

# O Efeito da Elevada Corrente de Falta e Dos Limites das Características Nominais do TC na Proteção de Sobrecorrente

Gabriel Benmouyal e Stanley E. Zocholl  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Apresentado na  
39th Annual Minnesota Power Systems Conference  
Saint Paul, Minnesota  
4–6 de novembro de 2003

Apresentado previamente na  
57th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, maio de 2003,  
e 56th Annual Conference for Protective Relay Engineers, abril de 2003

Originalmente apresentado na  
29th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2002

Traduzido para o português em julho de 2017

# O EFEITO DA ELEVADA CORRENTE DE FALTA E DOS LIMITES DAS CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO TC NA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

---

Gabriel Benmouyal  
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.  
Longueuil, Québec, CANADA

Stanley E. Zocholl  
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.  
Holland, PA USA

## INTRODUÇÃO

Os transformadores de corrente utilizados nas linhas de transmissão são especificados para evitar saturação durante a porção assimétrica da máxima corrente de falta. A saturação é evitada através da seleção da tensão nominal ANSI maior do que a tensão na carga para o valor máximo de falta, com o fator  $(1+X/R)$  aplicado. Isto é possível nas aplicações de proteção de linhas, uma vez que as elevadas correntes de carga resultam no uso de TCs com alta relação e as correntes de falta são normalmente limitadas de três a cinco, e raramente ultrapassam dez, vezes a corrente primária nominal do TC.

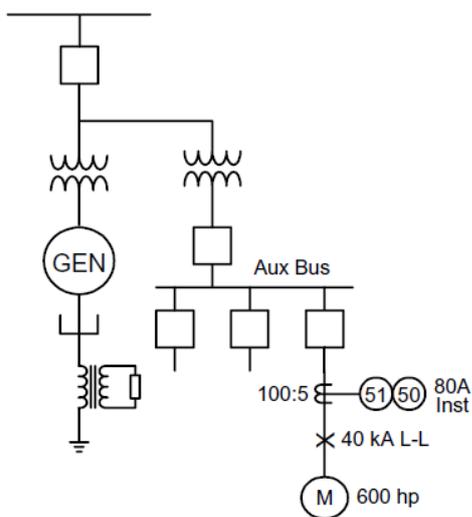
Torna-se mais difícil evitar a saturação com a proteção diferencial de transformadores. Nestas aplicações, os TCs do lado de alta tensão são normalmente instalados nas buchas do transformador e requerem cabos longos para conexão com o relé. A relação mais baixa de corrente requerida no lado de alta tensão do transformador, associada aos cabos mais extensos, causa a saturação durante o offset, enquanto os TCs do lado de baixa tensão, especificados de forma mais adequada, têm uma relação mais alta e permanecem lineares. Portanto, o relé detecta o segundo harmônico presente na falsa corrente diferencial e bloqueia o trip para faltas externas. Conseqüentemente, pode ser aplicado o valor nominal ANSI tão baixo quanto duas vezes a tensão na carga para a máxima falta, em vez de aplicar o fator  $(1+X/R)$ .

Enquanto os guias IEEE abordam a seleção de TCs para relés de proteção diferencial e de linhas, existe uma área desconhecida e negligenciada para a qual não existem guias de aplicação. Este artigo aborda as características nominais dos TCs usados nos serviços auxiliares de usinas e aplicações relacionadas, onde as correntes de falta podem ultrapassar 200 vezes a corrente nominal primária do TC. Um critério de seleção de TCs foi desenvolvido para essas aplicações baseando-se no tempo de trip de 2 ciclos. O artigo analisa as limitações da filtragem digital convencional usada nos modernos elementos de sobrecorrente instantâneos. Ele também introduz as técnicas de medição digitais apropriadas para manter a velocidade e a confiabilidade quando os elementos de sobrecorrente instantâneos forem aplicados com formas de onda de corrente altamente saturadas.

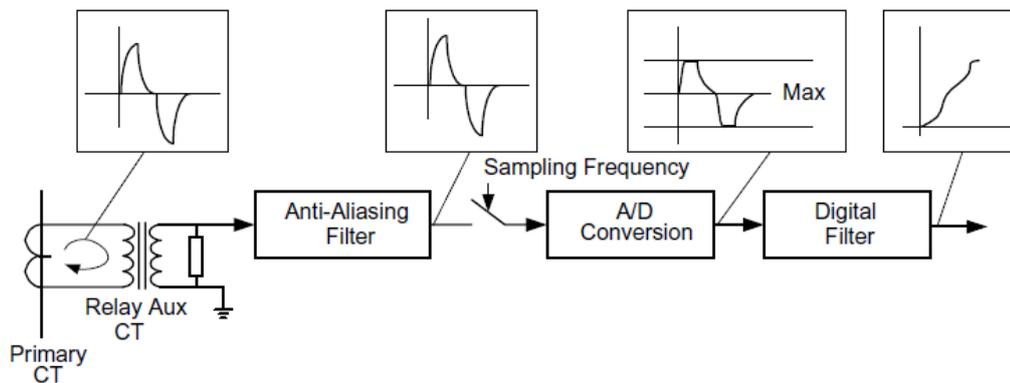
## LIMITAÇÕES DE UM AJUSTE DO INSTANTÂNEO DE 80 A

