

Paralelismo de Transformadores E Transitório de Magnetização de Transformadores

**Disciplina: SEL0329 - Conversão Eletromecânica de
Energia**

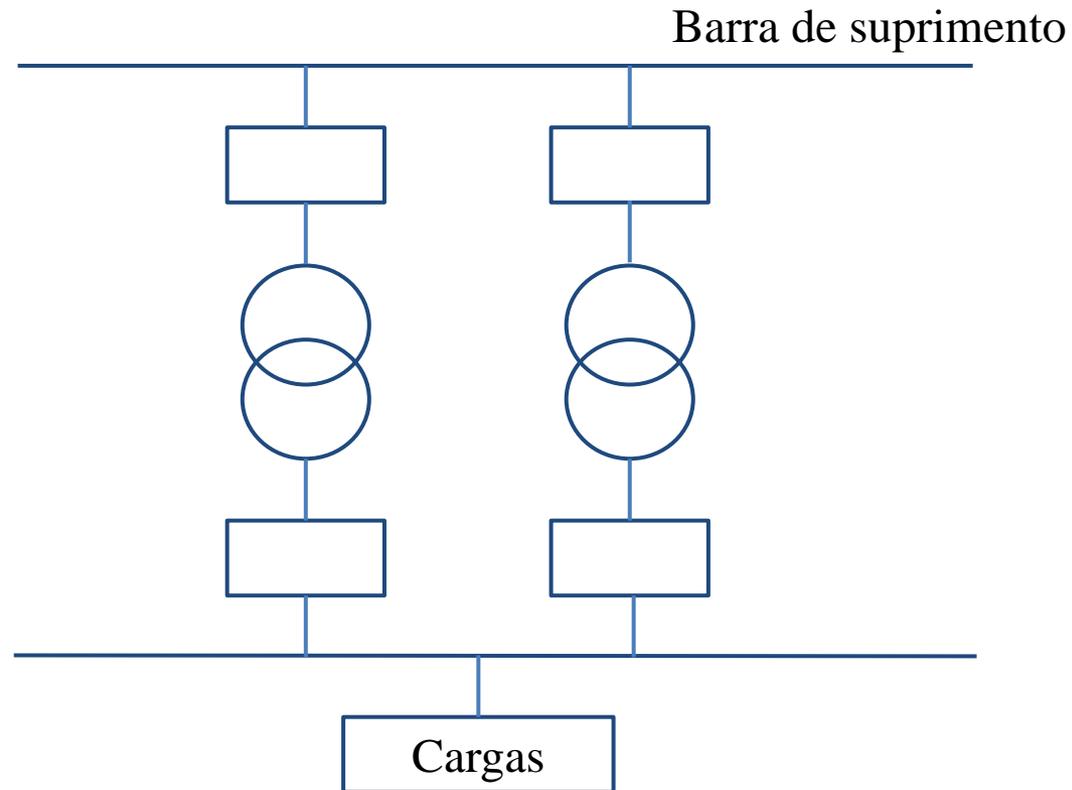
Gustavo Gonçalves dos Santos

Tópicos

- **Paralelismo de transformadores**
 - Motivações;
 - Corrente de circulação;
 - Condições de paralelismo de transformadores;
 - Divisão de cargas entre transformadores em paralelo.

- **Transitório de Magnetização de Transformadores**
 - A corrente de excitação transitória de um transformador;
 - Energização ideal de transformadores;
 - *Inrush* solidário;
 - Fatores que controlam a duração e magnitude do *inrush* de magnetização;
 - Problemas na proteção diferencial.

Paralelismo de transformadores



Por que a operação em paralelo de transformadores?

Paralelismo de transformadores

- Rendimento máximo

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_C + P_{Cu}}$$

Considerando:

$$f_c \approx \frac{I}{I_n} \text{ e } f p_n = f_p$$

$$\eta(f_c) = \frac{P_n f_c}{P_n f_c + P_C + P_{Cu_n} f_c^2}$$

$$\eta' = \frac{P_n (P_n f_c + P_C + P_{Cu_n} f_c^2) - P_n f_c (P_n + 2P_{Cu_n} f_c)}{(P_n f_c + P_C + P_{Cu_n} f_c^2)^2}$$

Paralelismo de transformadores

- Máximo rendimento

$$\eta' = \frac{P_n(P_n f_c + P_C + P_{Cu_n} f_c^2) - P_n f_c (P_n + 2P_{Cu_n} f_c)}{(P_n f_c + P_C + P_{Cu_n} f_c^2)^2} = 0$$

$$P_n(P_n f_c + P_C + P_{Cu_n} f_c^2) = P_n f_c (P_n + 2P_{Cu_n} f_c)$$

$$P_n f_c + P_C + P_{Cu_n} f_c^2 = P_n f_c + 2P_{Cu_n} f_c^2$$

$$f_c = \sqrt{\frac{P_C}{P_{Cu_n}}}$$

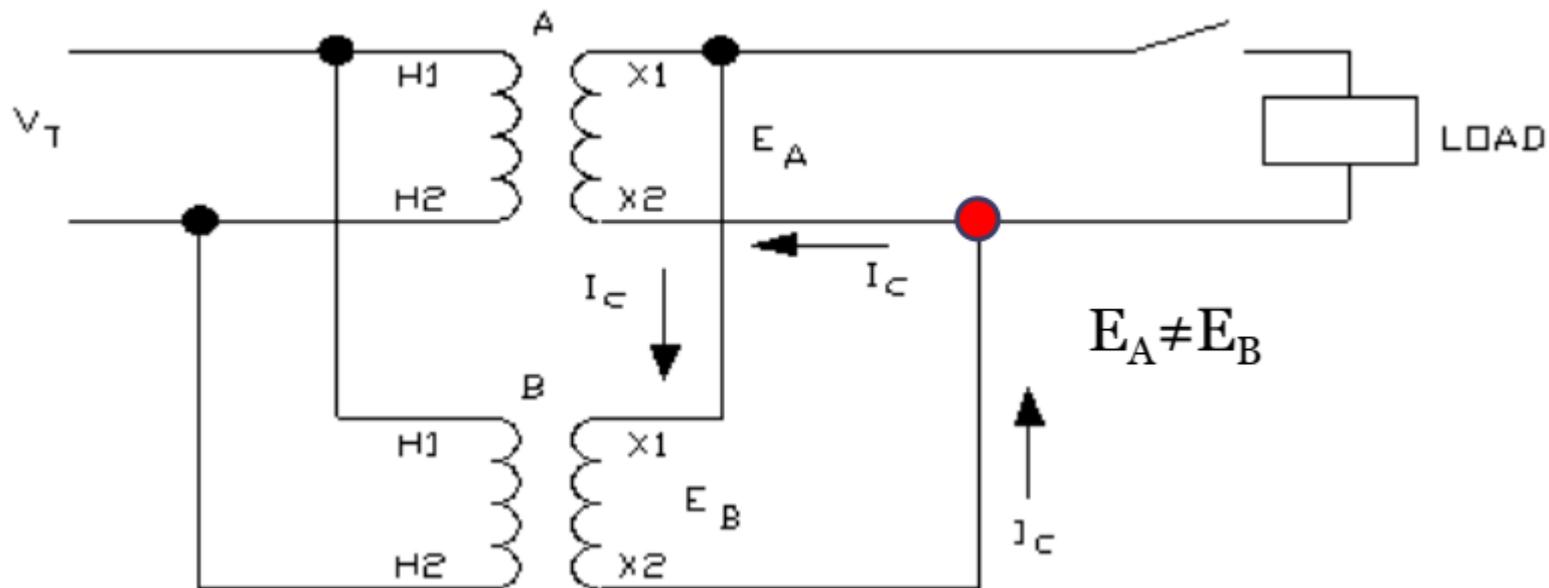
Conforme resultados anteriores, na condição de rendimento máximo (com fator de potência unitário), as perdas no núcleo devem ser igual as perdas nos enrolamentos. Assim, **conclui-se que os transformadores são fabricados para obter o máximo rendimento próximo a plena carga.**

