



SEL354 Proteção de Sistemas de Energia Elétrica

*Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Engenharia Elétrica
Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica - LSEE*

- Docente
 - ✓ Prof. Titular Denis Vinicius Coury (016 3373-8133, coury@sc.usp.br)

- Colaboradores
 - ✓ Thiago Souza Menezes (thiagosm@usp.br)

São Carlos, 2019.

TÓPICOS

A proteção de sistemas elétricos

- 2.1 Introdução.
- 2.2 Filosofias básicas da proteção.
- 2.3 Proteção das linhas de transmissão
- 2.4 Proteção de transformadores
- 2.5 Proteção de reatores e geradores
- 2.6 Proteção de barramentos.
- 2.7 Transformadores de potencial e de corrente.

2.4 Proteção de transformadores

✓ Transformadores maiores (2,5 MVA ou mais) são geralmente protegidos por relés diferenciais percentuais (corrente).

✓ Relés Diferenciais: Opera quando o vetor da diferença de duas ou mais grandezas elétricas excede uma quantidade pré estabelecida.

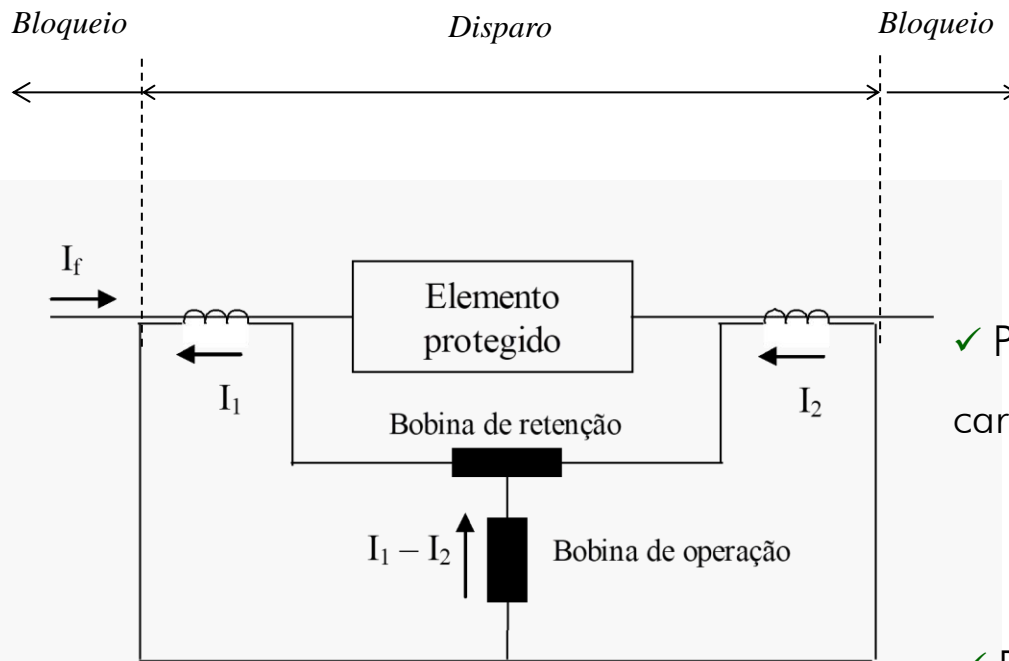
✓ Dois tipos:

Diferenciais Amperimétricos e

Diferenciais Percentuais

2.4 Proteção de transformadores

Representação esquemática:



Corrente efetiva na bobina retenção:

$$(I_1 + I_2)/2$$

Corrente efetiva na bobina operação:

$$(I_1 - I_2)$$

✓ Para uma **falta externa** (ou corrente de carga):