Os relés usados para proteção dos serviços auxiliares de usinas podem ser submetidos a elevadas correntes de falta, da ordem de 40 kA, onde a relação  $X/R$  ultrapassa 20. Além disso, TCs com relação baixa podem ser usados com relés que possibilitem que o elemento de sobrecorrente instantâneo seja ajustado com valor elevado da ordem de 80 A. Qual é a resposta de um relé com ajuste do instantâneo de 80 A, e quais são as formas de onda das correntes? Existem limites de operação? Existem guias de aplicação publicados? Uma barra auxiliar está mostrada na Figura 1. O exemplo a seguir aborda os aspectos mencionados.

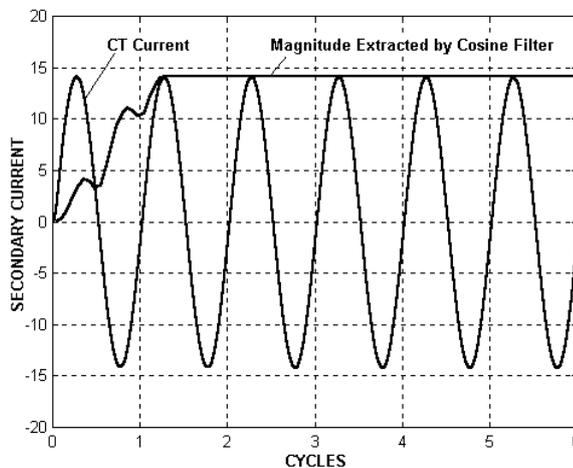
Na Figura 1, o motor da bomba de água de 600 hp instalado na barra auxiliar da usina utiliza TCs de 100:5, C50. O relé do motor possui o ajuste da corrente à plena carga do motor de 6,7 A, que corresponde à corrente primária de 135 A. O ajuste do rotor travado é de 40 A, que é seis vezes o valor da corrente à plena carga.



**Figura 1** Barra Auxiliar do Gerador com Corrente de Falta Elevada



**Figura 2** Esquemático do Relé Mostrando os Sinais Medidos



**Figura 3** Sinal Extraído com uma Corrente Primária do TC de 200 A

O elemento instantâneo está ajustado em 80 A, que é duas vezes o valor do rotor travado. A Figura 2 mostra o diagrama esquemático de um relé microprocessado, indicando a progressão de um sinal que passa da forma analógica para a digital. Na Figura 2, o transformador auxiliar do relé converte a corrente secundária do TC em um sinal de tensão escalonado. O filtro passa-baixa (LPF) anti-aliasing remove toda frequência elevada presente na forma de onda e o conversor A/D converte o sinal para o valor digital da corrente a uma taxa de amostragem típica de 16 amostras por ciclo. A função do filtro digital é a de rejeitar todos os harmônicos e extrair a magnitude do conteúdo da fundamental do sinal. A Figura 3 mostra a magnitude da fundamental extraída resultante da corrente primária de 200 A. A corrente senoidal e a magnitude da fundamental extraída, mostradas na Figura 3, são as formas de onda esperadas. Portanto, qual a forma de onda que pode ser esperada para a falta de 40 kA? A Figura 4 mostra a corrente secundária do TC severamente saturado e a magnitude limitada da saída de A/D. E além disso, a fundamental extraída da saída de A/D está abaixo do valor limite de trip de 80 A.

## DEFININDO UM CRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE TCs

O problema associado à elevada corrente de falta e ao ajuste do instantâneo de 80 A é demonstrado através da falha na eliminação da falta de 40 kA. O TC de 100:5, C50 é claramente inadequado; porém, qual o critério que deveria ser usado? Como critério, vamos selecionar o valor nominal do TC de forma a garantir o tempo máximo de trip do relé igual a 2 ciclos. Efetuando a simulação do TC, podemos aumentar os seus valores nominais padronizados até que possamos obter o resultado desejado. A Figura 5 mostra que um TC de 200:5, C200 gera um tempo de trip maior do que 2 ciclos. A Figura 6 mostra que um TC de 400:5, C400 gera um tempo de trip menor do que 2 ciclos e é o valor nominal mínimo que está de acordo com o critério.

