



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO GABRIEL MOTA DE MIRANDA

MÉTODOS DE REDUÇÃO DE CORRENTES DE *Inrush* EM
TRANSFORMADORES

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JULHO DE 2018

PAULO GABRIEL MOTA DE MIRANDA

**MÉTODOS DE REDUÇÃO DE CORRENTES DE INRUSH EM
TRANSFORMADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários a obten-
ção do grau de Bacharel em Ciências no Do-
mínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Francisco das Chagas Fernandes Guerra
Orientador

Campina Grande - Paraíba
Julho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que passaram por minha vida, pois sem essas experiências eu não seria a pessoa que sou hoje.

A meus amigos e familiares, que direta ou indiretamente me ajudaram ao longo do percurso das mais variadas formas e nos mais diversos momentos.

E agradeço especialmente a meus pais Aécio e Sayonara, e minha irmã, Ana, que foram fundamentais em todos os momentos de minha vida.

"Qualquer um pode amar uma coisa 'por causa de'. É tão fácil quanto colocar um vintém no bolso. Mas amar uma coisa 'apesar de', conhecer suas falhas e amá-las também, isso é raro, puro e perfeito."

-Patrick Rothfuss

Lista de Figuras

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Curvas de Histerese | 8 |
| 2 | Circuito Elétrico Equivalente de um Transformador Monofásico com Secundário em Aberto | 11 |
| 3 | Curva de Saturação Linearizada por Partes | 11 |
| 4 | Curva de Saturação Linearizada sem Remanência | 12 |
| 5 | Curva de Saturação Linearizada com Remanência | 12 |
| 6 | Fluxo no núcleo do equipamento | 13 |
| 7 | Resultados dos Testes em um transformador de 230/138kV e 100MVA | 14 |
| 8 | Esquema de Chaveamento Controlado. | 16 |
| 9 | Circuito Elétrico Equivalente. | 17 |
| 10 | Simulação e teste de ΔV , das fases B e C, para diferentes valores de R_n | 19 |
| 11 | Comparação entre os valores de ΔV e das correntes de inrush das fases B e C, para diferentes valores de R_N | 20 |
| 12 | Representação de um Sistema de Distribuição com Múltiplos Ali- mentadores. | 21 |
| 13 | Tensão e Corrente no transformador. | 22 |
| 14 | Tensão e Corrente de amplitude variável. | 22 |
| 15 | Fluxo decrescente no núcleo. | 23 |
| 16 | Tensão e Corrente de frequência variável. | 23 |
| 17 | Modelo do Dispositivo de Desmagnetização. | 24 |
| 18 | Modelo de um Transformador Monofásico. | 24 |
| 19 | Tensão, Corrente e Fluxo no transformador simulado. | 25 |
| 20 | Correntes de <i>inrush</i> nos dois casos simulados. | 26 |
| 21 | Modelo Adaptado do Transformador Trifásico. | 26 |
| 22 | Dispositivo de Desmagnetização Ligado ao Transformador. | 26 |
| 23 | Fluxo em Cada Ramo, (a)Hyst1, (b)Hyst2, (c)Hyst3, (d)Hyst4, (e)Hyst5. | 27 |

| | | |
|----|--|----|
| 24 | Fluxo nos Transformadores número 1 e 38, respectivamente, ligados ao alimentador | 28 |
| 25 | Curva de Saturação do Transformador Monofásico. | 29 |
| 26 | Curva de Saturação do Transformador Trifásico. | 30 |
| 27 | Circuito Simulado para o Transformador Monofásico. | 31 |
| 28 | Circuito Simulado para o Transformador Trifásico. | 31 |
| 29 | Corrente de <i>inrush</i> do transformador monofásico no pior caso. . . | 32 |
| 30 | Corrente de <i>inrush</i> do transformador monofásico no pior instante de chaveamento com fluxo inicial nulo. | 33 |
| 31 | Corrente de <i>inrush</i> do transformador monofásico no melhor instante de chaveamento com fluxo inicial 20V.s. | 33 |
| 32 | Correntes de <i>inrush</i> do transformador trifásico no pior instante de chaveamento com fluxo remanescente no núcleo. | 34 |
| 33 | Correntes de <i>inrush</i> do transformador trifásico no pior instante de chaveamento sem fluxo remanescente no núcleo. | 35 |
| 34 | Correntes de <i>inrush</i> do transformador trifásico com chaveamento no pico da fase A com fluxo remanescente no núcleo. | 36 |
| 35 | Correntes de <i>inrush</i> do transformador trifásico com chaveamento nos picos de cada fase com fluxo remanescente no núcleo. | 37 |

Lista de Tabelas

- 1 Características dos testes no transformador de 230/138kV e 100MVA 14
- 2 Resultados das Simulações para um Transformador Trifásico . . . 28

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Resumo | 5 |
| 1 Introdução | 6 |
| 2 Fundamentação | 7 |
| 2.1 Saturação de Núcleos Magnéticos | 7 |
| 2.2 Surtos de Energização em Equipamentos Altamente Indutivos . . | 10 |
| 3 Técnicas para Redução de Correntes de Energização | 13 |
| 3.1 Chaveamento Controlado com Conhecimento do Fluxo Remanescente | 13 |
| 3.2 Chaveamento Sequenciado das Fases com Uso de Impedância de Neutro | 16 |
| 3.3 Desmagnetização do Núcleo | 21 |
| 4 Resultados de Simulações | 29 |
| 5 Conclusões | 39 |
| Referências | 40 |

Resumo

As correntes de *inrush* em transformadores ligados ao sistema de potência causam diversos efeitos, como afundamentos de tensão e má atuação de sistemas de proteção, além de danos mecânicos e elétricos aos equipamentos em si. Sua redução é essencial para a melhoria da qualidade de energia e aumento da vida útil dos equipamentos mais importantes do sistema elétrico.

Palavras-Chave: Transformadores, *Inrush*, Qualidade de Energia

1 Introdução

Um dos principais distúrbios que podem ocorrer nos sistemas de potência é a corrente de *inrush* de transformadores. Elas se originam da alta saturação do núcleo dos equipamentos no instante em que são ligados (KOVAN et al., 2011). Tais correntes podem levar a uma atuação indevida dos dispositivos de proteção, que veem a corrente de *inrush* como uma falta. Além disso, ela causa, também, transitórios de tensão no sistema, estresses mecânicos nos enrolamentos e degradação dos materiais isolantes, devido aos picos de tensão criados nos enrolamentos que, conjuntamente, vem a diminuir a vida útil do equipamento.

Os dois principais agravantes das correntes de *inrush* são o ponto de chaveamento da tensão e o fluxo residual no transformador. Quando a fase é conectada nas proximidades do zero da tensão, o que, pela lei de Faraday, leva a um fluxo máximo cerca de duas vezes o fluxo de regime permanente, que demanda grande corrente. Somando-se a esse fluxo causado pelo chaveamento o fluxo residual existente no núcleo, ocorre uma super saturação do núcleo, causando elevadas correntes.

A forma tradicional de mitigação das correntes de *inrush* é o uso de resistores de pré-inserção nos disjuntores. Porém, tal método, além de demandar demasiada manutenção, apresenta alto custo financeiro.

De forma a contornar estes problemas, diferentes métodos são propostos, como, por exemplo, o chaveamento controlado das fases, BRONZEADO et al. (2014) e CUI et al. (2005), ou ainda, o uso de fontes externas para a desmagnetização dos transformadores KOVAN et al. (2011).

Tendo em vista que diferentes métodos podem apresentar diferentes benefícios, pretende-se, neste trabalho, fazer uma análise comparativa entre alguns desses métodos.

