

Detecção de Falhas de Alta Impedância nos Sistemas de Distribuição de Energia

Daqing Hou, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Resumo—Quando linhas aéreas de transmissão de energia de sistemas solidamente aterrados ou aterrados através de baixa impedância perdem a sustentação e caem sobre superfícies de solos de baixa condutividade, elas geram falhas de alta impedância (“high-impedance faults” – HIFs). Essas falhas consistem numa grande fonte de preocupação para a segurança pública, pois as correntes de falta são geralmente muito pequenas para serem detectadas pelos relés de sobrecorrente convencionais. Essa preocupação tem gerado um grande interesse na detecção, no nível da subestação, de HIFs associadas à queda de cabos condutores. Neste artigo, apresentamos um algoritmo de detecção de HIFs que usa a lógica de relés tradicionais. O algoritmo é mais fácil de ser entendido e mais simples de ser implementado do que muitos métodos de detecção do tipo “black-box”, tal como as redes neurais. Abordamos aspectos essenciais para o desenvolvimento do algoritmo tais como seleção das grandezas de entrada, geração de uma referência confiável, adaptação aos ruídos das cargas no ambiente dos alimentadores e lógica de decisão baseada em tendências e memórias. Usamos dados reais coletados a partir de testes preparados para simulação de HIFs e cargas de subestações com ruídos para validar os resultados da detecção.

I. INTRODUÇÃO

Nos sistemas de distribuição de energia com tensões entre 4 kV e 34,5 kV, as falhas de alta impedância (HIFs) têm desafiado as concessionárias de energia elétrica e os pesquisadores há vários anos. HIFs são aquelas falhas nos alimentadores da distribuição cujos valores de corrente ficam abaixo dos valores de partida dos relés de sobrecorrente tradicionais. A queda de condutores de energia em superfícies de solos de baixa condutividade, galhos de árvores balançando e encostando nas linhas de transmissão e isoladores poluídos consistem em causas potenciais de HIFs. Em diversos estudos realizados a partir de testes preparados para simulação e análise das HIFs dos sistemas de distribuição aterrados, os pesquisadores registraram magnitudes das correntes de falta variando de zero a menos de 100 amperes.

HIFs possuem correntes de falta tão pequenas que elas geralmente não afetam a operação do sistema de distribuição de energia. Entretanto, as HIFs causadas pela queda de condutores de energia representam uma grande fonte de preocupação para a segurança pública. Sem que sejam tomadas as devidas providências no devido tempo, essas falhas podem ser perigosas para a vida de seres humanos e para as propriedades. Existem diversos casos documentados de litígios de alto custo co-

mo resultado de danos causados por condutores de energia que caíram e não foram detectados.

HIFs nos sistemas multiterrados da distribuição são difíceis de serem detectadas no nível da subestação. Cargas monofásicas e retorno de correntes desequilibradas por múltiplos caminhos são diversos fatores que contribuem para dificultar a detecção dessas falhas [1]. Um sistema aterrado pode ser bastante desequilibrado se um ramal monofásico importante estiver fora de serviço. Além de garantir a coordenação com os dispositivos e fusíveis localizados à frente (“downstream devices”), e de evitar a partida de cargas a frio e as correntes de *inrush* nos transformadores, deve ser evitado o falso trip ajustando a proteção de sobrecorrente de terra convencional acima do valor máximo de desbalanço previsto. Dessa forma, as proteções de sobrecorrente que usam a componente fundamental ou valores RMS de corrente são ineficazes para detecção de HIFs. Algumas HIFs, tais como as que resultam da queda de condutores no asfalto ou areia seca, geram virtualmente nenhuma corrente de falta. Nenhum dispositivo baseado na subestação pode detectar essas HIFs ou situações de queda de condutores. Uma publicação da “IEEE Power Engineering Society” (PES) [2] documentou situações específicas sobre quedas de condutores de energia, abordando o motivo pelo qual elas não podem ser sempre detectadas.

HIFs são aleatórias e dinâmicas. Um condutor de energia caído pode permanecer inativo na superfície do solo por um certo tempo e passar a conduzir assim que tenha ocorrido um rompimento na isolação. Um condutor com presença de arcos pode não permanecer parado na superfície do solo, mas pode se mover como resultado da força eletromagnética. As magnitudes e os conteúdos da corrente de falta se alteram à medida que a umidade da superfície do solo é reduzida em função do calor gerado pela falta e/ou à medida que os materiais de silício do solo são aquecidos, transformando-se em substâncias vitrificadas. Os solos, durante diferentes estações do ano e de acordo com diversas regiões geográficas, também produzem diferentes conteúdos das correntes de falta.