O grau de saturação é definido pela tensão de saturação  $V_s$ , que foi derivada na Referência 1. Neste exemplo,  $V_s$  foi limitada em 20 e usada como critério para evitar a saturação. Na Referência 2, valores de  $V_s$  maiores do que 20 foram usados para definir e correlacionar vários níveis de saturação do TC para ajustes da inclinação porcentual nas aplicações do diferencial de barras de baixa impedância. Neste ponto, vamos basear o critério de seleção do TC no nível da tensão de saturação produzida pela falta de 40 kA no TC de 400:5, C400. A equação para a tensão de saturação,  $V_s$ , é:

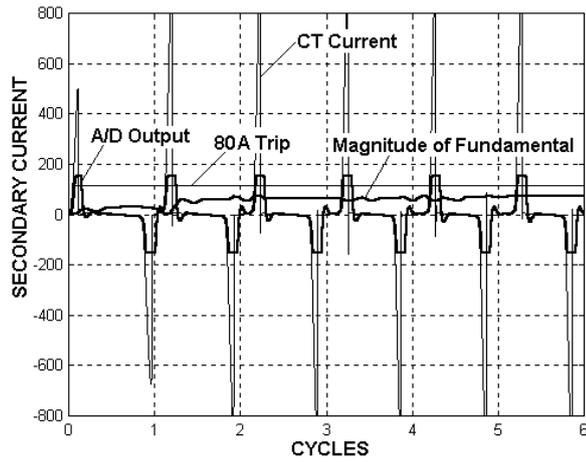
$$V_s \geq \left( \frac{X}{R} + 1 \right) \cdot I_f \cdot Z_b \quad (1)$$

onde:

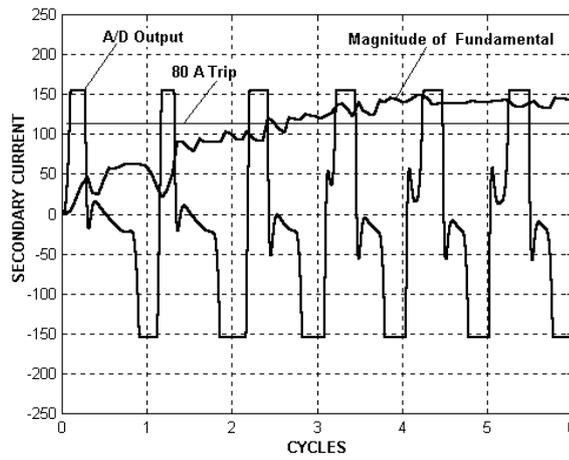
- $I_f$  é a máxima corrente de falta em pu do valor nominal do TC
- $Z_b$  é a carga do TC em pu da carga padrão
- $X/R$  é a relação X/R do circuito de falta primário

Usando a corrente nominal primária do TC de 400 A e a corrente de falta de 40 kA:

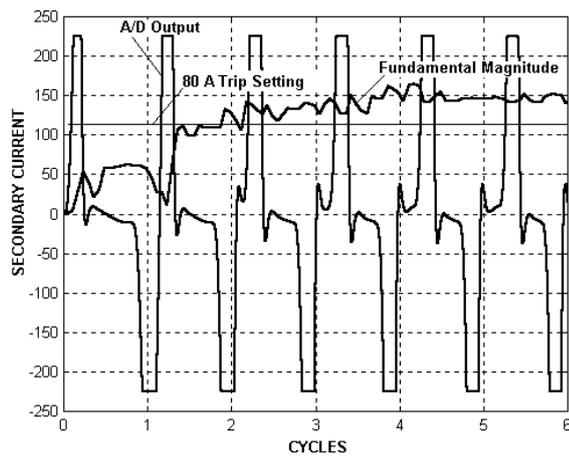
$$I_f = \frac{I_{MAX}}{CT_{NOMINAL}} = \frac{40.000}{400} = 100 \quad (2)$$



**Figura 4** Sinais do TC e do Relé para uma Falta de 40 kA Usando TCs de 100:5, C50



**Figura 5** Resposta a uma Falta de 40 kA Usando TCs de 200:5, C200



**Figura 6** Resposta a uma Falta de 40 kA Usando TCs de 400:5, C400

Usando a carga padrão de 4 Ω, C400, e a carga real do TC de 0,5 Ω:

$$Z_b = \frac{Z_{\text{Carga}}}{Z_{\text{PADRÃO}}} = \frac{0,5}{4} = 0,125 \quad (3)$$

Com uma relação X/R de 20:

$$V_s \geq (20 + 1) \cdot 100 \cdot 0,125 = 262,5 \quad (4)$$

Conseqüentemente, nas aplicações dos serviços auxiliares das usinas, os transformadores de corrente usados com o relé microprocessado devem estar de acordo com o seguinte critério:

$$262,5 \geq \left( \frac{X}{R} + 1 \right) \cdot I_f \cdot Z_b \quad (5)$$

onde:  $I_f$  é a máxima corrente de falta em pu do valor nominal do TC  
 $Z_b$  é a carga do TC em pu da carga padrão  
 $X/R$  é a relação X/R do circuito de falta primário

Os exemplos a seguir mostram como o critério é usado.

