

Como os Relés Microprocessados Respondem a Harmônicos, Saturação e a Outras Distorções de Onda

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

Apresentado na
1998 International Conference Modern Trends in the Protection Schemes
of Electric Power Apparatus and Systems
New Delhi, India
28–30 de outubro de 1998

Apresentado previamente na
1998 Pennsylvania Electric Association Relay Committee Fall Meeting,
setembro de 1998,
52nd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, maio de 1998,
e 51st Annual Conference for Protective Relay Engineers, abril de 1998

Originalmente apresentado na
24th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 1997

Traduzido para o português em julho de 2017

COMO OS RELÉS MICROPROCESSADOS RESPONDEM A HARMÔNICOS, SATURAÇÃO E A OUTRAS DISTORÇÕES DE ONDA

Stanley E. Zocholl and Gabriel Benmouyal
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
Pullman, WA USA

RESUMO

Os fatores magnéticos e os mecanismos dos relés eletromecânicos são difíceis de formular e as suas características são obtidas principalmente de dados de testes experimentais. Como resultado, saber exatamente como os relés respondem, ou devem responder, aos harmônicos, saturação e distorção de onda em geral tem sido uma fonte de discussão, controvérsia e ansiedade para o engenheiro de relés. Em contraste com isso, os relés baseados em microprocessadores executam algoritmos que são procedimentos matemáticos. Eles produzem características analíticas que podem ser descritas precisamente através de uma equação. Portanto, temos oportunidade de calcular a resposta a formas de onda específicas. A chave para o comportamento dos relés microprocessados está no cálculo da resposta do filtro digital e na comparação do desvio da resposta com o sinal da onda senoidal. Este artigo apresenta a resposta dos relés microprocessados para formas de onda tais como a distorção do terceiro harmônico na corrente do neutro de distribuição, formas de onda de corrente de retificador de seis pulsos com ressonância, corrente de energização magnetizante do transformador e falsa corrente diferencial em TCs de barramento em anel, causada por remanência desigual. Tomados em conjunto, esses exemplos proporcionam um pano de fundo para a discussão da filosofia da resposta ideal e tirar conclusões sobre o grau de tolerância para a distorção da onda.

INTRODUÇÃO

O quê os relés medem? Os relés eletromecânicos produzem um torque que é proporcional ao quadrado do fluxo produzido pela corrente. Esses relés respondem à corrente ao quadrado ou ao produto das correntes produzido pelas grandezas de entrada. Tendo em vista que a raiz quadrática média (rms) (valor eficaz) é definida como a média da integral do quadrado da corrente, esses relés são chamados de responsivos ao valor eficaz. Os relés analógicos de estado sólido, utilizando circuitos lineares e detectores de nível respondem aos picos do sinal de entrada. Onde os microprocessadores podem implementar qualquer dessas técnicas, a maioria dos microprocessadores usa filtros digitais para extrair somente a fundamental e atenuar ou eliminar harmônicos.

Qual técnica é a melhor? Os relés de proteção são projetados para operação com onda senoidal de 60 Hz e todos trabalham confiavelmente na ausência de distorção de onda significativa. Mesmo com base crescente, as cargas não lineares dos retificadores de pulso, acionamentos de velocidade variável e fontes de força não interrompível, a distorção de onda precisa ser severa para que seja feita uma distinção. Este artigo investiga os casos severos de distorção de terceiro harmônico em neutros de distribuição, formas de onda de corrente de retificador de pulso com ressonância de harmônico, corrente de energização magnetizante de transformadores e falsa corrente diferencial em TCs de barramento em anel causada por ressonância. Coletivamente, esses exemplos proporcionam o pano de fundo para discussão da filosofia da resposta ideal e retirar as conclusões quanto ao grau de tolerância à distorção da onda.

O FILTRO DIGITAL

Os relés microprocessados executam procedimentos matemáticos e produzem características analíticas que podem ser descritas precisamente por equações. Portanto, temos a oportunidade de calcular resposta do relé a qualquer forma de onda especificada. A chave para o comportamento dos relés microprocessados é a saída do filtro digital. Essa é obtida fazendo-se amostragem das correntes e/ou tensões de onda senoidal a intervalos de tempo discretos. Um número fixo de amostras instantâneas por ciclo é convertido em grandezas digitais por um conversor A/D e armazenadas para processamento. A filtragem digital é o simples processo de multiplicar amostras sucessivas por coeficientes pré-determinados e depois combiná-las para obter grandezas digitais representando componentes do fasor da entrada. Por exemplo, uma primeira amostra tomada em um tempo arbitrário de uma onda senoidal de corrente é o valor de CC instantâneo representando $I \cos(\omega \cdot t + \theta)$, onde θ é um ângulo de fase arbitrário. Um segundo exemplo tomado 90° depois é $I \sin(\omega \cdot t + \theta)$. Conseqüentemente, apenas pegando duas amostras separadas por 90° extrai-se os componentes reais e imaginários de um fasor.

O termo “filtragem” é usado porque a magnitude dos componentes se altera quando o intervalo de amostragem permanece fixo e se varia a freqüência da entrada. A saída do filtro então varia em magnitude e fase em função da freqüência da entrada. Conseqüentemente, mais de duas amostras por ciclo são usadas, e os coeficientes do filtro são selecionados para obter uma resposta de freqüência mais favorável. Por exemplo, um filtro de coseno [1] de ciclo completo, 16 amostras/ciclo, é particularmente adequado para relés de proteção. Enquanto extrai a fundamental, o filtro rejeita todos os harmônicos, incluindo a exponencial declinante e será usado em todos os casos subseqüentes. O filtro em forma de equação aparece da seguinte forma:

$$\text{Os coeficientes do filtro: } CFC_n = \cos \left[\frac{2\pi}{16} \cdot n \right] \quad (1)$$

$$\text{O filtro de Coseno: } IX_{\text{smp}l + \text{s}pc} = \frac{2}{N+1} \sum_{n=0}^N I_{\text{smp}l + \text{s}pc - n} CFC_n \quad (2)$$

$$\text{A magnitude do fasor: } |I_o|_{\text{smp}l + \text{s}pc} = \sqrt{(IX_{\text{smp}l + \text{s}pc})^2 + \left(IX_{\text{smp}l + \text{s}pc - \frac{\text{s}pc}{4}} \right)^2} \quad (3)$$

$$\text{A saída do fasor: } I_o_{\text{smp}l + \text{s}pc} = IX_{\text{smp}l + \text{s}pc} + j \cdot IX_{\text{smp}l + \text{s}pc - \frac{\text{s}pc}{4}} \quad (4)$$

onde:

N	= 15
n	= 0, 1, 2, ..., N
smp	= seqüência de amostras 0, 1, 2, 3,.....
spc	= número de amostras por ciclo (16)
$I_{\text{smp}l + \text{s}pc - n}$	= amostras de corrente
$IX_{\text{smp}l + \text{s}pc}$	= saída do filtro
I_o	= fase de corrente derivada do filtro

Na equação (2), qualquer valor de “smp” indica que 16 amostras de corrente foram amostradas. O índice n varia de 0 a 15, para aplicar os coeficientes e somar as amostras para produzir a saída. Com 16 amostras/ciclo, 4 amostras representam 90 graus elétricos. Portanto, na equação (4), a saída presente, juntamente com as quatro amostras registradas antes, constitui os componentes real e imaginário do fasor. O Anexo A é um arquivo Mathcad® 6.0 que implementa o filtro coseno e permite ao usuário investigar a sua resposta para uma corrente de falta offset.

O Efeito Dos Raios Sobre Relés Instantâneos

Qual necessidade existe para a filtragem em relés de proteção? Em Junho de 1995, um raio atingiu uma linha de 734 kV na malha principal de transmissão da Hydro Québec. Um relé instantâneo, na proteção principal, desligou a linha. Como resultado, foi realizado um estudo para avaliar o efeito de raios sobre os relés instantâneos. Uma amostra da corrente devida a um impacto de descarga atmosférica foi obtida do programa EMTP, excitando-se a linha com um pulso de tensão. As amostras de corrente divididas pela relação do TC são mostradas na Figura 1, onde a frequência de amostragem é de 20 kHz. A Figura 2 mostra a plotagem FFT da forma de corrente, onde as frequências dominantes a 400 e 800 são dependentes dos parâmetros da linha.

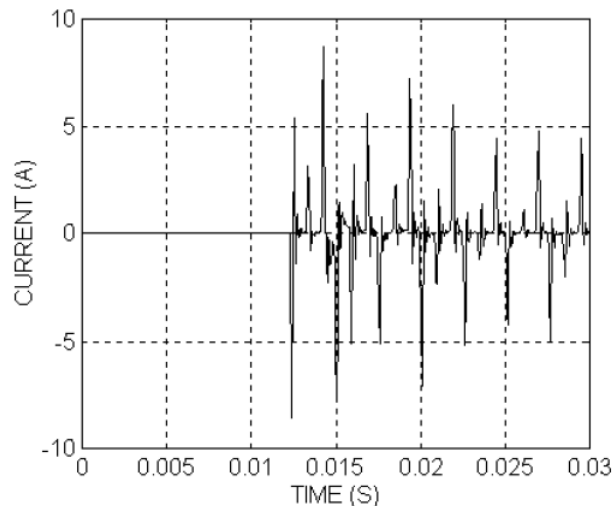


Figura 1: Amostras de Corrente Devidas ao Raio

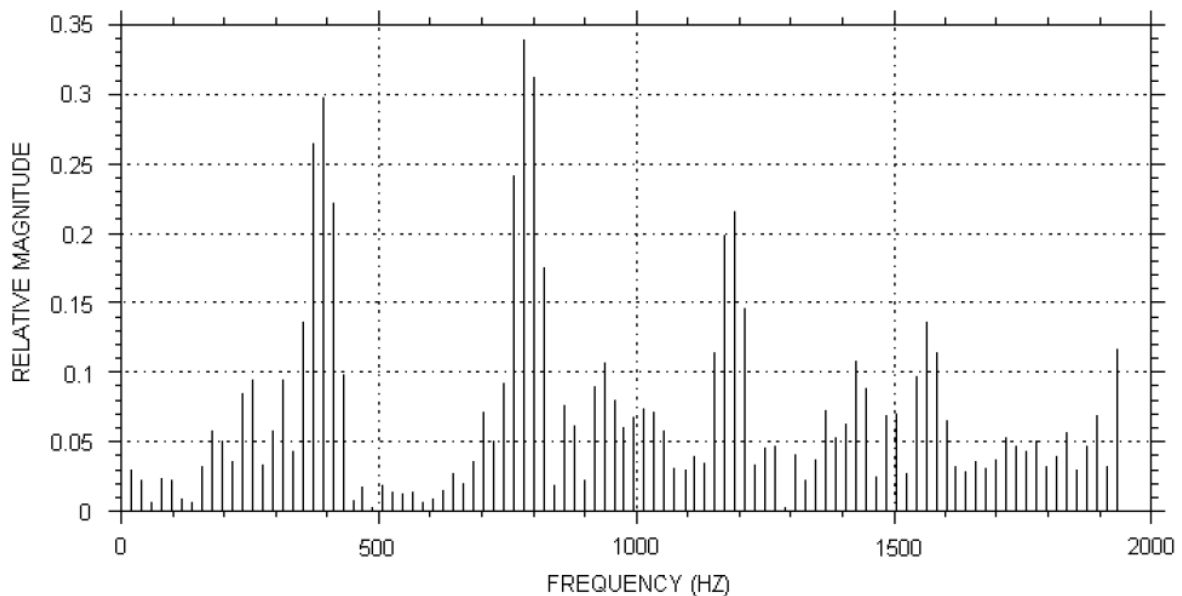


Figura 2: FFT de Amostras de Corrente

Usando o programa SPICE, as amostras foram aplicadas a um modelo dos principais componentes do circuito de dois relés instantâneos de estado sólido, relés A e B, projetados no início da década dos 60. O tipo de carga de saída de TC interposta teve um efeito preponderante sobre o desempenho global do relé.