Op: $(I_1 - I_2) = 0 \rightarrow$ plena retenção

Ret.: $(I_1 + I_2)/2 = I_1 = I_2$

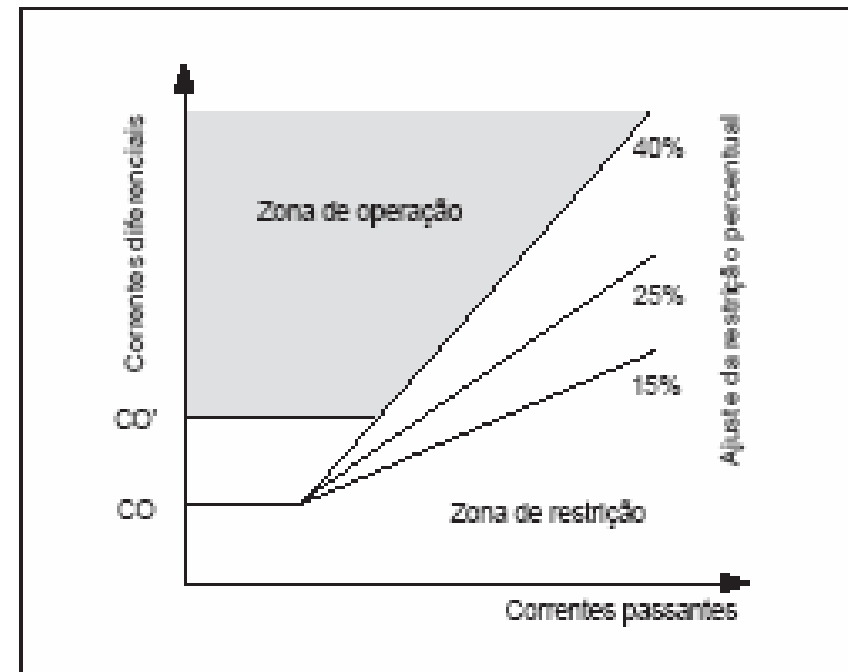
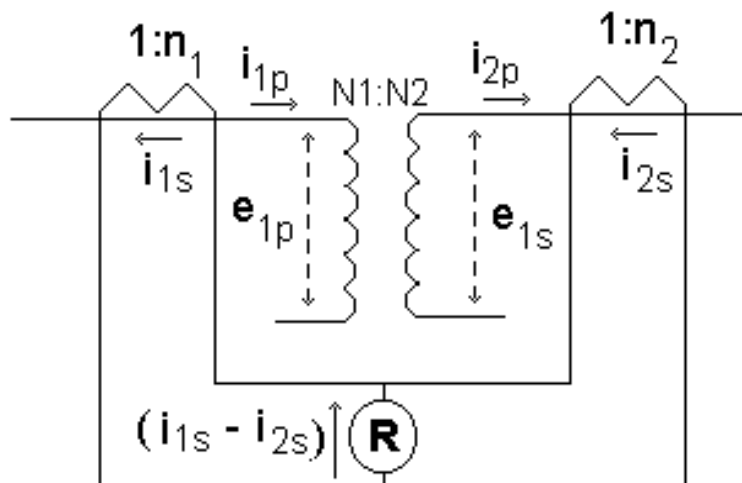
✓ Para uma **falta interna** : (I_2 torna-se negativo)