2 Fundamentação

2.1 Saturação de Núcleos Magnéticos

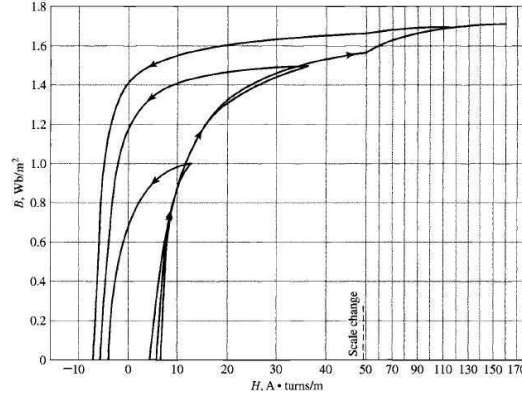
Conforme descreve UMANS (2014), uma força magnetizante externa, aplicada a um material, faz com que os momentos dos domínios magnéticos dele tendam a se alinhar ao campo magnético aplicado. Assim, os campos magnéticos destes domínios somam-se ao campo aplicado, produzindo uma densidade de fluxo maior do que aquela que existiria devido apenas à força magnetizante. À medida que a força magnetizante aplicada é aumentada, ocorre a movimentação das paredes dos domínios magnéticos e o processo de alinhamento dos momentos magnéticos até o ponto em que eles estejam praticamente alinhados com o campo magnetizante e não possam mais contribuir com o aumento da densidade de fluxo. Nesse ponto, diz-se, então, que o material atingiu a saturação magnética.

Na ausência de tal força magnetizante externa, os domínios magnéticos do material tendem a se alinhar naturalmente a direções associadas à estrutura cristalina dos domínios, conhecidas como eixos de mais fácil magnetização (UMANS, 2014). Assim, quando a força externa é reduzida, os momentos magnéticos tendem a retornar aos pontos de mais fácil magnetização próximas ao campo aplicado. Com a retirada do campo externo, os momentos tendem a retornar a suas orientações iniciais, porém não de forma totalmente aleatória, assim, eles conservam uma componente de magnetização líquida na direção do campo aplicado (fluxo remanescente ou residual).

A curva utilizada para descrever este fenômeno é a curva de histerese. A curva mostra a relação entre a densidade de fluxo magnético (B) e a força magnetizante (H). As setas na Figura 1 representam a trajetória seguida por B quando H cresce ou decresce.

É possível observar pela figura, que a medida que H cresce, as curvas de histerese tendem a ficar cada vez mais horizontais, isso ocorre devido à saturação do material.

Figura 1: Curvas de Histerese



Fonte: UMANS (2014)

De acordo com a Lei de Faraday, sabemos que a tensão aplicada ao enrolamento primário e o fluxo enlaçado pelo mesmo são relacionados, podendo ser expressa pela equação 1:

$$v(t) = \frac{d\lambda}{dt}, \quad (1)$$

na qual v é a tensão, λ é o fluxo enlaçado e t é a variável de tempo.

Sendo a tensão da forma $v(t) = V_m \cos(\omega t)$, o fluxo concatenado pode ser calculado como a integral da função no tempo, assim

$$\lambda(t) = \int_0^t \lambda_m \text{sen}(\omega t) dt \quad (2)$$

A densidade de fluxo magnético é então dada por

$$B = \frac{\lambda}{A}, \quad (3)$$

na qual A é a área do material por onde passa o fluxo.

Da Lei de Ampère, sabemos que o campo H é proporcional à corrente. Assim, à medida que aumentamos a tensão sobre os enrolamentos do transformador, a densidade de fluxo B aumenta (equações 1 e 3) e, por conseguinte, surge uma corrente cada vez mais elevada nos enrolamentos do transformador. À medida que se passa do ponto de saturação do núcleo, uma pequena elevação na tensão aplicada eleva a corrente nos enrolamentos de maneira acentuada (A elevação de B causa um aumento mais acentuado em H).

2.2 Surtos de Energização em Equipamentos Altamente Indutivos

Segundo GUERRA, as correntes de excitação em regime permanente de transformadores de potência estão na faixa de 0,5% e 2% da corrente nominal. Entretanto, durante a energização podem ocorrer picos de corrente que podem chegar a 20 vezes a corrente nominal com duração de vários ciclos.

O valor instantâneo da tensão no instante de chaveamento de um transformador com secundário em aberto é um dos fatores que mais influenciam na corrente de energização do mesmo. Isto se deve pelo fato de que o transformador, nestas condições, pode ser visto pelo sistema como um componente altamente indutivo (GUERRA), assim, o fluxo magnético induzido estará atrasado de quase 90° da tensão. Isso significa que, quando a tensão tem valor próxima a zero no instante de chaveamento, o fluxo imposto pela fonte terá valor máximo.

Além da influência sobre como o transformador é visto pelo restante do sistema, o secundário em aberto também tem influência sobre a corrente de *inrush* pelo fato de, por não haver uma corrente no secundário, não surgirá um campo desmagnetizante que diminua o fluxo induzido pelo lado primário do transformador.

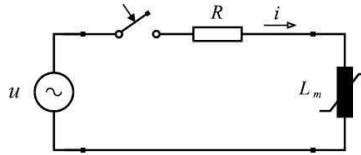
Outro fator que influencia na amplitude da corrente de *inrush* do equipamento é a magnitude e sinal do fluxo residual no núcleo do mesmo (GUERRA). Caso a taxa de variação do fluxo imposto tiver mesmo sinal que o fluxo remanescente, a soma destes dois fluxos pode levar à saturação do núcleo.

A Figura 2 representa um transformador monofásico com o secundário em aberto. A indutância não linear apresenta uma característica $i = f(\lambda)$ como a da Figura 3, também chamada de curva de saturação.

A equação que descreve o comportamento do circuito da Figura 2 é

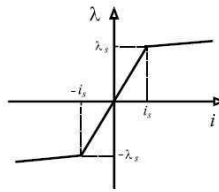
$$\frac{d\lambda}{dt} + Ri_m = U_m \text{sen}\omega t \quad (4)$$

Figura 2: Circuito Elétrico Equivalente de um Transformador Monofásico com Secundário em Aberto



Fonte: GUERRA

Figura 3: Curva de Saturação Linearizada por Partes



Fonte: GUERRA

Assumindo que o núcleo não satura, a função $f(\lambda)$ se comporta como uma função linear até o ponto de joelho da curva da Figura 3, e a corrente pode ser substituída por $\frac{\lambda}{L_m}$, assim, a equação 4 pode ser reescrita como

$$\frac{d\lambda}{dt} + \frac{R}{L_m}\lambda = U_m \text{sen}\omega t \quad (5)$$

Solucionando a equação 5, e considerando $R \ll \omega L_m$, chegamos à equação

$$\lambda(t) = \lambda_m [e^{-\frac{R}{L_m}t} - \cos\omega t] \quad (6)$$

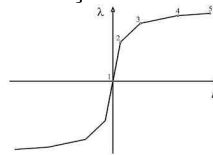
É possível notar que a equação 6, representando o fluxo no núcleo do transformador, apresenta uma componente de decaimento exponencial e uma componente cossenoidal.

A forma como o transformador é energizado também influencia a amplitude da corrente, visto que o valor desta é inversamente proporcional à área

entre o núcleo e o enrolamento. Uma vez que, em geral, os enrolamentos de menor tensão estão mais próximos ao núcleo e são envolvidos pelo enrolamento de maior tensão (GUERRA), as correntes de *inrush* para transformadores abaixadores (enrolamento de maior tensão, mais externo, energizado) é da ordem de 5 a 10 vezes a corrente nominal. Para os transformadores elevadores, em que o enrolamento de menor tensão, mais interno, é energizado, as correntes de *inrush* podem atingir valores de 10 a 25 vezes o valor da corrente nominal (MARDEGAN, 2010).

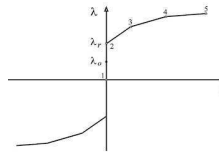
A curva de saturação pode ser linearizada por partes, como as das Figuras 4 e 5, de acordo com a caracterização necessária

Figura 4: Curva de Saturação Linearizada sem Remanência



Fonte: GUERRA

Figura 5: Curva de Saturação Linearizada com Remanência



Fonte: GUERRA

A Figura 4 representa a linearização da curva de saturação de um transformador sem remanência, usualmente utilizada em simulações em regime permanente. Enquanto que a Figura 5 apresenta a curva com remanência, normalmente utilizadas em simulações para regime transitório, onde λ_0 é o fluxo residual e λ_r é o fluxo de enlace correspondente ao fluxo de remanência.