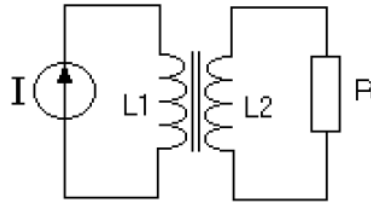


Figura 3: Transformador de Corrente Interposto

Pelo esquema de transformador interposto mostrado na Figura 3, a tensão através da carga pode ser caracterizada como:

$$V_b = \frac{s \cdot M \cdot R \cdot I(s)}{R + L2 \cdot s} \text{ onde } M = \sqrt{L1 \cdot L2} \quad (1)$$

No Relé A, a impedância de saída do transformador é muito maior do que a carga e a saída é:

$$V_b = \frac{s \cdot M \cdot R \cdot I(s)}{R + L2 \cdot s} = \sqrt{\frac{L1}{L2}} \cdot R \cdot I(s) = \frac{R \cdot I(s)}{n} \quad (2)$$

onde n é a relação de espiras. No Relé B, a impedância da carga é muito maior do que a impedância do transformador e a saída é:

$$V_b = s \cdot M \cdot I(s) \quad (3)$$

No Relé B, a carga é um diferenciador usado para rejeitar o componente de CC da corrente de falta para minimizar o sobrealcançe. No entanto, o seu ganho causa uma diminuição drástica no pick-up com a frequência, conforme mostrado na Figura 4.

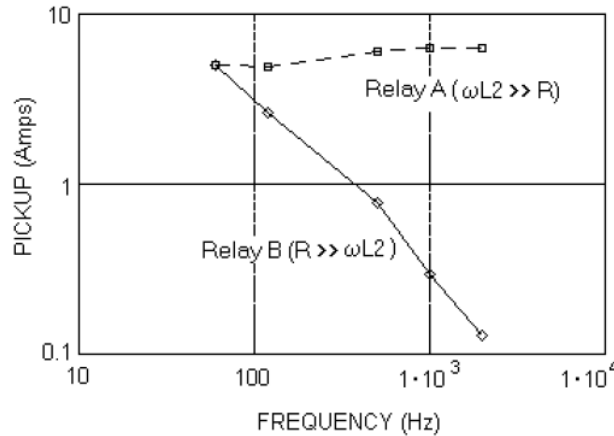


Figura 4: Corrente de Pick-Up Vs Frequência

Ambos os relés são detectores de pico e possuem uma resposta de frequência para responder à corrente induzida pelo raio. Figura 5 mostra a resposta do Relé A à corrente induzida pelo raio. Embora ambos os relés fossem projetados para operação à frequência nominal do sistema de potência, nenhuma provisão é feita para tratar do fenômeno de alta frequência comum.

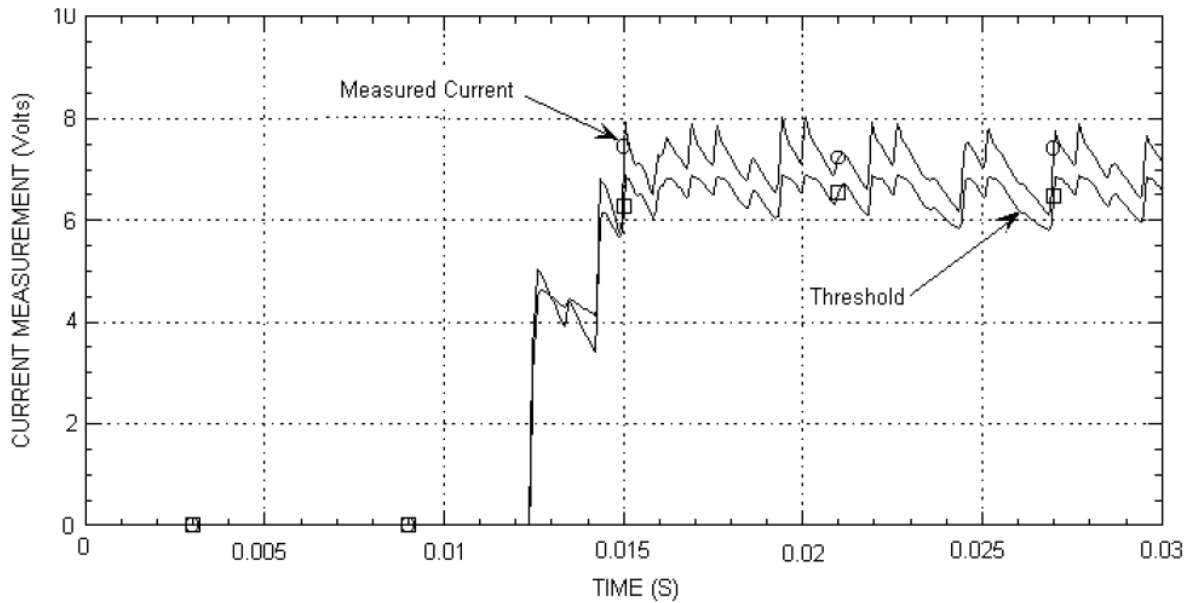


Figura 5: Medição da Corrente do Raio Pelo Relé A (measured current = corrente medida; threshold = limiar)

Em contraste, é prática normal no esquema de relés microprocessados utilizar um filtro digital para extrair a fundamental e um filtro anti-aliasing para atenuar a alta frequência, de forma a se preservar a medição. Para comparação, as amostras de raios foram aplicadas a um relé digital teórico usando um filtro anti-aliasing Butterworth de quarta ordem, com uma frequência de corte de 480 Hz, e um filtro de coseno de 16 amostras por ciclo. A atenuação do filtro anti-aliasing é mostrada na Figura 6. A Figura 7 mostra a pequena magnitude extraída pelo filtro coseno.