Op: $(I_1 - I_2) \rightarrow$ fortalecido

Ret.: $(I_1 + I_2)/2 \rightarrow$ enfraquecido

Característica do relé diferencial percentual

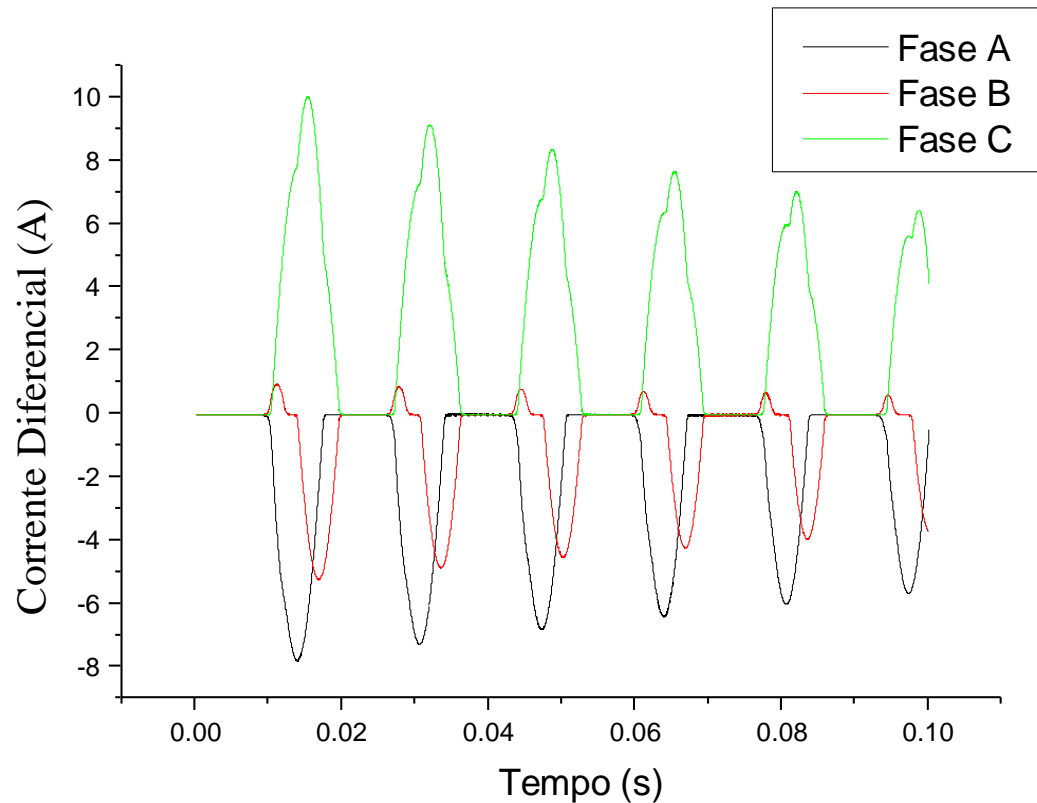
- ✓ Esquema de um transformador monofásico, com conexão de relé de proteção diferencial.
- ✓ Conexão dos transformadores de corrente (TCs).
- ✓ $N1:N2$: RT (primário e o secundário) do transformador principal.
- ✓ $1:n1$ e $1:n2$: RT entre os ramos e os TCs.
- ✓ Característica operacional de um relé diferencial percentual.
- ✓ Ajuste: - Valor inicial
- Declividade



Característica do relé diferencial percentual

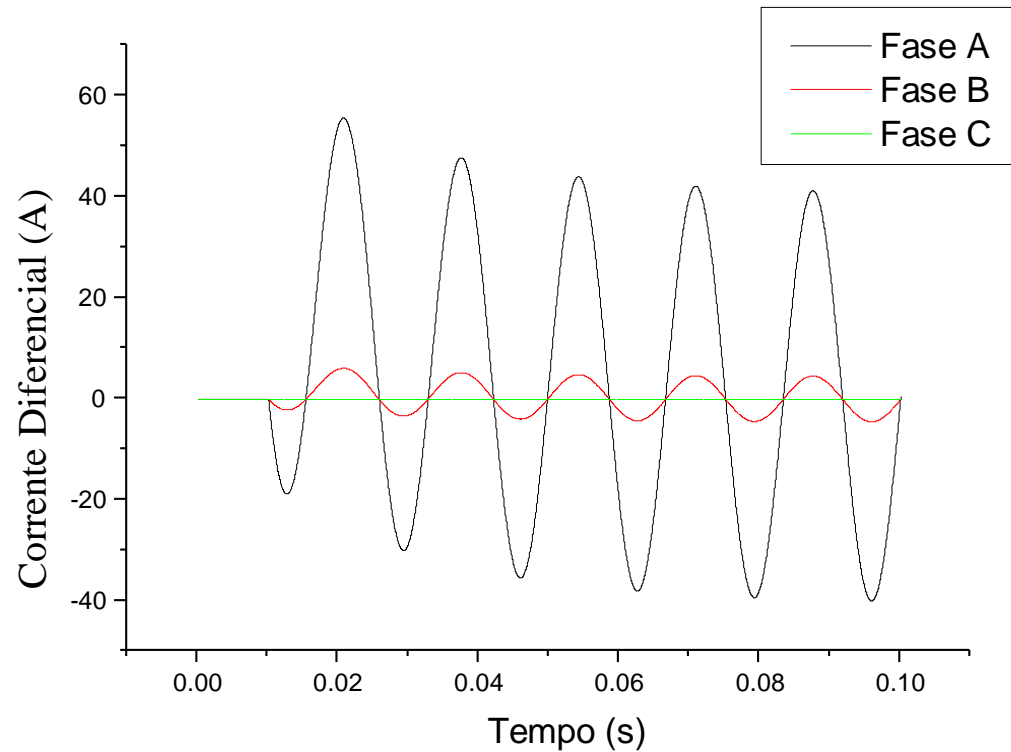
- ✓ Durante a energização, correntes anormais podem fluir no enrolamento.
- ✓ **Corrente de magnetização**: causada pela saturação do núcleo do trafo (processo aleatório) – **altas correntes**. É necessário distinguir entre faltas e correntes de magnetização.
- ✓ Uma técnica usada para impedir a atuação sob condições de **magnetização** é detectar a **segunda harmônica**. A corrente de falta é quase puramente de frequência fundamental.
- ✓ Isso pode ser feito através de **filtros analógicos** ou por meio de **filtros digitais** (corrente harmônica é usada para fortalecer $I_{ret.}$).
- ✓ Outra situação a ser observada é quando o trafo está **sobre-excitado**. Neste caso, a corrente de magnetização apresenta um componente de **quinto harmônico** significativo (fortalecer o $I_{ret.}$).

