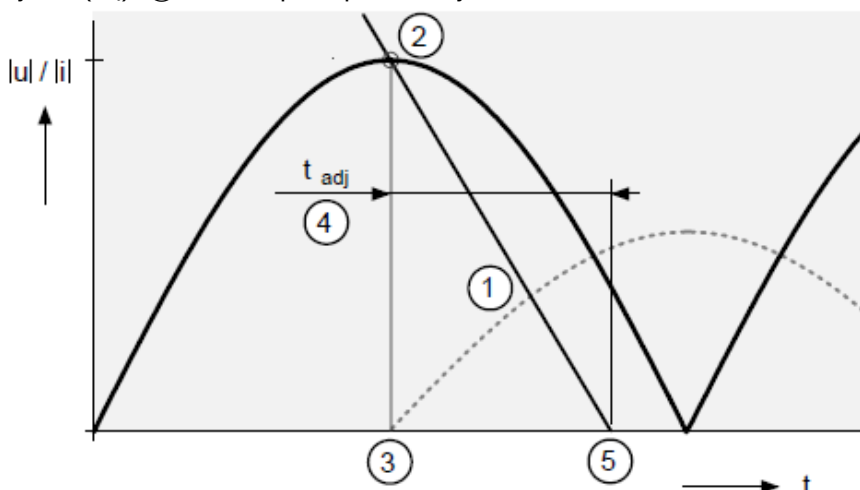
A sequência das ações para se realizar uma manobra de fechamento para se energizar um equipamento (transformador e reator) está mostrada na Figura 10B; assim que a energia contida na mola de fechamento (I) é liberada, o movimento é transferido ao eixo de manobra (II) que está interligado com as biebas de transferência de movimento do cárter (III), conectadas diretamente aos contatos móveis (detalhe em verde), assim seu acionamento faz com que os contatos se unam e crie o caminho para

o potencial elétrico. Simultaneamente a esse processo, o sistema de carregamento atua sobre a mola de abertura (IV), que possibilita o envio de um comando de abertura ao disjuntor, caso necessário (ALSTOM, 2011).

Em manobras de disjuntores, os parâmetros mais importantes a serem considerados são os tempos de acionamento dos contatos e do pré-arco. O tempo de movimento dos contatos para a manobra de fechamento deve ocorrer em ~ 100 ms para ser efetiva, enquanto a de abertura deve ocorrer em ~ 30 ms até atingir o status de aberto. Esses valores são periodicamente testados por meio de ensaios de aferição dos tempos de acionamentos (ALSTOM, 2011).

O tempo de pré-arco corresponde ao tempo necessário para a formação do arco elétrico entre os contatos durante o processo da manobra de fechamento. À medida que os contatos se aproximam, a rigidez dielétrica do meio diminui até uma determinada distância que possibilita a formação do arco elétrico. Esse tempo é intrínseco do equipamento de acordo com suas características construtivas (BENMOUYAL et al., 2017).

Figura 11. Curva característica do pré-arco. ① curva senoide característica do pré-arco; ② ponto de intersecção da tensão do pré-arco; ③ início do fluxo de corrente – ponto zero da curva senoide; ④ tempo de ajuste (t_{adj}); ⑤ contato principal do disjuntor.



Fonte: Extraído de SIEMENS, 2006.

A Figura 11 apresenta uma curva característica de um exemplo de tempo ④ de pré-arco (t_{adj}) ①. Este é usado para deslocar o instante do contato principal em relação à passagem da curva de tensão pelo ponto máximo da curva senoide ②, para se obter o momento ideal do fechamento, logo deve ser inserido nos ajustes do dispositivo de manobra controlada (SIEMENS, 2006).

A manobra deve ser realizada exatamente em ③, uma vez que dependendo do ponto da curva senoide, o arco elétrico provocado pela corrente, pode causar danos severos aos contatos do disjuntor. Em manobras de desenergização de reatores pode haver reignições de arco elétrico até que a distância dos contatos ⑤ passa a ser suficiente para extinguir a magnitude do mesmo provocado durante a manobra. Devido a isso, o instante ideal para manobras de desligamento em reatores é no pico da tensão ②, pois a corrente está no ponto zero da curva senoide ③ (BENMOUYAL et al., 2017).