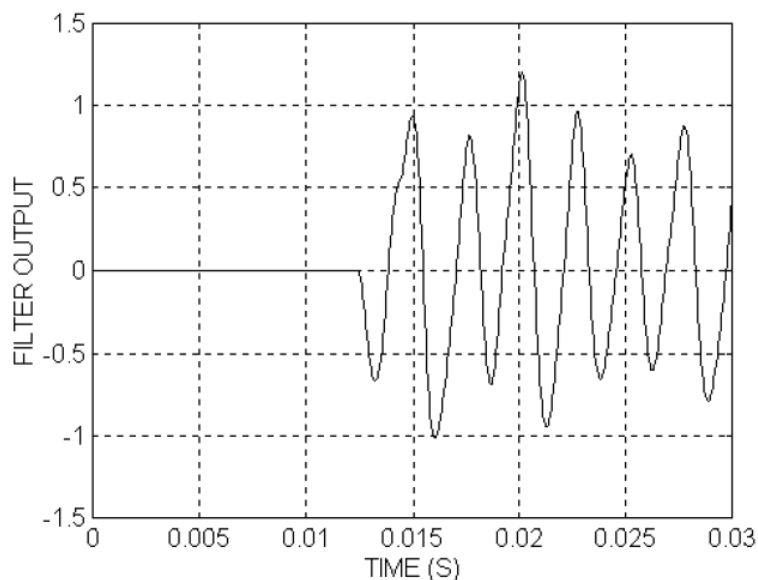


Figura 6: Resposta do Filtro Anti-Aliasing ao Raio (filter output = saída do filtro)

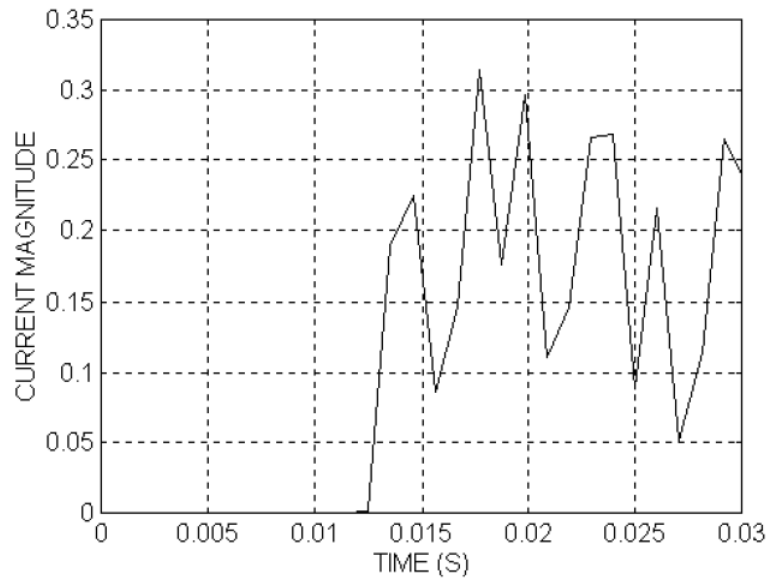


Figura 7: Resposta do Filtro Digital ao Raio

Terceiro Harmônico do Neutro

Os relés de sobrecorrente de terra operam em um ambiente da residual causado pelo previsível desbalanceamento da carga normal e quantidades incertas de harmônicos acumulados no neutro. A distorção de harmônicos pode ser decorrente da acumulação da corrente magnetizante proveniente de transformadores de distribuição ou da má prática de se colocar em paralelo geradores pequenos solidamente aterrados. Portanto, os relés de terra têm de ser ajustados suficientemente baixos, para proporcionar proteção sensível para faltas à terra, e suficientemente altos, para evitar os desligamentos sem motivo. A resposta do filtro digital a uma corrente do neutro composta por 50 ampères da fundamental e 100 ampères do terceiro harmônico, é mostrada na Figura 8. Neste caso, você tem de ajustar um relé eletromecânico ou um relé de sobrecorrente de terra de estado sólido, acima de 112 ampères rms. No entanto, conforme mostrado na Figura 8, o filtro digital adquire apenas a fundamental, permitindo um ajuste mais sensível. É claro, neste caso, que a fundamental contém a informação e todo o resto é apenas interferência.

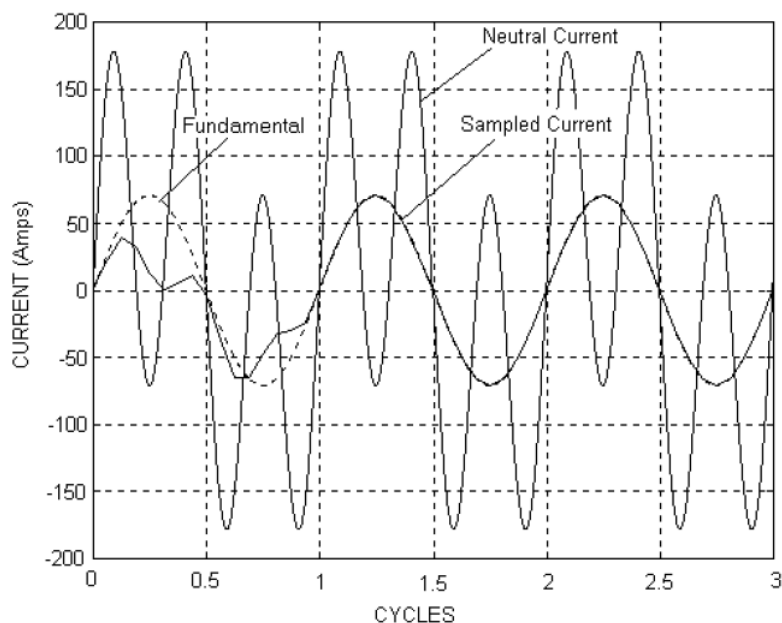


Figura 8: Resposta do Filtro à Corrente de Neutro Com Distorção do Terceiro Harmônico

Distorção de Harmônico em Retificadores de Pulso

A Tabela 1, extraída da Referência [4], relaciona os harmônicos não triplos introduzidos por um retificador de seis pulsos. A primeira coluna lista a magnitude dos harmônicos típicos para carga normal indutiva. A segunda coluna lista as magnitudes, com ressonância próxima do sétimo harmônico, causada pela capacitância de correção do fator de potência. A Norma IEEE 519-1992 define o fator de distorção como a relação da raiz quadrática média dos harmônicos para a raiz quadrática média da fundamental, expressa como porcentagem da fundamental. O fator de 21% indica uma forma de onda severamente distorcida. No entanto, ela não apresenta qualquer dificuldade particular para um relé que mede rms, pico ou a fundamental, porque a raiz quadrática média total é apenas 1,02 vezes a da fundamental. Figura 9 mostra a forma de onda, com a fundamental mostrada como uma linha pontilhada. Ela também mostra a fundamental adquirida pelo filtro digital.

