

Seleção de TCs para Otimização do Desempenho dos Relés

Gabriel Benmouyal
IREQ

Jeff Roberts e Stanley E. Zocholl
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Publicado no
SEL Journal of Reliable Power, Volume 2, Número 3, setembro de 2011

Apresentado previamente na
1999 Pennsylvania Electric Association Electrical Equipment and Protection
Committee, setembro de 1999,
51st Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, abril de 1997,
50th Annual Conference for Protective Relay Engineers, abril de 1997,
Electrical Council of New England, First Engineering Joint Meeting, abril de 1997,
e 23rd Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 1996

Originalmente apresentado na
1996 Pennsylvania Electric Association Relay Committee Fall Meeting, setembro de 1996

Traduzido para o português em julho de 2016

Seleção de TCs para Otimização do Desempenho dos Relés

Gabriel Benmouyal, *IREQ*

Jeff Roberts e Stanley E. Zocholl, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Sumário—Embora haja um interesse permanente na aplicação de transformadores de corrente (TCs) para relés de proteção, existem poucas regras escritas para seleção das características nominais. Por exemplo, o documento C37.110 do PSRC (*Power System Relaying Committee*), “IEEE Guide to the Application of Current Transformers for Relaying Purposes” (“Guia do IEEE para Aplicação de Transformadores de Corrente Usados para Relés de Proteção”), contém regras de seleção para aplicações do relé diferencial. Contudo, ele não oferece nenhuma orientação para outras aplicações onde essas regras não se aplicam. Núcleos pequenos, cabos longos, cargas (*burdens*) elevadas, correntes elevadas e offset provocam a saturação dos TCs. A saturação afeta praticamente todos os elementos do relé que usam corrente. Este artigo analisa os efeitos da saturação em vários desses elementos e fornece diretrizes de aplicação que eliminam ou minimizam o risco de saturação do TC.

Palavras-chave—Seleção do TC, efeitos da saturação do TC, aplicação do TC

I. INTRODUÇÃO

Para introduzir o tópico da seleção do transformador de corrente (TC), analisamos inicialmente a relação entre a curva de excitação e a carga (*burden*) padrão e características nominais da tensão de um TC. Em seguida, analisamos a relação entre a densidade do fluxo e a integral da tensão em relação ao tempo. Usando essas informações, relacionamos a corrente de falta, a carga do TC e a relação X/R do sistema em uma expressão, a qual determina basicamente a faixa útil de qualquer TC. O trabalho identifica então os efeitos dos níveis de saturação em vários elementos do relé e fornece diretrizes de aplicação que eliminam ou minimizam o risco de saturação do TC.

II. CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO TC E CURVA DE EXCITAÇÃO

Uma quantidade finita de amperes-espiras é necessária para estabelecer o fluxo no núcleo de um TC e pode ser expressa como a corrente de magnetização medida nos terminais secundários. A corrente de excitação, que é subtraída da corrente primária refletida (*ratio current*), tem valores definidos para cada valor de tensão, conforme mostrado na Fig. 1. Esta curva detalha a tensão do estado de regime versus corrente de excitação, onde a tensão é medida através de um voltímetro para leitura da média, calibrado em *rms*. A curva apresenta, na verdade, um gráfico do fluxo versus corrente de magnetização, uma vez que a tensão média é a integral da tensão em relação ao tempo (*volt-time* [tensão-tempo]) calculada durante o período da onda senoidal.

A curva de excitação, mostrada na Fig. 1 para um TC de bucha multirrelação de 2000:5, C400, representa uma medição do desempenho do TC e pode ser usada para determinar os fatores de correção da relação em diversos níveis de excitação para a condição de regime. Embora a curva de excitação tenha

um valor do “ponto de joelho” (*knee point*) bem definido [1], ela não tem um ponto discernível de saturação. Por este motivo, as características nominais de precisão para uso com relés são baseadas na correção da relação não ultrapassando 10 por cento e os valores nominais são determinados pela classificação e tensão secundária. A tensão nominal secundária é a tensão que o TC vai suportar através de sua carga padrão, com 20 vezes a corrente nominal, sem exceder a correção da relação de 10 por cento.

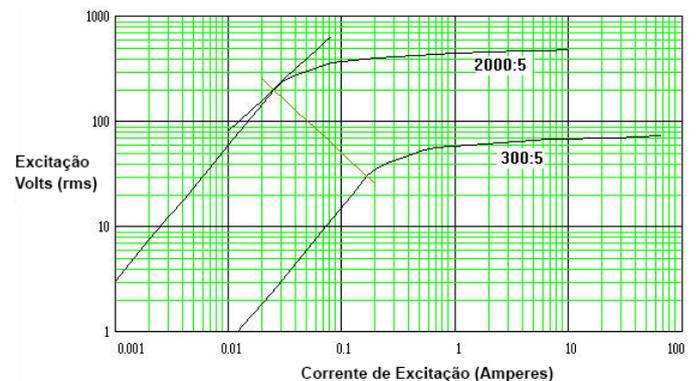


Fig. 1. Curva de Excitação do TC 2000:5 e Tap 300:5 Mostrada com Linhas Normais e Tangentes do *Knee-Point*

As cargas padronizadas para os relés de proteção são 1, 2, 4 e 8 ohms, todas com um ângulo de impedância de 60 graus. Conseqüentemente, para 20 vezes a corrente nominal secundária de 5 amperes, os valores nominais padronizados são 100, 200, 400 e 800 volts. Uma vez que os valores nominais do TC ocorrem para 100 amperes de corrente secundária, a um fator de correção da relação de 10 por cento, a tensão nominal pode ser lida a partir da curva de excitação para 10 amperes da corrente de excitação. Em primeiro lugar, precisamos subtrair a queda da tensão interna devida à resistência *dc* do enrolamento. Para o enrolamento com relação de 2000:5 da Fig. 1, a tensão lida na curva, para 10 amperes, é 496 volts. Neste caso, a tensão é menor do que o valor nominal 800 e maior do que 400. Portanto, a classificação nominal é C400, considerando que o enrolamento de 400 espiras tem uma resistência *dc* menor do que 0,0024 ohm-por-espira para garantir uma queda de tensão interna menor do que 96 volts.