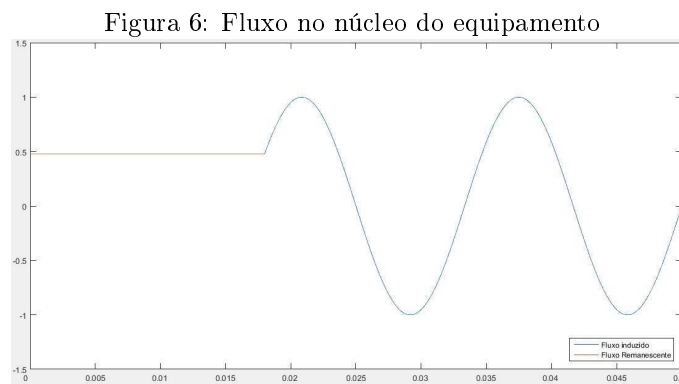
O fluxo de remanência, ou fluxo remanescente, corresponde ao valor do fluxo residual (λ_r) quando no processo de desmagnetização a corrente elétrica assume o valor zero.

3 Técnicas para Redução de Correntes de Energização

Nas subseções seguintes são apresentadas algumas das formas de redução das correntes inrush propostas em alguns artigos estudados.

3.1 Chaveamento Controlado com Conhecimento do Fluxo Remanescente

Segundo descreve BRONZEADO et al. (2014), uma alternativa ao uso dos resistores de pré-inserção é o uso do chaveamento controlado, que consiste no controle do fechamento elétrico dos polos do disjuntor, de forma que a tensão aplicada nos enrolamentos do transformador estabelece um fluxo que coincida com o fluxo que seria induzido pela tensão do sistema, caso não houvesse desenergização anterior do equipamento. Este comportamento do fluxo é exemplificado na da Figura 6, onde, estão representados o fluxo remanescente no equipamento após sua desenergização (constante), e o fluxo que é induzido pelo sistema, devido à tensão do sistema.



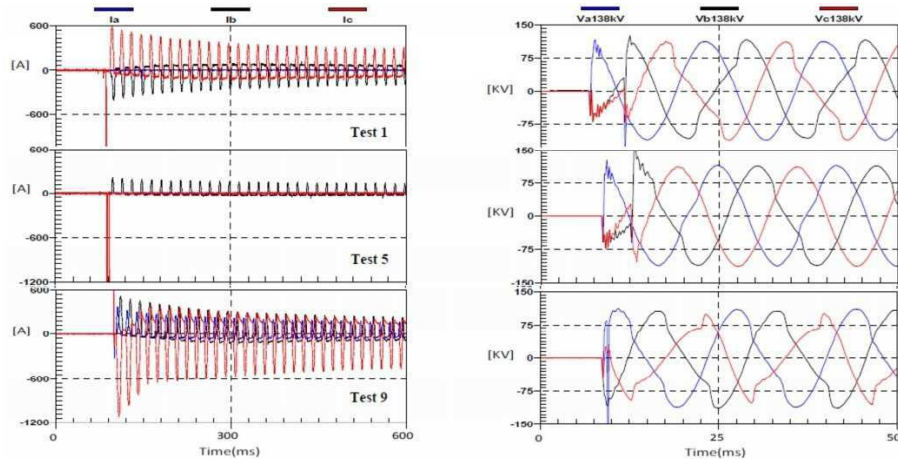
Fonte: o próprio autor

Devido ao fato de o fluxo induzido ter o mesmo sentido do fluxo residual, reduz-se a corrente no instante de energização do transformador. Caso houvesse

defasagem entre o fluxo induzido e o remanescente, a corrente de energização precisaria ser mais elevada de forma que o fluxo no transformador passasse a acompanhar a tensão do sistema.

BRONZEADO et al. (2014) exemplificaram os efeitos do chaveamento controlado por meio de alguns teste com um transformador de 230/138kV e 100MVA, corrente nominal de 251A. Na Figura 7 é possível observar os resultados de três testes, e suas características são descritas na Tabela 1.

Figura 7: Resultados dos Testes em um transformador de 230/138kV e 100MVA



Fonte: BRONZEADO et al.

Tabela 1: Características dos testes no transformador de 230/138kV e 100MVA

| Teste | Características |
|--------|---|
| Test 1 | Energização controlada do transformador sem conhecimento do fluxo remanescente, que foi considerado nulo. |
| Test 5 | Energização controlada do transformador com conhecimento do fluxo remanescente. |
| Test 9 | Energização não controlada do transformador. |

Fonte: o próprio autor.

É possível observar em *Test 1* que o primeiro polo a ser fechado foi o da fase A, seguido, 1/4 de ciclo depois, pelos polos das fases B e C. Apesar do controle do chaveamento, a não consideração do fluxo remanescente levou a uma saturação do núcleo do transformador, como pode ser visto através da distorção

das formas de onda das tensões no secundário do mesmo.

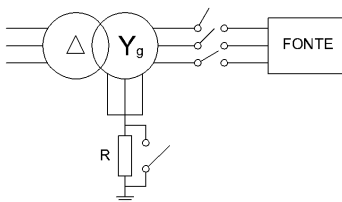
No caso do teste *Test 5*, com o conhecimento prévio do fluxo remanescente do núcleo, calculado a partir do decaimento das tensões medido durante a desenergização anterior do equipamento (BRONZEADO et al., 2009), e a partir de então o controle do fechamento dos polos, é possível observar uma redução considerável na corrente de *inrush* do equipamento, atingindo cerca de 48% de sua corrente nominal.

No caso em que não houve controle do fechamento dos polos, *Test 9*, a corrente de energização chegou a atingir um pico de 2,5 vezes a corrente nominal do equipamento na fase C, além de causar uma grave distorção na tensão nos terminais do secundário, devido à saturação do núcleo.

3.2 Chaveamento Sequenciado das Fases com Uso de Impedância de Neutro

Segundo o proposto por CUI et al. (2005), um chaveamento sequenciado das fases de um transformador, com o ponto de neutro aterrado por um resistor, Figura 8, tem a capacidade de reduzir a corrente de *inrush* de um transformador. Durante o chaveamento sequenciado, este resistor se comporta como um resistor ligado em série ao circuito equivalente do transformador. Segundo ABDUSALAM; XU (2007), uma resistência equivalente a 8,5% da reatância de magnetização não saturada, pode levar a uma redução de 80 a 90% da corrente de *inrush*.

Figura 8: Esquema de Chaveamento Controlado.



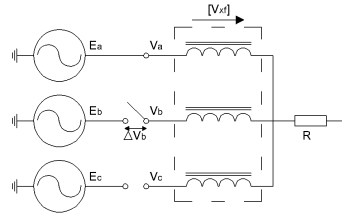
Fonte: o próprio autor

Este método apresenta desempenho semelhante ao uso de resistores de pré-inserção. Porém, por envolver o uso de apenas um resistor e visto que, conforme afirmado por BRONZEADO et al. (2014) "*A adição de resistores de pré-inserção em disjuntores já existentes requer a inclusão de uma câmara auxiliar com um custo adicional de 25 a 30% do valor nominal do disjuntor e somente pode ser aplicado quando há possibilidade em função do projeto do disjuntor. Se tal adaptação não for possível, apenas a troca completa do disjuntor é que permite lançar mão deste recurso (resistor de pré-inserção).*", o chaveamento controlado se torna menos custoso, além de dissipar uma pequena potência, visto que em regime permanente, o resistor conduz uma pequena corrente de

neutro.

Segundo XU et al. (2005), a tensão de regime permanente sobre os disjuntores tem grande impacto sobre a amplitude da corrente de *inrush*. Assim, uma análise em regime permanente do circuito equivalente do transformador, 9, possibilita a determinação dessa tensão.

Figura 9: Circuito Elétrico Equivalente.



Fonte: o próprio autor

Ainda segundo XU et al., as equações de regime permanente para o transformador podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} V_{xf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Axf} \\ V_{Bxf} \\ V_{Cxf} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} X_s & X_m & X_m \\ X_m & X_s & X_m \\ X_m & X_m & X_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde X_s e X_m são as impedâncias própria e mútuas, respectivamente.