Apesar desses desafios, os pesquisadores permanecem otimistas, acreditando que vão desenvolver um algoritmo para detecção de HIFs por dispositivos baseados na subestação, com um custo adequado. No início da década de 70, surpreendida pelas rupturas não detectadas de condutores de polietileno reticulado (“cross-linked polyethylene – XLP), a empresa “Pennsylvania Power and Light Company (PP&L)” iniciou

diversos testes com simulação de HIFs, derrubando os cabos XLP em diferentes tipos de solo [3]. O EPRI (“Electric Power Research Institute”) e a CEA (“Canadian Electricity Association”) conduziram pesquisas no final da década de 70 e início da década de 80, as quais resultaram em diversos relatórios analíticos [4]–[7]. Desde então, pesquisadores têm estudado e aplicado inúmeras técnicas novas e já existentes para detecção de HIFs. Estão incluídos testes hipotéticos baseados em estatísticas [8], sistemas especialistas baseados nos princípios de indução [9], redes neurais [10] [11], ângulo do terceiro harmônico das correntes de falta [12], decomposição das *Wavelets* [13] [14], árvores de decisão [15], lógica *fuzzy* [16], e outros. PES e o “Power System Relaying Committee” (PSRC) do IEEE acompanharam de perto os desenvolvimentos, forneceram um curso tutorial [17] e publicaram relatórios do comitê [18]–[20].

Conforme indicado pelo longo histórico de pesquisas em andamento e pelo número de tecnologias que os pesquisadores têm estudado e aplicado, percebe-se a dificuldade e a complexidade envolvidas no desenvolvimento de um algoritmo para detecção de HIFs que seja totalmente confiável e 100% seguro contra alarmes falsos.

Embora seja relativamente fácil criar um algoritmo que detecte determinadas HIFs, é difícil tornar o mesmo algoritmo seguro. O objetivo da proteção contra HIFs é remover o perigo para o público. Quando um dispositivo de detecção de HIF indicar uma falta, as concessionárias têm de tomar as decisões de trip baseando-se em diversas circunstâncias para garantir que um trip não provoque outras situações de perigo. As concessionárias não podem admitir falsos alarmes dos dispositivos de detecção de HIFs. Pode ser mais perigoso e caro, por exemplo, desligar uma interseção de muito tráfego, um hospital ou a carga de um aeroporto.

Neste artigo, apresentaremos um outro algoritmo de detecção de HIFs. Na Seção II, identificaremos e introduziremos as áreas essenciais para criação de algoritmos efetivos de detecção. Estão incluídos a seleção das grandezas de entrada, geração de uma referência confiável, adaptação às condições ambientais de cada alimentador, função baseada em tendências e memórias e lógica de decisão que usa lógicas simples de relés tradicionais. Na Seção III, apresentaremos os resultados dos testes obtidos com o algoritmo, usando dados de testes montados para simulação e análise de HIFs. Além disso, verificamos a segurança do algoritmo por meio do uso de cargas representativas de subestações com ruídos.

II. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA DETECÇÃO DE ALTA IMPEDÂNCIA

A partir de nossas pesquisas e estudos do assunto em questão, identificamos os itens seguintes como elementos chave para o desenvolvimento com sucesso de um algoritmo de detecção de HIFs:

- Uma grandeza informativa que identifique da melhor forma possível os sinais indicativos de uma HIF, ou

seja, as “assinaturas de uma HIF”, sem ser afetada por cargas e outras condições de operação do sistema.

- Uma média da operação da grandeza que forneça uma referência estável da pré-falta. De preferência, a média deve estar disponível continuamente, mesmo durante uma condição de HIF. Para isso, a média de operação não deve acompanhar, de forma muito rápida, o valor elevado da grandeza durante uma condição de falta.
- Uma função de sintonia adaptativa que identifique e desligue para condições de ruído no ambiente do alimentador. Preferencialmente, a sintonização deve estar ativa sempre que não houver detecção pelo algoritmo de uma condição de HIF no sistema.
- Uma lógica de decisão efetiva para diferenciar uma condição de HIF de outras condições do sistema tais como operações de chaveamento e cargas com ruído.

O algoritmo de detecção de HIFs que estamos propondo concentra esses elementos chave, porém inclui outros blocos com funções suplementares. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do algoritmo para a corrente da fase A. O mesmo processamento também se aplica às correntes da fase B, fase C e residual.