III. ÁREA SOB A CURVA DE TENSÃO

A tensão na carga v está relacionada às espiras N do núcleo e à taxa de variação do fluxo no núcleo ϕ através da equação de indução:

$$v = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Podemos integrar (1) para mostrar que a densidade do fluxo no núcleo é representada pela área sob a forma de onda da tensão. Portanto, os enlaces do fluxo no núcleo são obtidos a partir da integral (2), onde o fluxo é expresso como a densidade do fluxo B vezes a área transversal do núcleo A .

$$\phi \cdot N = B \cdot A \cdot N = \int_0^t v \cdot dt \quad (2)$$

Podemos, agora, reconhecer a importância do valor nominal de tensão ANSI, uma vez que a área sob a onda senoidal, de tal magnitude, representa a densidade do fluxo saturado B_s . Esta área sob a curva de tensão representa o limite de saturação e estabelece a fronteira da operação livre de saturação.

A Fig. 2 mostra a área sob a curva de tensão (*volt-time area*) sombreada que é produzida pela corrente de falta assimétrica. Neste caso, I_f é a magnitude da corrente de falta no secundário, Z_B é a impedância da carga e L/R é a constante de tempo do circuito primário sob defeito. As componentes senoidal e exponencial da forma de onda estão representadas tracejadas para comparação. O gráfico enfatiza o fato de que, embora consideremos a classificação nominal C como uma onda senoidal, temos de considerar a área sob a curva de tensão aumentada, para uma falta assimétrica, quando estivermos selecionando um TC.

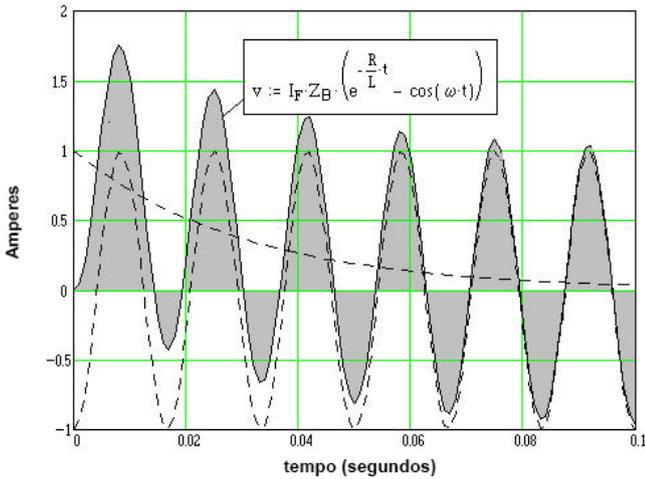


Fig. 2. Tensão da Carga para uma Corrente de Falta Assimétrica

Usando a tensão assimétrica em (2), podemos escrever:

$$B_s \cdot N \cdot A \cdot \omega = I_f Z_B \left[-\frac{\omega L}{R} \int_0^t e^{-\frac{R}{L}t} \left(-\frac{R}{L} dt \right) - \int_0^t \cos(\omega t) (\omega dt) \right] \quad (3)$$

Em (3), o limite da integral do termo exponencial é a relação X/R do circuito primário. Uma vez que a integral limite do termo cosseno é unitária, podemos escrever a equação:

$$B_s \cdot N \cdot A \cdot \omega = \left(\frac{X}{R} + 1 \right) \cdot I_f Z_B \quad (4)$$

A Equação (4) expressa a tensão da classificação nominal C em termos dos parâmetros físicos do TC, isto é, da densidade do fluxo saturado B_s , da relação de espiras N , da área transversal do núcleo A e da frequência do sistema ω . Além disso, ela determina a faixa de operação sem saturação do TC em termos da relação X/R do sistema, da máxima corrente de falta I_f e da carga Z_B do TC.

IV. CRITÉRIO PARA EVITAR SATURAÇÃO

Podemos derivar uma forma mais versátil de (4), reconhecendo que a tensão nominal é 20 vezes a tensão na carga padrão para a corrente nominal. Em seguida, se expressarmos a corrente de falta I_f em p.u. da corrente nominal, e a carga Z_B em p.u. da carga padrão, (4) passa a ser um critério simples para evitar a saturação:

$$20 \geq \left(\frac{X}{R} + 1 \right) \cdot I_f \cdot Z_b \quad (5)$$

onde:

I_f é a corrente máxima de falta em p.u. da corrente nominal do TC.

Z_b é a carga do TC em p.u. da carga padrão.

X/R é a relação X/R do circuito primário sob defeito.

A seguir, apresentamos um exemplo de como o critério é usado: Uma linha de transmissão tem um ângulo de impedância de 85,24 graus (isto é, a relação X/R é 12). A máxima corrente de falta é quatro vezes a corrente nominal de um TC C800. A Equação (5) é atendida quando Z_b for igual ou menor do que 0,38 p.u. da carga padrão de 8 ohms. Portanto, a saturação é evitada mantendo-se a carga do TC em 3,02 ohms ou menos.

V. SELEÇÃO DE TCS PARA PROTEÇÃO DE LINHAS

Na prática, os modernos relés de proteção de linhas eliminam as faltas em tempos da ordem de ciclos para preservar a estabilidade, identificam com precisão o tipo da falta para aplicações de religamento monopolar e determinam com precisão a localização da falta. Para isso, os relés de linhas precisam de uma corrente sem distorção no secundário do TC para executar as medições fasoriais na presença de *offset dc*. Quanto estão corretas as especificações dos TCs para proteção de linhas? O critério estabelecido em (5) pode ser usado para verificar qualquer aplicação.