### **Máxima Corrente de Falta com um Ajuste do Instantâneo de 80 A**

Máxima corrente de falta em termos do valor nominal de tensão ANSI e do TC primário, carga (burden) em ohms e relação X/R:

$$I_{MAX} = \frac{262,5}{\left( 1 + \frac{X}{R} \right)} \cdot \frac{ANSI}{100 \cdot Z_B} \cdot TC_{NOMINAL} \quad (6)$$

Exemplo: Um relé de sobrecorrente microprocessado tem um ajuste do instantâneo de 80 A. O relé será usado com um TC de 400:5, C400, com uma carga total de 0,5  $\Omega$ . A relação X/R é 20. Qual o máximo valor da falta para que a operação seja segura?

A carga é, essencialmente, devida aos enrolamentos do TC e cabos externos para o relé (a carga própria do relé microprocessado é desprezível):

Circuito total de 300 pés de cabo #10 AWG (1,0 $\Omega$ /1000 pés)	0,3
Enrolamento do TC (80 espiras a 0,0025 $\Omega$ /espira)	<u>0,2</u>
Burden Total	0,5 $\Omega$

$$I_{MAX} = \frac{262,5}{\left( 1 + \frac{X}{R} \right)} \cdot \frac{ANSI}{100 \cdot Z_B} \cdot TC_{NOMINAL} \quad (7)$$

$$I_{MAX} = \frac{262,5}{(1 + 20)} \cdot \frac{400}{100 \cdot 0,5} \cdot 400 = 40.000 \quad (8)$$

### **Valor Nominal Mínimo do TC com um Ajuste do Instantâneo de 80 A**

Valor nominal do TC em termos da máxima corrente de falta, relação X/R, valor nominal ANSI e carga:

$$TC_{NOMINAL} = \frac{\left( 1 + \frac{X}{R} \right)}{262,5} \cdot \frac{100}{ANSI} \cdot I_{MAX} Z_B \quad (9)$$

Exemplo: Com um ajuste do instantâneo de 80 A, qual é o valor nominal mínimo do TC que pode ser usado quando a máxima corrente de falta for de 40 kA, X/R = 20 e a carga for 0,5 Ω:

$$TC_{\text{NOMINAL}} = \frac{\left(1 + \frac{X}{R}\right)}{262,5} \cdot \frac{100}{\text{ANSI}} \cdot I_{\text{MAX}} Z_B \quad (10)$$

$$TC_{\text{NOMINAL}} = \frac{(1 + 20)}{262,5} \cdot \frac{100}{400} \cdot 40.000 \cdot 0,5 = 400 \quad (11)$$

O critério possibilita que os engenheiros de proteção determinem os limites das aplicações de correntes elevadas em termos da magnitude da corrente de falta, da relação X/R e da carga do relé. O critério é direcionado à limitação das características nominais dos TCs. Precisamos, agora, abordar a velocidade de trip.

## IMPLEMENTANDO OS ELEMENTOS DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEOS

### Implementação Digital dos Relés de Sobrecorrente Instantâneos

Os relés microprocessados usam um par de filtros ortogonais de resposta ao impulso finito para aquisição dos fasores das grandezas de corrente e tensão. Os fasores são normalmente obtidos através dos filtros Fourier ou Coseno, que eliminam os componentes harmônicos e CC, ao mesmo tempo em que contribuem com um sobrealcançe transitório mínimo [5, 7].

Além disso, os filtros baseados na raiz quadrada média (RMS), no valor de pico ou valores médios podem também ser utilizados. Os filtros RMS respondem ao conteúdo total de energia e à componente CC, assim como à cada frequência presente na forma de onda. Os detectores de pico digitais também respondem aos harmônicos e à componente CC. Embora eles não sejam normalmente aplicados, vamos discutir as vantagens distintas de um detector de pico.

A Figura 7 mostra uma variação do detector de pico que tem um sobrealcançe transitório reduzido. O filtro computa o valor de pico da forma de onda como a média do valor absoluto de dois picos positivo e negativo consecutivos. O sobrealcançe transitório máximo de 112 por cento ocorre com uma constante de tempo de 1 ciclo e diminui à medida que a constante de tempo aumenta, conforme mostrado na Figura 8.