Durante o chaveamento da primeira fase, fase A, o resistor do neutro funciona como um resistor de pré-inserção, por estar em série com a fase. Durante o chaveamento da segunda fase, fase B, a corrente de inrush é fortemente influenciada pelo valor de ΔV_B . Da figura 9, a equação para a determinação de ΔV_B é dada como:

$$\Delta V_B = E_B - V_B \quad (8)$$

onde

$$V_N = R_N I_A \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} E_B \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} X_s & X_m & X_m \\ X_m & X_s & X_m \\ X_m & X_m & X_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ V_N \\ V_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

das equações 8, 9 e 10 é possível chegar a:

$$|\Delta V_B| = E \sqrt{3 + (X_m - X_s) \frac{X_m + 2X_s + \sqrt{3}R_N}{R_N^2 + X_s^2}} \quad (11)$$

Da mesma forma, para o chaveamento da terceira fase, fase C, chegamos às equações:

$$\Delta V_C = E_C - V_C \quad (12)$$

$$V_N = R_N (I_A - I_B) \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ V_C \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} X_s & X_m & X_m \\ X_m & X_s & X_m \\ X_m & X_m & X_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ V_N \\ V_N \end{bmatrix} \quad (14)$$

e assim,

$$|\Delta V_C| = E \sqrt{\frac{9R_N^2 + (X_s + 2X_m)^2}{4R_N^2 + (X_s + X_m)^2}} \quad (15)$$

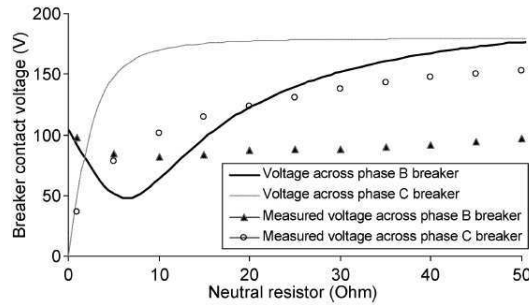
De posse dessas equações, é possível calcular a corrente em cada fase no instante do chaveamento.

XU et al. (2005) exemplificam estes resultados ao simular e testar o mesmo transformador utilizado em CUI et al. (2005), que apresenta as seguintes características:

- 138 MVA;
- 72 - 13,8 kV, Y - Δ ;
- $Z_{mag} \approx 20\Omega$;

Na Figura 10 são apresentados os valores da diferença de potencial nos terminais do disjuntor obtidos para diferentes valores de R_N .

Figura 10: Simulação e teste de ΔV , das fases B e C, para diferentes valores de R_n

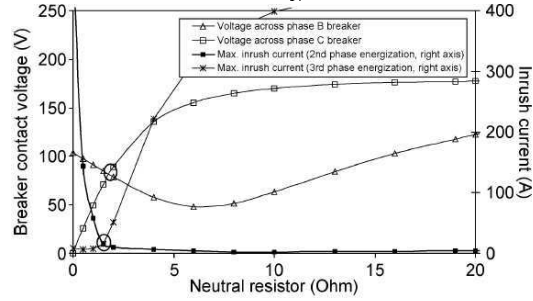


Fonte: XU et al.

É possível observar que, inicialmente, a tensão ΔV_b decresce com o aumento de R_n , enquanto que a tensão ΔV_c aumenta. Fato que pode ser observado ao se analisar as equações 11 e 15.

Na Figura 11 é apresentada uma comparação entres os valores de ΔV_b e ΔV_c , bem como para as correntes de inrush I_b e I_c , em função de R_N .

Figura 11: Comparação entre os valores de ΔV e das correntes de inrush das fases B e C, para diferentes valores de R_N



Fonte: XU et al (2005).

É possível identificar pela Figura 11 que o melhor valor de R_N é aquele que leva à interseção entre as curvas das tensões ΔV_b e ΔV_c , ponto este que leva às menores correntes I_b e I_c . Da mesma forma, é possível obter a equação para a melhor resistência do neutro a partir das equações 11 e 15, igualando-as.

$$3 + (X_m - X_s) \frac{X_m + 2X_s + \sqrt{3}R_N}{R_N^2 + X_s^2} = \frac{9R_N^2 + (X_s + 2X_m)^2}{4R_N^2 + (X_s + X_m)^2} \quad (16)$$

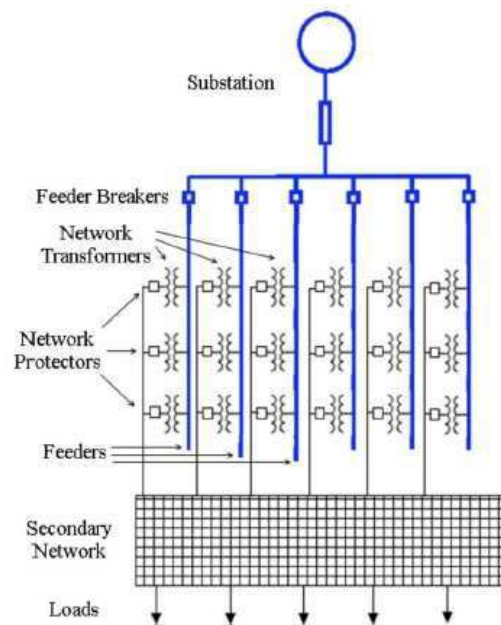
A equação 16 não possui solução fechada, mas pode ser solucionada numericamente.

3.3 Desmagnetização do Núcleo

A forma de mitigação das correntes de *inrush* em transformadores proposta por KOVAN et al. (2011) é o uso de fontes de tensão contínuas, ligadas aos transformadores desligados para reduzir o fluxo remanescente do núcleo.

KOVAN et al. (2011) exemplifica o problema das correntes de *inrush* em sistemas de distribuição, onde existem vários transformadores ligados em paralelo (Figura 12), drenando múltiplas correntes de *inrush* nos diferentes alimentadores do sistema.

Figura 12: Representação de um Sistema de Distribuição com Múltiplos Alimentadores.



Fonte: KOVAN et al (2011).

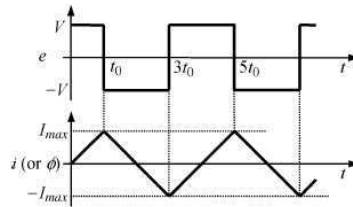
A técnica adotada por KOVAN et al. (2011) consistiu do uso de uma fonte CC de baixa tensão, uma chave eletrônica e um sistema de controle. As simulações foram feitas em um sistema de média tensão (25kV) com 40 transformadores de 500kVA distribuído ao longo do alimentador.

Utilizando a técnica proposta, é possível reduzir o fluxo remanescente

do núcleo aplicando-se uma tensão alternada, como a da Figura 13.

Uma vez que a corrente em um indutor não saturado é uma função linear e diretamente proporcional ao tempo, é possível calcular a corrente que passará pelo enrolamento do transformador. Até o instante t_0 , a tensão positiva cria uma corrente crescente linearmente com o tempo, de t_0 a $3t_0$, a tensão da fonte dc é negativa, criando uma corrente que decresce linearmente com o tempo, até que no instante $3t_0$ a polaridade da tensão muda novamente e a corrente volta a crescer (Figura 13).

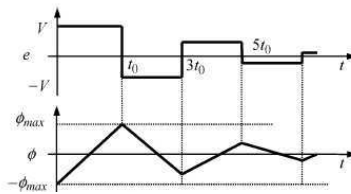
Figura 13: Tensão e Corrente no transformador.



Fonte: KOVAN et al (2011).

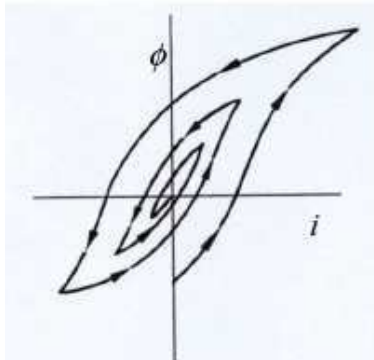
Ao se aplicar uma tensão da mesma forma que na Figura 13, porém com amplitude variável, obtemos uma corrente também variável. Uma vez que o fluxo em um indutor é proporcional à corrente, $\phi = Li$, se esta corrente for decrescente (Figura 14), obtemos um fluxo que diminui com o passar do tempo (Figura 15).

