SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO
E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SP/GTC/05

São Paulo, 10/15 de Abril de 1972

GRUPO DE ESTUDOS DE PROTEÇÕES, TELECONTRÔLE

E TELECOMUNICAÇÕES

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE FÔRÇA

Engº Antonio Emilio Garcia

Centrais Elétricas de São Paulo S/A - CESP

1.0 - INTRODUÇÃO : Os modernos sistemas de proteção diferencial possibilitam, num esquema único, a mais completa cobertura para/ curto-circuitos de enrolamentos e terminais. O sistema opera/ no conhecido principio de "Merz-Price" de circulação de corrente, no qual os transformadores de corrente em cada terminal são balanceados entre si. Um curto interno à área protegida provocará um desbalanço que resulta na operação do sistema. A aplicação do sistema diferencial na proteção de barramentos e enrolamentos de geradores é relativamente simples e geral./ Para os transformadores temos que levar em conta os ítens abaixo analisados.

2.0 - AJUSTE DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE : As correntes que entram ou saem de um transformador durante condições de carga ou de curto diferem em módulo e ângulo de fase, dependendo da relação de transformação e do arranjo dos enrolamentos do transformador.

Como um sistema de proteção diferencial necessita ser estável para condições de carga e curto, é claro que as variações em módulo e ângulo de fase das correntes tem que ser levada em conta na aplicação do esquema.

Os valores do circuito em cada lado do transformador correspondem inversamente à relação de tensão da linha. Também as correntes de fase numa transformação delta/estrêla sofrem uma variação de $\sqrt{3}$ no módulo. Esta diferença é corrigida pelo uso de transformadores de corrente que diferem na relação de acôrdo com a relação do transformador de fôrça, tendo características primárias que correspondam às características do circuito. Quando são usados transformadores de corrente de relações padronizadas, as correntes secundárias nos dois lados podem diferir e serão então corrigidas por transformadores de corrente auxiliares previstos de taps.

Os transformadores modernos são equipados com comutação sob carga. Assim qualquer afastamento da posição de tap nominal, para a qual os transformadores de corrente foram escolhidos, resulta em correntes desbalanceadas nos circuitos dos relés. Além disso os transformadores de corrente são geralmente de diferentes tipos e têm características de magnetização diferentes, resultando novamente em correntes adicionais nos circuitos dos relés durante condições de curto severas.

As diferenças de fase resultantes de conexões diferentes dos enrolamentos de alta e baixa tensão, podem ser corrigidas, - ligando o transformador de corrente em estrêla do lado em - delta do transformador de fôrça e aquêles do lado em estrêla dêste, em delta, levando-se em consideração o diagrama vetorial do mesmo.

Em transformadores com o enrolamento em estrêla de ambos os/ lados, não há correção a ser feita do ângulo de fase, mas os TC's devem ser conectados em delta para assegurar estabilidade de curto.

Na figura 2.0.1 a distribuição de correntes no transformador e circuito dos relês é dada para um curto externo no lado em estrêla de um transformador delta/estrêla. Obedecendo as regras acima os TC's são conectados em estrêla e delta, respectivamente nos lados delta e estrêla do transformador de fôrça. Os TC's em estrêla têm uma relação NI/i e os em delta - $I/\frac{i}{\sqrt{3}}$. As correntes secundárias em ambos os lados do trans - formador de fôrça são idênticas nas respectivas fases, sem - correntes resultantes nos circuitos dos relês e assim a proteção permanece estável.

3.0 - A CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO NA ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES

Vamos assumir o secundário do transformador aberto. Sabemos/ que a corrente normal de excitação de um transformador sem - carga não excede a 10% da corrente de carga. Mas quando o - transformador é ligado ao circuito energizado com uma tensão perto do valor nominal, influxos de corrente podem exceder/ várias vezes êste valor. Fìsicamente estas correntes podem - ser explicadas da seguinte maneira (figura 3.0.1) : em operação normal sem carga, o valor da tensão u_1 = ab corresponde/ a um valor de fluxo em regime $\emptyset_1$ = ac (figura 1). Entretanto na ausência de magnetismo residual, no instante de fechamento a corrente i_o e o fluxo $\emptyset_o$ produzido devem ser nulos. Um processo transitório, então, se desenvolve de maneira a aparecer um valor de fluxo $\emptyset_2$, que satisfaça a relação $\emptyset_1 + \emptyset_2 = 0$. Se considerarmos a resistência do enrolamento primário - igual a zero ($r_1 = 0$), a energia eletro-magnética correspondente ao fluxo $\emptyset_2$ não se dissipará e o fluxo $\emptyset_2$ permanecerá/ constante em valor e sinal.

Na realidade $r_1 \neq 0$ e o fluxo $\emptyset_2$ é gradualmente amortecido.

Vamos assumir que a tensão varie senoidalmente e que não dependa das condições de funcionamento do transformador. Nêste caso a equação da f.e.m. para o instante de fechamento pode/ ser escrita :

$$u_1 = U_{1m} \text{ sen } (wt + \emptyset_o) = i_o r_1 + w_1 \frac{d\,\emptyset_T}{dt} \qquad (1)$$

onde $\emptyset_o$ é o ângulo de fase da tensão correspondente ao valor u_1 no instante do fechamento.