Por exemplo, o sistema de proteção de uma linha de transmissão de 138 kV, com 4,5 milhas de extensão, usa uma relação do transformador de potencial (TP) de 1200:1 e uma relação do TC de 300:1. O TC é multirrelação de 2000:5, C800, no tap 1500:5. A falta máxima é de 4.625 MVA, ou 19.349 amperes, e o ângulo de impedância da linha e da fonte é de 74 graus. Os parâmetros para (5) são:

$$I_f = \frac{19349 \text{ A}}{1500 \text{ A}} = 12.9 \quad \frac{X}{R} = \tan(74) = 3.48 \quad (6)$$

Substitua esses valores em (5) para determinar a carga máxima em p.u. da carga padrão:

$$Z_b \leq \frac{20}{\left(\frac{X}{R} + 1 \right) \cdot I_f} = \frac{20}{(3.48 + 1) \cdot 12.9} = 0.345 \quad (7)$$

A Equação (7) indica que a carga deve ser menor ou igual a 0,345 p.u. da carga padrão. Embora a carga padrão seja de 8 ohms para a classificação nominal C800, temos que usar três quartos do valor da carga padrão, baseando-se na constante volts por espiras, uma vez que o tap 1500:5 está sendo usado. Consequentemente, a saturação é evitada se a carga total for igual ou menor que:

$$Z_B = 0.345 \cdot 6 = 2.073 \Omega \quad (8)$$

A previsão da carga (*burden*) para a instalação é de:

Cablagem total do circuito do TC com 200 pés de cabo #11 AWG (1,261 Ω /1000')	0,252 Ω
Enrolamento do TC (300 espiras a 0,0025 Ω /espira)	0,750 Ω
<i>Burden</i> admissível do relé	1,071 Ω
<i>Burden</i> total	2,073 Ω

Os relés, consistindo de um relé de distância microprocessado com uma carga desprezível e um relé de sobrecorrente usado como detector de corrente, têm uma carga combinada que é, certamente, menor do que os 1,071 ohm distribuídos. Consequentemente, a saturação do TC é evitada para todas as faltas assimétricas, bem como para as faltas simétricas na linha.

VI. PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DO TC

O exemplo acima sugere o seguinte procedimento para seleção do TC, usando (5) em qualquer aplicação de relés de proteção de linhas:

1. Determinar a máxima corrente de falta I_F em amperes primários.
2. Determinar a relação X/R do circuito primário.
3. Selecionar a tensão nominal do TC. Em seguida, determinar a carga total em p.u. da carga padrão do TC.
4. Usando (5), calcular I_F , que é a corrente de falta em p.u. do valor nominal do TC.
5. Dividir a máxima corrente de falta primária I_F pela corrente em p.u. para determinar a corrente nominal do TC. Selecionar o valor nominal padrão mais próximo e maior do que o valor calculado.

Para quais tipos de aplicação pode o procedimento ser um sucesso? O fato de (5) poder ou não ser atendida depende da relação X/R e da magnitude da máxima corrente de falta. A carga e a relação X/R podem ser especificadas e, então, (5) pode ser usada para calcular a máxima corrente de falta para uma determinada relação do TC. A Tabela I relaciona as máximas correntes de falta versus relação X/R, para as quais a saturação é evitada usando os TCs de 3000:5, 2000:5, ou 1500:5.

TABELA I
MÁXIMA CORRENTE PARA EVITAR A SATURAÇÃO

Ângulo da Linha	Relação X/R	C800, 3000:5 $Z_B = 2.5$	C800, 2000:5 $Z_B = 2.0$	C400, 1500:5 $Z_B = 2.0$
75°	3,7	40.547 A	33.812 A	12.680 A
77°	4,3	36.012 A	30.010 A	11.254 A
80°	5,7	28.780 A	23.983 A	8.994 A
82°	7,1	23.689 A	19.715 A	7.393 A
83°	8,1	20.997 A	17.479 A	6.561 A
84°	9,5	18.261 A	15.217 A	5.707 A
85°	11,4	15.446 A	12.872 A	4.827 A
86°	14,3	12.548 A	10.457 A	3.921 A
87°	19,1	9.561 A	7.968 A	2.988 A
88°	28,6	6.478 A	5.399 A	2.025 A

VII. CÁLCULO DO *BURDEN* DO TC

No processo de seleção dos TCs, estamos interessados em minimizar a carga total (*total burden*) que consiste da

resistência interna do próprio enrolamento do TC, da resistência dos cabos de conexão entre o TC e o relé, incluindo o caminho de retorno, e da carga dos relés conectados.

Os TCs com relações mais altas (3000:5) contribuem com uma resistência de 0,0025 ohm-por-espira para a carga; relações mais baixas (300:5) contribuem com 0,005 ohm-por-espira. Consequentemente, aplicando um TC de 600 espiras (3000:5), a contribuição é de uma resistência interna de 1,5 ohm. Em novas instalações, podemos escolher a dimensão do cabo para controlar a resistência do percurso do circuito. Por exemplo, o log da resistência por 1.000 pés de cabo é proporcional à bitola AWG do cabo. A referência para um cabo de cobre é de 0,9989 ohm/1000 pés para um cabo com bitola #10 AWG. Diminuindo a bitola em três números, reduz a resistência pela metade, e aumentando a bitola em três números, dobra a resistência. Portanto, a fórmula conveniente para a resistência versus a bitola do cabo AWG é:

$$\Omega / 1000' = e^{0.232G - 2.32} \quad (9)$$

onde:

$\Omega / 1000'$ é a resistência em ohms por 1.000 pés.

G é o número da bitola AWG.

Uma prática adequada consiste em dimensionar os cabos para limitar a resistência do cabo em 0,5 ohm ou menos. De acordo com esta regra, o cabo com bitola #10 seria o escolhido se os TCs estivessem instalados a 250 pés dos relés, para um percurso total de 500 pés para os, e a partir dos, TCs.

Finalmente, podemos comparar a carga de um relé microprocessado multifunção, considerada quase desprezível, com a carga da ordem de ohms que é contribuída pelos relés eletromecânicos que executam a mesma função. A vantagem da carga baixa pode ser vista nas restrições da corrente de falta e cargas versus relação X/R apresentadas na Tabela I.