A forma de onda ressonante apresenta um dilema. A queda de tensão causada pela corrente do retificador de 6 pulsos, circulando através da impedância da fonte entrante, causa uma queda de tensão contendo os harmônicos. Conseqüentemente, a tensão na barra da usina então contém os harmônicos não triplos. Infelizmente, a capacitância necessária para efetivamente corrigir o fator de potência da planta forma um circuito ressonante série com a indutância na impedância da fonte com uma frequência ressonante entre o quinto e sétimo harmônicos fornecidos pelo retificador. A forma de onda ressonante resultante é mostrada na Figura 10.

Tabela 1: Harmônicos em um Retificador de Seis Pulsos

Ordem de Harmônicos	Magnitude do Retificador de 6 Pulsos	Magnitude com Ressonância
1	100,0%	100,0%
5	17,4%	45,0%
7	11,0%	150,0%
11	4,5%	9,0%
13	2,9%	5,0%
17	1,5%	3,0%
DF	21%	157%

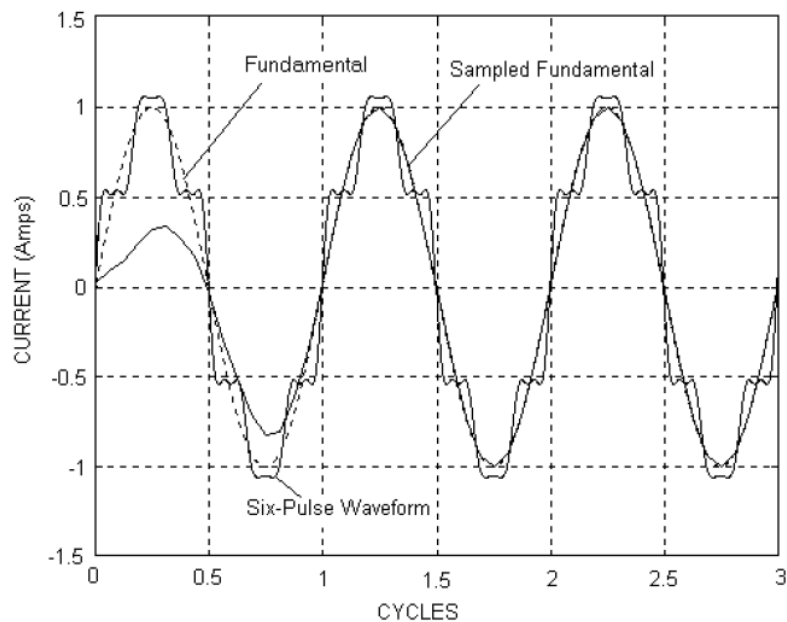


Figura 9: Filtragem Digital e Fundamental da Corrente de um Retificador de Seis Pulsos (sampled fundamental = fundamental amostrada; six-pulse waveform = forma de onda de 6 pulsos)

A forma de onda da Figura 10 tem um fator de distorção de 156% e rms de 186% da fundamental. É prática nas plantas industriais ajustar o pick-up do relé de sobrecorrente em 120% a 150% da corrente de carga normal. Conseqüentemente, o relé responsivo a picos ou o relé responsivo a rms irá desligar e ocasionar uma parada na planta para uma condição que precisa ser tolerada até que seja diagnostica e remediada [5]. O aumento do valor de pick-up pode impedir o desligamento, porém perturba a coordenação. O filtro digital tem uma vantagem distinta neste caso, conforme mostrado na Figura 10. Conseqüentemente, o relé responsivo à fundamental não requer ajuste da configuração e conserva a coordenação pretendida.

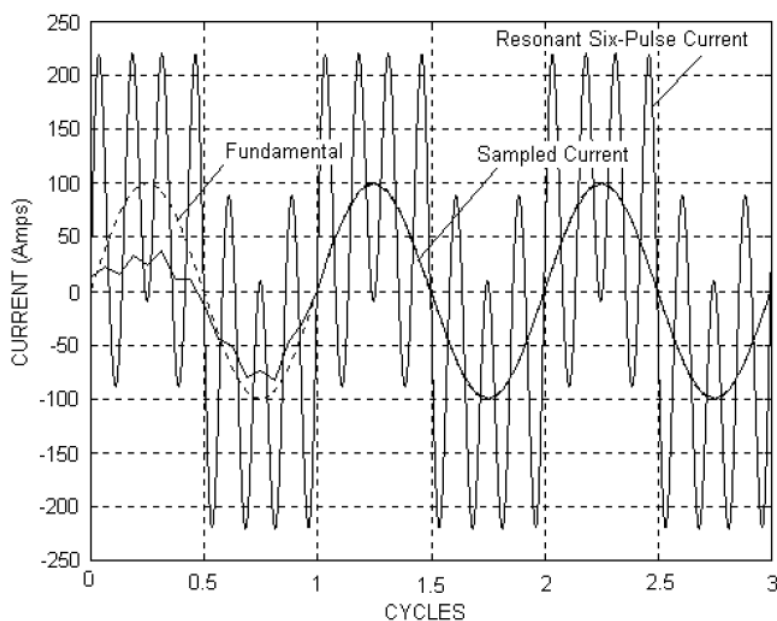


Figura 10: Filtragem Digital e Fundamental da Forma de Onda de Seis Pulsos com Ressonância (resonant six-pulse current = corrente ressonante de 6 pulsos; sampled current = corrente amostrada)

Corrente de Energização

Você normalmente associaria a plotagem da corrente de energização, mostrada na Figura 11, com um relé diferencial de transformador com limitação de harmônicos. Ela é a corrente de energização transitória causada pela energização de um transformador 600 MVA. O que torna esta plotagem interessante é que ela foi obtida do relatório de eventos registrado por um relé de distância. O evento foi disparado por um elemento instantâneo de ajuste alto com um ajuste de pick-up de seis ampères. Como parte da lógica de perda de potencial não utilizada no relé, ele foi programado para disparar o relatório de eventos porém não para desligar. A plotagem da corrente de energização é feito usando o relatório de eventos de amostras não filtradas. A plotagem do segundo harmônico foi calculada para mostrar o conteúdo de segundo harmônico da forma de onda.