Relé diferencial percentual



Corrente de magnetização durante a energização de um transformador.

Relé diferencial percentual



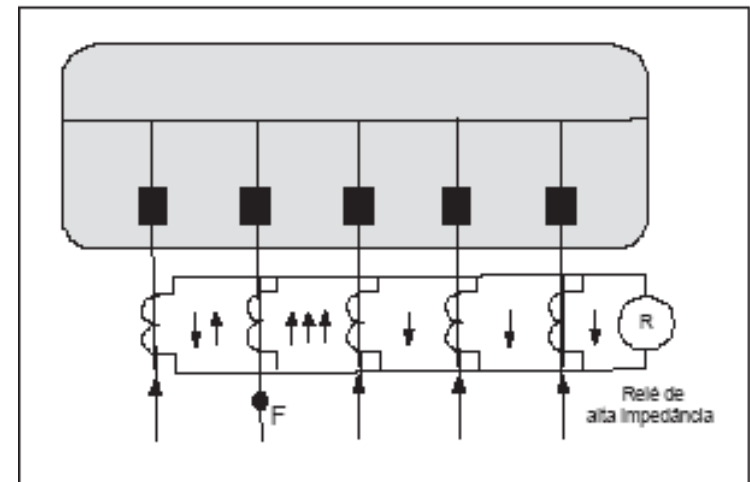
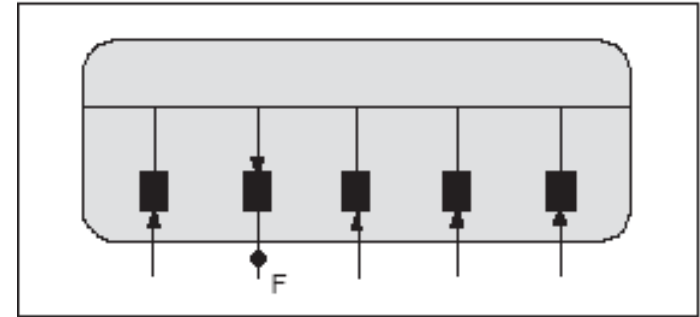
Corrente de falta interna em um transformador.