Paralelismo de transformadores

- Motivações
 - Melhora a **eficiência**;
 - Aumenta a **capacidade de carregamento** da subestação;
 - É geralmente **mais econômico** instalar um transformador em paralelo ao invés de substituir o transformador existente por uma unidade maior;
 - **Adiamento de investimentos**;
 - **Facilidade ou mesmo viabilização de transporte**;
 - **Confiabilidade** é aumentada.

Paralelismo de transformadores

- Corrente de circulação



$$I_C = \frac{E_A - E_B}{Z_A + Z_B}$$

Paralelismo de transformadores

- Exemplo - Corrente de circulação (I_c):
 - Dois transformadores monofásicos de 100 kVA operando em paralelo:

Transformador	Relação de transformação	R (Ω) (referida ao secundário)	X (Ω) (referida ao secundário)
A	2300 V – 460 V	0,028778	0,074060
B	2300 V – 450 V	0,029624	0,070251

Determinar a magnitude de I_c e o valor percentual de I_c em relação as correntes nominais de cada transformador.

Transformador	Relação de transformação	R (Ω) (referida ao secundário)	X (Ω) (referida ao secundário)
A	2300 V – 460 V	0,028778	0,074060
B	2300 V – 450 V	0,029624	0,070251

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_B}{Z_A + Z_B}$$

$$\dot{I}_C = \frac{460 - 450}{(0,028778 + 0,029624) + j(0,074060 + 0,070251)}$$

$$\dot{I}_C = 64,23 \angle -67,97^\circ$$

$$\frac{I_C}{I_A} = \frac{64,23}{217,39} = 29,55\%$$

29,55% da capacidade do transformador A é consumida por I_C

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{64,23}{222,22} = 28,91\%$$

28,91% da capacidade do transformador B é consumida por I_C

Condições de paralelismo de transformadores

- **OBRIGATÓRIA:** As razões entre tensões de linha dos transformadores devem ser iguais. Caso contrário, se houver uma pequena diferença:
- Na condição de **carregamento nulo: haverá corrente circulante no loop formado pelo enrolamento secundário;**
 - Na condição de **carregamento pleno:** a corrente circulante irá tender a produzir **inequidade da carga** distribuída nos dois transformadores e pode não ser possível levar o grupo de transformadores a carregamento completo (**um dos transformadores pode ficar sobrecarregado**).

Condições de paralelismo de transformadores

- **OBRIGATÓRIA: Os transformadores devem ter a mesma polaridade**
 - Se eles são conectados com polaridade incorreta então duas FEMs induzirão no secundário dos enrolamentos os quais estão em paralelo, atuarão juntas ao circuito secundário local e produzirão curto-circuito.

OBRIGATÓRIA para transformadores trifásicos

- **Os transformadores devem ter a mesma sequência de fase:**
 - Se forem diferentes, em cada ciclo, um par de fases irão permanecer curto-circuitadas.
- ***Os transformadores devem ter o ângulo relativo zero de defasamento entre as tensões de linha secundária.**

*Em alguns casos há defasagem intencional.

Condições de paralelismo de transformadores

- **OTIMIZAÇÃO:** Os transformadores devem ter impedâncias de dispersão percentuais iguais e a mesma razão entre reatância equivalente e resistência equivalente (X/R).
 - Se as unidades forem iguais, implica que os transformadores terão o mesmo carregamento. Caso contrário, as impedâncias de unidades de dispersão (em ohms) deverão ser inversamente proporcional ao carregamento do transformador;
 - A diferença das razões entre valores de resistência e reatância poderão resultar em diferentes ângulos de fase para as correntes de carregamento dos dois transformadores. Neste caso, um transformador trabalhará com um fator de potência mais alto enquanto que o outro com um fator de potência mais baixo. Por consequência, a potência real não será proporcionalmente compartilhada pelos transformadores.

Divisão de carga entre transformadores em paralelo

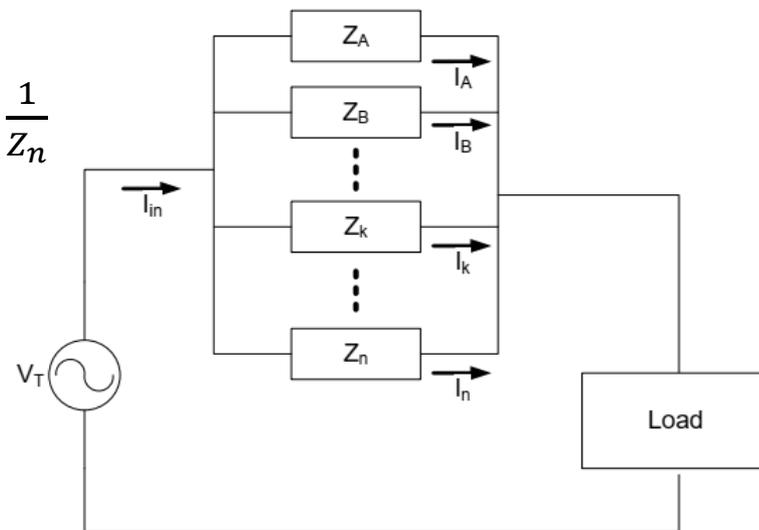
- Quando as razões de transformação forem iguais entre os transformadores, **as correntes de carga dividirão através das impedâncias dos enrolamentos dos transformadores.** Mais correntes fluirão por meio de baixas impedâncias.
- Considerando todas as impedâncias referidas ao mesmo lado do transformador:

$$Y_A = \frac{1}{Z_A}, Y_B = \frac{1}{Z_B}, \dots, Y_k = \frac{1}{Z_k}, \dots, Y_n = \frac{1}{Z_n}$$

Usando a regra do divisor de corrente:

$$Y_P = Y_A + Y_A + \dots + Y_k \dots + Y_n$$

$$I_k = I_{in} \left(\frac{Y_k}{Y_p} \right)$$



Divisão de carga entre transformadores em paralelo

➤ Exemplo

Um transformador de 100 kVA está operando em paralelo com um transformador de 200 kVA. Cada transformador possui a relação de transformação, 4160 – 240 V. As impedâncias de cada transformador (referidas ao lado de alta de tensão) são:

$$Z_{TA} = 2,8381 + j5,4686[\Omega] \text{ (transformador 100 kVA)}$$

$$Z_{TB} = 0,9518 + j3,4871[\Omega] \text{ (transformador 200 kVA)}$$

Determine:

- A corrente nominal (no lado de alta tensão) de cada transformador.**
- % da corrente do carregamento total drenada por cada transformador;**
- Máxima corrente de carga que pode fluir sem sobrecarregar nenhum dos transformadores.**