Nos casos acima, a informação do relé está contida na fundamental do sistema, e os harmônicos apenas interferiram. É um tanto surpreendente que o filtro digital vá extrair fielmente a fundamental de qualquer forma de onda que seja periódica à frequência do sistema. Os elementos de distância não operaram porque nenhuma depressão de tensão acompanhou o sinal de alta corrente. No entanto, ajustes sensíveis fizeram o elemento direcional de sequência negativa identificar uma falta a frente [6].

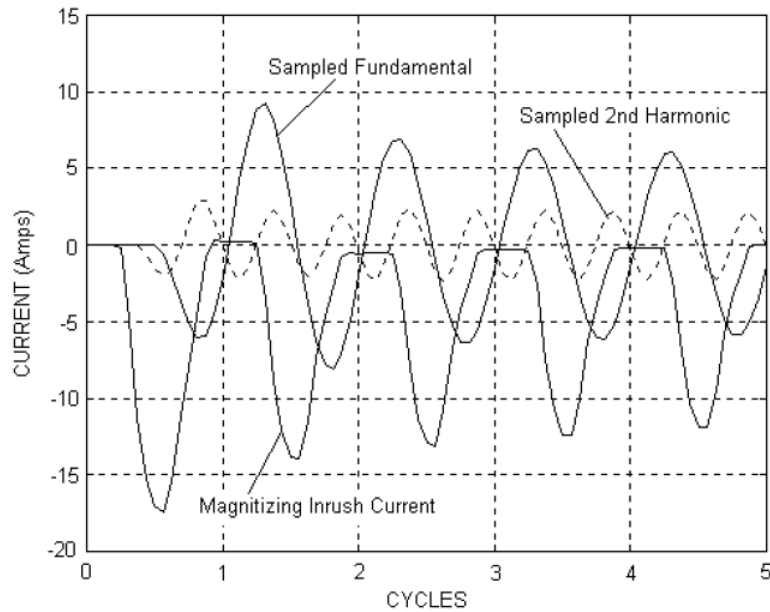


Figura 11: Corrente de Energização do Transformador (sampled fundamental = fundamental amostrada; sampled 2nd harmonic = segundo harmônico amostrado; magnetizing inrush current = corrente de energização magnetizante)

Totalizando TCs em um Barramento em Anel

O que poderia ser mais comum do que uma configuração de barramento em anel mostrada na Figura 12? Ao mesmo tempo, o que poderia ser mais nebuloso do que o nível de fluxo remanente nos TCs? As correntes dos secundários dos TCs adicionam, para faltas na linha alimentadas a partir de disjuntores, e subtraem, para corrente que circula em torno do circuito, para produzir corrente zero nos relés. Os conjuntos redundantes adequadamente dimensionados de TCs C800, de 2000:5 possuem não mais do que 1,5 ohm de carga. Quão efetivo é esse cancelamento?

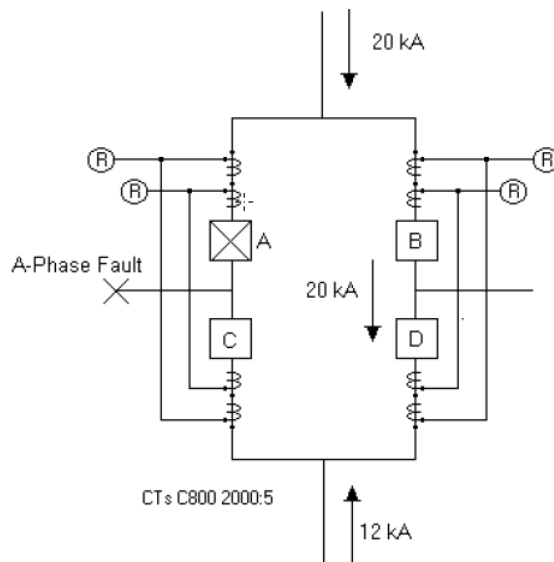


Figura 12: Falta No Barramento em Anel

Considere o caso onde os Disjuntores A e C desarmaram para eliminar uma falta de 20.000 ampères na linha oeste mostrada no diagrama. Religando o Disjuntor C em cima da falta causa um desligamento instantâneo dos Disjuntores B e D da linha leste. Os relatórios de

eventos dos relés registraram 6000 ampères, de um conjunto de TCs, e 2000 ampères do outro, onde os ajustes de pick-up dos eles eram 800 ampères, para o elemento de terra, e 2000 ampères para o elemento de fase. A resposta desigual indica a presença de fluxo remanente.