VIII. LIMITES DO CRITÉRIO

Pode a saturação ser evitada em todas as aplicações? Um limite para o critério está indicado na Tabela I, onde a máxima corrente de falta admissível para uma determinada característica nominal do TC diminui severamente com o aumento da relação X/R. O limite pode ser observado quando uma relação X/R elevada e uma corrente de falta elevada ocorrerem próximas ao gerador. Neste caso, torna-se impraticável dimensionar o TC para evitar a saturação durante uma falta assimétrica. Precisamos, então, deixar o critério de lado e especificar o TC de acordo com a sensibilidade aceitável para faltas na extremidade da linha. Persiste, então, o conceito de que temos de avaliar o efeito da saturação durante o *offset*.

IX. ESTATÍSTICAS DA ASSIMETRIA

Quando a corrente for menor do que 20 vezes o valor nominal do TC e a carga for menor do que a carga nominal padrão, não ocorrerá saturação para uma corrente de falta simétrica. Além disso, é mais provável a ocorrência de uma falha na isolação ou de *flashover* para a tensão de pico, onde a corrente reativa localiza-se no zero natural. Consequentemente, faltas fase-terra têm maior probabilidade de serem faltas simétricas. Entretanto, em qualquer falta trifásica, todas as correntes não podem estar em zero simultaneamente em cada fase e o *offset dc* é inevitável em uma ou mais fases. Além disso, o deslocamento das fases causa um *offset dc* desigual em cada fase.

X. UMA HISTÓRIA DE CASO

De que modo a saturação afeta a resposta de um relé de distância? O efeito é menos dramático do que se possa imaginar e pode ser melhor ilustrado através de um exemplo. Considere uma linha de transmissão de 230 kV, com 31 milhas de extensão, protegida por um relé de distância microprocessado, onde as relações do TP e TC são de 2000:1 e 600:1, respectivamente. O TC especificado é de 3000:5, C800, com uma carga total de 2,5 ohms. A linha é uma das diversas linhas que conectam uma subestação da geração ao sistema, com potência máxima para uma falta trifásica de 17.184 MVA e relação X/R da linha e da fonte igual a 25. A corrente de falta para uma falta trifásica na linha, localizada a 1,55 milha da subestação, é de 33.195 amperes por fase. A resposta do relé para uma falta severa deste tipo, considerando diversos ângulos de início da falta, está mostrada nos três relatórios de eventos seguintes.

XI. FALTA DE 33 KA COM TCS IDEAIS

O Evento 1, mostrado na Fig. 3, é o caso ideal de uma falta trifásica sem saturação do TC. O relatório inclui amostras a cada quarto de ciclo no formato de sequência de eventos. As amostras 9 a 36 do relatório exibem as grandezas de corrente e tensão de pré-falta, falta e pós-falta, e os estados de todas as

entradas, saídas e elementos de medição da falta. As correntes e tensões estão identificadas na parte superior, a partir da esquerda para a direita, e as identificações dos elementos (lidas verticalmente) encontram-se à direita. As sequências dos tempos estão indicadas a partir da parte superior para a parte inferior, em intervalos de um quarto de ciclo. Com um quarto de ciclo representando 90 graus entre as amostras, uma amostra qualquer e a amostra anterior formam as partes real e imaginária do fasor, fornecendo a magnitude e o ângulo de fase da grandeza medida.

O evento, disparado na 16a amostra, indica o *pickup* do elemento de sobrecorrente instantâneo de supervisão 50H. O elemento de sequência-negativa 51Q atua momentaneamente enquanto um ciclo completo de dados está sendo acumulado. Entretanto, o ponto significativo é aquele em que o primeiro dos elementos *mho* fase-fase (ZBC) declara uma falta na Zona 1 e atua os Contatos de Trip 1 e 2 (indicados por B naquela coluna) antes que a aquisição do ciclo completo de dados seja concluída. O relé, então, continua a medir até que a corrente seja interrompida e, neste intervalo, determina a localização precisa da falta. Em seguida, o relé anexa o tipo da falta, as sinalizações do painel frontal, a localização da falta e a frequência de rastreamento no final do relatório.

EXAMPLE: BUS B, BREAKER 3										Date: 07/11/96		Time: 08:49:42.742	
CURRENTS (pri)				VOLTAGES (kV pri)			RELAY ELEMENTS		OUT	IN	Event Sample		
IR	IA	IB	IC	VA	VB	VC	ZZZZZO	555566L	1357	1357			
							ABCBCO	3111077O	8888	8888			
							BCAGGGS	2NQPPNP	2468	2468			
-12	-3	-3	-6	60.2	74.9	-135.2	.....	.....	.....	1...	9
0	0	0	0	-121.3	112.9	8.5	.....	.....	.....	.....	10
0	0	0	0	-60.2	-74.9	135.2	.....	.....	.....	.....	11
-9	-3	-3	-3	121.3	-112.9	-8.5	.....	.....	.....	.....	12
-9	-3	-3	-3	60.2	74.9	-135.2	.....	.....	.....	.....	13
-3	-3	0	0	-121.3	112.9	8.6	.....	.....	.....	.....	14
0	0	0	0	-60.1	-74.9	135.2	.....	.....	.....	.....	15
-84	-7065	-1323	8304	104.8	-84.8	-20.1	.....	H..	.....	.....	16
201	10425	-10416	192	40.3	57.1	-97.6	1.....	Q p.H..	B4..	1...	17		
66	13899	11169	-25002	-58.0	41.4	16.8	111....	Q p.H..	B4..	1...	18		
-243	-25761	24000	1518	-17.1	-28.3	45.6	111....	Q p.H..	B4..	1...	19		
18	-13668	-19701	33387	27.8	-26.0	-2.0	111....	p.H..	B4..	1...	20		
60	30663	-27171	-3432	13.7	17.3	-31.2	111....	H..	B4..	1...	21	
-21	13662	19707	-33390	-27.8	26.0	2.0	111....	H..	B4..	1...	22	
-72	-30666	27162	3432	-13.8	-17.3	31.2	111....	H..	B4..	1...	23	
15	-13659	-19710	33384	27.8	-26.0	-2.0	111....	H..	B4..	1...	24	
63	30666	-27165	-3438	13.7	17.3	-31.2	111....	H..	B4..	1...	25	
-24	13650	19710	-33384	-27.8	26.0	2.0	111....	H..	B4..	1...	26	
-60	-25059	17940	7059	-16.3	-13.4	27.3	111....	H..	B4..	1...	27	
-3	-7653	-13023	20673	33.6	-21.5	-10.1	111....	H..	B4..	1...	28	
12	9720	-4362	-5346	9.4	4.8	-11.8	111....	H..	B4..	1...	29	
9	828	3165	-3984	-19.8	8.5	9.1	111....	Q p.H..	B4..	.....	30	
3	0	0	3	-0.0	0.0	0.0	111....	Q p.H..	B4..	.....	31	
-9	-3	-3	-3	-0.0	-0.0	0.0	.....	Q p....	* B...	.....	32
-9	-3	-3	-3	-0.0	-0.0	-0.0	.....	Q.....	* B...	.....	33
0	0	0	0	0.0	0.0	-0.0	.....	Q.....	* B...	.....	34
0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	.....	Q.....	* B...	.....	35
-9	-3	-3	-3	-0.0	-0.0	-0.0	.....	Q.....	* B...	.....	36
Event: ABC Location: +1.55 Frequency: 60.0													
Targets: INST ZONE1 EN A B C V1 Mem 135.0 / 333													