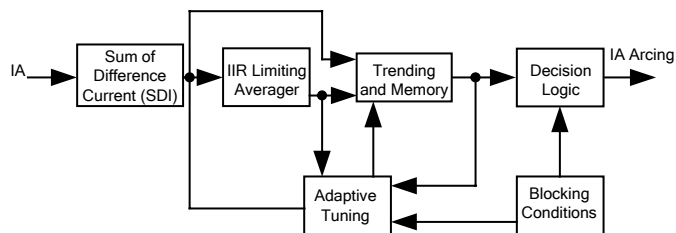


Figura 1. Diagrama de blocos para detecção de alta impedância

O primeiro bloco de função calcula um sinal da grandeza em que o algoritmo se baseia para efetuar a detecção de HIF. Essa grandeza é denominada Soma da Diferença de Correntes (“Sum of Difference Current” – SDI). Um circuito Limitador do Valor Médio do filtro de Resposta ao Impulso Infinita (“Infinite-Impulse-Response [IIR] Limiting Averager”) estabelece uma referência estável para SDI. O bloco de Tendências e Memórias compara o valor de SDI com a média de SDI e memoriza o tempo e a relação se SDI for um valor limite ajustado acima da média de SDI. A Lógica de Decisão usa os resultados do bloco de Tendências e Memórias para determinar a existência de HIF na fase processada. O bloco de Sintonização Adaptativa monitora o ruído do ambiente do alimentador durante condições normais de operação do sistema e estabelece um limite de comparação para o bloco de Tendências e Memórias. O Limitador do Valor Médio de IIR também usa esse valor limite para evitar que sua magnitude de entrada se torne muito elevada.

O texto a seguir fornece detalhes das principais funções da Figura 1.

A. Soma da Diferença de Correntes (SDI)

Considerando que as HIFs geram baixas magnitudes de corrente, percebeu-se desde o início que deveriam ser feitas pesquisas para encontrar sinais de grandezas que não fossem a componente da frequência fundamental e o valor RMS das correntes para detecção de HIFs.

Tipicamente, as HIFs envolvem arcos e condução através das superfícies do solo. Tanto o arco quanto a condução pelo solo apresentam resistência não linear para o fluxo de corrente, gerando, portanto, harmônicos [4]. Por outro lado, cargas normalmente não lineares como centros de motores, inversores de potência e fornos a arco também geram harmônicos significativos, especialmente harmônicos de ordem ímpar. O que queremos são sinais de grandezas que, na maior parte das vezes, identifiquem as assinaturas das HIFs, mas que tendem para zero durante condições normais de operação do sistema.

Inicialmente, foram usadas as componentes de seqüência da frequência fundamental, terceiro e quinto harmônicos, variações na magnitude e fase do terceiro harmônico, e componentes de alta frequência entre 2 kHz e 10 kHz [5]–[7]. Cada um dos componentes tem seus mistérios e limites. No final, foram discutidos e aplicados alguns tipos de sinais elevados como diferenças de correntes [11] [22], harmônicos de ordem par e ímpar e não harmônicos [9], e energia de bandas de frequências especiais provenientes da decomposição das *wavelets* [13] [14]. Uma das referências [21] sugeriu o uso da combinação de sinais diferentes.

Em nosso projeto, escolhemos usar uma SDI, mostrada na Figura 2, como entrada para detecção de faltas. O sistema rastreia a frequência do sistema de potência e amostra as correntes do alimentador (I_k) em um número inteiro (N_{spc}) de amostras por ciclo do sistema. O sistema usa um filtro simples de diferença de um ciclo [22] para calcular a diferença de correntes (DI_k) e obtém SDI acumulando os valores absolutos da diferença de corrente durante diversos ciclos de potência (N_s).

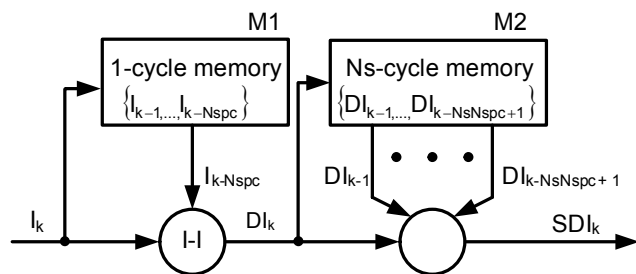


Figura 2. Cálculo da Soma da Diferença de Correntes (SDI)

A Figura 3 ilustra o cálculo de SDI no domínio do tempo através da forma de onda de corrente de uma HIF amostrada a 32 amostras por ciclo. Para formas de ondas senoidais ideais, o cálculo da diferença de um ciclo vai resultar numa saída com todos os valores iguais a zero. Entretanto, com a corrente de arco de uma HIF, a diferença de um ciclo das correntes indica a atividade um processo com arcos bastante aleatório.