6 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS TRANSITÓRIOS

A principal causa dos fenômenos eletromagnéticos transitórios no setor elétrico de potência são provenientes de manobras em transformadores e reatores de derivação. No momento da energização dos mesmos, surge uma corrente oriunda da magnetização do núcleo (corrente de *inrush*) do equipamento formado por material ferromagnético (lâminas de aço silício – Figura 2). O caráter não linear desse material gera corrente com formato caracterizado por terceira harmônica ($60 \text{ Hz} \times 3$ que corresponde à frequência fundamental multiplicada por três) que leva à drenagem da fonte de energia do sistema com subsequente aquecimento excessivo do equipamento e aumento das perdas por efeito Joule (UMANS, 2014).

Em alguns casos, as sobretensões

harmônicas podem gerar desligamentos inesperados causados por atuações errôneas dos sistemas de proteção, pois os níveis de corrente de magnetização excedem os parâmetros pré-definidos em estudos de proteção. Falhas em para-raios são esperadas, pois as sobretensões fluem para o aterramento através deles; essas altas intensidades fazem com que ocorra a saturação da isolação dos para-raios e sua capacidade de absorção é comprometida. Os efeitos transitórios gerados podem também causar saturação de equipamentos conectados em paralelo localizados nas proximidades da subestação devido ao fenômeno conhecido como interação simpática (*sympathetic interaction*). Todos esses fatos comprometem a vida útil dos equipamentos e ocasionam o envelhecimento precoce da isolação dos mesmos (BRONZEADO et al., 2014).

Fenômenos de interação simpática ocorrem quando um transformador é ligado em uma rede de sistema de energia com outros já energizados. Embora a amplitude da corrente de *inrush* seja maior durante a energização do transformador único, a corrente de *inrush* simpática é de especial importância devido às suas características incomuns. Geralmente, a corrente de *inrush* em um transformador decai em alguns ciclos, mas a corrente de interação simpática pode persistir por mais tempo (SCHRAMM; SIHLER; ROSADO, 2011).

7 CHAVEAMENTO CONTROLADO

O chaveamento controlado consiste em uma técnica para limitar os fenômenos transitórios gerados pelas manobras em equipamentos de alta tensão. Inicialmente, utilizam-se resistores de pré-inserção para realizar este controle, porém esses se tornam limitados devido ao aumento da resistência utilizada, pois conforme se aumenta a potência do equipamento manobrável (transformadores e reatores), é necessário

aumentar também o valor da resistência de pré-inserção (MACIEL, 2016).

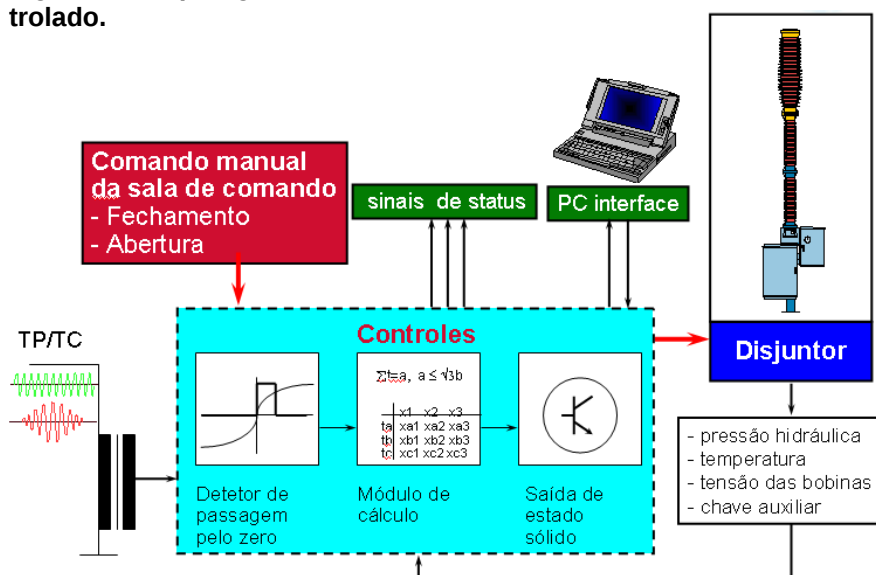
A função do dispositivo de manobra controlada é realizar o acionamento no momento ideal para a energização do equipamento (próximo da passagem pelo ponto zero da corrente), isso faz com que ocorra a redução da corrente de magnetização e permite o aumento do fluxo magnético de forma simétrica. O dispositivo de manobra controlada também visa proteger e preservar os equipamentos envolvidos nas manobras (disjuntores) contra os efeitos dos fenômenos eletromagnéticos transitórios de alta magnitude, pois estes podem ocasionar danos em seus contatos e impossibilitar o seu desempenho ideal (BRONZEADO et al., 2014).