Divisão de carga entre transformadores em paralelo

Relação de transformação: 4160 – 240 V

$$Z_{TA} = 2,8381 + j5,4686 [\Omega] \text{ 100 kVA}$$

$$Z_{TB} = 0,9518 + j3,4871[\Omega] \text{ 200 kVA}$$

a) Corrente total (lado de alta tensão)

$$I_{TA} = \frac{100000}{4160} = 24,04 [A]$$

$$I_{TB} = \frac{200000}{4160} = 48,08 [A]$$

Divisão de carga entre transformadores em paralelo

Relação de transformação: 4160 – 240 V

$$Z_{TA} = 2,8381 + j5,4686 [\Omega] \text{ 100 kVA}$$

$$Z_{TB} = 0,9518 + j3,4871 [\Omega] \text{ 200 kVA}$$

b) % da corrente da carga (I_c) drenada por cada transformador

$$Y_{TA} = \frac{1}{Z_{TA}} = 0,1623 \angle -62,57^\circ$$

$$Y_{TB} = \frac{1}{Z_{TB}} = 0,2766 \angle -74,73^\circ$$

$$Y_P = Y_{TA} + Y_{TB} = 0,4367 \angle -70,24^\circ$$

$$I_{TA} = \frac{Y_{TA}}{Y_P} 100\% I_{carga} \Rightarrow \mathbf{I_{TA} = 37,16\% I_{carga}}$$

$$I_{TB} = \frac{Y_{TB}}{Y_P} 100\% I_{carga} \Rightarrow \mathbf{I_{TB} = 63,34\% I_{carga}}$$

Divisão de carga entre transformadores em paralelo

c) Máxima I_{carga} admitida (sem sobrecarga) para os dois transformadores:

1. $I_{TA} = 24,04 A$

$$\frac{I_{TA}}{I_{carga}} = 0,3716 \Rightarrow I_{carga} = 64,69A$$

$$S_{carga} = 4160 I_{carga}$$
$$S_{carga} \cong 268 \text{ kVA}$$

$I_{TB} = 0,6334 I_{carga} = 40,97A < 48,08 A$

2. $I_{TB} = 48,08 A$

$$\frac{I_{TB}}{I_{carga}} = 0,6434 \Rightarrow I_{carga} = 74,73A$$

$I_{TA} = 0,3716 I_{carga} = 27,77 A > 24,04 A$

Sobrecarga

Paralelismo de transformadores

- Operação econômica de transformadores em paralelo
 - Seja $(X-1)$ transformadores em paralelo, as perdas totais (P_t) será igual a:

$$P_t = (X - 1)P_C + \frac{P_{Cu}f_{ct}^2}{X - 1}$$

- Ao adicionarmos um transformador, o novo valor de perda total será:

$$P_{t'} = X P_C + \frac{P_{Cu}f_{ct}^2}{X}$$

Quando $P_t = P_{t'} \Rightarrow f_{ct} = \sqrt{\frac{X(X-1)P_C}{P_{Cu}}}$

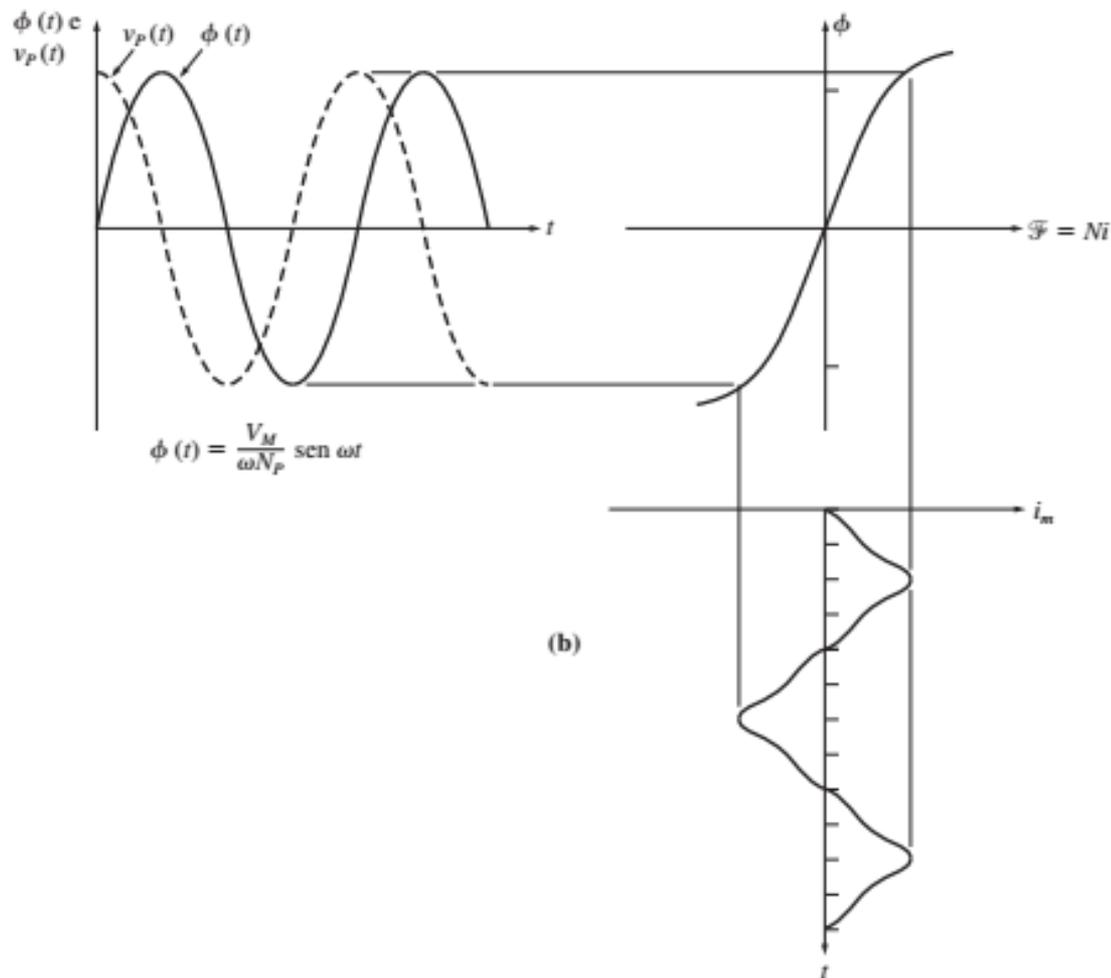
Acima desse fator de carga é vantajoso acrescentar um transformador

Corrente de excitação de um transformador

- A **corrente de energização** de um transformador é a corrente necessária **para produzir fluxo em um núcleo** ferromagnético do transformador. Consiste de duas parcelas:
 - **Corrente de magnetização i_M** : corrente necessária para produzir o fluxo no núcleo do transformador;
 - **Correntes de perdas no núcleo i_{h+p}** : correntes responsável pelas perdas por histerese e por correntes parasitas no núcleo.