2.5 Proteção de reatores e geradores

- ✓ A proteção principal para um **reator** e ou um **gerador** é similar a proteção diferencial de transformadores.
- ✓ Os transformadores de corrente empregados nos dois terminais de um enrolamento de um **gerador** são especialmente “casados”.
- ✓ Não é necessário nenhum artifício para considerar os **erros causados pelas mudanças dos taps**.
- ✓ Não é preciso de preocupar com a **corrente de magnetização**.
- ✓ Usualmente é relacionada ao aquecimento do rotor causado pela **corrente de seqüência negativa nos enrolamentos do estator** (correntes desbalanceadas do estator).
- ✓ A corrente de seqüência negativa do relé é testada para a quantidade:
 $|i_2^2| > K$, *abertura ou alarme*
 $< K$, *não operação*

2.6 Proteção de barramento

- ✓ Por não ser fisicamente longo, o relé diferencial é usado para sua proteção.
- ✓ Quando não há falta no barramento: soma algébrica de todas as correntes deve ser zero (considerando TCs idênticos).
- ✓ Problema a ser considerado: saturação do TC para uma falta externa.
- ✓ Exemplo: corrente no ramo faltoso é alta, o TC corre o risco de se tornar saturado. TC saturado não produz corrente de secundário
- ✓ Solução: relés de alta impedância (a impedância mais baixa do secundário do TC saturado *bypassa* a corrente diferencial do relé).

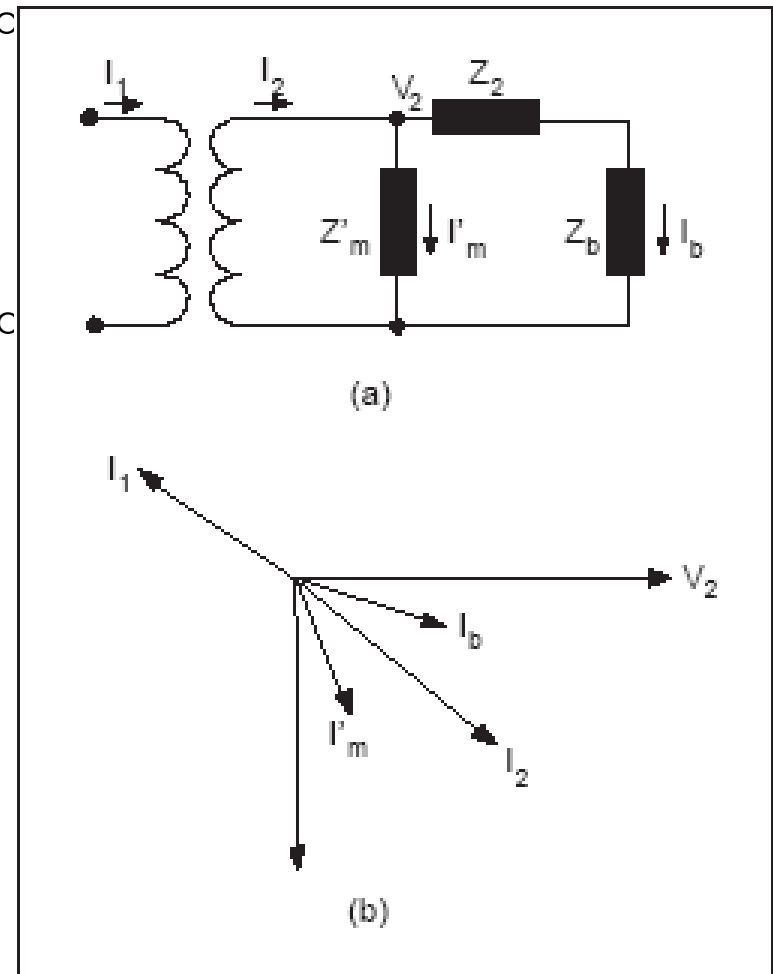


2.7 Transformadores de corrente e de potencial

Transformadores de corrente – TCs

- ✓ Existe um erro na corrente secundária causado pela **saturação** do núcleo do TC.
- ✓ Mesmo quando o núcleo do TC não está saturado, a corrente secundária apresenta um erro devido a **corrente de magnetização** (fluxo no núcleo).

Uma aproximação usual do TC e o diagrama fasorial das grandezas envolvidas.