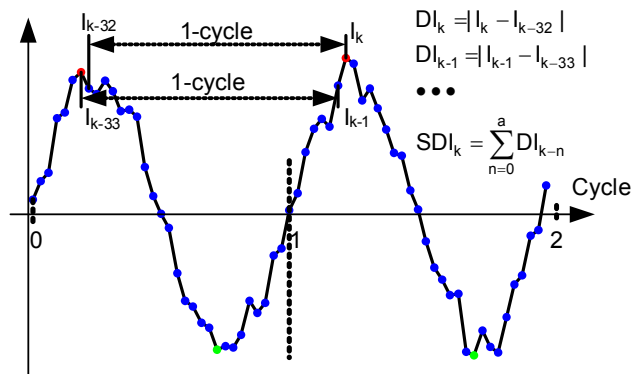


Figura 3. Ilustração do cálculo de SDI no domínio do tempo

A Figura 4 mostra a porção da magnitude da resposta de frequência do cálculo da diferença de um ciclo para o quarto harmônico. Observe que a magnitude da resposta tem um zero em todos os harmônicos de frequência, incluindo os componentes da frequência fundamental e DC. Todos os componentes dos harmônicos, incluindo o DC e a fundamental da corrente, são removidos após o cálculo da diferença. Os conteúdos da frequência da diferença de correntes contêm somente não harmônicos. A grandeza SDI representa uma média da medição do conteúdo total de não harmônicos de uma corrente na janela de N_s ciclos, fazendo de SDI uma ferramenta de enorme valor para detecção de HIFs.

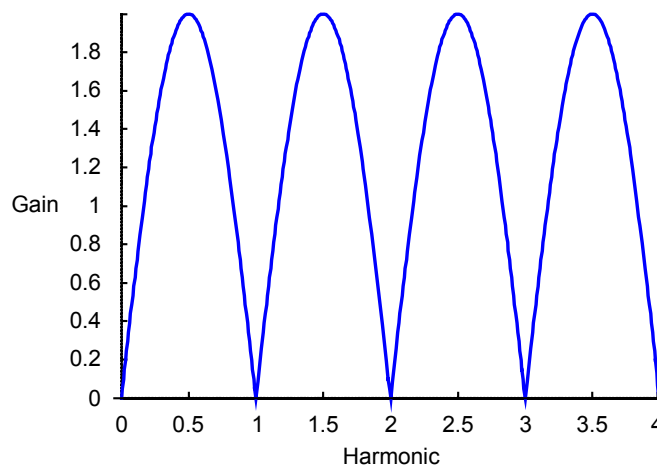


Figura 4. Magnitude da resposta de frequência do filtro de diferença de um ciclo

B. Limitador do Valor Médio de IIR

Quando ocorre uma HIF, a grandeza SDI aumenta. O valor dessa elevação pode ser observado somente através da comparação da grandeza com seu histórico. A função do Limitador do Valor Médio de IIR fornece uma referência confiável; a qualidade dessa referência é importante para o sucesso do algoritmo de detecção.

Escolhemos usar um tipo de função para obtenção do valor médio do filtro de resposta ao impulso infinita (IIR) com uma constante de tempo fixa, pois podemos obter os dados da memória de longa duração de forma eficiente e, relativamente,

com poucos cálculos e unidades de memória. Pode ser escolhida uma constante de tempo grande o suficiente para fornecer uma referência estável durante faltas. Por outro lado, uma constante de tempo pequena é adequada para propiciar um rastreamento rápido da média das entradas durante condições normais, sem a presença de faltas. Para obter um equilíbrio entre esses requisitos conflitantes e para evitar que a média acompanhe, de forma muito rápida, os picos elevados de SDI, a entrada do limitador do valor médio é limitada se o valor de SDI estiver acima do limite. Outra possibilidade para estabilizar a média da saída no caso de picos elevados de entrada é aumentar a constante de tempo. Alguns relés de distância usam este método, descrito na patente US 5,790,418 [23], no filtro de memória para a grandeza de polarização.

A Figura 5 mostra os detalhes do Limitador do Valor Médio de IIR, cuja saída, SDI_REF_k , está de acordo com a equação de primeira ordem do IIR (1)

$$SDI_REF_k = (1 - \alpha) \cdot x_{in} + \alpha \cdot SDI_REF_{k-1} \quad (1)$$

onde se refere à constante de tempo e x_{in} pode ter dois valores possíveis de acordo com a saída do comparador C1. A entrada para a polaridade positiva do comparador C1 é SDI_k e a entrada para a polaridade negativa do comparador C1 é $G_{IIR1}d + SDI_REF_{k-1}$. A seção de Sintonização Adaptativa introduz a variável d. Aqui, considere essa variável como uma constante. A saída do comparador é uma lógica 1 se $SDI_k > G_{IIR1}d + SDI_REF_{k-1}$; caso contrário, é uma lógica 0. Quando a saída do comparador for uma lógica 0, a chave SW está na posição 1 e, portanto, x_{in} é igual a SDI_k . Quando a saída do comparador for uma lógica 1, a chave SW está na posição 2 e, portanto, x_{in} é igual a $G_{IIR2}d + SDI_REF_{k-1}$. Então, podemos calcular a saída do limitador do valor médio, SDI_REF_k , a partir de (2).