Corrente de excitação de um transformador

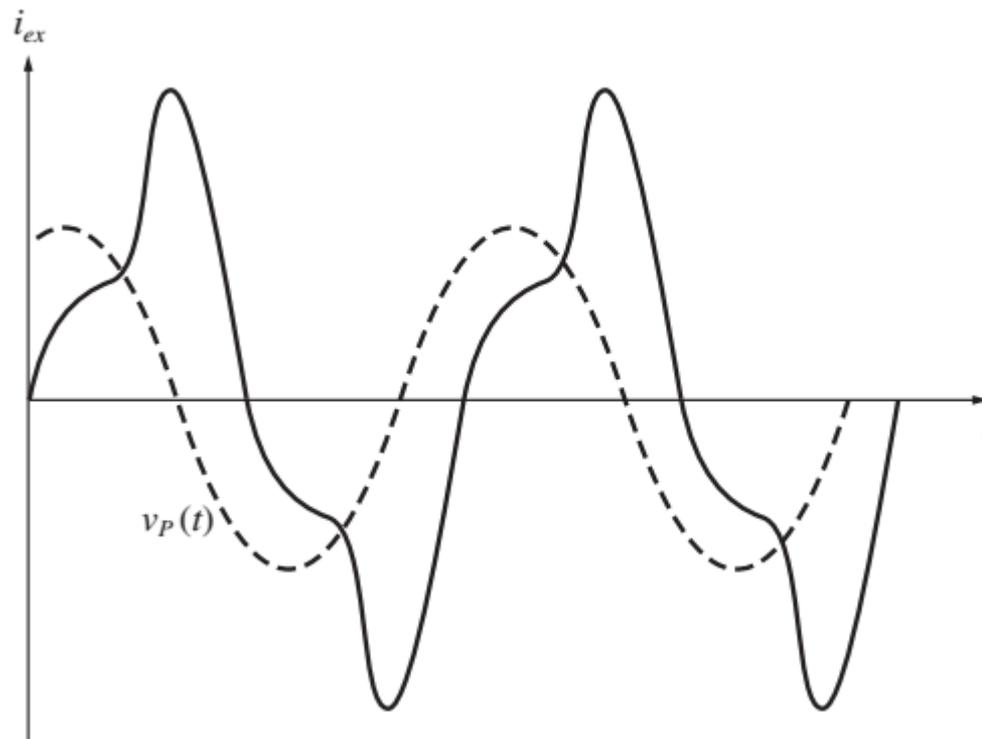
- Corrente de magnetização do transformador:



Corrente de excitação de um transformador

- Corrente total de excitação do transformador:

$$i_{ex} = i_m + i_{h+p}$$

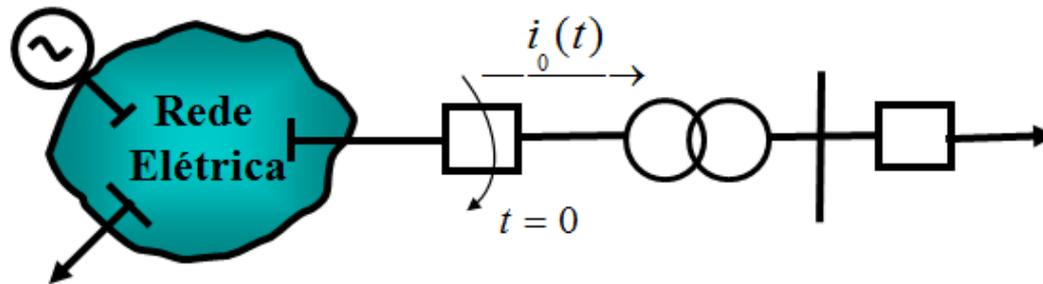


Transitório de Magnetização de Transformadores (*Inrush* de transformadores)

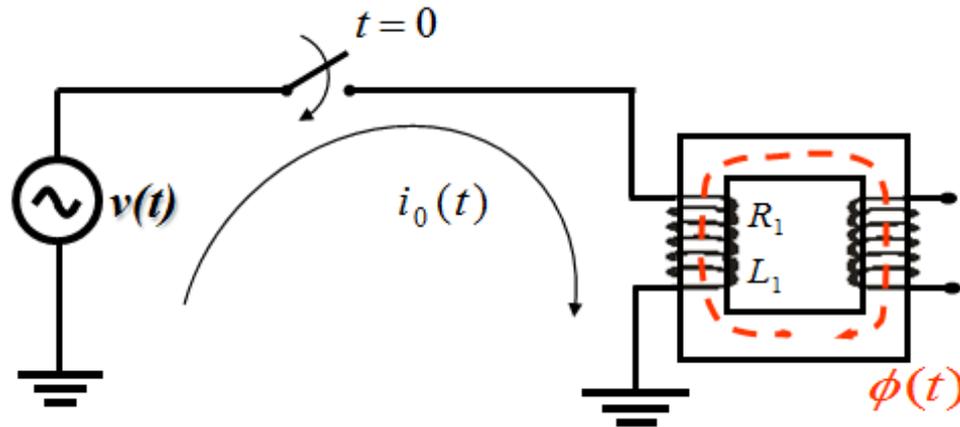
- Em **regime permanente** e condições normais de operação, a **corrente de excitação** de um transformador é normalmente **menos de 5% da corrente a plena carga**;
- Entretanto, no **momento da energização de um transformador**, a corrente transitória de energização pode ser de **10 a 20 vezes maior do que a corrente a plena carga**;
- O conhecimento dessa corrente de excitação permite:
 - Determinar o **máximo estresse mecânico** que pode ocorrer nos enrolamentos do transformador;
 - Ajustar a atuação da **proteção**.

Corrente de excitação transitória

- Interpretação física

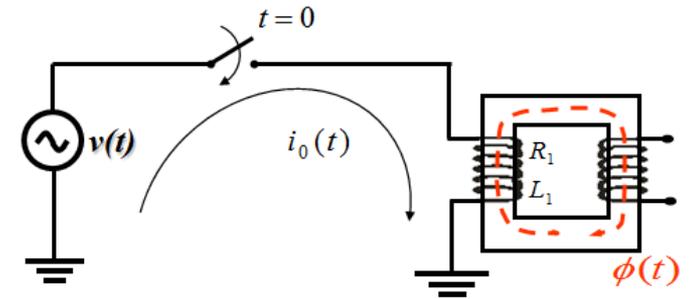


- Modelo



Corrente de excitação transitória

- Equacionamento



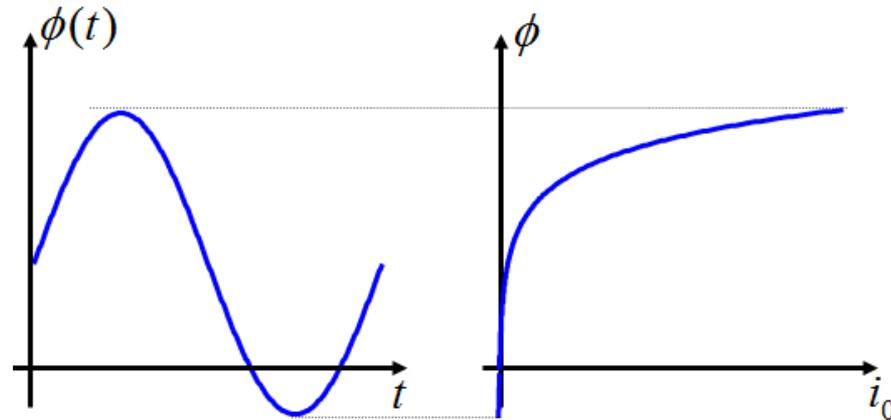
$$v(t) = V \sin(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Condições iniciais: $t = 0, \phi_0 = \pm \phi_r$