Fig. 3. Evento 1 – Falta ABC de 33 kA, Localizada a 1,55 Milha, em uma Linha de Transmissão de 230 kV (Teórico—Sem Saturação do TC)

Este evento é, evidentemente, puramente teórico, uma vez que o *offset dc* não pode ser evitado para uma falta trifásica e que a carga, as características nominais do TC especificado e a relação X/R indicam que o *offset dc* vai causar saturação com um valor de corrente de falta de 7.413 amperes. A saturação elevada do TC causada pela falta de 33 kA, com *offset* máximo na Fase A, está mostrada na Fig. 3.

XII. O EFEITO DA SATURAÇÃO

Podemos observar os efeitos da saturação nas formas de onda da Fig. 4. Uma porção considerável da corrente refletida da Fase A foi para a corrente de magnetização. O que restou da corrente refletida na carga é uma corrente extremamente reduzida e distribuída na direção do pico da parte superior da forma de onda. A filtragem digital usada em um relé

microprocessado extrai a componente fundamental da forma de onda [3]. Consequentemente, o relé extrai uma corrente fundamental reduzida em magnitude e adiantada na fase quando comparada à corrente refletida. Ao mesmo tempo, devido ao *offset* máximo estar na Fase A, a saturação é retardada nas Fases B e C.

O resultado da amostragem da corrente na Fase A através de um filtro cosseno de 16 amostras por ciclo está mostrado na Fig. 5a. A corrente secundária saturada e a magnitude da fundamental estão representadas em linha cheia, com a corrente primária refletida e a magnitude de sua fundamental representadas em linha tracejada. No gráfico da Fig. 5b o ângulo de fase, no qual a fundamental do sinal saturado está à frente daquela correspondente à corrente refletida.

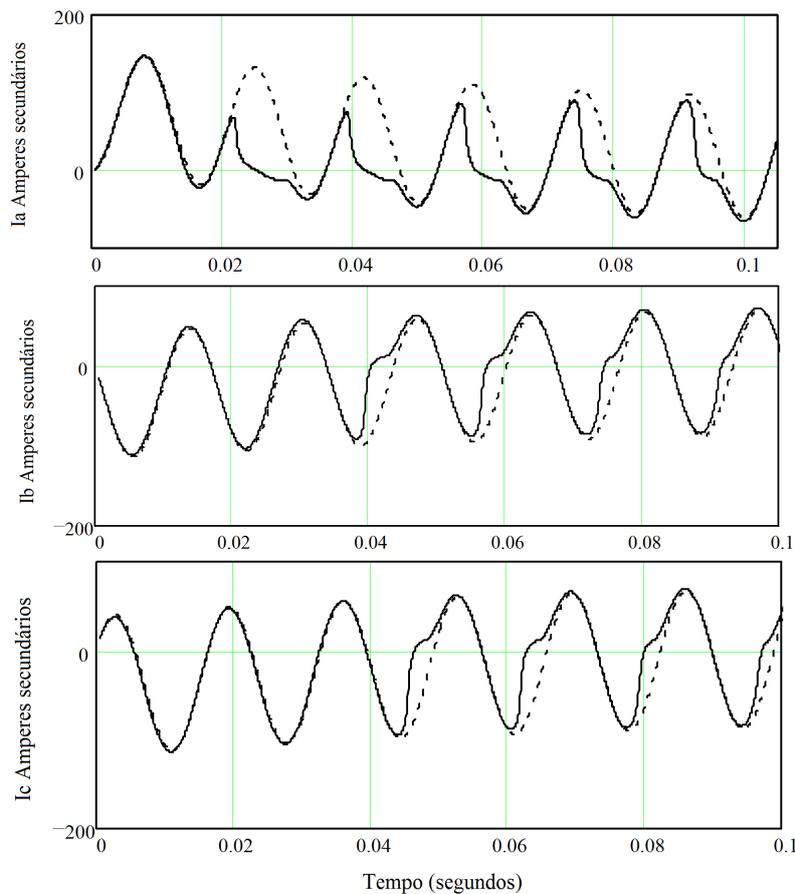


Fig. 4. Corrente Secundária em um TC de 3000:5, C800, para uma Falta Trifásica de 33 kA, com *Offset*, Localizada a 1,55 Milha, com uma Constante de Tempo Primária de 0,066