A manobra controlada também busca auxiliar na manutenção da qualidade da energia elétrica, pois minimiza distorções harmônicas na rede devido às sobretensões ocasionadas durante as

manobras (ALMEIDA, 2019).

A Figura 12 ilustra a topologia de um sistema de controle que utiliza dispositivo de manobra controlada. A partir da interpretação dos sinais de tensão ou corrente de referência do sistema, provenientes do (TP/TC), o dispositivo memoriza a passagem pelo ponto zero da corrente, instante ideal para manobra. Como as duas grandezas (tensão e corrente) têm sinais opostos, assim que a tensão estiver passando pelo seu ponto máximo da curva senoide, a corrente está passando pelo ponto zero, desta forma é possível registrar o posicionamento das fases e os instantes na curva senoide. Em seguida, o dispositivo processa a lógica de comandos de acordo com a característica da carga e realiza a adição do tempo do pré-arco que compensa o tempo adequado para o deslocamento dos contatos do disjuntor (SIEMENS, 2006).

Figura 12. Topologia de um sistema com chaveamento controlado.



Fonte: Extraído de SIEMENS, 2006.

7.1 Manobra controlada de transformadores

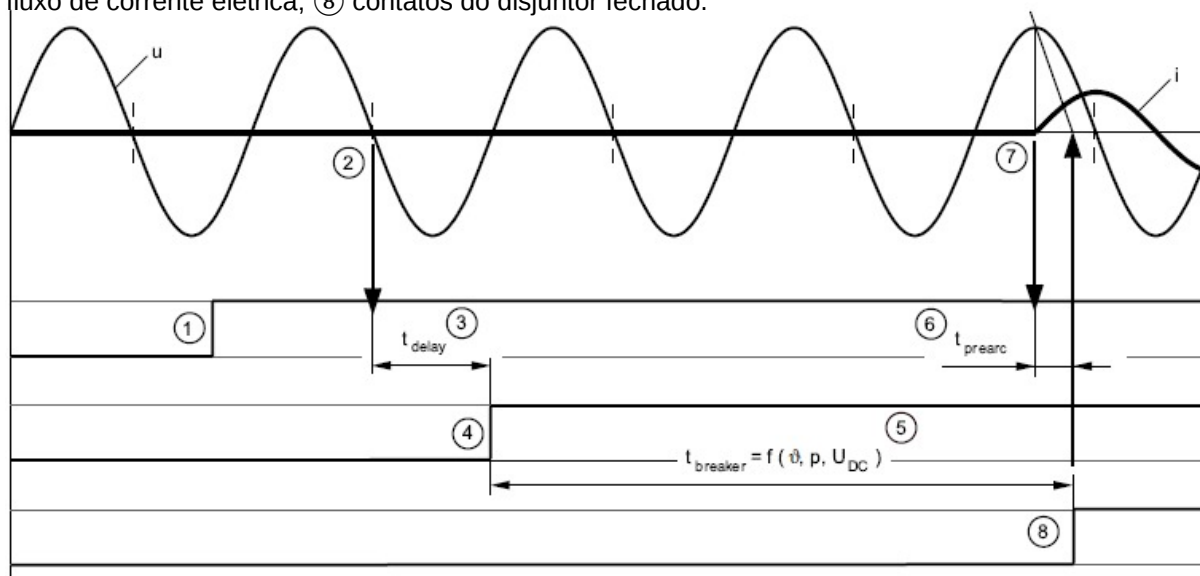
A Figura 13 ilustra o passo a passo para a manobra controlada durante energização de transformadores de potência. Em qualquer ponto da onda de tensão