Figura 14: Tensão e Corrente de amplitude variável.



Fonte: KOVAN et al (2011).

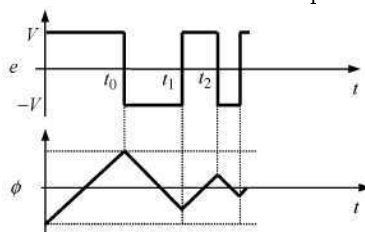
Figura 15: Fluxo decrescente no núcleo.



Fonte: KOVAN et al (2011).

Outra possibilidade para a tensão aplicada sobre o transformador é uma tensão de amplitude constante, porém de frequência variável. Esta variação na frequência se dá de forma crescente, de modo a reduzir o tempo em que a tensão tem valor positivo ou negativo a cada inversão que ocorra. Esta redução nos intervalos subsequentes diminui a corrente nos enrolamentos, o que faz com que o fluxo diminua do mesmo modo que no caso anterior.

Figura 16: Tensão e Corrente de frequência variável.



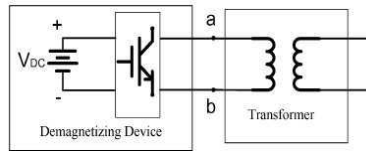
Fonte: KOVAN et al (2011).

O uso de uma fonte com frequência variável, apresenta, segundo KOVAN et al. (2011), duas vantagens em relação a fonte de amplitude variável.

1. A implementação do método através de conversores e fontes de tensão disponíveis é mais simples.
2. A eliminação do fluxo residual é mais rápida.

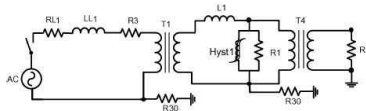
KOVAN et al. (2011) utilizaram o EMTP-RV (*Eletromagnetic Transients Program*) para simular o esquema proposto em um transformador. Na Figura 17 é apresentado o modelo do dispositivo de desmagnetização, a forma como ele é ligado ao transformador e o modelo do transformador monofásico (Figura 18) implementados no software.

Figura 17: Modelo do Dispositivo de Desmagnetização.



Fonte: KOVAN et al (2011).

Figura 18: Modelo de um Transformador Monofásico.

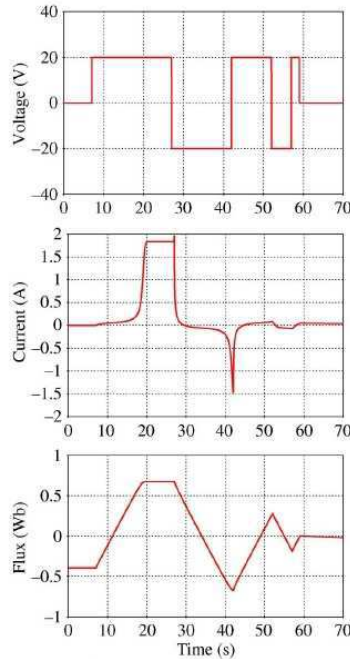


Fonte: KOVAN et al (2011).

Mediante a simulação, utilizando a estratégia de amplitude constante e frequência variável da tensão aplicada, busca-se desmagnetizar o núcleo deste transformador. Como pode ser visto na Figura 19, o fluxo remanescente no transformador é de $-0,38\text{Wb}$. O primeiro degrau de tensão tem por objetivo levar o transformador a uma saturação positiva do núcleo, para que se possa ter uma referência inicial. A aplicação dos degraus de tensão subsequentes, de duração decrescente, tem como objetivo a redução do fluxo no núcleo do transformador.

É possível ver pelo gráfico do fluxo que a aplicação dessa tensão de frequência variável reduz, em cerca de um minuto, o fluxo residual a um valor quase nulo, aplicando uma tensão de amplitude baixa (20V) em comparação aos níveis de tensão dos transformadores de distribuição (13,8kV).

Figura 19: Tensão, Corrente e Fluxo no transformador simulado.



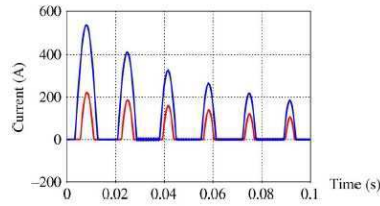
Fonte: KOVAN et al (2011).

A fim de se obter uma comparação entre a corrente de *inrush* após o uso da técnica proposta, as simulações foram feitas de forma a se obter a corrente de *inrush* mais alta possível, com chaveamento na fase 0° da tensão e com fluxo residual, de forma que o fluxo imposto pela tensão se somasse ao fluxo remanescente e o transformador alcançasse uma super-saturação, duas vezes o fluxo nominal adicionado ao fluxo remanescente. Na Figura 20 são apresentados os resultados obtidos para as duas simulações.

A corrente de pico no pior caso, atingiu um nível de 550A, equivalente a 58pu no transformador de 127kVA simulado. No caso com fluxo residual nulo, o pico de corrente caiu para 210A (22pu). Assim, é possível observar que a eliminação do fluxo residual reduziu a corrente de *inrush* em cerca de 60%.

KOVAN et al. (2011) apresentaram, ainda, os resultados em um transformador trifásico de 500kVA. O modelo utilizado para o transformador trifásico pode ser visto na Figura 21, foi proposto por MORK et al. (2007), e adaptado

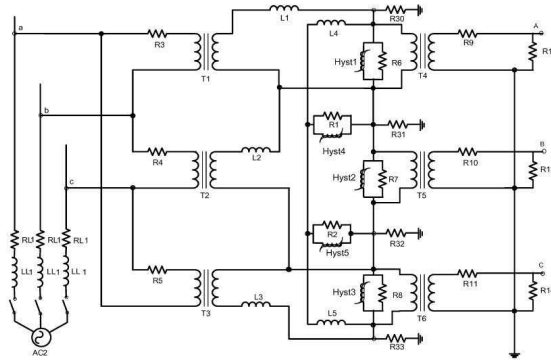
Figura 20: Correntes de *inrush* nos dois casos simulados.



Fonte: KOVAN et al (2011).

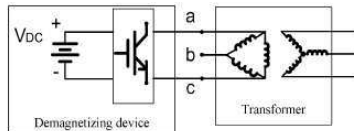
por KOVAN et al. (2011). Aplicando-se o mesmo dispositivo de desmagnetização, com tensão de 20V, aplicado ao transformador trifásico (Figura 22), é possível reduzir o fluxo no núcleo a valores quase nulos.

Figura 21: Modelo Adaptado do Transformador Trifásico.



Fonte: KOVAN et al (2011).

Figura 22: Dispositivo de Desmagnetização Ligado ao Transformador.

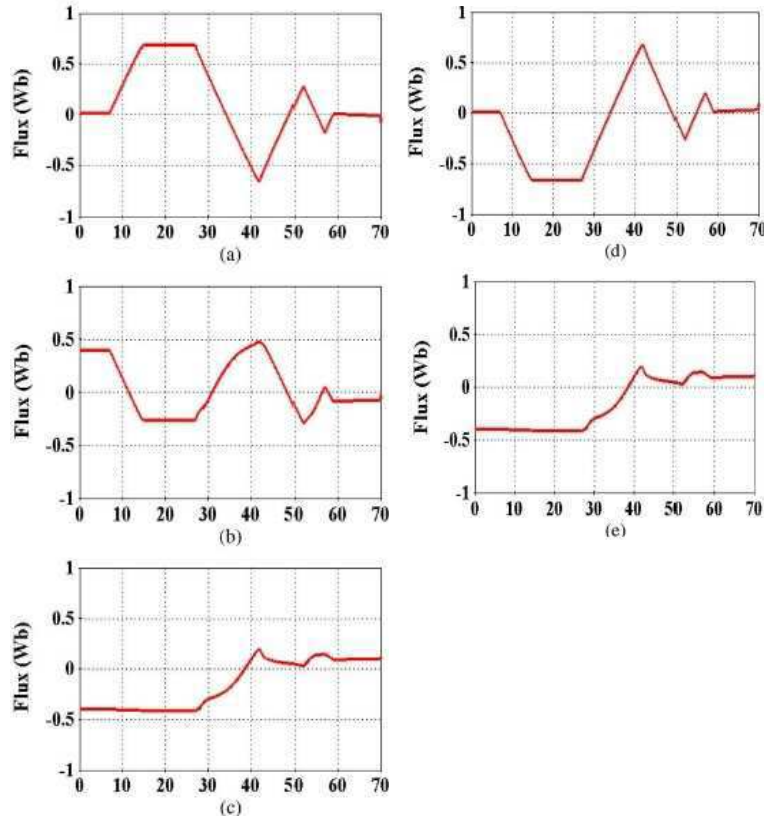


Fonte: KOVAN et al (2011).