Desde que a relação $\emptyset T = f\,(i_o)$ é de natureza complexa determinada pela curva de magnetização do transformador, a solução da equação 1 é possível sòmente se assumirmos que o fluxo é uma função linear da corrente i_o, isto é, $\emptyset W_1 = L_1 i_o$, onde L_1 é a indutância constante correspondente a todo o fluxo no primário. Então,

$$U_{1w} \text{ sen } (wt + \emptyset_o) = \frac{\emptyset w_1}{L_1} r_1 + w_1 \frac{d\emptyset_T}{d_t}$$

ou

$$\frac{\emptyset T}{L_1} r_1 + \frac{d\,\emptyset T}{d_T} = \frac{U_{1m}}{W_1} \text{ sen } (wt + \emptyset_o) \qquad (2)$$

Esta equação é resolvida fàcilmente. O fluxo $\emptyset T$ é a soma dos dois fluxos $\emptyset_1$ e $\emptyset_2$. Então,

$$\emptyset T = \emptyset_1 + \emptyset 2 \qquad (3)$$

O fluxo $\emptyset 1$ está em atraso com relação à tensão u_1 sensivelmente 90º elétricos. Portanto,

$$\emptyset_1 = \emptyset_m \text{ sen } (wt + \emptyset_o - \frac{\pi}{2}) = - \emptyset_m \cos (wt + \emptyset_o) \qquad (4)$$

Para determinar o fluxo $\emptyset_2$, assumimos o lado direito da equação 2 igual a zero e resolvendo a equação obtida desta maneira, encontramos :

$$\emptyset_2 = C \; e^{\frac{-r_1}{L_1} t} \qquad (5)$$

Onde C é a constante de integração determinada pelas condições iniciais. No instante em que o transformador é ligado à linha (t = 0), existe no núcleo sòmente o fluxo de magnetização residual $\pm \emptyset_3$. Nêste caso a equação 3 pode ser reescrita :

$$\emptyset_T = \pm \emptyset_3 = - \emptyset_m \cos \emptyset o + C$$

e portanto,

$$C = \emptyset_m \cos \emptyset o \pm \emptyset_3$$

Substituindo êste valor de C na equação 5

$$\emptyset_2 = \emptyset_m \cos \emptyset o \, e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \pm \emptyset_3 \, e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \qquad (6)$$

Então,

$$\emptyset_T = \emptyset_1 + \emptyset_2 = - \emptyset_m \left[\cos (wt + \emptyset_o) - \cos \emptyset_o \, e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \right] \pm \emptyset_3 \, e^{-\frac{r_1}{L_1} t}$$

As melhores condições de fechamento ocorrem quando :

$$\emptyset_o = \pi/2 \quad e \quad \emptyset_3 = 0$$

Nêste caso :

$$\emptyset_1 = - \emptyset_m \cos (wt + \pi/2) = \emptyset_m \operatorname{sen} wt$$

$$e \ \emptyset_2 = 0$$

Isto é, o fluxo imediatamente estabelecido no transformador é correspondente ao fluxo de regime.
A condição mais desfavorável de fechamento ocorre quando $\emptyset_o = 0$, isto é, quando : $u_1 = 0$ e o fluxo $\emptyset_2$ é de sinal oposto ao fluxo $\emptyset_1$. Nêste caso :

$$\emptyset_T = - \emptyset_m \cos wt + \emptyset_m \, e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \pm \emptyset_3 \, e^{-\frac{r_1}{L_1} t}$$

Usualmente a densidade de fluxo residual é baixa, quando o transformador é energizado pela primeira vez. Entretanto, - quando um curto-circuito severo ocorre perto do transformador, num momento em que sua densidade de fluxo é alta (tensão zero) e se o curto é interrompido num número impar de - meio ciclo depois, o fluxo residual no instante de reenergizar o transformador, pode se aproximar da densidade normal,- sendo necessário para que isto aconteça que o curto comece/ e seja eliminado a zero de tensão, o que é pouco provável.

Então adotaremos $\emptyset_3 = (0,2 \text{ a } 0,3)\ \emptyset_1$.

Nêste caso após meio período, isto é, quando :

$$wt = \frac{2\pi}{T} = \frac{T}{2} = \pi$$

temos :

$$\emptyset_T = \emptyset_m + \emptyset_m e^{-\frac{r_1}{L_1} t} + (0,2 \text{ a } 0,3)\ \emptyset_m e^{-\frac{r_1}{L_1} t}$$

Como $r_1 \ll wL_1$, então $e^{-\frac{r_1}{wL_1}\pi} \sim 1$

e $\emptyset_{Tm} = \emptyset_m + \emptyset_m + (0,2 \text{ a } 0,3)\ \emptyset_m$

$$\emptyset_{Tm} = (2,2 \text{ a } 2,3)\ \emptyset_m$$

A corrente de magnetização, requerida para se criar um fluxo desta ordem, é determinada através da curva de magnetização/ do transformador, Os transformadores modernos são projetados para operarem a densidade de fluxo que correspodam ao joelho da curva de magnetização, ou seja, ao fluxo em regime Ø (figura 3.0.3).

O aumento duplo do fluxo, por conseguinte, resulta em saturação do núcleo e como se vê na curva de magnetização haverá - um aumento abrupto da corrente no enrolamento.

A corrente de magnetização cai ràpidamente nos primeiros ciclos e depois muito lentamente. Um completo amortecimento - ocorre depois de 6 a 8 segundos. Entretanto, em transformadores de alta tensão, o processo de amortecimento pode levar - até mais de 20 segundos.

O coeficiente de amortecimento R/L não é constante, devido à variação da indutância do transformador com a saturação. Durante os primeiros instantes o grau de saturação é alto, fazendo L baixo. Como a indutância do transformador aumenta - com a diminuição da saturação o valor R/L diminui enquanto - a corrente cai.