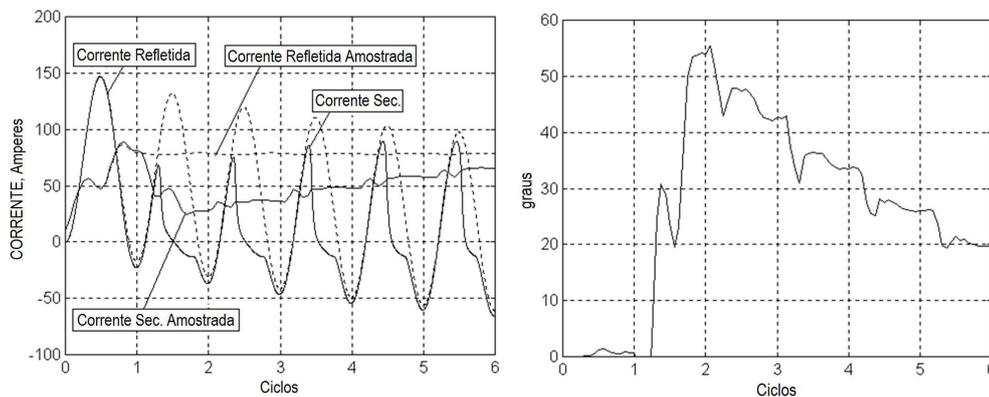


Fig. 5. Magnitude e Diferença de Fases da Corrente Secundária Amostrada

A relação da fundamental da corrente secundária saturada pela corrente refletida secundária ideal resulta em um fator complexo. Podemos imaginar este fator sendo aplicado às amostras da corrente refletida para produzir uma forma de onda saturada.

Por exemplo, os fatores amostra-por-amostra dos primeiros dois ciclos das formas de onda da Fig. 4 estão relacionados na Tabela II. Os fatores apresentam pouca alteração em um ciclo da falta. Contudo, no instante 1,5 ciclo, a corrente secundária da Fase A é 58,3 por cento da refletida e está adiantada da corrente refletida em 23,7 graus.

TABELA II
FATORES DE SATURAÇÃO RESULTANTES DO *OFFSET* MÁXIMO NA FASE A

Corrente da Fase A			Corrente da Fase B			Corrente da Fase C		
Ciclos	$I_{sec}/I_{refletida}$	Ângulo δ	Ciclos	$I_{sec}/I_{refletida}$	Ângulo δ	Ciclos	$I_{sec}/I_{refletida}$	Ângulo δ
0	0,9993	0,0004	0	0,9987	0,0021	0	0,9978	0,0127
0,0625	0,9991	0,0020	0,0625	0,9984	0,0121	0,0625	0,9975	0,1045
0,1250	0,9988	0,0061	0,1250	0,9979	0,0293	0,1250	0,9994	0,1646
0,1875	0,9983	0,0151	0,1875	0,9973	0,0600	0,1875	1,0004	0,1018
0,2500	0,9976	0,0361	0,2500	0,9967	0,1181	0,2500	1,0002	0,0562
0,3125	0,9963	0,0893	0,3125	0,9963	0,2245	0,3125	0,9998	0,0377
0,3750	0,9945	0,2330	0,3750	0,9976	0,3653	0,3750	0,9994	0,0342
0,4375	0,9934	0,6050	0,4375	1,0008	0,3845	0,4375	0,9990	0,0433
0,5000	0,9993	1,2230	0,5000	1,0021	0,2724	0,5000	0,9985	0,0690
0,5625	1,0147	1,4725	0,5625	1,0017	0,1976	0,5625	0,9983	0,1153
0,6250	1,0255	1,0979	0,6250	1,0010	0,1753	0,6250	0,9986	0,1722
0,6875	1,0271	0,6637	0,6875	1,0005	0,1794	0,6875	0,9996	0,2079
0,7500	1,0233	0,4677	0,7500	1,0003	0,1942	0,7500	1,0005	0,2012
0,8125	1,0206	0,5630	0,8125	1,0004	0,2072	0,8125	1,0010	0,1699
0,8750	1,0202	0,8042	0,8750	1,0007	0,1998	0,8750	1,0010	0,1422
0,9375	1,0245	0,7519	0,9375	1,0008	0,1653	0,9375	1,0008	0,1298
1,0000	1,0238	0,6500	1,0000	1,0002	0,1603	1,0000	1,0008	0,1315
1,0625	1,0068	-1,381	1,0625	0,9992	0,1747	1,0625	1,0008	0,1333
1,1250	0,8951	-7,223	1,1250	0,9978	0,2349	1,1250	1,0008	0,1319
1,1875	0,7017	-9,300	1,1875	0,9961	0,3922	1,1875	1,0008	0,1268
1,2500	0,5235	2,9531	1,2500	0,9951	0,7292	1,2500	1,0006	0,1197
1,3125	0,5240	24,3842	1,3125	0,9978	1,2680	1,3125	1,0003	0,1141
1,3750	0,5866	30,8397	1,3750	1,0062	1,6627	1,3750	0,9997	0,1185
1,4375	0,6180	28,9589	1,4375	1,0142	1,5694	1,4375	0,9988	0,1472
1,5000	0,5830	23,7362	1,5000	1,0149	1,2803	1,5000	0,9978	0,2216
1,5625	0,4831	19,4597	1,5625	1,0098	1,3004	1,5625	0,9972	0,3659
1,6250	0,3674	23,0943	1,6250	1,0066	1,6398	1,6250	0,9980	0,5793
1,6875	0,3089	37,5746	1,6875	1,0065	1,9396	1,6875	1,0009	0,7760
1,7500	0,3226	49,7819	1,7500	1,0080	2,0592	1,7500	1,0048	0,8242
1,8125	0,3426	53,5113	1,8125	1,0087	2,1352	1,8125	1,0068	0,7346
1,8750	0,3499	53,6025	1,8750	1,0089	2,0608	1,8750	1,0060	0,6691
1,9375	0,3510	54,1780	1,9375	1,0088	2,1106	1,9375	1,0043	0,7319
2,0000	0,3475	53,8137	2,0000	1,0042	1,9722	2,0000	1,0037	0,8540