(u) é possível enviar um comando de fechamento ao disjuntor ①, a próxima passagem pelo ponto zero da onda de tensão (u) ② dá início à sincronização dos tempos. De acordo com o tempo de operação dado para o respectivo polo

(disjuntor) e com o ponto de coincidência na curva senoide, um tempo de atraso (t_{delay}) é calculado (3) de forma que o tempo comece a ser sincronizado após o ciclo negativo da tensão, desta forma a contagem é iniciada no tempo requerido (4). O ponto (5) corresponde ao tempo de movimento que o contato do disjuntor leva para sair do status aberto até o fechado. Devido ao inevitável pré-arco (6),

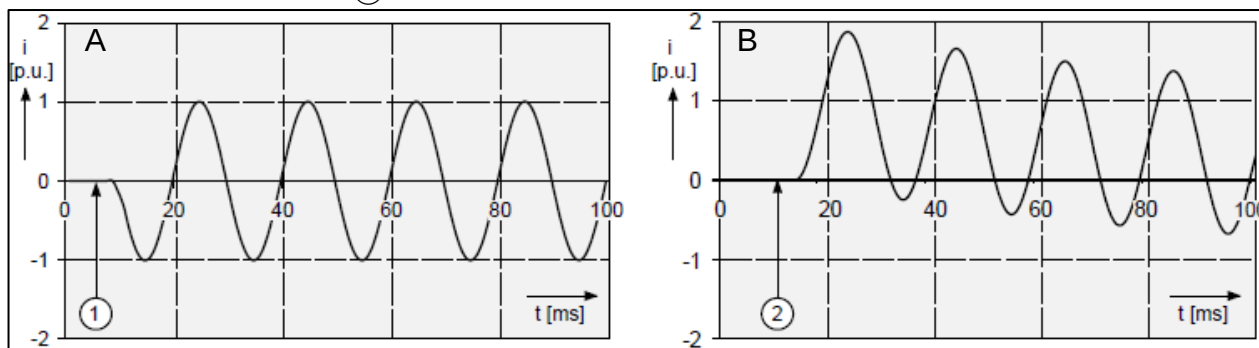
o fluxo de corrente (i) se inicia antes mesmo do toque dos contatos (7), o mais importante é que nesse instante o fluxo se inicia no ponto zero, desta forma a conexão física dos contatos do disjuntor (ou o tempo galvânico) (8) fica determinado pela diferença do tempo de fechamento total menos o tempo de pré-arco (SIEMENS, 2006).

Figura 13. Princípio da temporização da manobra de transformadores com a utilização do dispositivo de manobra controlada. ① comando de fechamento; ② identificação da passagem pelo zero; ③ atraso calculado para ocorrer o acionamento de fechamento dos contatos; ④ comando controlado para as bobinas de fechamento; ⑤ tempo de fechamento; ⑥ tempo do pré-arco; ⑦ início do fluxo de corrente elétrica; ⑧ contatos do disjuntor fechado.



Fonte: Adaptado de SIEMENS, 2006.

Figura 14. Espectros das curvas da corrente de magnetização (Inrush). A. Manobra controlada. ① B. Manobra não controlada. ②



Fonte: Extraído de manual do equipamento SIEMENS, 2006.

A Figura 14 ilustra os espectros das curvas da corrente de magnetização (*inrush*) com manobra controlada (A) e não controlada (B). A propriedade indutiva da

bobina do transformador provoca atraso da corrente elétrica (-90°) em relação à tensão, dessa forma quando o fluxo de corrente tem início no ponto máximo da