$$\text{se } SDI_k < G_{IIR1} \cdot d + SDI_REF_{k-1}$$

então

$$SDI_REF_k = (1 - \alpha) \cdot SDI_k + \alpha \cdot SDI_REF_{k-1} \quad (2)$$

do contrário

$$= (1 - \alpha) \cdot G_{IIR2} \cdot d + SDI_REF_{k-1}$$

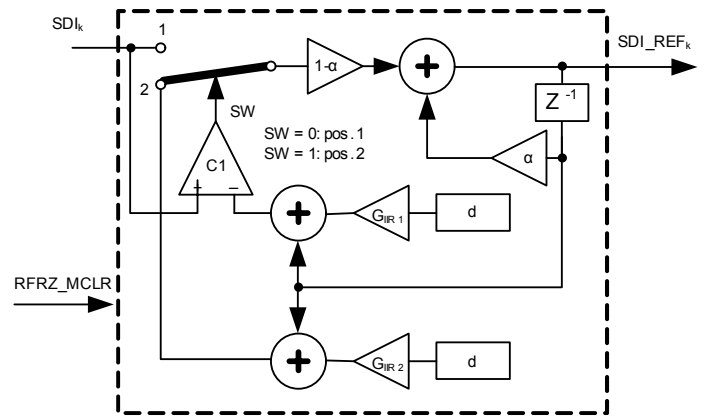


Figura 5. Limitador do Valor Médio das Entradas de IIR

Quando da ocorrência de condições que não sejam HIFs, a entrada de parada, RFRZ_MCLR, é uma lógica 1 e o cálculo do valor médio de limitação de IIR é suspenso. Essas situações de não-HIFs incluem grandes variações nas correntes de fase e variações nas tensões de linha.

C. Tendência e Memória

Uma vez que o algoritmo tenha estabelecido a grandeza de detecção SDI e sua média SDI_REF, o algoritmo tem de extrair as assinaturas de HIF dessas grandezas. A função de Tendências e Memórias registra alterações incomuns de SDI relacionadas às HIFs no sistema e memoriza essas variações para a lógica de decisão. A função de Tendências e Memórias fornece informações indicando qual a frequência com que ocorre o desvio, e qual o valor do desvio de SDI a partir de SDI_REF, acrescido de uma margem.

A Figura 6 mostra os detalhes da função de Tendências e Memórias. A parte da lógica anterior ao comparador C opera de acordo com a taxa de atualização de cada SDI. A porção remanescente da lógica opera sempre que a saída de C for uma lógica 1.

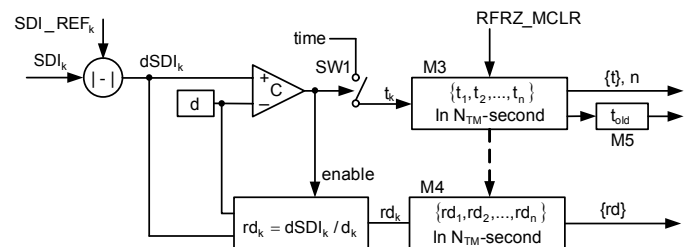


Figura 6. Função de Tendências e Memórias

O valor absoluto da diferença entre SDI e SDI_REF, ou dSDI, vai para a entrada positiva do comparador C. A entrada negativa do comparador conecta-se à variável d. A seção de Sintonia Adaptativa introduz a variável d.

Quando dSDI ultrapassa d, a saída do comparador é uma lógica 1; do contrário, a saída do comparador é uma lógica 0. Uma lógica 1 do comparador C fecha a chave SW1, e o algoritmo registra em uma memória, M3, o instante em que a cha-

ve SW1 fecha. Essa memória possui unidades suficientes para salvar o maior número possível de t_k dentro de N_{TM} segundos.

No início de cada segmento N_{TM} -segundos, se o valor anterior ajustado $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ não for zero, o último valor de tempo, t_n , move-se para uma unidade de memória simples, M5, como t_{old} . Se o valor ajustado $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ não tiver nenhum elemento, M5 retém seu valor anterior como t_{old} .

A função de Tendências e Memórias fornece $\{t\}$, $\{rd\}$, e t_{old} para que a lógica de decisão determine a existência de uma HIF. A função também fornece o valor n , o número de vezes que SDI desvia do limite de SDI_REF , mais d , nos N_{TM} segundos anteriores, para a lógica de Sintonia Adaptativa. O algoritmo usa as mesmas condições de bloqueio que aquelas do Limitador do Valor Médio de IIR, RFRZ_MCLR, para que essa função de Tendências e Memórias apague os $\{t\}$ e $\{rd\}$ memorizados no caso de condições do sistema que não sejam HIFs.