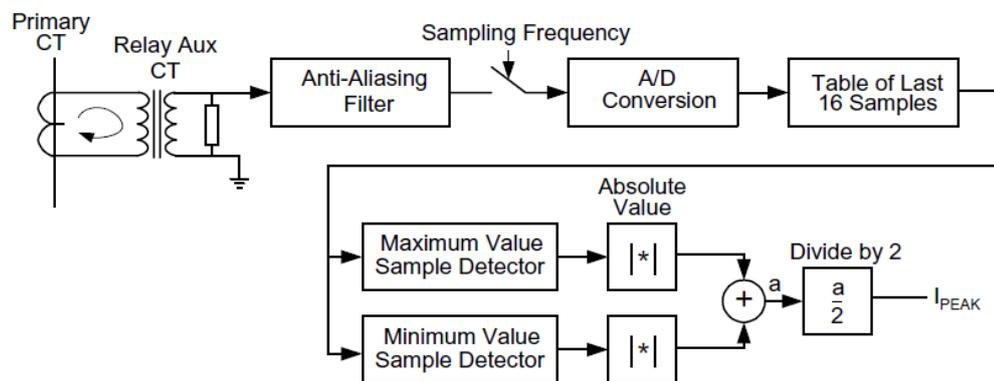
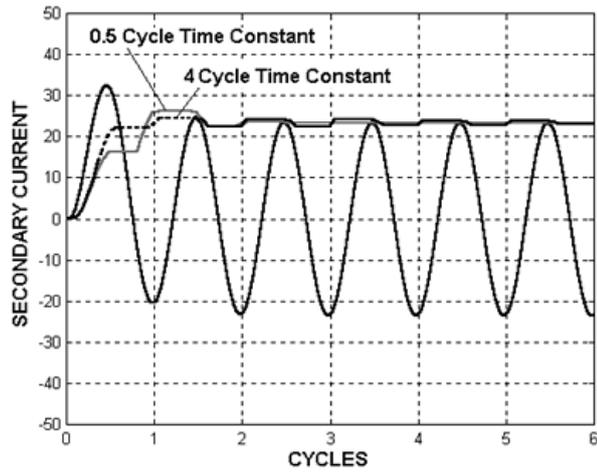
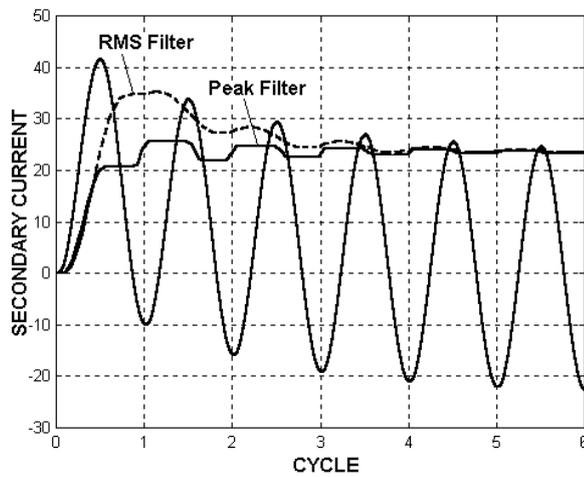


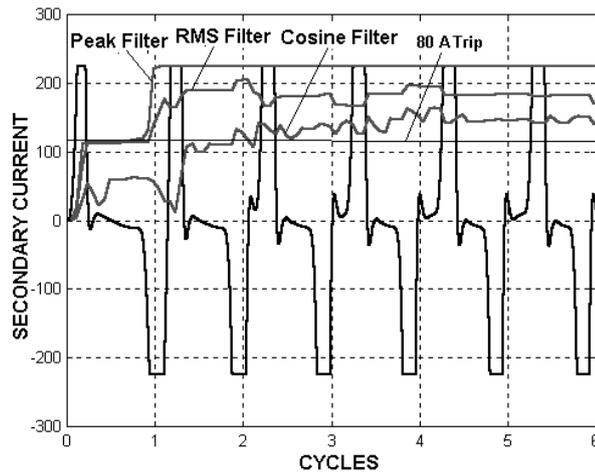
Figura 7 Diagrama do Detector de Pico Bipolar



**Figura 8** Sobrealcance Transitório do Detector de Pico Bipolar



**Figura 9** Sobrealcance Transitório do Filtro RMS Comparado ao do Filtro de Pico Bipolar



**Figura 10** Resposta do Filtro, Falta de 40 kA, X/R=20, TC de 200:5, C100, Carga de 0,5

### **Performance do Filtro Digital Com Saturação do TC**

Os filtros digitais não podem efetuar uma medição precisa da corrente de falta se houver saturação. Vimos, na Figura 3, que a magnitude da fundamental de uma forma de onda de

corrente extremamente saturada é uma representação incompleta da corrente de falta real. Entretanto, a resposta rápida dos filtros RMS e de pico diante de transitórios são mais representativas da magnitude real. As respostas dos filtros de pico, RMS e Coseno são comparadas na Figura 10. O filtro RMS tem um sinal de resposta rápida aos transitórios porém apresenta um sobrelance transitório proibitivo de 150 por cento, uma vez que ele tem de responder ao offset CC, conforme mostrado na Figura 9. Dos três filtros, a comparação mostra que o detector de pico bipolar efetua a melhor aquisição da magnitude.