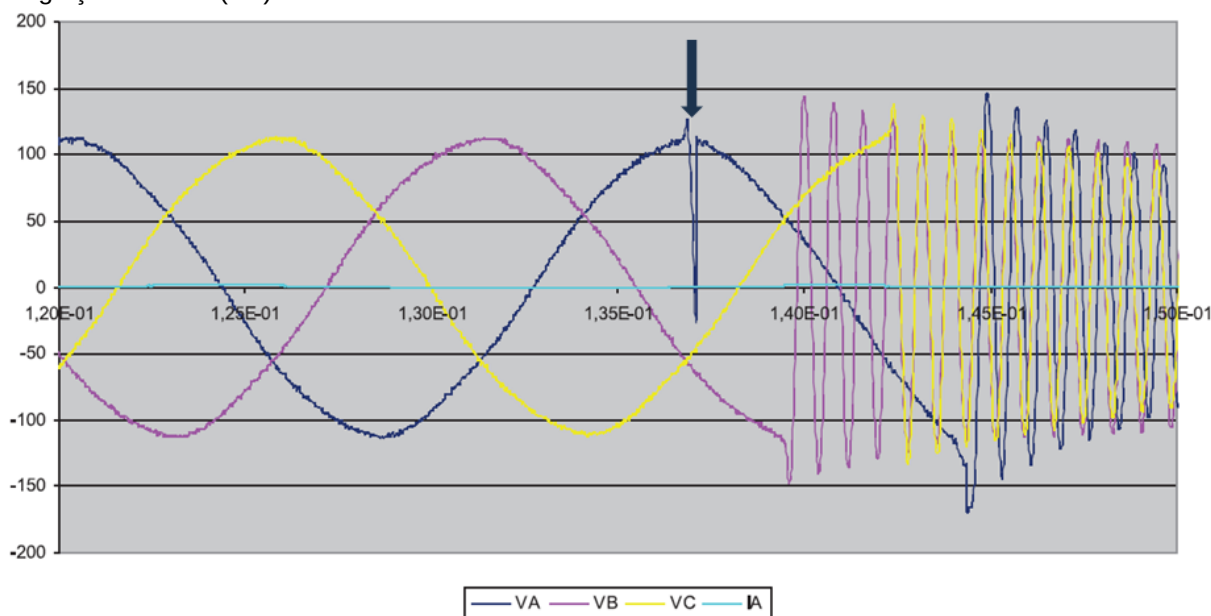
tensão, a corrente tem início em zero com sentido para o ciclo negativo ①. Por outro lado, em B, como o fluxo se inicia no ponto zero de tensão ②, a corrente por consequência se inicia do lado positivo, com tendência ao seu ponto máximo. Esse fluxo de corrente tende a aumentar cada vez mais devido ao ciclo de histerese do material ferromagnético (SIEMENS, 2006).

7.2 Manobra controlada em reatores de derivação

Na manobra de reatores, o foco é na desenergização, uma vez que o corte de corrente (*current chopping*) pode ocasionar reignição do arco elétrico caso a corrente seja interrompida em seu pico máximo. Neste caso, a reignição pode

alcançar níveis de sobretensões superiores aos suportados pelos equipamentos e provocar danos severos aos contatos do disjuntor e na isolamento do reator. Além disso, as reignições fazem com que a tensão retorne com níveis superiores ao nominal e distorcida devido à adição de componentes harmônicas. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 15 que ilustra por oscilografia (registro de atuação) que a manobra não foi realizada de forma controlada. É possível verificar que ocorre reignição na fase VA (seta azul) e assim que há abertura do contato do disjuntor, o sinal da curva senoide tende a zero, porém com a ocorrência da reignição, retorna com a forma de onda elevada (sobretensão) e distorcida (componente harmônica associada) (FRONTIN et al., 2013).

Figura 15. Exemplo de abertura de banco de reatores sem manobra controlada – Ocorrência de reignição na fase (VA).



Fonte: Extraído de Frontin et al., 2013.

A ação da manobra controlada deve ser realizada no momento ideal quando a corrente estiver passando pelo ponto zero da curva senoide, deste modo a corrente não é susceptível à interrupção no seu ponto máximo, e não há risco de re-ignição (FRONTIN et al., 2013).