A resistência entre a fonta e o transformador determina o - amortecimento da onda de corrente. Assim transformadores localizados junto ou perto de um gerador terão uma corrente de magnetização alta, enquanto que em subestações remotas não - se deve esperar valores tão elevados, pois a resistência da/ linha amortece ràpidamente a corrente.

Normalmente não se dispoẽ das informações de projeto necessárias para o cálculo de influxo da corrente de excitação. Entretanto, na tabela abaixo, encontramos uma ordem de grandeza dessa corrente para transformadores monofásicos, 60 Hz, quando energizados pelo lado de alta tensão, no momento em que a tensão passa por zero. Os valores abaixo são dados em p.u. dos valores de crista da corrente de carga máxima.

MVA	TIPO NÚCLEO ENVOLVIDO	TIPO NÚCLEO ENVOLVENTE
2	5 - 8	
10	4 - 7	2,5 - 5
20		2,0 - 4

Energizando-se pelo lado de baixa de um transformador, do tipo núcleo envolvido, pode haver um influxo de duas vezes os valores dados na tabela. O valor por unidade de um transformador de núcleo envolvente é mais ou menos o mesmo para ambos os lados.

Os valores de corrente da tabela acima são baseados na energização do transformador por uma fonte de reatância zero. Quando se deseja computar o valor da reatância da fonte a corrente pode ser estimada por :

$$I = \frac{I_0}{1 + I_0 x}$$

onde,

I_0 = corrente de influxo sem se levar em conta a reatância por unidade do transformador de corrente.

x = reatância efetiva da fonte em por unidade na base da potência do transformador.

Quando um transformador trifásico é ligado, podemos esperar um maior ou menor influxo de corrente, porque haverá uma fase em que o fechamento é feito perto do zero.

Num transformador com o primário em delta, mais que um núcleo pode ser saturado. Desde que os máximos da corrente em cada - um dos núcleos estarão defasados de 60º elétricos, ou um múltiplo dêste valor, a forma de onda será distorcida ou a curva resultante será oscilatória. Ainda mais, a corrente de linha/ será o vetor soma de duas correntes de fase. Se existir um outro enrolamento em delta, a corrente poderá ser influenciada/ pelo acoplamento entre enrolamentos de diferentes voltagens.- Se as unidades formam um transformador trifásico, dependendo/ da construção do núcleo, o acoplamento entre fases pode afe - tar a corrente de magnetização.

Formas de ondas similares são também encontradas quando energizarmos o enrolamento em estrêla de um banco estrêla-triângulo ou quqndo energizarmos um auto-transformador. Nêste caso a forma de onda monofásica é distorcida por causa do acoplamento magnético entre fases obtido através do enrolamento em delta (ou terciário).

Na figura 3.0.4. a corrente de magnetização em cada fase de - um transformador trifásico é mostrada. A amplitude inicial da corrente na fase S (no caso a pior condição) é cerca de 7 (sete) vezes o valor da plena carga, caindo a meia vez no primeiro segundo. Como esta corrente flui no primário do transformador sòmente,ela se apresenta para a proteção diferencial convencional como um curto interno e faz com que o relé opere.

Uma análise típica da forma de onda da corrente de magnetização em condições de influxo ao ser ligado um transformador - com o secundário aberto nos dá a seguinte proporção de harmônicas :

Fundamental	100%
Segunda harmônica	63%
Terceira harmônica	27%
Quarta harmônica	5%
Quinta harmônica	4%

Desta análise verifica-se que a componente de segunda harmônica predomina e uma análise similar abrangendo todos os tama - nhos de transformadores indica que êste valor nunca é menor - que 23%.

4.0 - ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE EHV COM TRANSFORMADORES NA PONTA : Um dos efeitos produzidos que podem criar problemas/ de operação da proteção é a saturação dos transformadores devido a altas sobretensões transientes. Testes mostraram que, na - energização de uma linha terminada em transformador, a tensão - nos terminais do transformador pode alcançar valores entre 2,25 a 3,5 vezes a tensão nominal, dependendo do tamanho da linha e da impedância de sequência zero do transformador. Estas sobre - tensões causarão saturação do transformador e um consequente aumento na corrente de excitação, causando às vezes operação falsa da proteção diferencial.

Nêste caso, embora a 3ª e outras harmônicas impares de ordem superior possam vir do sistema e auxiliar a restrição de um relé/ com restrição por harmônicas, a alta impedância da linha pode - limitar estas harmônicas até o ponto onde elas não forneçam suficiente restrição.

5.0 - REJEIÇÃO DE CARGA : Em seguida a uma rejeição de carga, altas - sobretensões podem aparecer nos terminais do transformador de - uma estação geradora. Estas sobretensões podem variar de 20% a 50%, dependendo de fatores, tais como a resposta do sistema de excitação, o comprimento das linhas que permanecem conectadas à estação geradora, a existência ou não de curtos anteriores à - rejeição, o valor da reatância "shunt" ligada e a carga inicial do gerador.

Estas sobretensões no transformador serão sustentadas por um espaço apreciável de tempo. Em muitos casos, o transformador irá saturar e como consequência haverá um apreciável aumento na corrente de excitação, tendendo a proteção a operar.