## FILTRO ADAPTATIVO COSENO-PICO

O filtro Coseno tem uma excelente performance com relação ao offset CC e à remoção dos harmônicos. O detector de pico bipolar efetua a melhor aquisição da magnitude em situações de elevada saturação do TC. A combinação dos dois filtros fornece uma solução eficiente para o elemento instantâneo ideal. Esse elemento instantâneo, mostrado na Figura 11, é denominado filtro Adaptativo Coseno-Pico, uma vez que ele incorpora ambos os filtros. O filtro Coseno fornece a magnitude para uma operação senoidal normal. O detector de pico bipolar fornece a magnitude para formas de onda saturadas. Um detector mede o grau de saturação avaliando o nível de distorção e comuta a entrada para o detector de pico bipolar se a distorção atingir um valor pré-determinado.

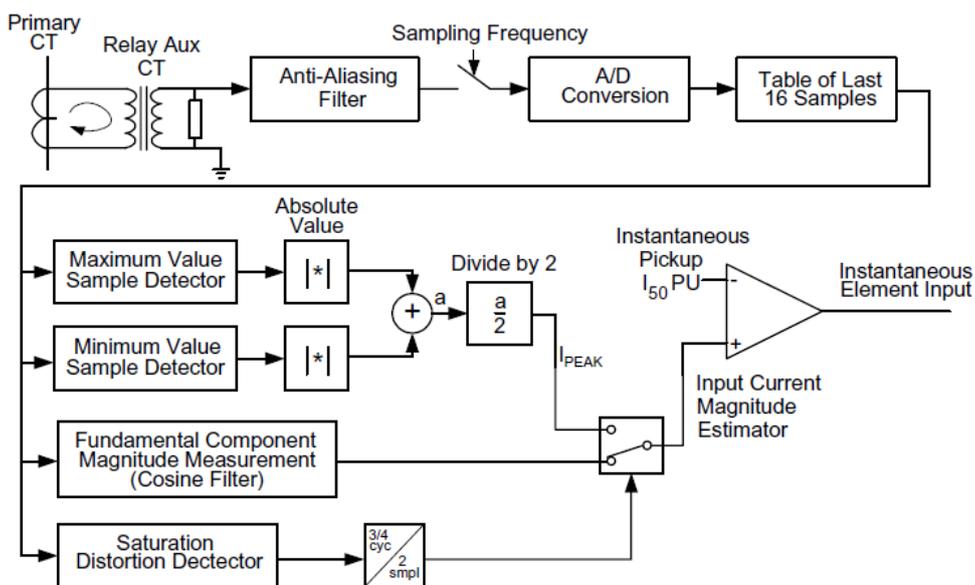


Figura 11 Elemento Instantâneo Usando o Filtro Adaptativo Coseno-Pico

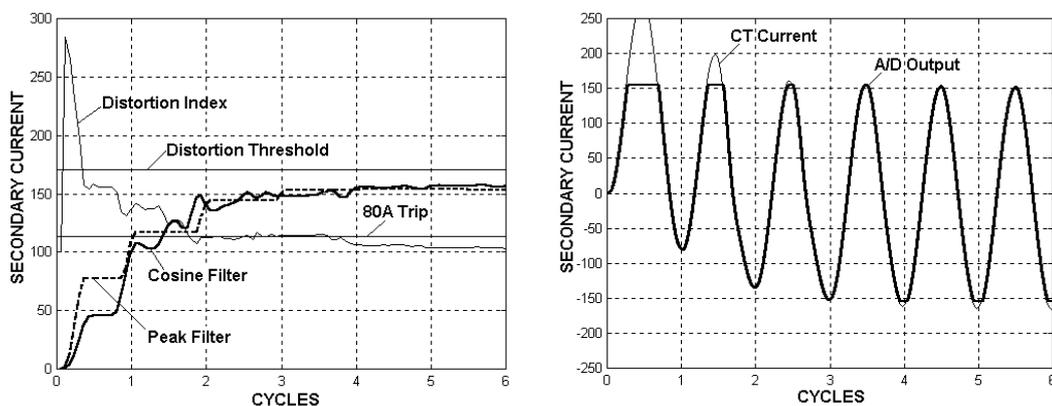
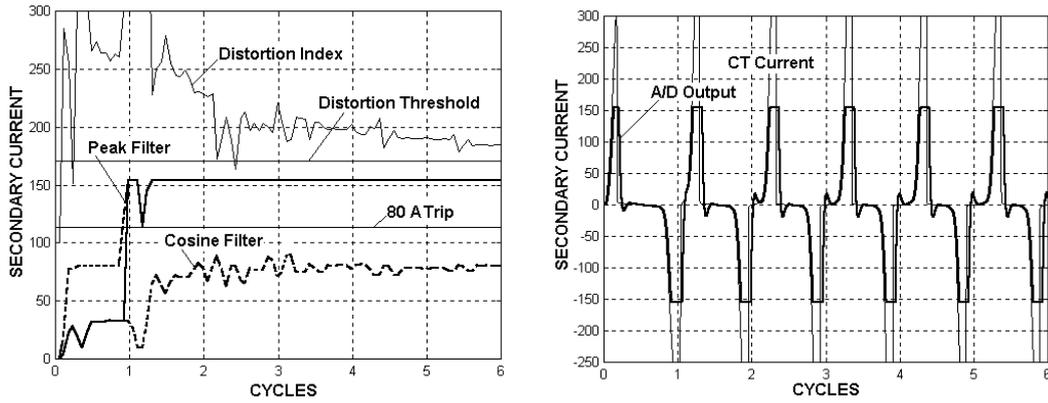
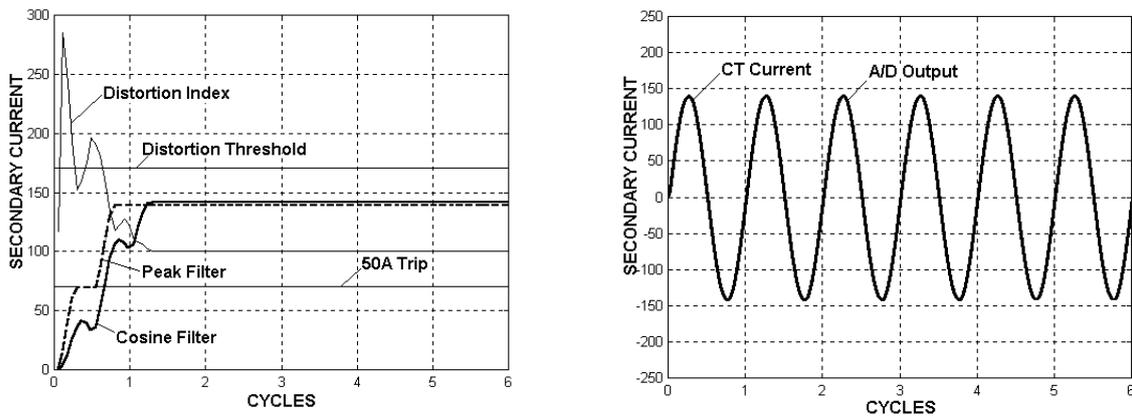


Figura 12 Filtro Coseno Gerando Trip para uma Forma de Onda com Baixa Saturação, para uma Falta de 4.500 A, TC de 200:5, C400 com X/R = 11,31