2.7 Transformadores de corrente e de potencial

Efeito da Saturação

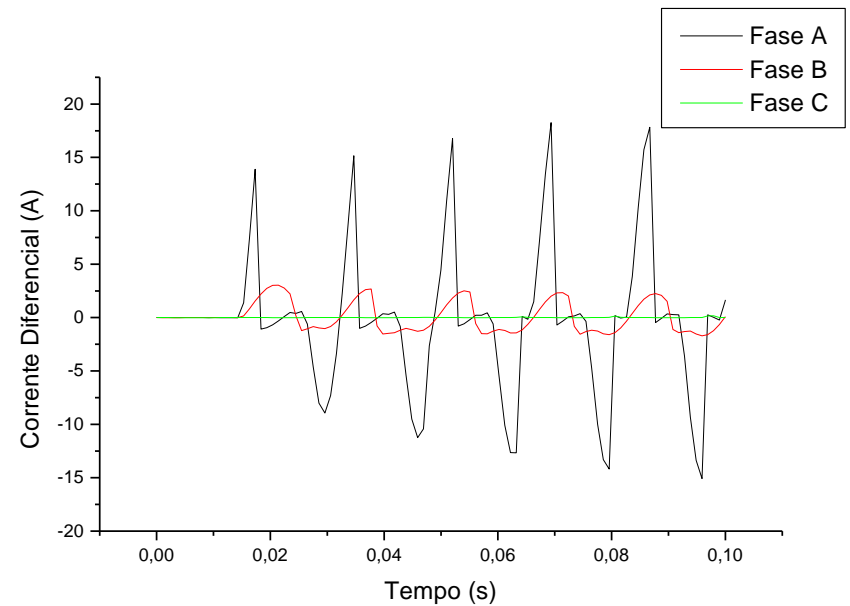