Estudaremos o problema numa ligação gerador-transformador. Desde que o lado de baixa do transformador é usualmente ligado em delta, as únicas componentes que aparecem no gerador serão : a fundamental, a 5ª harmônica e algumas de ordem maior. A 3ª harmônica, que é a maior componente da corrente de excitação, não aparecerá no gerador, mas irá aparecer e circular no delta do - transformador de fôrça. A corrente de excitação no gerador será composta predominantemente pela fundamental, desde que as harmônicas maiores são pequenas em amplitude. Para a proteção dife - rencial esta corrente de exc itação fundamental aparece em um - lado do relé sòmente e, portanto, tenderá a operá-lo. As harmônicas de ordem maior fornecem alguma restrição, mas podem ser - insuficientes para prevenir a operação.

6.0 - OUTROS FENÔMENOS : Embora normalmente relacionada apenas com a energização de transformadores, a elevada corrente de magnetização pode ser causada por qualquer transiente que cause uma mudança abrupta de tensão no circuito de magnetização do transformador. Tais transientes incluem a ocorrência de um curto, a sua remoção, mudança no seu tipo (por exemplo, de uma fase à terra para duas fases à terra) e uma tentativa de sincronização. Logo, um esquema de desensibilização que opera sòmente quando da energização do transformador pode se tornar inadequado.

Existem muitas condições que causam um fenômeno de corrente de magnetização elevada. Um dêles envolve bancos de transformadores em paralelo com disjuntores individuais a uma certa distância da estação geradora, sendo que um dêles já esteja energizado e o outro está sendo energizado. Um influxo de corrente de/ magnetização irá ocorrer em ambos os transformadores. O amortecimento da onda nêste caso será mais lento do que quando um transformador é ligado sem outros em paralelo.

A amplitude da corrente de magnetização no banco em funcionamento não será tão alta como no banco sendo ligado, mas poderá fàcilmente exceder a 2 vezes a corrente de plena carga; a presença de carga ligada ao transformador irá reduzir ligeiramente o influxo e aumentar a rapidez de amortecimento.

A causa do fenômeno é a seguinte : a componente contínua da corrente de magnetização do banco sendo energizado flue através da resistência da linha de transmissão entre os transformadores e a estação geradora, produzindo uma componente contínua de queda de tensão na tensão aplicada aos bancos. Esta componente contínua de tensão causa uma corrente contínua de magnetização no banco já ligado, cuja velocidade de amortecimento é a mesma do banco que está sendo energizado. Quando a amplitude das componentes contínuas em ambos os transformadores se tornam iguais, não há componente contínua no circuito alimentador, mas existe uma corrente circulando no circuito de interligação dos bancos, cuja constante de tempo, dependendo sòmente/ das constantes dêste circuito, é muito maior que a constante de tempo do circuito de alimentação.

Se os bancos são protegidos como uma unidade, mesmo com relés/ diferenciais percentuais com retenção por harmônicas, pode ocorrer uma operação indesejada porque, como mostrado na figura 6.0.1, a onda da corrente total, ràpidamente torna-se simétrica, e não contém as harmônicas pares necessárias para a retenção.

O exposto acima torna necessário um relé percentual com retenção por harmônicas para cada banco.
Outro fenômeno de influxo de corrente envolve a energização de um transformador através de uma chave sêca. Os arcos no fechamento podem resultar em sucessivos meio ciclos de arcos de mesma polaridade. Então, se o primeiro meio ciclo resulta em substancial magnetismo residual no núcleo do transformador, os subsequentes podem causar um incremento cumulativo no magnetismo/ residual, cada vez resultando num influxo mais severo.
Ocasionalmente, aumentos de tensão de pequena duração podem - aparecer durante outras condições de operação do sistema, principalmente em unidades gerador-transformador. Como os modernos transformadores operam a uma alta densidade de fluxo na tensão nominal, a corrente de excitação pode aumentar de 10 a 100 vezes o seu valor normal durante aumentos de tensão de 20 a 30%. Para se prevenir a operação desnecessária da proteção, existem relés que possuem restrição de tensão, que utilizam a propriedade da corrente de excitação a altas densidades de fluxo possuir uma componente de 5ª harmônica relativamente alta.
De uma maneira geral, os transformadores poderão ter um influxo de corrente de excitação quando a tensão é restaurada de - pois de um curto ou depois que ela desapareceu por qualquer outra razão.

7.0 - <u>MÉTODOS EMPREGADOS NA PROTEÇÃO DIFERENCIAL</u> : Entre os métodos/ atualmente em uso, para se evitar a operação indevida da proteção diferencial nos casos analisados, podemos citar : -

7.1. - <u>Relé diferencial com reduzida sensibilidade à onda de influxo</u> : É o método mais simples e econômico. O relé - possui um alto valor de "pick-up" para a onda e mais um retardo para o alto pico inicial. A sua característica/ percentual é variável, ou seja, baixa percentagem em - curtos leves e alta percentagem em curtos severos onde/ a saturação dos TC's podem acarretar problemas.

7.2. - <u>Supressor automático de disparo operado por tensão em - conjunção com o relé diferencial</u> : Êste método é baseado na possibilitade de se distinguir um influxo de corrente de um curto interno, por intermédio da tensão. O influxo é a plena tensão, enquanto que o curto é caracterizado pela redução da tensão em uma ou mais fases.