KOVAN et al. apresentaram os fluxos em cada ramo Hyst do modelo do transformador trifásico (Figura 23), além disso, segundo esses autores, a diferença na corrente de desmagnetização foi um aumento de 1,8A para 2,6A no

maior pico da corrente, o que significa que é necessária uma fonte com potência máxima de 52W para desmagnetizar um transformador de 500kVA.

Figura 23: Fluxo em Cada Ramo, (a)Hyst1, (b)Hyst2, (c)Hyst3, (d)Hyst4, (e)Hyst5.



Fonte: KOVAN et al (2011).

É possível ver que o fluxo em todos os ramos do modelo decaem para um valor próximo de zero. KOVAN et al. (2011) apresentam, assim, os resultados para o transformador trifásico, em simulações realizadas da mesma forma que para o transformador monofásico, na Tabela 2, com o valor do primeiro pico de corrente para cada uma das três fases.

Aplicando a estratégia para o caso da Figura 12 com 40 transformadores com a mesma técnica, foi possível reduzir o fluxo remanescente em todos transformadores conectados ao alimentador, com apenas uma fonte CC ligada

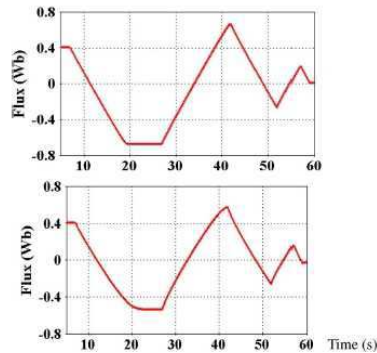
Tabela 2: Resultados das Simulações para um Transformador Trifásico

| Fase | Corrente máxima sem redução do fluxo residual [A] | Corrente máxima com redução do fluxo residual [A] |
|------|---|---|
| A | 767 | 184 |
| B | 251 | -3.2 |
| C | -767 | -184 |

Fonte: o próprio autor.

à entrada do mesmo. A Figura 24 mostra o fluxo no ramo Hyst1 do primeiro e trigésimo oitavo transformador.

Figura 24: Fluxo nos Transformadores número 1 e 38, respectivamente, ligados ao alimentador



Fonte: KOVAN et al (2011).

Para desmagnetizar, então, o núcleo dos 40 transformadores de 500kVA ligados ao alimentador mencionado, seria necessária uma potência 40 vezes maior que a de um único transformador, o equivalente a 2,08kW.

A partir dos resultados apresentados por KOVAN et al., é possível ver que mediante o uso de uma solução relativamente simples, é possível obter uma redução de pelo menos 60% da corrente de *inrush* de cada transformador.

4 Resultados de Simulações

A fim de verificar a eficácia das técnicas anteriormente apresentadas, simulações foram realizadas, com o auxílio do *Simulink*, com dois transformadores. Um monofásico e outro trifásico, com as seguintes características

- Transformador Monofásico

150 kVA

7967,4 - 220 V

$R_1 = 10,44 \Omega$ (resistência do primário)

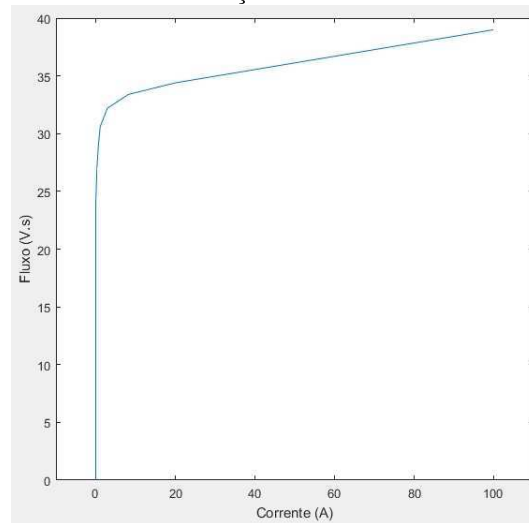
$L_1 = 62,3 \text{ mH}$ (indutância do primário)

$R_2 = 0 \Omega$ (resistência do secundário)

$L_2 = 0 \text{ H}$ (indutância do secundário)

$R_m = 120 \text{ k}\Omega$ (resistência de perdas no núcleo)

Figura 25: Curva de Saturação do Transformador Monofásico.



Fonte: o próprio autor

- Transformador Trifásico

100 MVA

230 - 69 kV

$R_1 = 0,0051$ pu (resistência do primário)

$L_1 = 0,0659$ pu (indutância do primário)

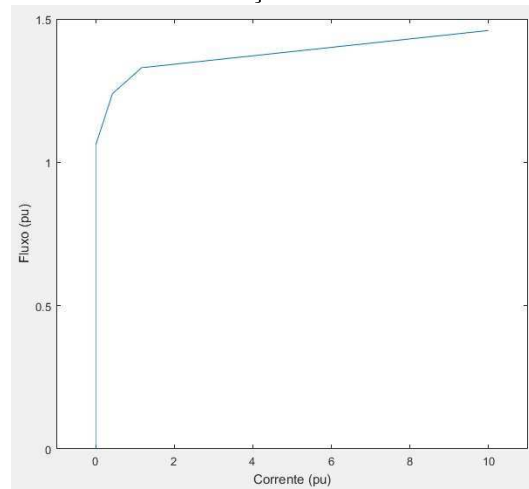
$R_2 = 0,0152$ pu (resistência do secundário)

$L_2 = 0,1977$ pu (indutância do secundário)

$R_m = 637,67$ pu (resistência de perdas no núcleo)

$L_0 = 0,5$ pu (indutância de sequência zero do fluxo de retorno no núcleo)

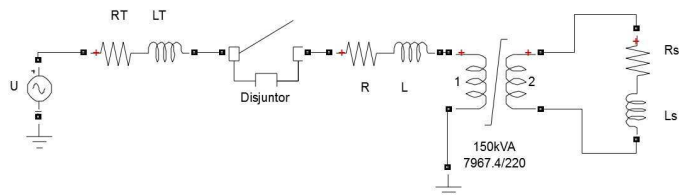
Figura 26: Curva de Saturação do Transformador Trifásico.



Fonte: o próprio autor

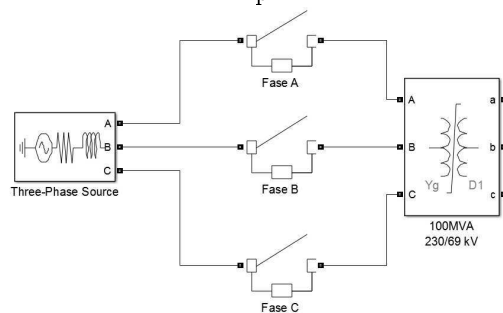
Nas Figuras 27 e 28 são apresentados, ainda, os circuitos elétricos montados no *Simulink* para o transformador monofásico e trifásico respectivamente.

Figura 27: Circuito Simulado para o Transformador Monofásico.



Fonte: o próprio autor

Figura 28: Circuito Simulado para o Transformador Trifásico.



Fonte: o próprio autor

Os elementos de cada circuito das Figuras 27 e 28 são descritos a seguir.