**Figura 13** Filtro de Pico Bipolar Gerando Trip para uma Forma de Onda com Elevada Saturação, para uma Falta de 20 kA, TC de 200:5, C50 com X/R = 11,31



**Figura 14** Filtro Coseno Gerando Trip para uma Forma de Onda sem Saturação, para uma Corrente de Falta Simétrica de 4 kA, TC de 200:5, C100

### Índice de Distorção Simples

Uma forma simples do índice de distorção mede a relação da soma das magnitudes dos harmônicos P pela magnitude da fundamental:

$$DI = \frac{\sum_{k=1}^P |A_k|}{|A_1|} \quad (12)$$

Como exemplo, se usarmos a fundamental, o segundo e o terceiro harmônico, a fórmula é:

$$DI = \frac{|A_1| + |A_2| + |A_3|}{|A_1|} \quad (13)$$

Nesta equação, A1, A2 e A3 representam os fasores da fundamental, segundo e terceiro harmônicos. Para formas de onda sem distorção (ou sem harmônicos), o índice de distorção será igual a 1. Para formas de onda de correntes altamente saturadas, o índice de distorção desta natureza atingirá níveis maiores do que 2. O conceito básico é, então, chavear a medição da magnitude que está sendo efetuada pelo sistema de filtragem digital convencional para o de detector de pico, quando o índice de distorção se tornar maior do que um valor limite determinado. Normalmente, esse valor limite é definido como 1,75.