Três relés de subtensão de alta velocidade, ligados de maneira a atuarem para tensões de fase a fase ou fase/ a neutro, controlam o disparo do relé diferencial.
Se todos os três relés de tensão operam durante o pe - ríodo de influxo, assim indicando que o transformador/ está perfeito ou então com uma corrente de curto muito pequena, um temporizador é energizado e fecha seus contatos tipo " a " no circuito de operação do relé diferencial após suficiente temporização, de maneira que a operação (durante o influxo sòmente) não ocorrerá. Mas para qualquer curto que operaria um relé diferencial e também reduziria a tensão de maneira que pelo menos um relé de tensão não opere, a operação do diferencial - ocorrerá imediatamente. Em outras palavras, a operação é retardada sòmente para valores de curto que alteram/ a tensão levemente.
Qualquer curto externo que abaixe a tensão o suficiente para causar um influxo significativo quando o curto é removido do sistema irá rearmar um ou mais dos relés de tensão, assim rearmando o temporizador e abrindo - o circuito de trip o suficiente para assegurar que o - relé diferencial rearme, caso tinha tendência de ope - rar.
Êste método é usado com relés diferenciais de alta velocidade ou não, mas sua mais larga aplicação é com re - lés de operação rápida.

7.3. - Relés com retenção por harmônicas : Vários esquemas - têm sido usados para aumentar o "pick-up" ou retardar/ o disparo durante a energização, especialmente para - grandes transformadores localizados perto de potentes/ fontes de alimentação. Retenção por harmônicas é o único atualmente em uso generalizado. Outros esquemas não têm satisfeito pelas seguintes razões :

- A remoção de um curto, que possa ocorrer durante a - energização, será retardada.
- Quando da remoção de um curto externo, a corrente de influxo pode causar a atuação da proteção.
- Não há proteção para a energização em paralelo de - transformadores.

Os relés com retenção por harmônicas fazem uso das harmônicas presentes no influxo (principalmente a 2ª) para bloquear o disparo durante o fenômeno. Então um valor de "pick-up" baixo para condições normais e um retardo mínimo pode ser utilizado, sem o perigo de falsa atuação.

Entretanto, há ainda uma imperfeição em certos tipos de relés, que pode ser fàcilmente contornada. Em curtos internos muitos severos, podem aparecer suficientes harmônicas para a retenção da operação. Um elemento instantâneo de sobrecorrente, regulado acima do influxo é adicionado para resolver o problema.

Embora o custo dos relés com retenção por harmônicas seja alto, geralmente pode ser justificado. Pontos importantes são : -

- Custo da investigação uma operação falsa quando a retenção por harmônicas não é usada.
- Tempo de operação mais rápido (0,03 a 0,05 segundos contra 0,1 a 0,2 segundos para o tipo de retenção percentual).
- "Pick-up" mais baixo (20 a 40% do nominal do transformador contra 40 a 100% para o tipo de retenção percentual).

7.4. - Desensibilização da proteção : Um tipo de desensibilização da proteção de um relé de subtensão com contatos tipo " b " com temporização para o "pick-up" e "reset", êstes contatos são ligados em série com um resistor de baixa resistência em paralelo com a bobina de operação do relé diferencial em cada fase. O relé de subtensão é energizado através de um transformador de potencial ligado entre o transformador de fôrça e o seu disjuntor do lado de baixa. Quando o transformador de fôrça é desenergizado, o relé de subtensão opera e seus contatos completam o circuito em paralelo à bobina de operação do relé diferencial. O relé de subtensão não irá operar e abrir seus contatos até que um intervalo de tempo haja decorrido após a energização do transformador, tornando assim insensível a proteção diferencial durante o período de influxo da corrente de magnetização. Durante a operação normal do transformador, o circuito de desensibilização está aberto, não interferindo na sensibilidade da proteção diferencial se um curto in

terno ocorrer. Se ocorrer um curto no transformador que iria operar o relé de subtensão, a temporização permitirá que a proteção diferencial opere antes.
Uma desvantagem dêste método é que pode ocorrer um curto-circuito durante o período em que o relé estiver insensível. Outra desvantagem é que êste equipamento não pode desensibilizar o relé diferencial para evitar operações perante correntes elevadas de magnetização após a remoção de um curto externo. Esta não é uma desvantagem muito séria porque o método aqui escrito é usado sòmente com relés com 0,2 segundos de temporização e pràticamente não há perigo de atuação perante surtos de tensão dêste tipo, com êstes relés.

8.0 - RECOMENDAÇÕES GERAIS : Não existem regras gerais categóricas / para a aplicação de um ou outro método ou tipo de relé. Cada caso deve ser estudado isoladamente. Entretanto, algumas considerações podem ser feitas:

8.1. - Para a proteção de transformadores onde alta velocidade de operação não seja essencial, onde os níveis de curto circuito não sejam altos e a probabilidade de ocorrências de problemas de influxo da corrente de excitação seja baixa, pode-se usar relés diferenciais com reduzida sensibilidade à onda de influxo, preferivelmente em conjunção com relés de pressão de gás de alta velocidade.

8.2. - Para grandes e importantes transformadores onde os níveis de curto-circuito sejam altos e se necessita alta velocidade de operação devem ser usados relés com restrição por harmônicas.

8.3. - Para transformadores de tensão igual ou superior a 230/KV devem ser empregados relés com restrição por 2ª harmônicas e 5ª harmônica. Dependendo do caso, esquemas especiais de ligação devem ser estudados, visando aumentar o travamento por harmônicas, por intermédio da corrente da 3ª harmônica retirada do enrolamento em delta do transformador de fôrça e inseridas no circuito de restrição do relé.

8.4. - É da maior importância uma escolha correta dos transformadores de corrente.