- Caso monofásico

$$U = 11267,6 \text{ V}$$

$$R_T = 0,06 \Omega \text{ (resistência da fonte)}$$

$$L_T = 0,64 \text{ mH (indutância da fonte)}$$

$$R = 10,1 \Omega \text{ (resistência da linha)}$$

$$L = 53,3 \text{ mH (indutância da linha)}$$

$$R_S = 3,2 \text{ G}\Omega \text{ (resistência da carga)}$$

$$L_S = 0,24 \text{ mH (indutância da carga)}$$

- Caso trifásico

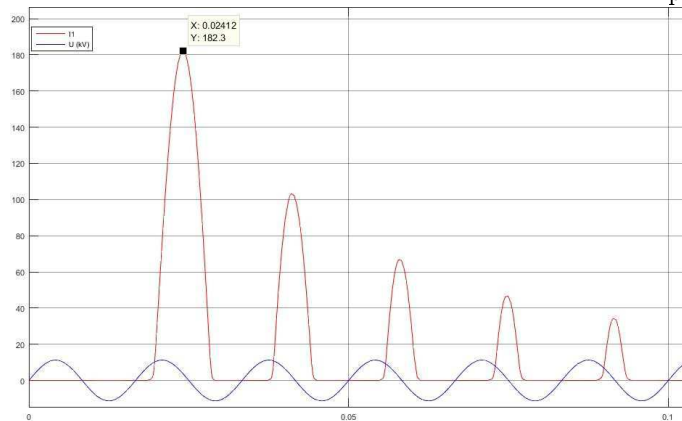
$$U = 230\text{kV}$$

$$S_{cc} = 15 \text{ GVA (potência de curto circuito da fonte)}$$

$$X/R = 32 \text{ (relação reatância/resistência da fonte)}$$

Em uma primeira simulação com o transformador monofásico, com a finalidade de obter uma das correntes de *inrush* mais altas possíveis, realizou-se o chaveamento do disjuntor no ponto de zero da tensão com um fluxo remanescente no núcleo do transformador equivalente a 20V.s. O resultado desta simulação é apresentado na Figura 29.

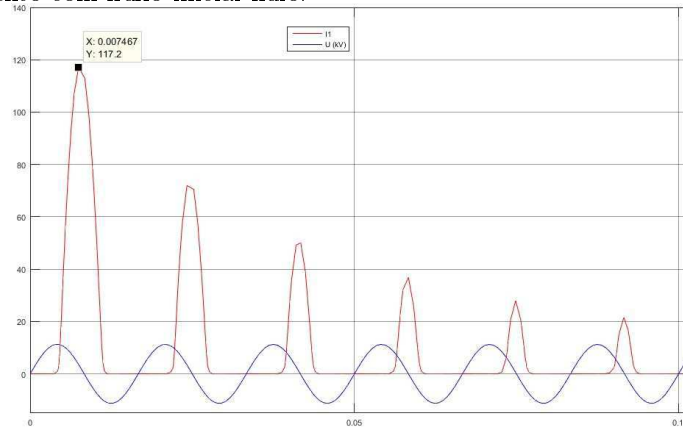
Figura 29: Corrente de *inrush* do transformador monofásico no pior caso.



Fonte: o próprio autor

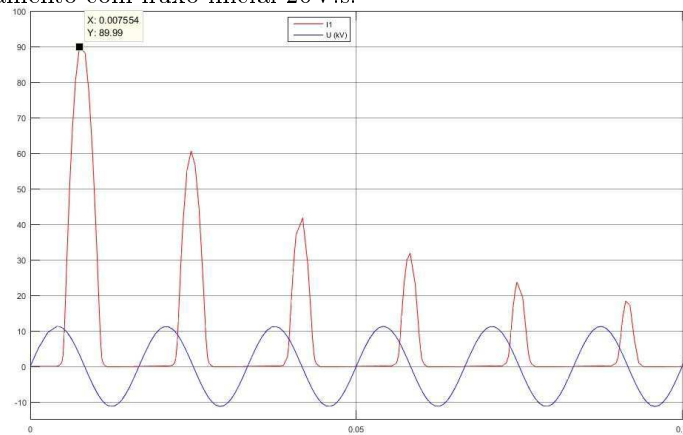
Utilizando-se das possibilidades discutidas, duas outras simulações foram feitas para o transformador monofásico. Na primeira, desmagnetizou-se o núcleo do transformador (fluxo inicial nulo no modelo da simulação) e o fechamento do disjuntor ocorreu novamente no pior ponto da onda de tensão. Em uma outra simulação, o fechamento do disjuntor ocorreu em 90° de fase da tensão da fonte (pico da onda), para 20V.s de fluxo inicial. Nas Figuras 30 e 31 são apresentados os resultados obtidos.

Figura 30: Corrente de *inrush* do transformador monofásico no pior instante de chaveamento com fluxo inicial nulo.



Fonte: o próprio autor

Figura 31: Corrente de *inrush* do transformador monofásico no melhor instante de chaveamento com fluxo inicial 20V.s.

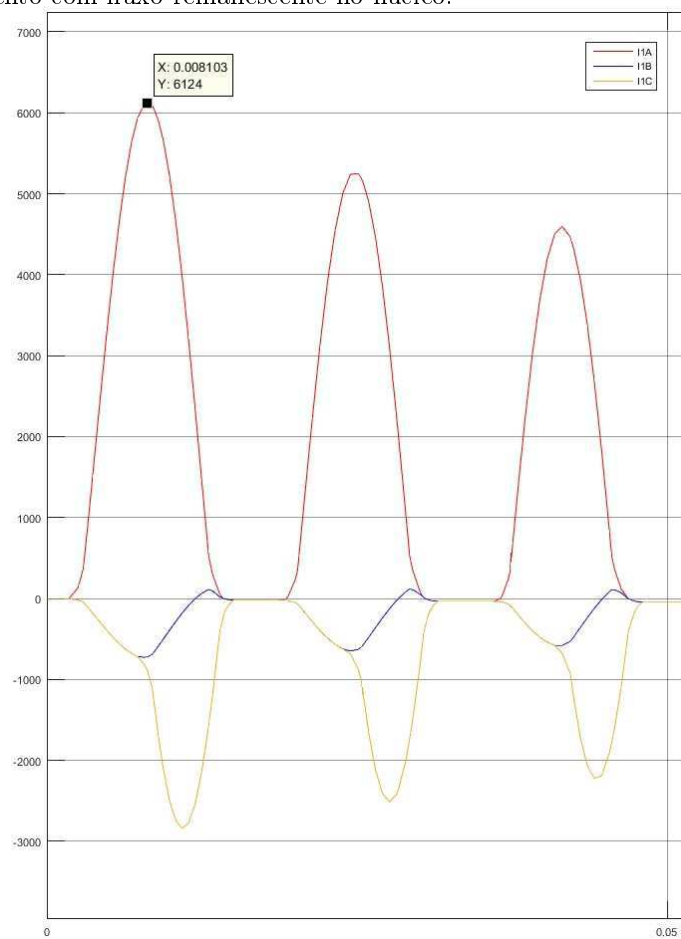


Fonte: o próprio autor

É possível observar que a utilização de cada uma das técnicas em separado foi capaz de reduzir a corrente de energização do transformador em cerca de 36% no primeiro caso e 51% no segundo.

No caso trifásico, o procedimento foi repetido. Na primeira simulação, o fluxo inicial em cada coluna do transformador era de 0,85, 0,5 e -0,5 pu. O fechamento do disjuntor se deu de forma simultânea para as três fases no ponto em que a tensão da fase A era nula. Na Figura 32 é apresentado o resultado desta simulação.