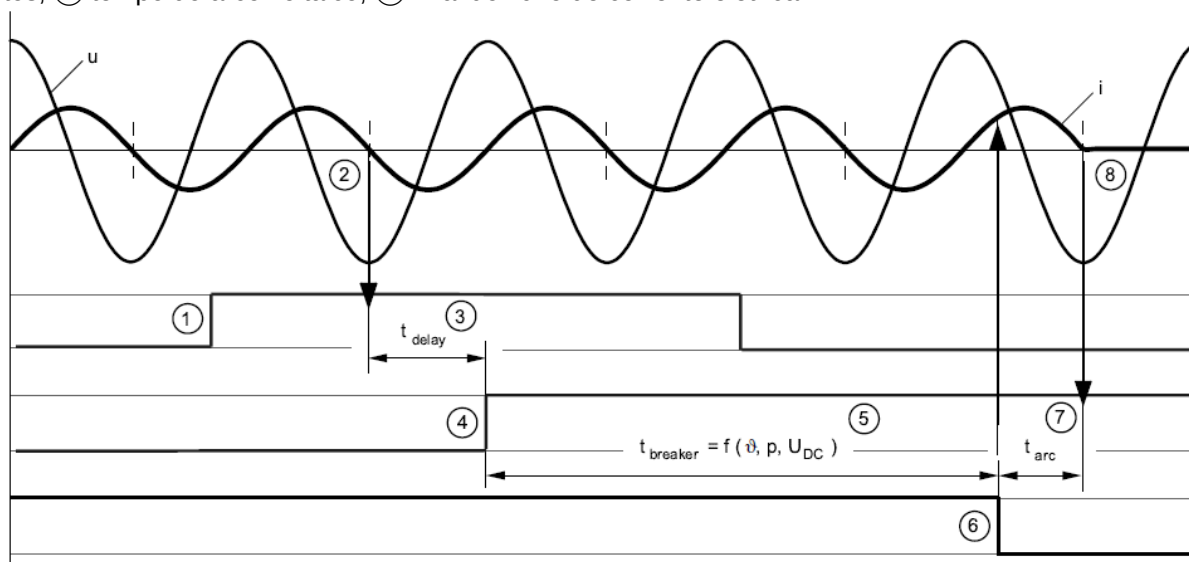
A Figura 16 ilustra a sequência de

operação que o dispositivo de manobra controlada realiza durante chaveamento em reatores de derivação. Em qualquer ponto aleatório da onda da tensão (u) de referência, é dado um comando de abertura ao disjuntor ① que passa pelo dispositivo de manobra controlada que analisa os instantes de tempo da sua curva senoide. A próxima passagem por zero

da corrente que corresponde à passagem pelo pico da tensão no ciclo negativo é o impulso interno de sincronização para o dispositivo começar a contar o tempo ②. Dependendo do tempo de operação dado para o respectivo polo do disjuntor, um tempo de atraso t_{delay} ③ é calculado, de forma que a separação de contatos ocorra no tempo requerido ④. O tempo de movimento corresponde ao tempo em que o contato do disjuntor leva

para sair do status fechado até o aberto ⑤. Em ⑥ ocorre a separação galvânica dos contatos do disjuntor, porém o fluxo de corrente elétrica (i) ainda está presente devido ao tempo do arco elétrico t_{arc} ⑦. O fluxo de corrente é cortado por completo somente após o tempo do arco voltaico, durante a passagem da corrente pelo zero da sua senoide ⑧ (SIEMENS, 2006).

Figura 16. Princípios de temporização da manobra de abertura com utilização de dispositivo de manobra controlada na operação de reatores de derivação. ① comando de abertura; ② identificação da passagem pelo zero; ③ atraso calculado para ocorrer o comando de abertura; ④ comando controlado para as bobinas de abertura; ⑤ tempo de abertura dos contatos; ⑥ separação dos contatos; ⑦ tempo do arco voltaico; ⑧ final do fluxo de corrente elétrica.



Fonte: Extraído de manual do equipamento SIEMENS, 2006.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Manobras controladas evitam estresses elétricos e eletromecânicos nos enrolamentos dos transformadores de potência e reatores de derivação, evitando a degradação da isolamento aumentando a vida útil desses equipamentos, gerando economia para os agentes transmissores que detêm ativos tão importantes para o sistema elétrico de potência.