XIII. FALTA DE 33 KA COM ASSIMETRIA MÁXIMA NA FASE A

O efeito dos fatores de saturação é aparente nas amostras registradas no próximo relatório de evento (mostrado na Fig. 6). O trip da Zona 1 é similar àquele do caso ideal. O elemento instantâneo 50M é ativado primeiro, seguido do *pickup* momentâneo do elemento direcional de sequência-negativa 32Q e do elemento de sobrecorrente de sequência-negativa 51Q durante a aquisição de um ciclo completo de informações das três fases. Como no caso anterior, o evento é disparado na 16a amostra e todos os elementos de fase ZAB, ZBC e ZCA indicam o trip da Zona 1 na 18a amostra, antes

que um ciclo completo de amostras tenha sido acumulado. Uma vez que o trip tenha sido emitido, o relé continua a medição para identificar o tipo e a localização da falta. O efeito da saturação na Fase A é visualizado com o aparecimento de uma corrente residual falsa nas amostras 21 e 22. Consequentemente, a lógica de identificação da falta [4] detecta uma falta à terra na 23a amostra, declara uma falta das Fases BC à terra e bloqueia dois dos elementos de fase. Neste caso, apesar da corrente reduzida na Fase A e da residual falsa, o relé calculou a localização da falta a 1,52 milha usando corrente e tensão BC.

EXAMPL: BUS B, BREAKER 3 - S/N 96030003 Date: 07/16/96 Time: 10:02:13.933												
CURRENTS (pri)				VOLTAGES (kV pri)			RELAY ELEMENTS		OUT	IN		
IR	IA	IB	IC	VA	VB	VC	ZZZZZO	555566L	1357	1357	Event	
							ABCBCO	3111077O	&&&&	&&&&	Sample	
							BCAGGS	2NQP	NQP	2468	2468	
0	0	0	0	-135.2	60.1	75.1	.....	.....	.....	1...	9
0	0	0	0	8.9	-121.5	112.7	.....	.....	.....	1...	10
-12	6	-3	-15	135.2	-60.1	-75.1	.....	.....	.....	1...	11
-6	-36	9	21	-9.0	121.6	-112.9	.....	.....	.....	1...	12
3	9	-39	33	-135.3	60.1	75.2	.....	.....	.....	1...	13
-6	84	0	-90	9.1	-121.8	112.9	.....	.....	.....	1...	14
-36	-2343	-315	2622	130.1	-51.0	-79.2	.....	M..	.....	1...	15
108	4812	-3096	-1608	-11.9	110.0	-98.3	.....	Q p. M..	.....	1...	16
-42	5406	6309	-11757	-103.4	28.5	75.1	..2....	Q p. H..	..4..	1...	17	
-243	-17718	9633	7842	13.6	-76.0	62.6	111....	Q p. H..	B4..	1...	18	
168	-3123	-19248	22539	60.7	-11.9	-49.1	111....	Q p. H..	B4..	1...	19	
-5811	23661	-13695	-15777	-8.1	42.2	-34.2	111....	Q p. H..	B4..	1...	20	
4098	2439	28704	-27045	-34.8	10.9	24.2	111....	H..	B4..	1...	21
15828	-17961	14397	19392	2.7	-29.0	26.3	111....	H..	B4..	1...	22
-8157	-4851	-30600	27294	30.5	-13.5	-17.3	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	23	
-23016	11343	-14604	-19755	-1.9	27.8	-25.9	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	24	
4602	1506	30330	-27234	-31.0	13.9	17.3	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	25	
24432	-6042	11436	19038	1.2	-26.8	24.9	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	26	
-3159	-318	-26355	23514	33.4	-13.3	-19.2	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	27	
-12699	6159	-3582	-15276	0.2	3.6	-2.1	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	28	
3357	210	14139	-10992	13.7	-13.3	-2.6	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	29	
1368	-4320	-510	6198	-27.9	75.9	-49.0	.1....	Qpp. H..	B4..	1...	30	
-870	1044	-2940	1026	-92.8	26.5	67.3	.1.1..	Qpp. H..	B4..	.....	31
-3	-3	0	0	55.0	-133.5	78.7	.1....	M..	B4..	32
-3	-3	0	0	122.3	-13.6	-108.6	L..	B..	33
-6	-3	-3	0	-54.9	133.5	-78.7	B..	34
-6	0	-3	-3	-122.4	13.7	108.5	B..	35
-3	0	-3	0	54.8	-133.5	78.7	B..	36

Event: BCG Location: +1.52 Frequency: 60.0

Targets: INST ZONE1 EN A B C Q V1 Mem 128.3 / 94

Fig. 6. Evento 2 – Falta ABC de 33 kA, Localizada a 1,55 Milha, em uma Linha de Transmissão de 230 kV (Saturação do TC Causada pelo *Offset* Máximo na Fase A)

XIV. FALTA DE 33 KA COM *OFFSET* NA FASE B E FASE C

Uma identificação incorreta da falta é a única consequência da condição de saturação do TC no caso anterior. O último caso a ser considerado é o Evento 3 (mostrado na Fig. 7), onde o ângulo de início da falta não provoca *offset* na Fase A, com *offset* igual nas Fases B e C. Como no caso anterior, o evento é disparado na 16a amostra e o trip da Zona 1 é declarado na 17a amostra, com a ativação de ambos os contatos de trip

indicados por B naquela coluna. A residual falsa é causada pela saturação em ambas as Fases B e C. Este efeito provoca a ativação do elemento de distância da Fase A à terra, ZAG. Após o trip, o relé usa as amostras subsequentes para identificar corretamente uma falta trifásica. Entretanto, as correntes reduzidas nas Fases B e C provocaram o cálculo de uma localização incorreta da falta, a 3,45 milhas.