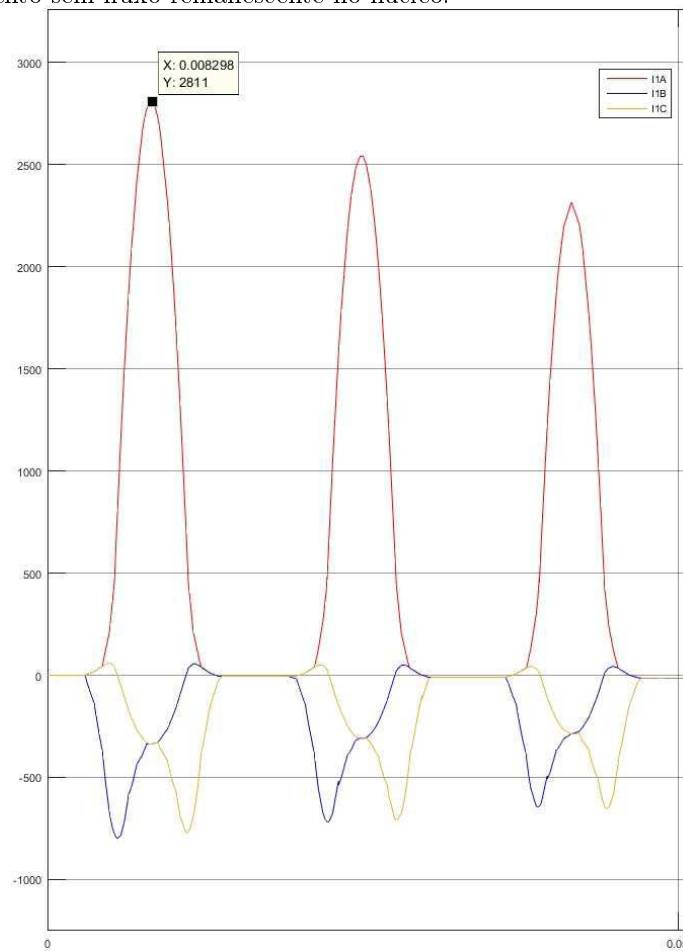
Figura 32: Correntes de *inrush* do transformador trifásico no pior instante de chaveamento com fluxo remanescente no núcleo.



Fonte: o próprio autor

Outras simulações foram feitas para se observar as estratégias de redução das correntes em transformadores trifásicos. Na Figura 33 são apresentadas as correntes em cada fase quando do fechamento dos polos do disjuntor também no instante em que a tensão da fase A era zero, porém com fluxo inicial nulo.

Figura 33: Correntes de *inrush* do transformador trifásico no pior instante de chaveamento sem fluxo remanescente no núcleo.



Fonte: o próprio autor

Duas outras simulações foram então realizadas para os melhores instantes de energização. Na primeira, Figura 34, o fechamento dos polos de todas as fases ocorreu simultaneamente no ponto de máximo da tensão da fase A.

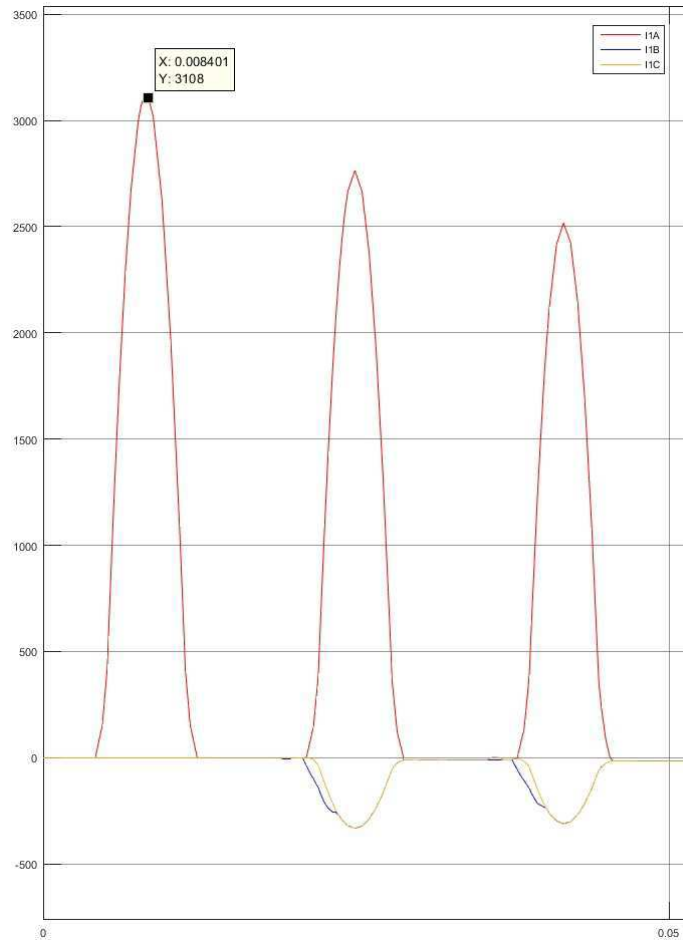
Figura 34: Correntes de *inrush* do transformador trifásico com chaveamento no pico da fase A com fluxo remanescente no núcleo.



Fonte: o próprio autor

Na Figura 35 é apresentado o resultado da simulação da energização do transformador trifásico com o fechamento de cada polo ocorrendo no instante de máximo de suas respectivas fases.

Figura 35: Correntes de *inrush* do transformador trifásico com chaveamento nos picos de cada fase com fluxo remanescente no núcleo.



Fonte: o próprio autor

Nota-se, então, a partir dos resultados apresentados, uma grande diminuição das correntes de energização do transformador trifásico quando comparados ao primeiro caso. As reduções foram de:

- 54% para o caso em que não havia fluxo remanescente no núcleo.
- 50,6% na fase A e 38% na fase C, se comparado ao pico da fase A no pior caso, para a primeira simulação com controle de instante de fechamento
- 50,3% para o pico na fase A no segundo teste, porém com as correntes das fases B e C próximas à corrente nominal do transformador.

5 Conclusões

Apesar de serem impossíveis de eliminar, é essencial que se reduza ao máximo as correntes de *inrush* nos sistemas de potência. Essas correntes, além de danos a equipamentos e diminuição da qualidade de energia, através de afundamentos de tensão quando da energização de transformadores, causam, também, a má atuação dos sistemas de proteção.

Técnicas como o controle dos instantes de chaveamento dos polos do disjuntor foram capazes de reduzir drasticamente os picos de corrente para cerca de 48% da corrente nominal, no caso em que se conhecia o fluxo remanescente no núcleo do transformador.

O uso de um chaveamento sequenciado das chaves, com alguns milissegundos entre o fechamento dos polos, além do cálculo de um resistor ideal a ser utilizado entre o neutro e a terra do transformador, possibilita a redução das correntes de *inrush* de maneira ainda mais significativa, entre 80% e 90% de acordo com os autores aqui expostos.

Com o auxílio da eletrônica de potência é possível desmagnetizar diversos transformadores ligados a um alimentador de um sistema de distribuição, reduzindo as correntes de *inrush* do sistema, de maneira menos dispendiosa, uma vez que um único dispositivo era capaz de desmagnetizar o núcleo de dezenas de transformadores.

A partir do que aqui foi apresentado, sugere-se então a análise futura das combinações das técnicas propostas pelos autores apresentados, bem como de outras técnicas existentes, de forma a avaliar a viabilidade técnica e econômica.

Referências

- ABDULSALAM, S. G.; XU, W. A sequential phase energization method for transformer inrush current reduction; transient performance and practical considerations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 208–216, Jan 2007. ISSN 0885-8977.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of electric circuits*. New York, NY: McGraw-Hill, 2013. ISBN 0073380571.
- BRONZEADO, H. et al. *Benefícios Operacionais da Aplicação de Manobras Controladas de Equipamentos de Alta Tensão*. 2014.
- BRONZEADO, H. et al. *Transformer Inrush is Over: An Experience with a 100MVA, 230/138 kV Three-phase Transformer Controlled Energizing*. 2009.
- CUI, Y. et al. A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction - part i: Simulation and experimental results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 943–949, April 2005. ISSN 0885-8977.
- GUERRA, F. das C. F. *Distúrbios de Correntes em Redes Elétricas: Notas de aula*.
- KOVAN, B. et al. Mitigation of inrush currents in network transformers by reducing the residual flux with an ultra-low-frequency power source. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1563–1570, July 2011. ISSN 0885-8977.
- MARDEGAN, C. Proteção dos transformadores - parte 1. *O Setor Elétrico*, p. 11, Setembro 2010.
- MORK, B. et al. Hybrid transformer model for transient simulation: Part i - development and parameters. In: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–1. ISSN 1932-5517.
- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. ISBN 978-85-8055-373-4.
- XU, W. et al. A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction - part ii: theoretical analysis and design guide. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 950–957, April 2005. ISSN 0885-8977.