D. Sintonização Adaptativa

Para ajustar relés de sobrecorrente tradicionais é usado um programa de estudo de curto-circuito para calcular a corrente de falta sob diferentes condições de operação do sistema. A corrente de defeito atende à lei de Ohm, de forma que o processo de cálculo de ajustes é efetuado com base em parâmetros e topologias conhecidas do sistema.

Entretanto, a situação é diferente para detecção de HIFs, que usa grandezas não tradicionais. As cargas dinâmicas e não lineares dos alimentadores influenciam essas grandezas de formas diferentes. Por exemplo, se o algoritmo de detecção de HIF usar o quinto harmônico das correntes, os ajustes de detecção vão ser diferentes para alimentadores com inversores de potência de seis pólos em relação aos alimentadores que possuem somente cargas residenciais com pouco ruído. Considerando a enorme variedade de cargas da distribuição, seria impraticável para os usuários estudar as cargas de cada alimentador e determinar os efeitos que essas cargas têm no algoritmo de detecção escolhido.

O objetivo da função de Sintonia Adaptativa é que o algoritmo caracterize automaticamente a grandeza de detecção de um alimentador para suas cargas normais. A função identifica uma margem acima da média de SDI, na qual o valor de SDI pode cair como resultado de operações normais do sistema. Ambas as funções do Limitador do Valor Médio de IIR e de Tendências e Memórias usam essa margem, denominada como variável d .

A Figura 7 mostra detalhes da função de Sintonia Adaptativa. Existem duas entradas, n e n_{AT} , no lado direito da Figura 7. A entrada, n , representa o número de vezes que SDI se desviou de sua média, mais a margem d , dentro dos N_{TM} segundos anteriores, conforme explicado anteriormente neste artigo. Um acumulador soma todos os valores de n por até N_{AT} minutos e gera uma saída n_{AT} , o número de vezes que SDI desvia de sua média, mais a margem d , dentro dos N_{AT} minutos anteriores.

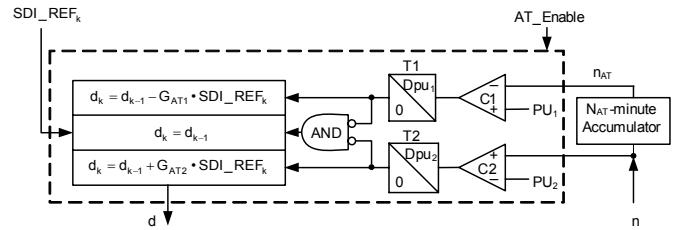


Figura 7. Função de Sintonia Adaptativa

O primeiro comparador da lógica, C1, compara o valor de n_{AT} com um valor limite PU_1 . Se n_{AT} for menor do que PU_1 , a saída de C1 é uma lógica 1. Caso contrário, a saída de C1 é uma lógica 0. Se a saída do comparador C1 for uma lógica 1 por um período consecutivo de D_{pu1} minutos, conforme determinado pelo temporizador T1, o temporizador T1 gera uma saída 1 na lógica. Essa saída 1 na lógica habilita o cálculo de atualização de d da linha superior e, ao mesmo tempo, faz com que o *gate* AND force sua saída para uma lógica 0. Em outras palavras, se SDI não desviar de sua média, mais uma margem d , por mais do que PU_1 vezes, por D_{pu1} minutos, o algoritmo considera a margem d muito grande e reduz o cálculo de atualização correspondente em G_{AT1} por cento da média, conforme indicado em (3).

$$d_k = d_k - G_{AT1} \cdot SDI_REF_k \quad (3)$$

O segundo comparador da lógica, C2, compara o valor de n com um valor limite de pickup PU_2 . Se n for maior do que PU_2 , a saída de C2 é uma lógica 1. Caso contrário, a saída de C2 é uma lógica 0. Se a saída do comparador C2 for uma lógica 1 por um período consecutivo de D_{pu2} segundos, conforme determinado pelo temporizador T2, o temporizador T2 gera uma saída 1 na lógica. Essa saída 1 na lógica habilita o cálculo de atualização de d da linha inferior e, ao mesmo tempo, faz com que o *gate* AND force sua saída para uma lógica 0. Em outras palavras, se SDI desviar de sua média, mais uma margem d , por mais do que PU_2 vezes em N_{TM} segundos, e se a condição permanecer por D_{pu2} segundos, o algoritmo considera a margem d muito pequena e aumenta o cálculo de atualização correspondente em G_{AT2} por cento da média, conforme indicado em (4).

$$d_k = d_k + G_{AT2} \cdot SDI_REF_k \quad (4)$$

Se ambas as saídas de T1 e T2 forem uma lógica 0, o *gate* AND gera uma saída 1 da lógica, a qual habilita o cálculo de atualização de d da linha do meio. O novo valor de d não difere do valor anterior.