Solução

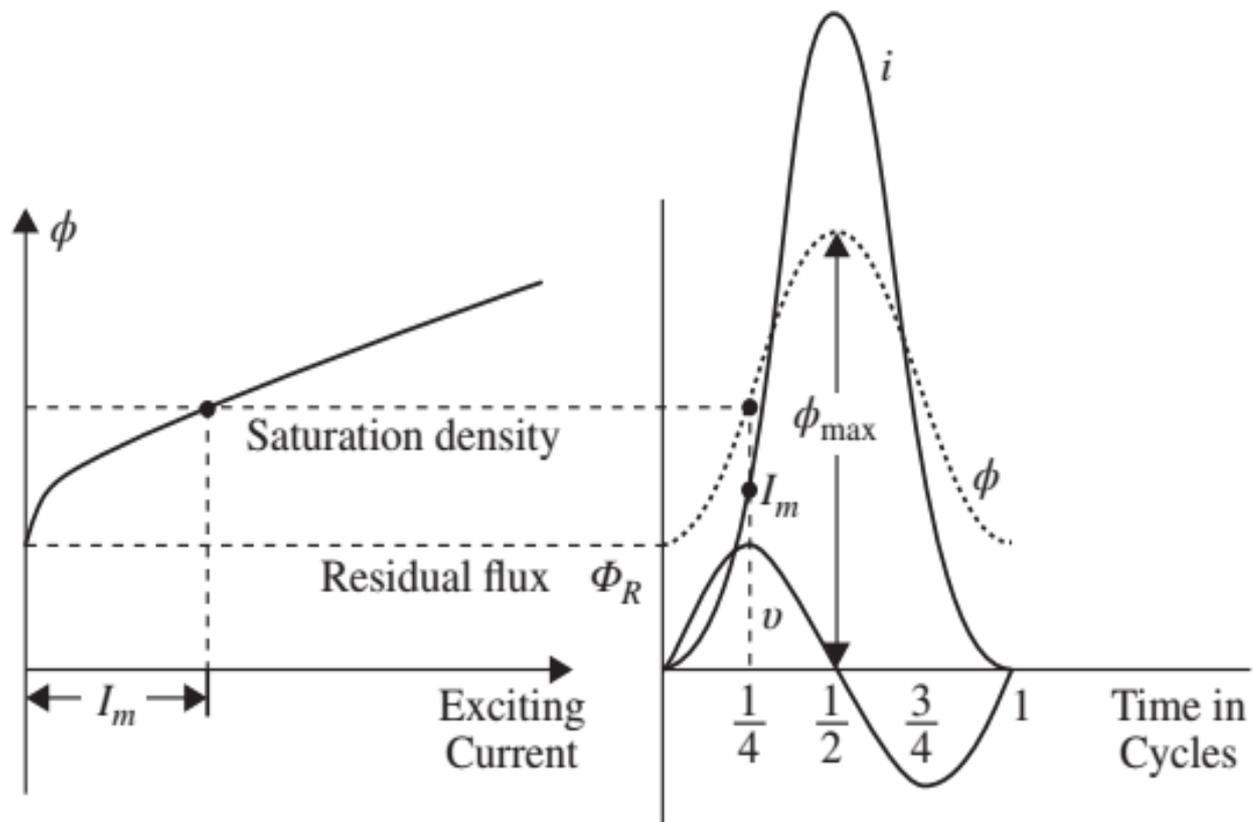
$$\phi(t) = (\phi_m \cos \theta \pm \phi_r) e^{\frac{-R_1}{L_1} t} - \phi_m \cos(\omega t + \theta)$$

Na relação: $\phi = f(i_0)$



Corrente de excitação transitória

- Derivação da onda de corrente de *inrush* a partir da curva de saturação de excitação



Corrente de excitação transitória

- Quando a excitação de um transformador é removida, a corrente de magnetização vai a 0. O fluxo, seguindo o loop de histerese, vai para o seu valor residual Φ_R .

- Sendo que (nos instantes iniciais, desconsiderando o amortecimento):

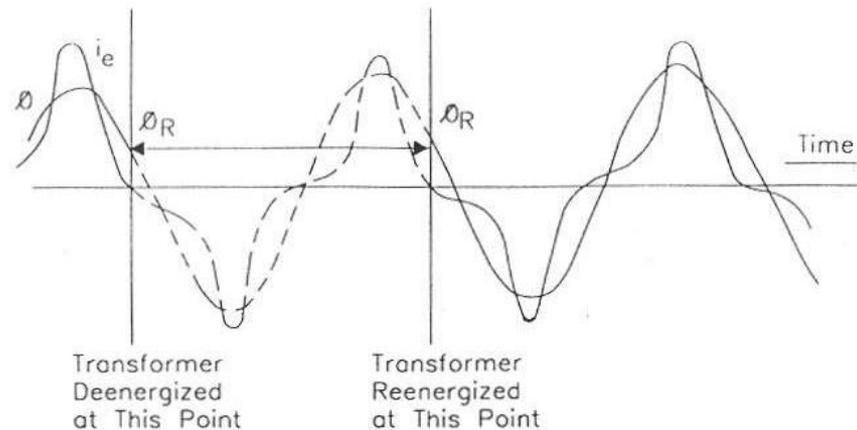
$$\phi(t) = \phi_m \cos \theta - \phi_m \cos(\omega t + \theta) \pm \phi_r$$

$$\phi = f(i_0)$$

- A **curva** ϕ_t é uma **senoide deslocada**, independentemente das características de saturação do circuito magnético;
- Teoricamente, o **valor máximo** do fluxo máximo é $(|\Phi_R| + 2|\phi_{max}|)$;