A manobra controlada em equipamentos de alta tensão desempenha um papel fundamental na operação segura e eficiente do sistema elétrico de potência,

através da implementação dessa técnica de controle durante a manobra de equipamentos, é possível minimizar os efeitos adversos, como a corrente de *inrush* e as sobretensões, garantindo a estabilidade do sistema e a proteção dos equipamentos envolvidos.

É importante ressaltar que a correta implementação e coordenação dessas estratégias exigem um planejamento detalhado e uma análise criteriosa das características do sistema elétrico. Além disso, a seleção adequada dos dispositivos e equipamentos utilizados, bem como a definição de parâmetros de controle precisos, são aspectos essenciais

para o sucesso da manobra controlada.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. A. de. Chaveamento controlado de linhas de transmissão por meio de disjuntores equipados com manobra tripolar, 2019.

ALSTON. Manual do equipamento, 2005.

ALSTON, 2011. Extraído de: <https://www.gegridsolutions.com/hvmv_equipment/catalog/gl317-317x.htm>. Acesso em: 10 jun. 2023.

BENJAMIM, F. B.; GEDRA R. L. Cabine Primária: subestações de alta tensão de consumidor. 4. ed. São Paulo: Érica, 2015.

BENMOUYAL, G. et al. A unified approach to controlled switching of power equipment. In: 72nd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference. 2018.

BRONZEADO, H. de S. et al. Benefícios operacionais da aplicação de manobras controladas de equipamentos de alta tensão, VII WORKSPOT- Workshop internacional sobre transformadores de potência, equipamentos, subestações e materiais Rio De Janeiro, RJ – 23 a 26 de novembro de 2014.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. ed. Porto Alegre AMGH editora, 2013.

CIGRÉ-Brasil, Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.cigre.org.br>>. Acesso em: 08 maio 2023.

COELHO, M. F. O. Fundamentos de Física. 2016.

FRONTIN et al. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013.

GUERRA, F. das C. F. Distúrbios de Correntes em Redes Elétricas: Notas de aula. 2018.

JAMALI, M.; MIRZAIE, M.; ASGHAR-GHOLAMIAN, S. Calculation and analysis of transformer inrush current based on parameters of transformer and operating conditions. Elektronika ir Elektrotechnika, v. 109, n. 3, p. 17-20, 2011.

LUZ, G. S. et al. Ajuste Sincronizadores na Manobra de Fechamento dos Bancos Capacitores da Subestações de Tijuco Preto. XIII Eriac-Encontro Regional Iberoamericano Do CIGRÉ, Puerto Iguazú, Argentina, maio de 2009.

MACIEL, B. T. Análise de transitórios gerados na energização de bancos de capacitores e aplicação de reatores limitadores de corrente. 2016. 106 f. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia elétrica – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

MAMEDE FILHO, J. M. Manual de Equipamentos Elétricos. 4. ed. Rio de Janeiro Grupo Gen-LTC, 2018.

MILASCH, M. Manutenção em transformadores em líquido isolante. Itajubá: Editora Edgard Blucher LTDA, 1984.

MOURA, A. P.; MOURA, A. A. F.; ROCHA, E. P. Transmissão de energia elétrica em corrente alternada. 2019.

PAN, Y. et al. Three-phase transformer inrush current reduction strategy based on prefluxing and controlled switching. IEEE Access, v. 9, p. 38961-38978, 2021.

SANTOS, J. P. et al. Influências do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos o efeito textura. 2005.

SANTOS, J. P. et al. Influências do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos o efeito textura. 2005.

SCHRAMM, S.; SIHLER, C.; ROSADO, S. Limiting sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients. In: International Conference on Power Systems Transients IPST. 2011.

SIEMENS. Manual do equipamento, 2006.

SOUSA, I; SANTOS, R. P. dos. Diagnóstico em transformadores de potência através de ensaios em campo. Engenharia Elétrica Telemática-Pedra Branca, 2012.

UMANS, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley [recurso eletrônico] I Stephen D. Umans; tradução: Anatólio Laschuk. - 7. ed. – Dados eletrônicos. - Porto Alegre: AMGH, 2014.

WEG. Manual do equipamento, 2010.