A entrada de ativação da Figura 7, AT_Enable , determina quando ocorre a atualização de d . Algumas cargas da distribuição, tal como o sistema de ferrovias, possuem ciclos diários, e outras cargas, tal como bombas de motores de fazendas, têm ciclos sazonais. De forma ideal, o processo de sintonização deve ser contínuo contanto que não existam HIFs no sistema. A sintonização deve também permanecer por um

certo período de tempo após o fechamento do disjuntor e detecção de corrente de carga.

E. Lógica de Decisão

A função de Tendências e Memórias fornece informações importantes indicando qual a frequência com que ocorre o desvio, e qual o valor do desvio de SDI a partir de sua referência, acrescido de uma margem. O valor de n representa o número de vezes que SDI desviou seu valor limite dentro dos N_{TM} segundos anteriores, enquanto o conjunto de relações, $\{rd\}$, representa as informações referentes ao valor com que SDI ultrapassou seu limite. O primeiro bloco da lógica de decisão da Figura 8 calcula um grupo de diferenças de tempo, $\{dt\}$, usando os valores de tempo, $\{t\}$, e t_{old} da função de Tendências e Memórias. A diferença dos tempos pode fornecer a característica temporal da indicação de aleatoriedade das HIFs. É possível utilizar alguns métodos de inteligência artificial para classificação e reconhecimento de padrões, tais como redes neurais ou árvores de decisão, visando decifrar essas informações para detecção das HIFs. Ao invés disso, escolhemos usar comparadores e contadores relativamente simples na lógica de decisão.

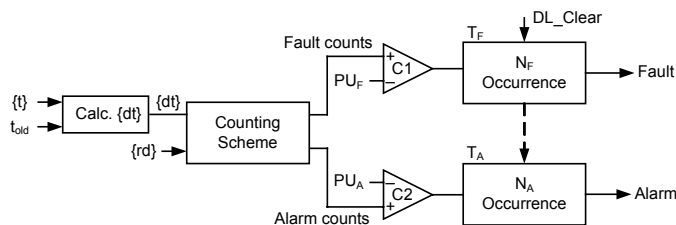


Figura 8. Diagrama de blocos da lógica de decisão

A lógica de decisão inclui dois contadores para funções separadas de alarme e trip de HIF. O Contador T_F é para a detecção de HIF e o Contador T_A é para os alarmes de HIF. Para cada par de $\{rd, dt\}$ no segmento dos N_{TM} -segundos anteriores, um esquema de contagem determina se efetua ou não a contagem e o número de contagens para uma falta ou alarme. Para cada segmento de N_{TM} -segundos, se o número de contagens para uma HIF exceder PU_F , conforme determinado pelo comparador C1, o comparador gera uma saída da lógica 1. O Contador T_F acumula o número de ativações da lógica 1 do comparador C1. Se N_F ocorrências se acumularem dentro do período de tempo de decisão de falta, o contador T_F gera uma saída 1 na lógica para indicar detecção de uma HIF. O algoritmo usa um método similar para gerar um alarme de uma HIF através do comparador C2 e contador T_A , porém usa limites de detecção diferentes, conforme indicado pela Figura 8.

A Figura 9 mostra o plano rd - dt . O plano como um todo é dividido em três regiões: Contagem de Falta, Contagem de Alarme e Sem Contagem. O eixo dt tem uma unidade de N_s ciclos, o intervalo onde SDI é acumulado. Se um par $\{rd, dt\}$ estiver na região de não contagem, o algoritmo não gera nenhuma contagem, nem para alarme e nem para falta. Se um par $\{rd, dt\}$ estiver na região de contagem de alarme, o algo-

ritmo gera contagens somente para alarmes de HIF. Se um par $\{rd, dt\}$ estiver na região de contagem de faltas, o algoritmo gera contagens para ambas as condições de falta e alarme de HIFs.

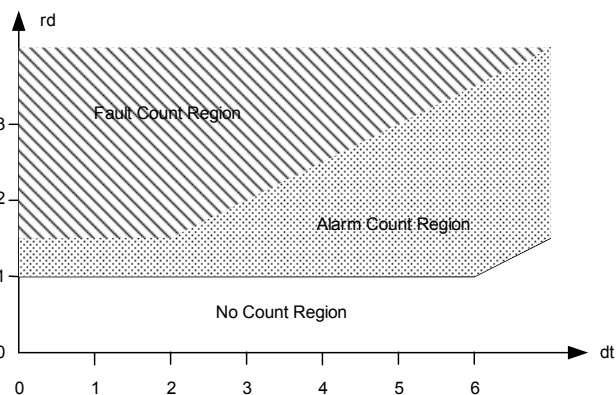


Figura 9. Regiões de contagem para condições de alarme e falta

Esse esquema de contagem no plano rd - dt é muito semelhante à característica de restrição porcentual do diferencial de corrente, com dt similar à grandeza de restrição e rd similar à grandeza de operação. Valores elevados de SDI, esporádicos e isolados, podem aparecer para chaveamentos no sistema tais como energização e desenergização de bancos de capacitores ou aumento e redução do tap de comutadores de cargas em derivação. Tais valores podem também resultar dos raios de descargas atmosféricas durante estações de chuvas fortes. Podemos descartar estes eventos de SDI, pois eles estão associados com valores elevados de dt . Por outro lado, ocorrências geradas por HIFs com arcos intensos e ativos tendem a gerar valores elevados de SDI concentrados num curto período de tempo, de forma que os pares $\{rd, dt\}$ relacionados terão maior probabilidade de se encontrar na região de operação do esquema de contagem.