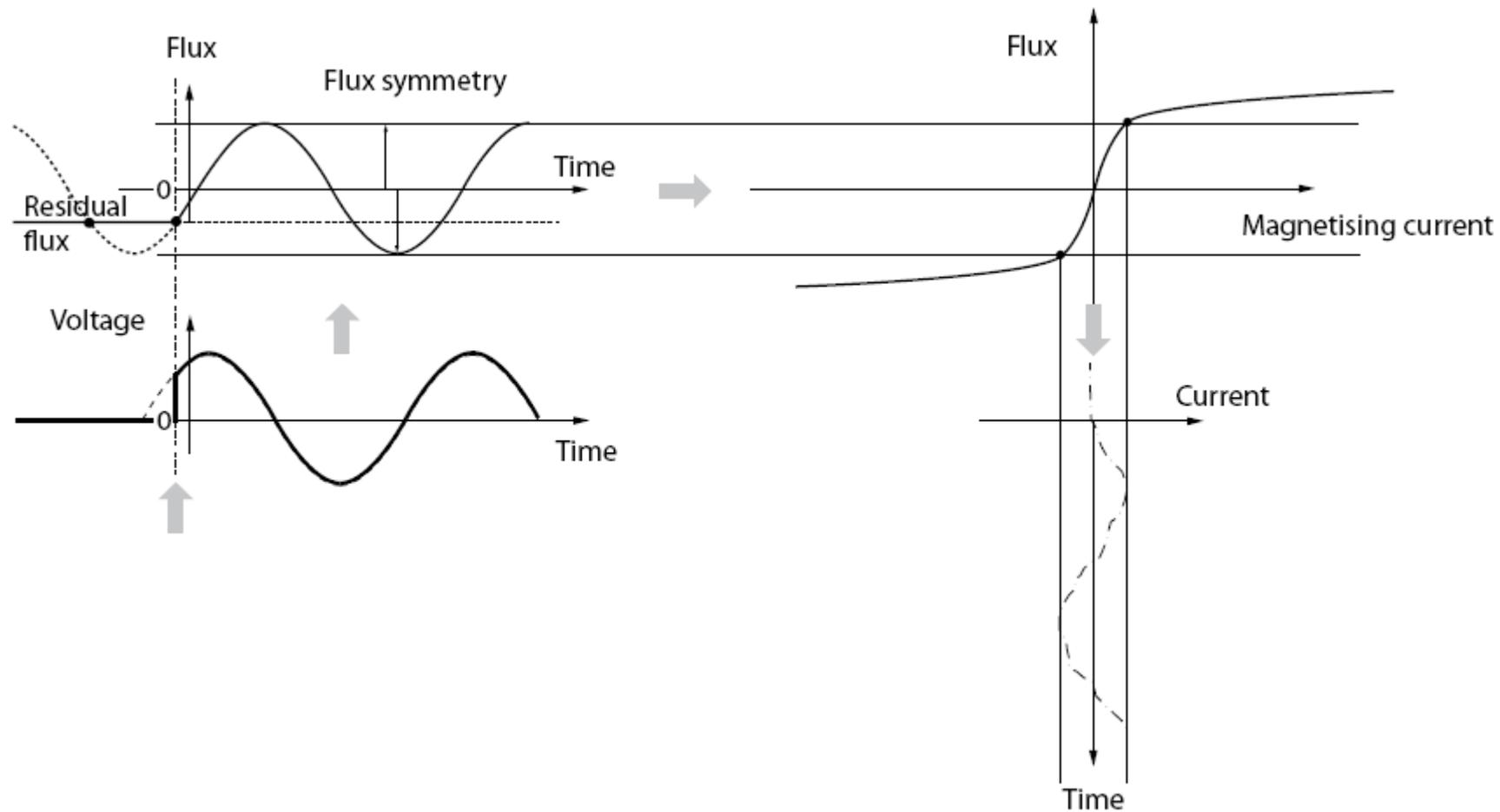
Inrush – Tempo correto de chaveamento

- Se o transformador fosse **reenergizado** no instante em que a forma de onda da tensão **correspondesse a densidade de fluxo residual** dentro do núcleo, existiria uma continuação suave da operação prévia com **nenhum transitório magnético**.



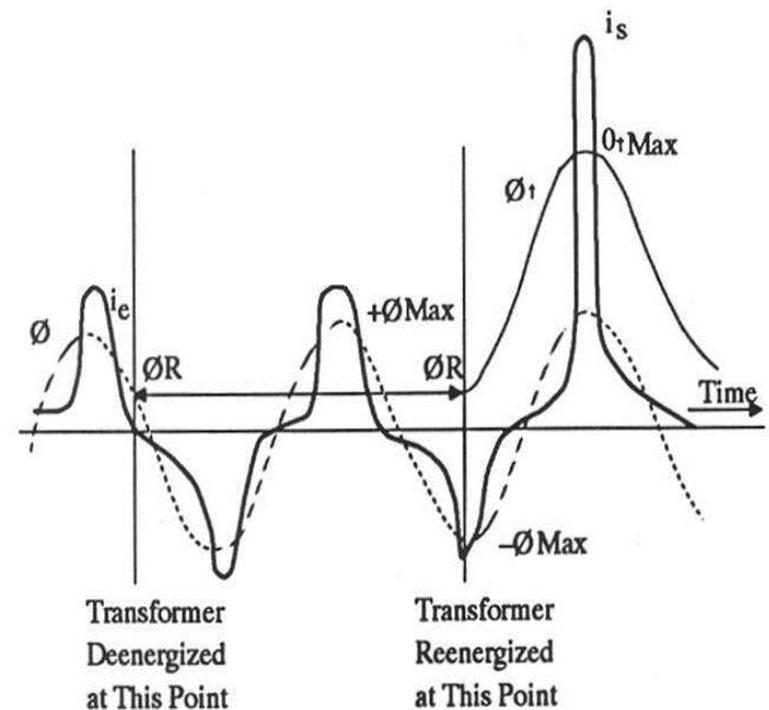
- **Na prática, entretanto, um transiente de magnetização é praticamente inevitável.**