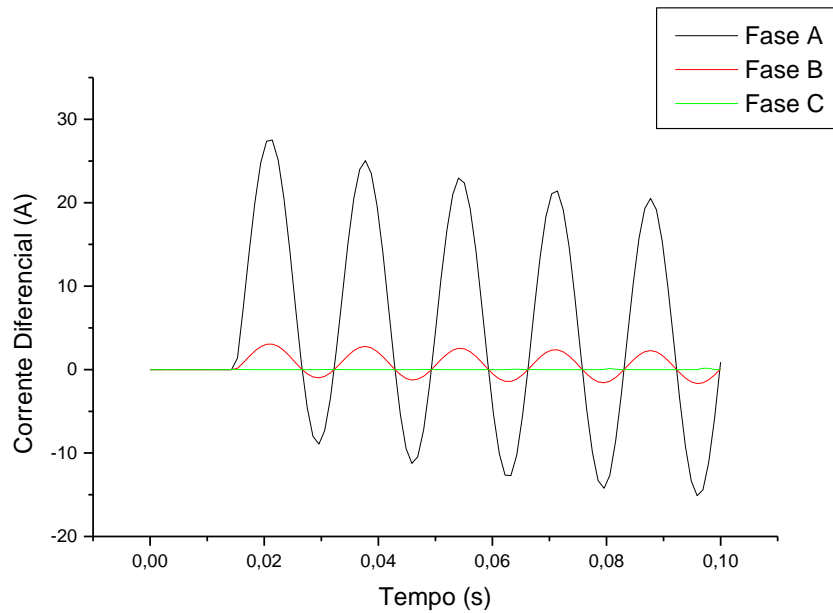
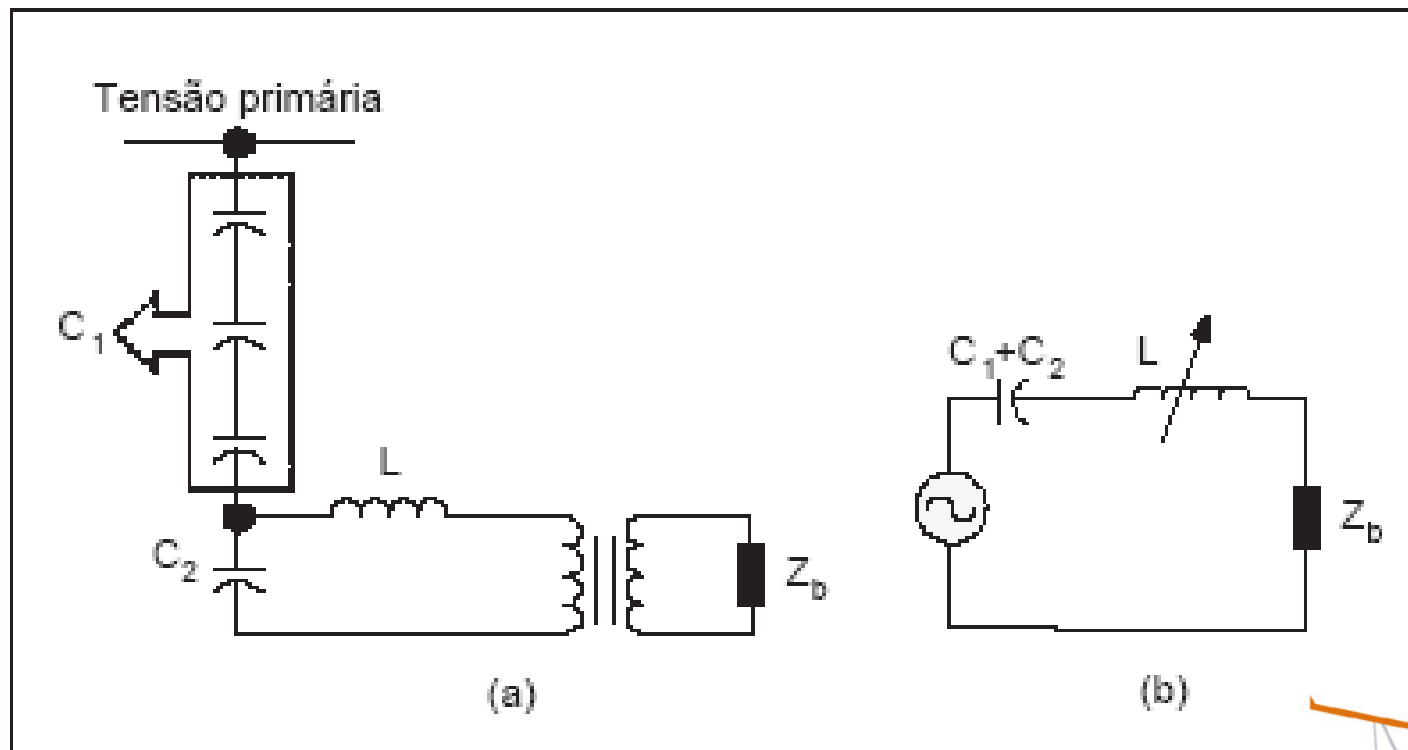