O índice de distorção é computado amostra por amostra e comparado ao valor limite. O comparador, por sua vez, controla uma chave. Quando a distorção ultrapassar o valor limite, a medição da magnitude da forma de onda é obtida na saída do detector de pico bipolar. Quando a distorção for menor do que o valor limite, a magnitude da forma de onda é obtida na saída do filtro Coseno. Os casos apresentados nas Figuras 12 a 14 demonstram a ação da chave. A Figura 12 mostra um caso de baixa saturação, onde o índice de distorção cai abaixo do valor limite e o filtro Coseno gera o trip instantâneo. A Figura 13 mostra um caso de elevada saturação, onde o trip instantâneo é gerado pelo filtro de pico bipolar. A Figura 14 mostra um caso sem saturação, onde o índice de distorção se estabiliza abaixo do valor limite de distorção e o filtro Coseno efetua a medição. O índice de distorção registra um valor inicial elevado em resposta a uma mudança abrupta porém se estabiliza rapidamente no valor correto. O temporizador de segurança ignora o tempo de estabilização para garantir uma medição precisa.

## CONCLUSÕES

1. Os ajustes elevados do instantâneo e a magnitude elevada da corrente de falta limitam as características nominais do TC.
2. Os elementos instantâneos devem responder à corrente de pico para garantir a abertura rápida quando de corrente de falta extremamente elevada na presença de saturação do TC.
3. Na ausência de saturação do TC, os elementos instantâneos devem responder à fundamental para eliminar o offset CC e harmônicos presentes.
4. O valor de pico supervisionado pelo índice de distorção propicia velocidade de abertura na presença de saturação durante offset CC e permite a resposta à fundamental para formas de onda não saturadas.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. E. Zocholl, G. Benmouyal e J. Roberts, "Selecting CTs to Optimize Relay Performance", 23rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 15 a 17 de outubro, 1996.
- [2] S. E. Zocholl, "Rating CTs for Low Impedance Bus and Machine Differential Applications", 27th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 24 a 26 de outubro, 2000.
- [3] S. E. Zocholl e D. W. Smaha, "Current Transformer Concepts", Proceedings of the 46th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, pp. 7-9, 29 de abril a 1 de maio, 1992.
- [4] S. E. Zocholl e G. Benmouyal, "How Microprocessor Relays Respond to Harmonics, Saturation, and Other Wave Distortions", 24th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 21 a 23 de outubro, 1997.
- [5] E. O. Schweitzer III e Daqing Hou, "Filtering for Protective Relays", 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 20 a 22 de outubro, 1993.
- [6] Norma IEEE C37.110-1996, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Relaying Purposes.
- [7] G. Benmouyal, "Removal of DC-Offset in Current Waveform Using Digital Mimic Filtering", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2, No. 2, pp. 621-630, abril de 1995.

## BIOGRAFIAS

**Stanley (Stan) Zocholl** tem um B.S. e um M.S. em Engenharia Elétrica pela Drexel University. Ele é Life Fellow do IEEE e membro da Power Engineering Society e da Industrial Application Society. É também membro do Power System Relaying Committee e foi presidente do Relay Input Sources Subcommittee. Em 1991, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories na posição de Distinguished Engineer. Trabalhou na ABB Power T&D Company Allentown (antiga ITE, Gould, BBC) desde 1947, onde ocupou diversos cargos na área de engenharia, incluindo o de Diretor de Tecnologia de Proteção.

Sua biografia aparece no livro *Who's Who in America*. Ele detém mais de uma dúzia de patentes relacionadas à proteção de sistemas de potência usando a tecnologia de microprocessadores e de estado sólido e é autor de diversos artigos apresentados em Seminários de Relés de Proteção e no IEEE. Recebeu os prêmios Best Paper Award of the 1988 Petroleum and Chemical Industry Conference, em 1988, e Power System Relaying Committee's Distinguished Service Award em 1991.

**Gabriel Benmouyal** recebeu seu B.A.Sc. em Engenharia Elétrica e seu M.A.Sc. em Engenharia de Controle pela Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canadá, em 1968 e 1970, respectivamente. Em 1969, ele começou a trabalhar da Hydro-Québec como especialista em instrumentação e controle. Trabalhou em diferentes projetos na área de sistemas de controle de subestação e centros de despacho. Em 1978, foi para a IREQ, onde sua principal área de trabalho foi a aplicação de técnicas digitais e microprocessadas para sistemas de proteção e controle de subestações de linhas e de usinas. Em 1997, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories na posição de Engenheiro de Pesquisas. É um profissional com registro na Province of Québec, é membro do IEEE e atende ao Power System Relaying Committee of IEEE desde maio de 1989.