EXAMPLE BUS B, BREAKER 3 - S/N 96030003 Date: 07/18/96 Time: 11:08:43.197													
CURRENTS (pri)				VOLTAGES (kV pri)			RELAY ELEMENTS				OUT	IN	Event Sample
IR	IA	IB	IC	VA	VB	VC	ZZZZZO	555566L	1357	1357	Event		
							ABCBCO	3111077O	&&&&	&&&&	2468	2468	
							BCAGGS	2NQPNQP					
0	0	0	0	-100.8	-27.9	128.7	.....	.....	....	1...	9
0	0	0	0	90.5	-132.6	42.2	.....	.....	....	1...	10
-12	27	0	-39	100.8	27.8	-128.7	.....	.....	....	1...	11
-12	-165	21	132	-90.8	133.1	-42.5	.....	.....	....	1...	12
12	405	-165	-228	-100.6	-29.2	129.9	.....	.....	....	1...	13
-24	-1161	303	834	89.8	-129.0	39.2	.....	.....	....	1...	14
3	-843	-1845	2691	92.5	34.6	-127.4	.....	M...	....	1...	15
60	8469	-1044	-7365	-80.2	103.9	-23.8	.....	Q p. H...	....	1...	16
51	-4065	11631	-7515	-65.9	-35.5	101.6	.11....	Q p. H...	B4..	1...	17		
-510	-18927	-1212	19629	55.4	-62.5	7.1	111....	Qpp. H...	B4..	1...	18		
1449	14790	-24765	11424	35.2	23.0	-58.4	111....	Qpp. H...	B4..	1...	19		
2130	23901	3435	-25206	-29.7	35.6	-5.8	111....	pp. H...	B4..	1...	20		
-8814	-22086	27222	-13950	-23.2	-10.0	33.3	111....	.... H...	B4..	1...	21	
-3591	-24165	1365	19209	20.6	-30.2	9.5	111....	.... H...	B4..	1...	22	
12840	23547	-22347	11640	22.9	6.4	-29.6	.1....	.... H...	B4..	1...	23	
2109	23994	-6156	-15729	-20.5	30.5	-9.8	.1....	Qpp. H...	B4..	1...	24		
-8013	-23109	18702	-3606	-23.8	-6.2	29.7	.1.1....	Qpp. H...	B4..	1...	25		
-1635	-21435	6036	13764	21.3	-28.9	7.1	.1.1....	Qpp. H...	B4..	1...	26		
8658	19737	-13143	2064	24.9	4.5	-27.4	.1.1....	Qpp. H...	B4..	1...	27		
-66	11067	-2865	-8268	-21.2	19.4	1.3	.1.1....	Qpp. H...	B4..	1...	28		
-6393	-9435	5196	-2154	-14.3	-1.8	14.1	.1.1....	Qpp. H...	B4..	1...	29		
1488	-1593	96	2985	10.0	-5.8	-3.5	.1.1....	Qpp. H...	B4..	....	30	
162	1017	-504	-351	1.8	0.2	-1.6	.1.1....	Qpp. H...	B4..	....	31	
-3	0	0	-3	-0.0	-0.0	-0.0	.1.1....	Qpp. M.*	B4..	....	32	
0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	.....	Q.....*	B...	....	33
0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	.....	Q.....*	B...	....	34
-6	-3	0	-3	0.0	-0.0	-0.0	.....	Q.....*	B...	....	35
-6	0	-3	-3	-0.0	-0.0	-0.0	.....	Q.....*	B...	....	36

Event: ABC Location: +3.61 Frequency: 60.0

Targets: INST ZONE1 EN A B C Q V1 Mem 132.1 / 132

Fig. 7. Evento 3 – Falta ABC de 33 kA, Localizada a 1,55 Milha, em uma Linha de Transmissão de 230 kV (Saturação do TC Causada pelo *Offset* nas Fases B e C)

XV. CONCLUSÕES

1. A relação entre as características nominais de tensão ANSI, carga (*burden*) do TC, máxima corrente de falta e relação X/R do sistema define o limite da saturação do TC. Estabelecido como uma equação com parâmetros expressos em p.u. do valor nominal do TC, isso serve como critério para especificação de TCs para proteção de linhas.
2. A equação derivada fornece o critério para especificação do TC para proteção de linhas em novas instalações e pode identificar o limite da saturação do TC em instalações mais antigas.
3. O critério tem sido usado num procedimento de seleção do TC para proteção de linhas baseado em cinco etapas, determinando a relação do TC através da falta máxima em amperes, da relação X/R do sistema e do *burden* do TC expresso em p.u. de um *burden* padrão nominal do TC. Diretrizes são incluídas para estimar o *burden* do TC usando valores de resistência típicos do TC em ohm-por-espira e uma fórmula conveniente para cálculo da resistência do cabo em ohms/1000 pés como função da bitola do cabo AWG.
4. O procedimento pode ser aplicado na maioria das aplicações de linhas. Contudo, as características nominais de TCs que evitam saturação para corrente assimétrica não são práticas em aplicações próximas da barra de um gerador onde a relação X/R e a corrente de falta são ambas extremamente elevadas. Nos casos em que a saturação *dc* é inevitável, os TCs podem apenas ser especificados para manter uma sensibilidade aceitável.
5. Os testes mostram que o tempo de trip de um relé de distância moderno não é prejudicado pela saturação do TC devida a um *offset dc* com correntes extremamente elevadas. No entanto, a saturação modifica a medição fasorial de uma ou mais correntes e afeta a capacidade de o relé identificar corretamente o tipo e/ou a localização da falta.

XVI. REFERÊNCIAS

- [1] S. E. Zocholl and D. W. Smaha, "Current Transformer Concepts," proceedings of the 46th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, Atlanta, GA, April 29 – May 1, 1992.
- [2] S. E. Zocholl, A. Guzmán, and D. Hou, "Transformer Modeling as Applied to Differential Relaying," proceedings of the 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 24–26, 1996.
- [3] E. O. Schweitzer, III and D. Hou, "Filtering for Protective Relaying," proceedings of the 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 20–22, 1992.
- [4] E. O. Schweitzer, III and J. Roberts, "Distance Relay Element Design," proceedings of the 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 20–22, 1992.