Inrush – Tempo correto de chaveamento

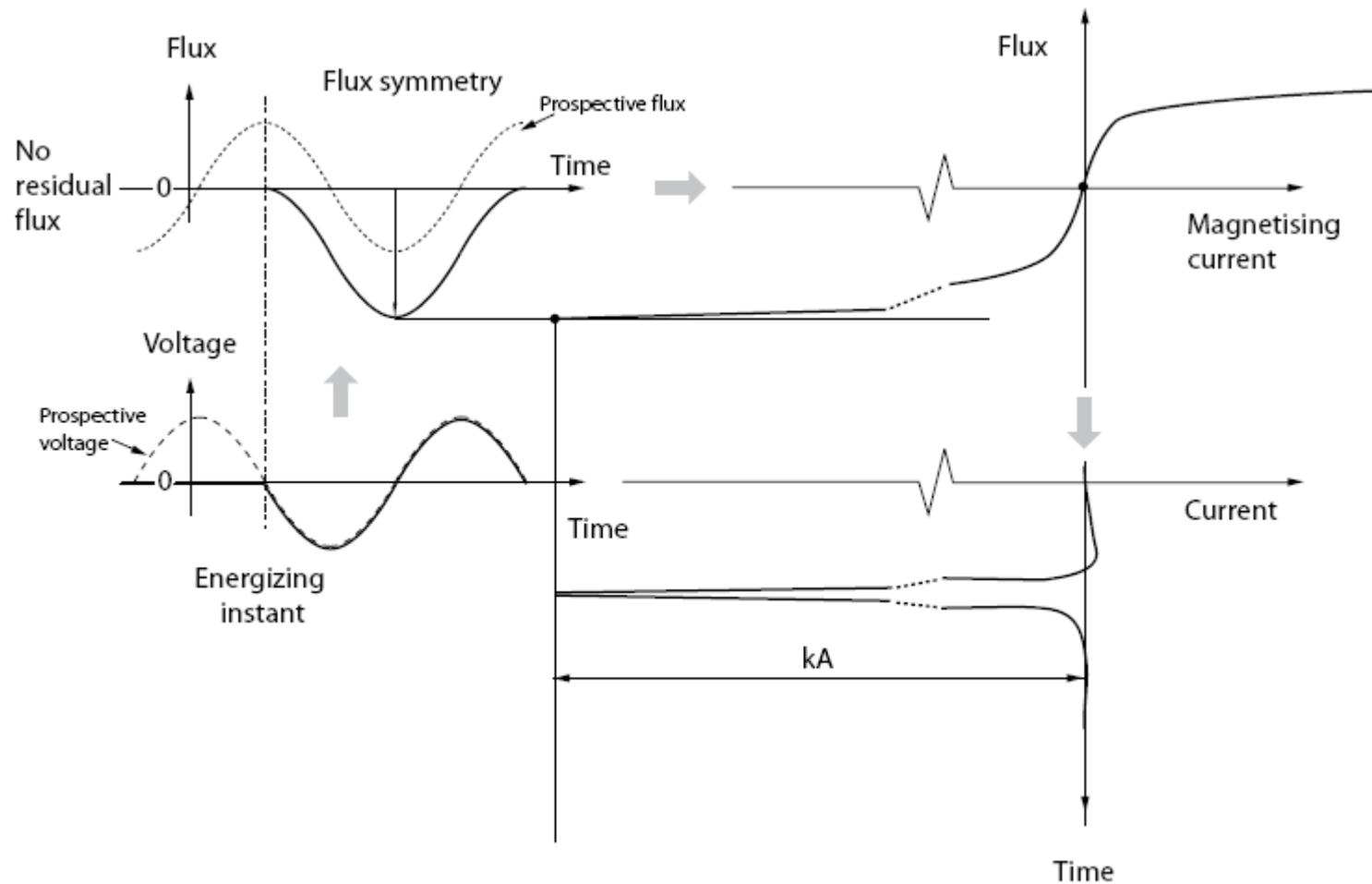


Corrente de excitação transitória

- Se o circuito for reenergizado no instante em que o **fluxo supostamente estaria no máximo valor negativo** ($-\Phi_{max}$) e o fluxo residual com o valor positivo (Φ_R), a forma de onda do fluxo, ao invés de começar no valor normal $-\Phi_{max}$ e aumentar ao longo do tempo, **irá começar com o valor residual Φ_R** .

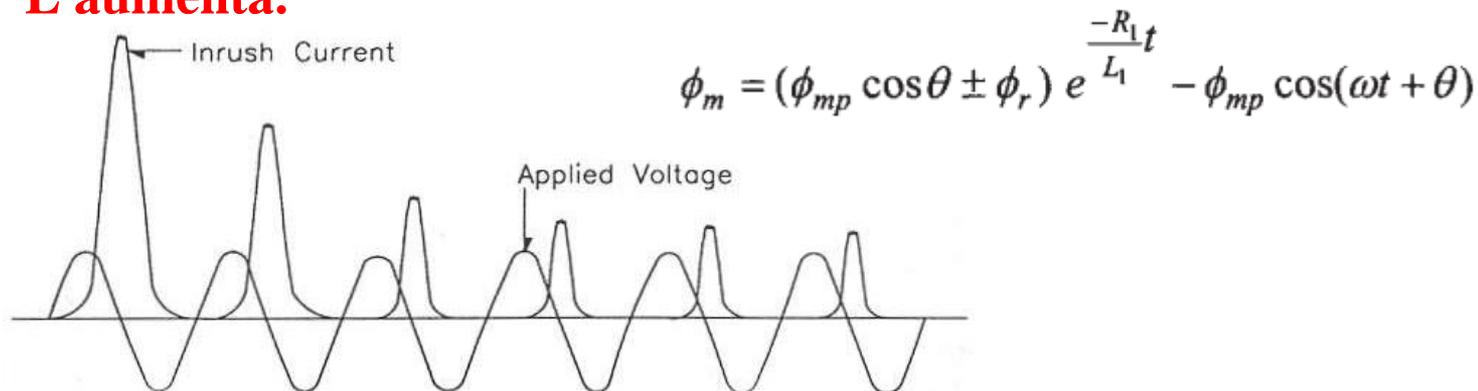


Inrush – Tempo incorreto de chaveamento



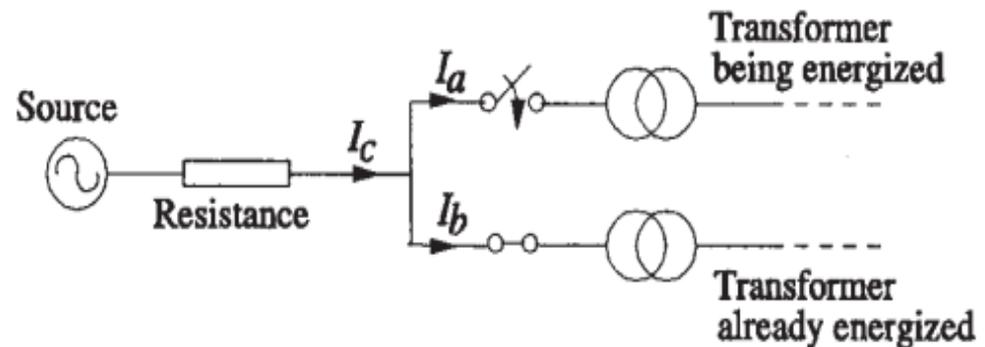
Corrente de excitação transitória

- **Para os primeiros ciclos, a corrente *inrush* decai rapidamente.** Posteriormente, entretanto, a corrente diminui muito lentamente, algumas podem levar muitos segundos se a resistência é baixa.
- A constante de tempo para o circuito **(L/R) não é constante**, L varia conforme o resultado de saturação do transformador. **Durante os primeiros ciclos, a saturação é alta e L é baixo. Em seguida, com as perdas que amortecem o circuito, a saturação diminui e L aumenta.**

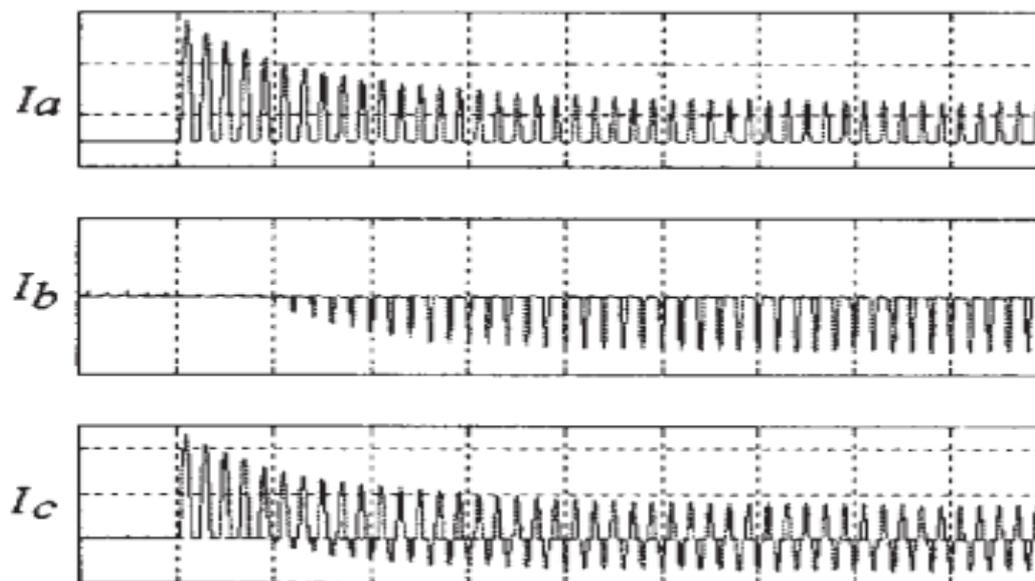
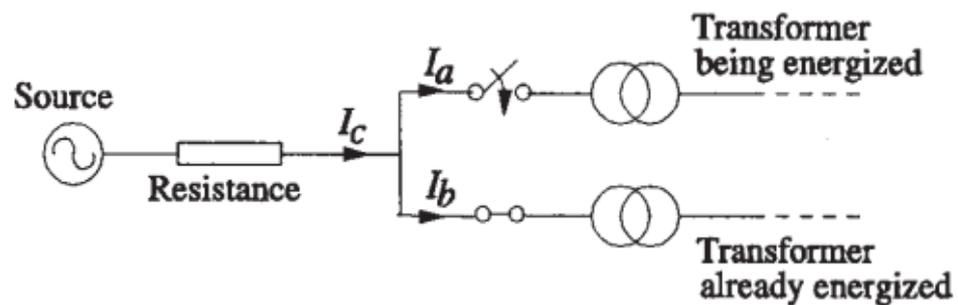