9.0 - BIBLIOGRAFIA :

9.1. - Westinghouse - Applied Protective Relaying

9.2. - English Electric - Protective Relays Application Guide

9.3. - Titarenko - Protective Relaying in Electric Power Systems

9.4. - G.E. - The Art of Protective Relaying - EHV Systems

9.5. - Kostenko - Electrical Machines

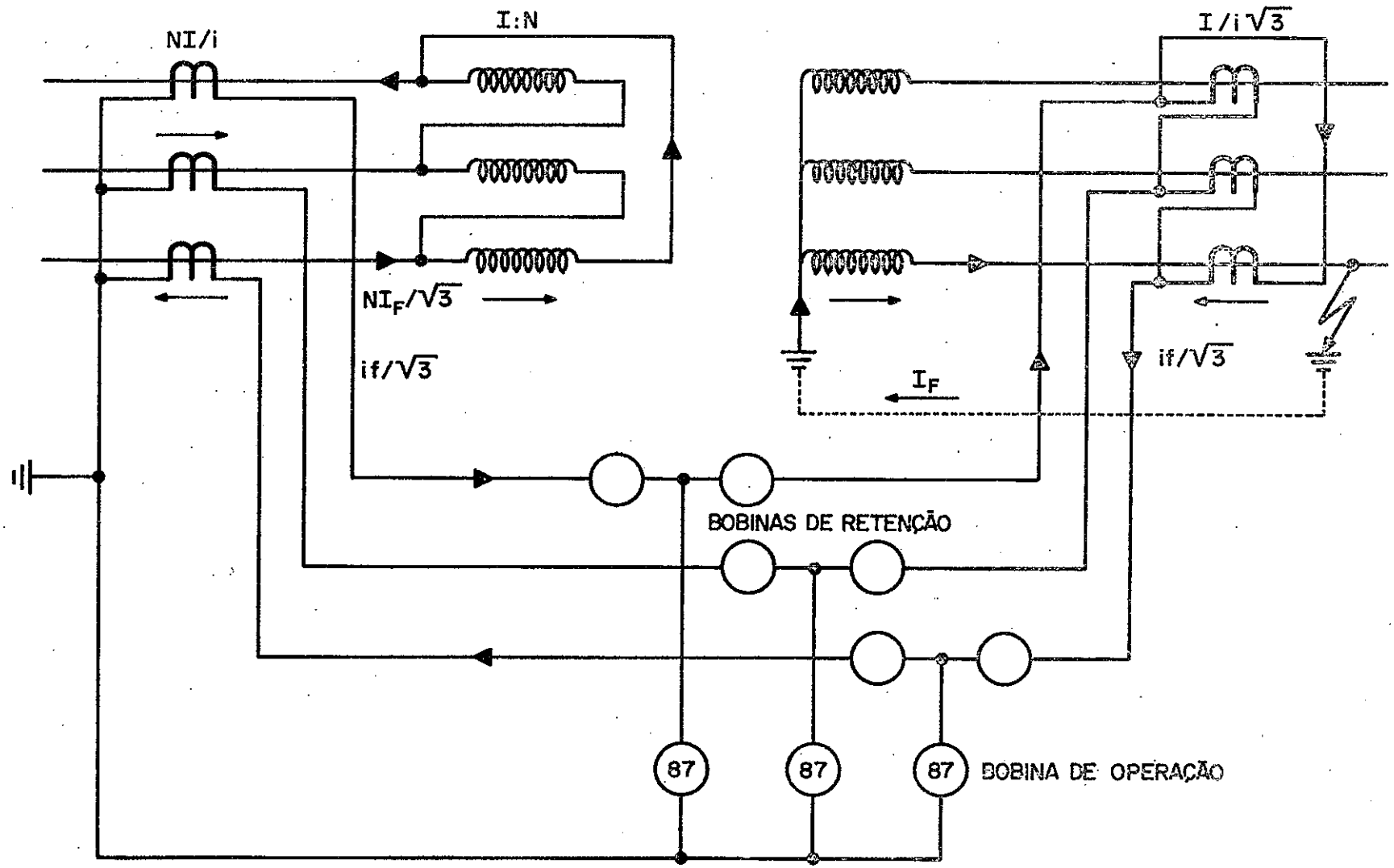
9.6. - Westinghouse - Transmiss-on and Distribution Reference-Book

9.7. - Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers - IEEE

9.8 - The Art and Science of Protective Relaying - Mason.

São Paulo, 2 de março de 1972

FIGURA 2.0.1 – DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE NUM TRANSFORMADOR PARA UM CURTO FASE-TERRA EXTERNO A ZONA DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL



SP/GTC/05

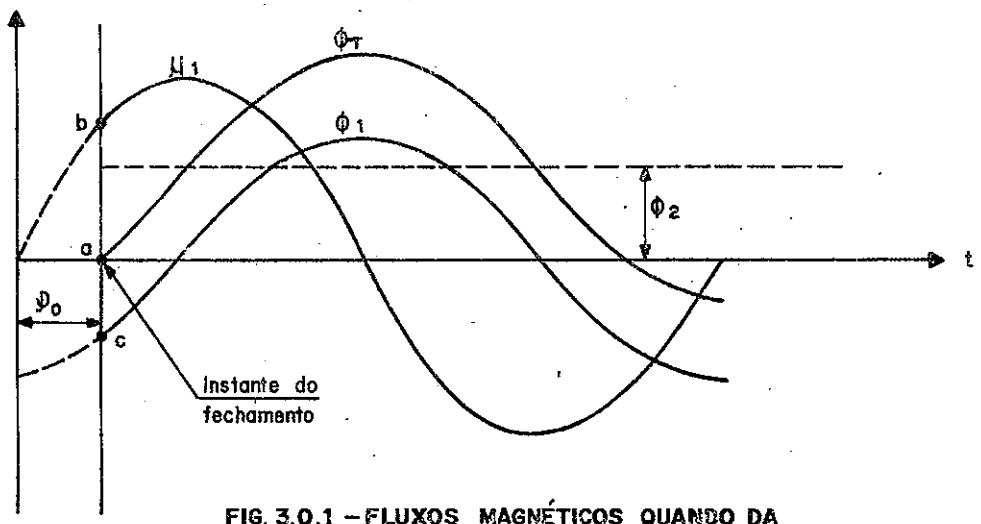


FIG. 3.0.1 – FLUXOS MAGNÉTICOS QUANDO DA ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR

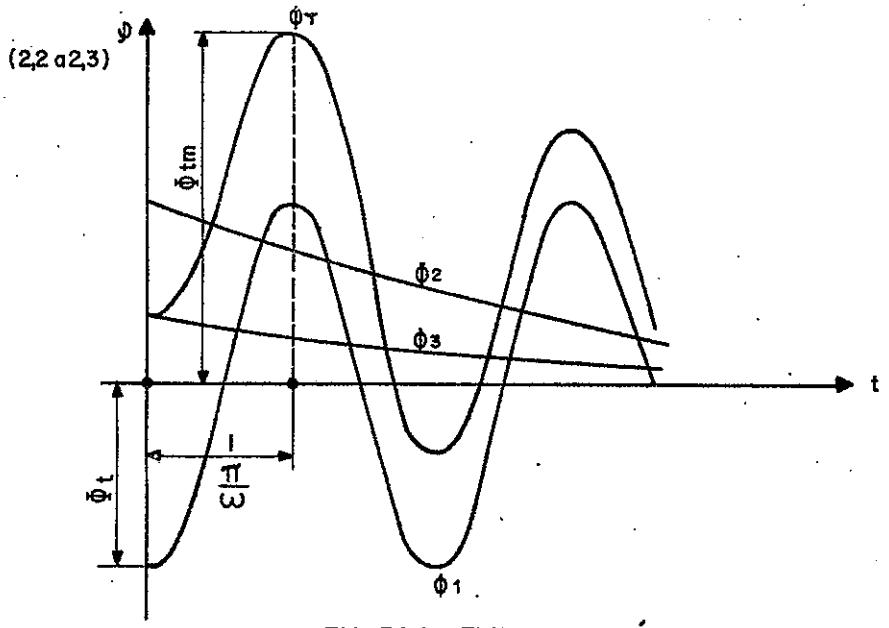


FIG. 3.0.2 – FLUXOS MAGNÉTICOS QUANDO DA ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR

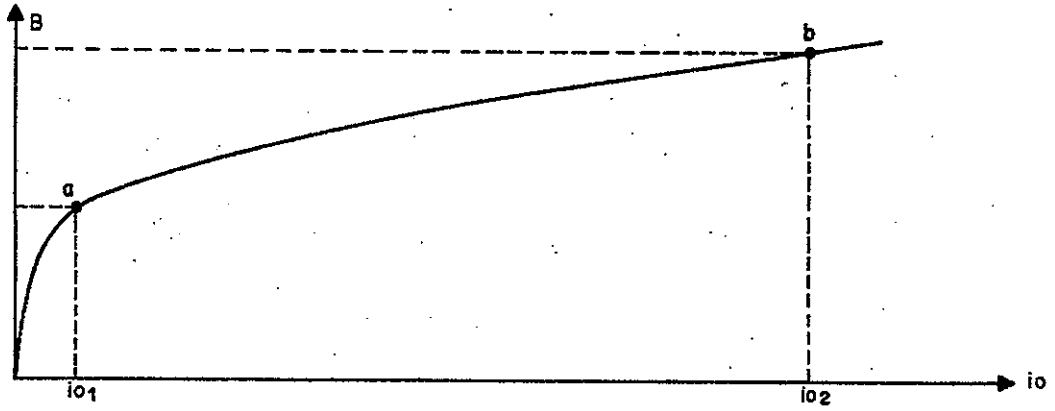


FIG. 3.0.3 – CURVA TIPICA DE MAGNETIZAÇÃO

FIGURA 3.0.4 - CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO NUM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