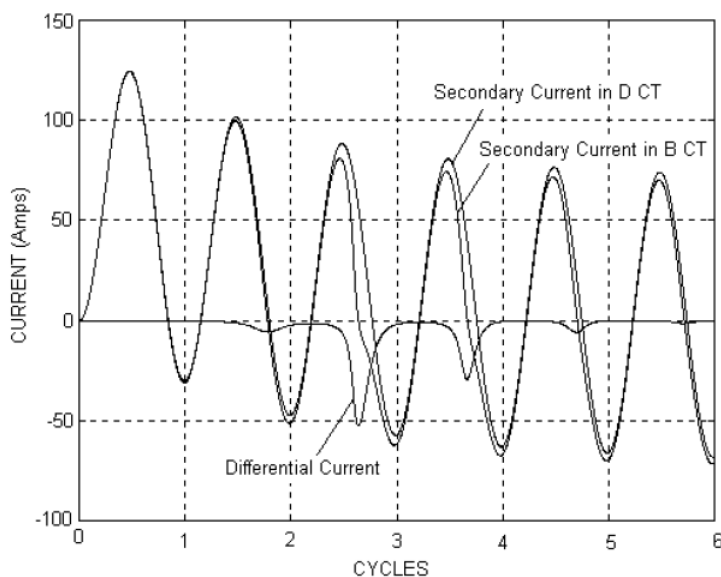


Figura 13: Correntes do Secundário em B e D Para Falta Assimétrica de 20 kA

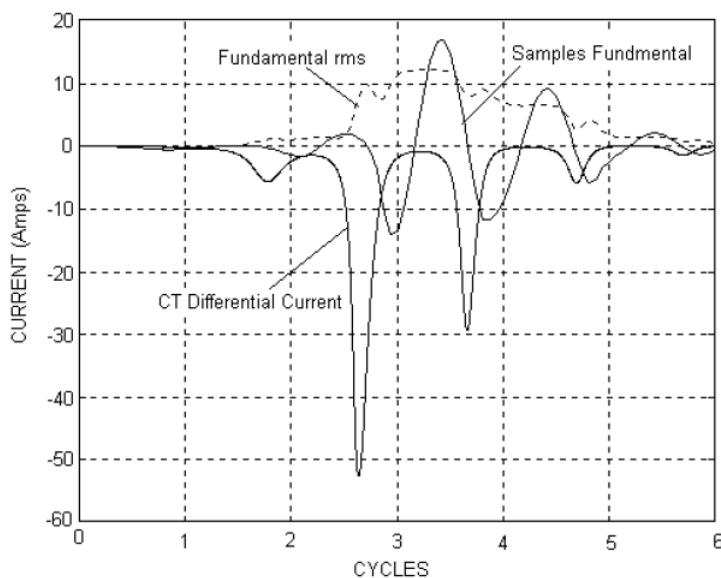


Figura 14: Corrente Diferencial e Fundamental Amostrada

Considere que para faltas na linha a corrente se divide igualmente nos disjuntores. A alta corrente de falta em cada TC tem a mesma polaridade e contribui para um fluxo remanente de mesma polaridade em cada TC. A corrente de falta, circulando no circuito, causa um fluxo que adiciona ao fluxo remanente em um TC, para promover saturação, e subtrai do fluxo do outro, para preveni-la. A Figura 13 mostra a corrente do secundário do TC nos disjuntores B e D para uma falta assimétrica de 20 kA. A corrente diferencial é causada pela saturação momentânea [8] de um TC que tem fluxo remanente igual a 20% da densidade do fluxo de saturação. A Figura 14 mostra a corrente diferencial que causou o desligamento e a fundamental adquirida pelo filtro digital do relé.

O problema ocorre perto da geração, onde a corrente de falta tem dez vezes o regime do TC. Para evitar o problema, ajuste o pick-up dos elementos instantâneos para não menos do que a metade da máxima corrente de falta ou utilize retardos de tempo para ajustes mais sensíveis.

CONCLUSÕES

1. As características dos relés eletromecânicos e analógicos são conhecidas através de experimentos. As características do relé microprocessado são conhecidas através de equações que proporcionam os meios para calcular a sua resposta.
2. Enquanto os relés clássicos respondem ao valor rms ou de crista do sinal de entrada, a maioria dos relés baseados em microprocessadores responde à fundamental.
3. Os relés microprocessados empregam um filtro digital para extrair a fundamental e um filtro e *anti-aliasing* para rejeitar harmônicos mais altos.
4. Os relés que respondem ao valor eficaz, ao valor de crista e à fundamental trabalham todos confiavelmente na falta de distorção de onda significativa. As distinções podem ser feitas em casos de severa distorção da onda.
5. Na maioria dos casos, a informação está na fundamental e os harmônicos interferem. É um tanto surpreendente quando a fundamental é extraída da corrente de erro, da corrente de energização ou saturação induzida remanente nos TCs.

RECONHECIMENTO

Gostaríamos de agradecer ao Sr. Michele Rousseau do Departamento de Planejamento da Hydro Quebec pela provisão do arquivo EMTP com a forma de onda da corrente devida à descarga atmosférica, a qual foi utilizada em nosso artigo.

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 Who's Who in America. Ele detém mais de uma dúzia de patentes relacionadas à proteção de sistemas de potência usando a tecnologia de estado sólido e microprocessadores 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" 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 da Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canadá, em 1968 e 1970, respectivamente.

Em 1969, ele começou a trabalhar na Hydro-Québec como especialista em instrumentação e controle. Trabalhou em diferentes projetos nas áreas de sistemas de controle de subestações e centros de despacho. Em 1978, ingressou na IREQ, onde sua principal área de trabalho foi a aplicação de técnicas digitais e microprocessadores para sistemas de proteção e controle de subestações de linhas e usinas. Em 1997, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories na posição de Engenheiro de Pesquisas.

Ele é um engenheiro profissional registrado na Province of Québec, é membro do IEEE e atende ao Power System Relaying Committee desde maio de 1989.

REFERÊNCIAS

- [1] E. O. Schweitzer III and Daqing Hou, "Filtering for Protective Relay," 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 20-22, 1992.
- [2] S. E. Zocholl, Armando Guzmán, and Daqing Hou, "Transformer Modeling as Applied to Differential Relaying," Proceedings of the 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 24-26, 1996.
- [3] W. A. Elmore, C. A. Kramer, and S. E. Zocholl, "Effects of Waveform Distortion on Protective Relays." IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993, pp. 404-411.
- [4] David E. Rice, "Adjustable Speed Drives and Power Rectifiers Harmonics - Their Effect on Power System Components," IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. IA-22, No. 1, January/February 1986, pp. 161-177.
- [5] S. Bhattacharya, Po-Tai Cheng, and Deepak Devan, "Hybrid Solutions for Improving Passive Filter Performance in High Power Applications," IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 33, No. 3, May/June 1997, pp. 732-747.
- [6] Jeff Roberts, E. O. Schweitzer III, Renu Arora, and Ernie Poggi, "Limits to the Sensitivity of Ground Directional and Distance Protection," 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 24-26, 1995.
- [7] IEEE Std 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [8] S. E. Zocholl, Jeff Roberts, and Gabriel Benmouyal, "Selecting CTs to Optimize Relay Performance" 23rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 15-17, 1996.
- [9] G. Benmouyal, H. Bilodeau, S. Chano, G. Sybille, "New Algorithm for Protection of Capacitor Banks Exposed to Harmonic Overvoltages," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 621-30, April 1995.

ANEXO A

COSFILT.MCD. Este arquivo Mathcad® 6.0 aplica o filtro coseno digital a uma corrente de falta assimétrica e extrai a fundamental da forma de onda e sua magnitude. O arquivo foi escrito e formulado em 4/10/96 por Armando Guzmán, da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., em Pullman, WA.