Inrush Solidário (Sympathetic inrush)

- O *offset* da corrente *inrush* do transformador energizado encontra um **caminho em paralelo na energização do banco.**
- A **componente DC** pode saturar o ferro do transformador, criando um *inrush* aparente.
- *Inrush* solidário será **menor do que a corrente inicial *inrush*.**
- Se um conjunto comum de restrição harmônica forem usados para os relés diferenciais de ambos os transformadores, **poderá existir falhas de operação.**



Sympathetic inrush



Fatores que controlam a duração e magnitude do *inrush* de magnetização

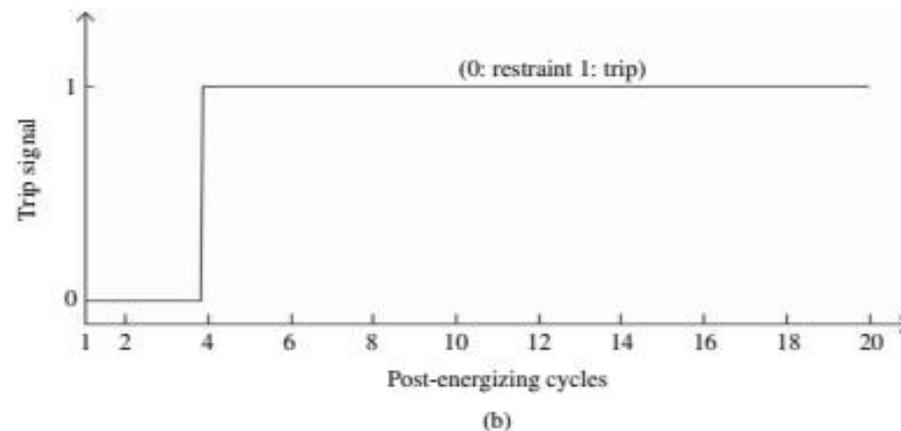
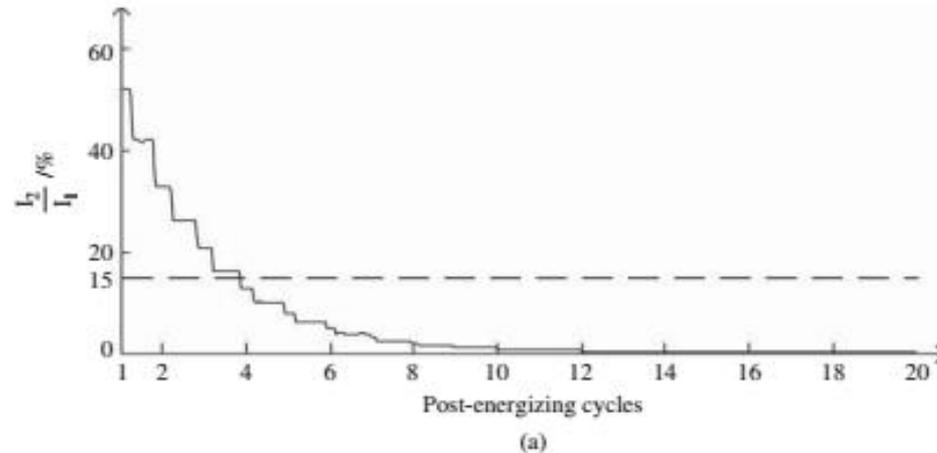
- Capacidade (potência) dos banco de transformadores;
- Força do sistema de potência com o qual o banco é conectado;
- Resistência no sistema de potência entre a fonte e o banco;
- Tipo de ferro usado no núcleo do transformador e a densidade de saturação desse;
- Histórico prévio ou nível de fluxo residual do banco;
- Como o banco de transformadores é energizado, por exemplo:
 - Energização inicial;
 - Recuperação da energização por atuação da proteção;
 - *Inrush* solidário em transformadores em paralelo.

Minimização da corrente *inrush* por meio de resistores

- Desde que os transformadores são projetados para resistir os esforços mecânicos de curtos-circuitos, as correntes *inrush* não poderiam ser considerada perigosas. Contudo, elas podem causar indevidamente a operação de equipamentos de proteção como relés e fusíveis;
- Um caminho viável para redução da corrente *inrush* é o **chaveamento de transformadores por meio de resistores;**
 - **Resistor é aplicado para reduzir a tensão terminal do transformador (exemplo, 50%) e, por consequência, reduz a corrente *inrush*.**
 - Na sequência, o resistor é curto-circuitado para aplicar a tensão completa no transformador.

Soluções – Método de restrição de harmônicos

- Usualmente, a proteção diferencial usa uma **restrição de 15% de segundo harmônico até quatro ou cinco ciclos** após a energização do transformado



Valores típicos de correntes *inrush* de transformadores de potência para estudos de seletividade (considerando $S_{cc} = \infty$)

- Transformadores abaixadores com primário ligado em delta:
 - Transformadores a óleo < 1.0 MVA $I_{Inrush} = 10xI_n$ (Equação 1)
 - Transformadores a óleo > 1.0 MVA $I_{Inrush} = 8xI_n$ (Equação 2)
 - Transformadores a seco - Todos $I_{Inrush} = 14xI_n$ (Equação 3)
- Se o transformador é abaixador e a conexão do primário é estrela aterrada, deve-se multiplicar os valores das equações 1, 2 e 3 pelo fator 1,4;
- Se o transformador é elevador e a conexão do primário é delta, multiplicar os valores das equações 1, 2 e 3 pelo fator 1,7.
- Se o transformador é elevador e a conexão do primário é estrela aterrada, multiplicar os valores das equações 11, 12 e 13 pelo fator 2,5

Fonte consulta: Revista O Setor Elétrico, Claudio Mardegan, 09/2010.

Bibliografia

- [1] ABB, Transformers Protection, *ABB Power Technology 1_114Q07*.
- [2] Camacho J. R., Apostila de Transformadores, *Universidade Federal de Uberlândia*, 2013.
- [3] Gopika R, Deepa Sankar, Study on Power Transformer Inrush Current, *IOSR Journal of Electrical and Eletronics Engineering (IOSR-JEEE)*, pp 59-63, 2017.
- [4] Mardegan, Cláudio. Proteção dos transformadores – Parte I. *Revista O Setor Elétrico*, pp. 1383 – 1400, 2010.
- [5] M. Jamali, M. Mirzaie, S. Asghar Gholamian, Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Trasnformer and Operation Conditions, *Eletronics and Electrical Engineering*, No. 3, 2011.
- [6] Parallel Transformers and Autotransformers, Notas de Aulas, *Southern Illinois University College of Enginnering*, 2016.
- [7] S.V. Kulkarni e S.A. Khaparde, Transformer Engineering: Design and Practice (Power Engineering, 25), CRC Press, 2004.
- [8] X. Lin, J. Ma, Q. Tian, H. Weng, Electromagnetic Transient Analysis and Novel Protective Relaying Techniques for Power Transformer, IEEE Press, 2015.