Ilustração da onda original com e sem o efeito da saturação

2.7 Transformadores de corrente e de potencial

Transformadores de potencial – TPs

- ✓ TPs em baixa tensão são muito precisos e, em geral, seus erros de transformação podem ser ignorados. Usa um **divisor de tensão capacitivo** + transformador com núcleo magnético.

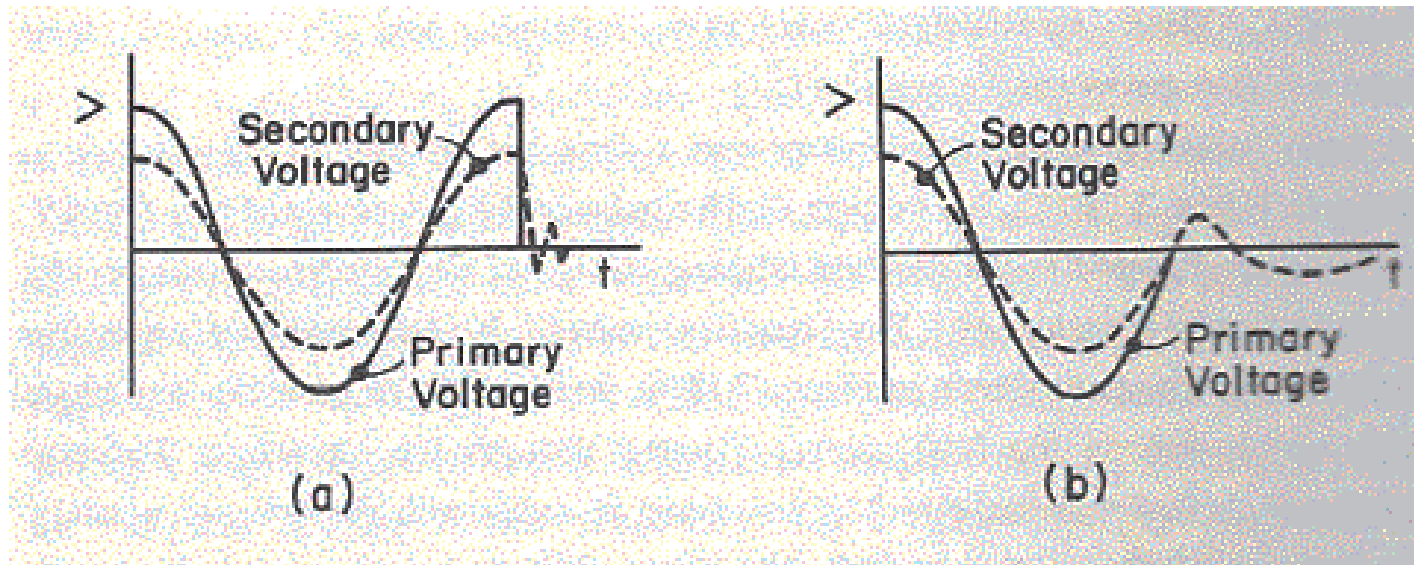


Transformadores de potencial – TPs

- ✓ $1/2\pi f (C1 + C2) = 2\pi f L$: defasamento entre fase de $(C1 + C2)$ é cancelado pelo atraso de fase da L para todas as correntes de carga e, a tensão secundária estará, em fase com a tensão primária.
- ✓ O erro em **regime permanente** do TPC é desprezível.
- ✓ Motivo de preocupação: **resposta transitória**.
- ✓ A tensão primária passa rapidamente do seu estado de pré-falta para valores de pós-falta, a tensão de saída experimentará um transitório atenuado antes de atingir o seu valor final de regime permanente.

Transformadores de potencial – TPs

✓ Este transitório atenuado depende dos parâmetros do TPC, impedância da carga e fator de potência, bem como do ângulo de incidência da falta primária. A **resposta transitória do TPC** causa dificuldade nas tarefas de proteção que requerem entradas de tensão (criam imagens falsas da tensão nos terminais de entrada do relé).



Exercício:

A figura a seguir mostra um relé diferencial percentual aplicado a proteção do enrolamento do estator de um gerador. O relé tem um valor de *picape* mínimo (corrente de atuação) de 0.1 A e está regulado para uma declividade de 10%.

Uma falta a terra, como mostra a figura, ocorreu no enrolamento do gerador, próxima ao extremo correspondente ao neutro aterrado solidamente, quando o gerador alimentava uma certa carga. Em consequência, as correntes fluindo a cada extremo do enrolamento do gerador são mostradas na figura, em magnitude (ampères) e direção.

Admitindo-se que os transformadores de corrente tem relação 400/5 A e nenhuma imprecisão, pergunta-se:

- O relé operará energizando o disjuntor do gerador nas condições dadas?
- Poderia o relé operar sob o dado valor de corrente de defeito se o gerador não estivesse fornecendo corrente a carga (correspondente ao disjuntor aberto)?
- Construir o diagrama de característica de operação do relé com os pontos que representam as correntes de operação e restrição no relé, nas duas condições acima.
- Considerar que o referido relé seja amperimétrico para as duas condições dadas acima. O relé operaria para as condições (a) e (b)? Para o exemplo em questão, qual dos dois tipos de relés é mais sensível? Fazer comentários.