Duração da falta:	$\text{ciclos} \equiv 6$	
Frequência do sistema:	$f \equiv 60$	$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$
Frequência de amostragem:	$f_s \equiv 16 \cdot f$	$f_s = 960$
Amostras/ciclo:	$\text{spc} := \frac{f_s}{f}$	$\text{spc} = 16$
Número máximo de amostras:	$\text{mns} := \text{spc} \cdot (\text{ciclos} + 1)$	$\text{mns} = 112$
Índice de amostras:	$t_{\text{smp1}} := 0, 1, \dots, \text{mns}$	
Tempo em cada amostra:	$t_{\text{smp1}} := \frac{\text{smp1}}{f_s}$	
Magnitude da corrente:	$I1 := 100$	
Sistema R:	$R1 := 5$	
Sistema X:	$X1 := 200$	
Relação do Sistema X sobre R:	$\frac{X1}{R1} = 40$	
Constante de tempo do sistema:	$\tau := \frac{X1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R1}$	$\tau = 0,106$
Ângulo de fase da corrente:	$\theta := \frac{\text{atan} \frac{X1}{R1}}{\text{deg}}$	$\theta = 88,568$
Ângulo Incidente (graus):	$\phi \equiv -12$	
Intervalo do tempo de amostra:	$\text{ciclo} := \frac{f}{f_s}$	$\text{ciclo} = 0,063$

Equação de corrente:

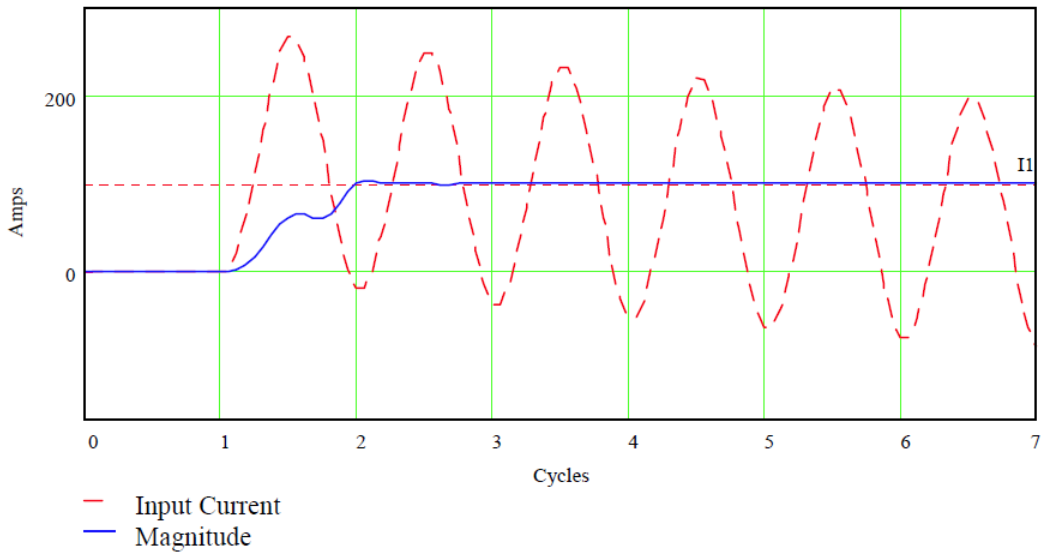
$$I_{\text{smp1} + \text{spc}} := \sqrt{2} \cdot I1 \cdot \left(\sin(\omega \cdot t_{\text{smp1}} + \phi \cdot \text{deg} - \theta \cdot \text{deg}) - e^{-\frac{t_{\text{smp1}}}{\tau}} \cdot \sin(\phi \cdot \text{deg} - \theta \cdot \text{deg}) \right)$$

Comprimento da janela: $N \equiv 16$ $n = 0 \dots N - 1$

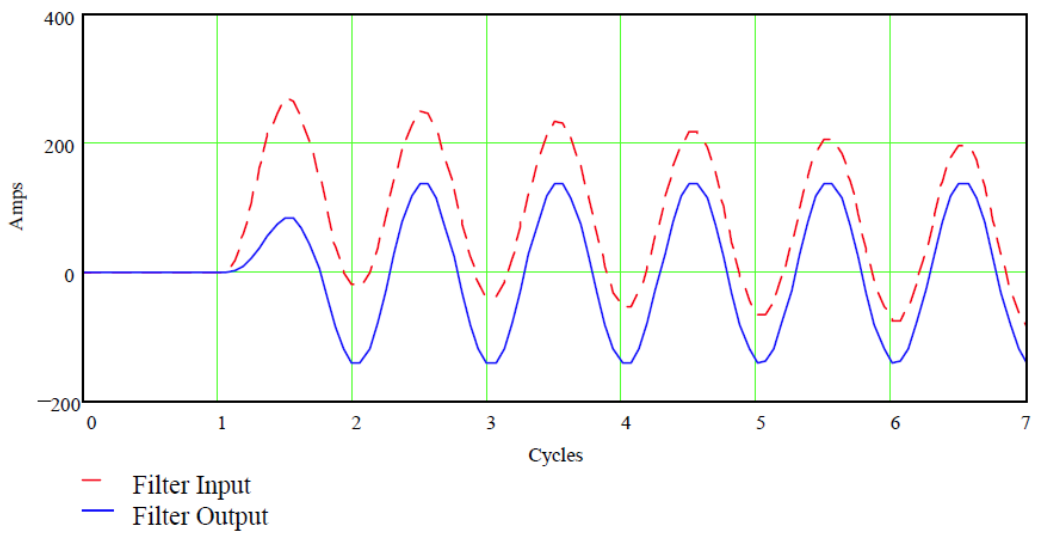
Coefficientes do filtro Coseno: $\text{CFC}_n := \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{\text{spc}} \cdot n\right)$

O filtro Coseno: $\text{IX}_{\text{smp1} + \text{spc}} := \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} I_{\text{smp1} + \text{spc} - n} \cdot \text{CFC}_n$

Amplitude do fasor: $M1_{\text{smp1} + \text{spc}} := \sqrt{\left(\text{IX}_{\text{smp1} + \text{spc}}\right)^2 + \left(\text{IX}_{\text{smp1} + \text{spc} - \frac{\text{spc}}{4}}\right)^2}$



Cálculo da Magnitude



Saída do Filtro Coseno

© SEL 1997, 1998
(Todos os direitos reservados)
980211