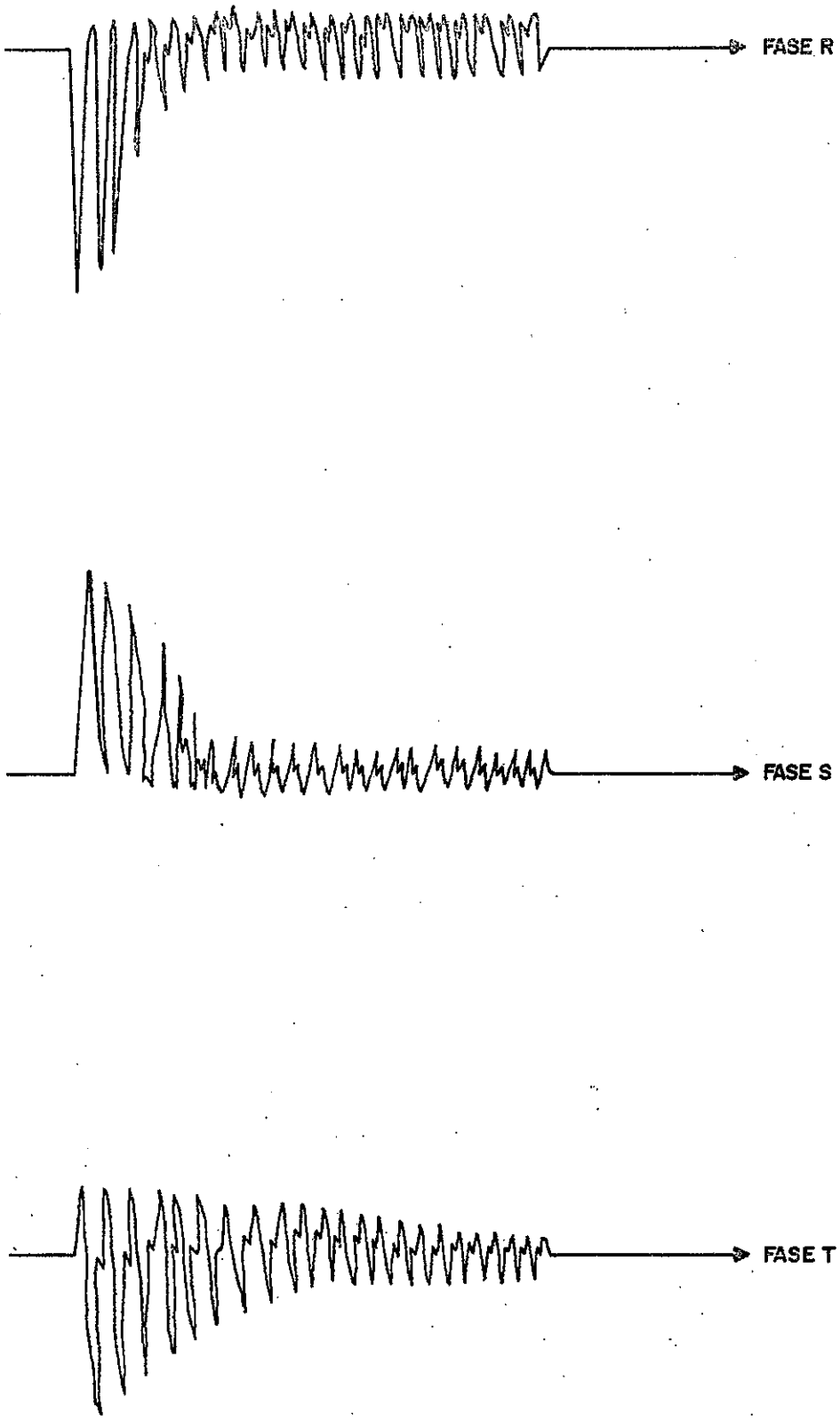
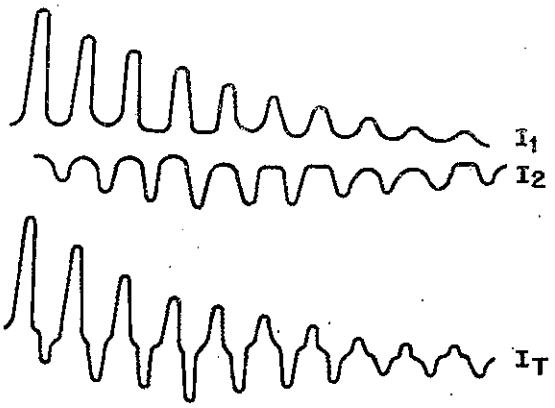
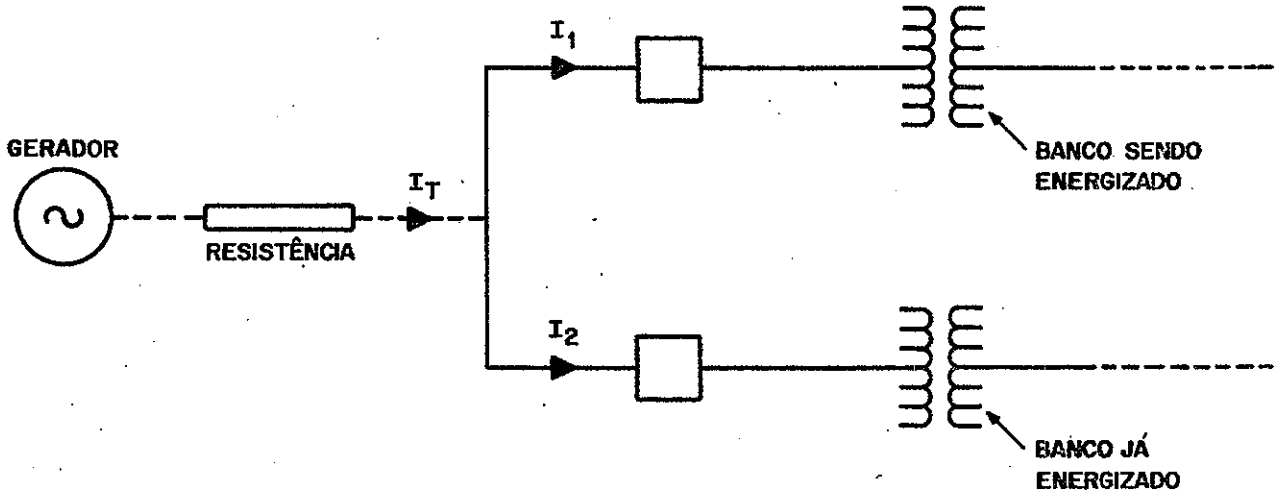



FIGURA 6.0.1 - A CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO EM BANCOS EM PARALELO