A Figura 10 mostra como o algoritmo gera o número de contagens como uma função da relação, rd , para cada par $\{rd, dt\}$ que o esquema de contagem mostrado na Figura 9 determina como sendo contável. Por exemplo, se o valor rd de um par $\{rd, dt\}$ for 4, e o par estiver na região de Contagem de Faltas, então o algoritmo gera não uma, mas duas contagens de falta e alarme para esse par de $\{rd, dt\}$. Estudos de dados de HIFs simuladas indicam que o valor de SDI geralmente correlaciona a relevância de um evento às HIFs. Fazendo com que o número de contagens seja proporcional à relação, rd , o algoritmo considera não apenas o evento em que SDI ultrapassa seu limite, mas também o valor da elevação de SDI, para determinar a existência de uma falta.

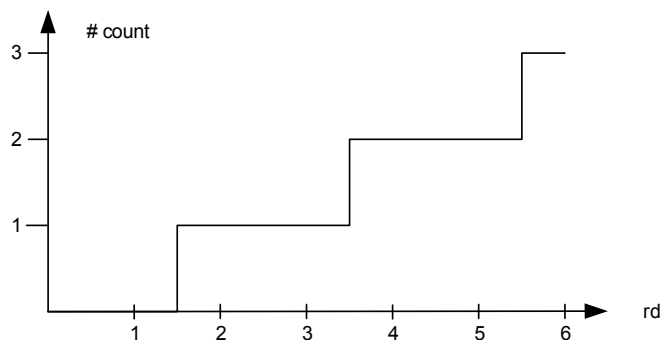


Figura 10. Número de contagens como função de rd

Diversas condições do sistema desabilitam a lógica de decisão conforme indicado pela entrada DL_Clear. Algumas dessas condições incluem grandes variações nas correntes de fase e algumas variações nas tensões. O algoritmo também detecta e usa eventos que ocorrem em todas as três fases para desabilitar a lógica de decisão, uma vez que assumimos que esses eventos têm muito pouca probabilidade de serem HIFs.

III. TESTES COM DADOS DE FALTAS SIMULADAS E CARGAS DA SUBESTAÇÃO

A. Simulação de Falhas de Alta Impedância

Nos estudos anteriores de HIFs, os pesquisadores simularam e registraram diversas faltas [6] [7]. Os dados dos testes desses estudos forneceram informações valiosas para a compreensão e caracterização das HIFs. Esses dados consistiram na base para o desenvolvimento de muitos dispositivos anteriores de detecção.

Ao longo do tempo, os pesquisadores construíram vários modelos de HIFs com o objetivo de criar e testar algoritmos de detecção de faltas. Esses modelos variavam desde simples diodos e fontes DC conectadas em série até resistências variáveis que podiam ser controladas por meio da relação entre a tensão e a corrente de algumas HIFs típicas [24].

Todavia, HIFs consistem em processos complicados e difíceis de serem compreendidos, incluindo diversas variáveis não determinísticas. Conforme explicado na referência [25], a impedância dessas faltas inclui aquelas dos arcos, da superfície do solo, do retorno pela terra e da interface entre as superfícies dos solos e os condutores caídos. Os pesquisadores conduziram estudos extensivos sobre algumas impedâncias, tais como as dos arcos; no entanto, provavelmente os resultados não podem ser aplicados diretamente nas situações de HIFs em função do nível de tensão, comprimento do arco e múltiplos caminhos do arco. Algumas outras impedâncias como as do retorno pela terra possuem uma fórmula bem definida; contudo, é difícil determinar alguns parâmetros necessários usados na formulação. Diversas outras variáveis, tais como os tipos dos condutores, a forma com que um condutor faz contato com a superfície do solo, tipos de superfície, conteúdo de umidade na terra e composição da terra dos retornos, podem

todos variar de diversas formas, o que impede que sejam considerados com precisão nas simulações.

Portanto, acreditamos que as simulações de HIFs possam fornecer dados iniciais para pesquisas preliminares, considerando, porém, que a verificação e o projeto final do algoritmo de detecção de faltas devem levar em conta os testes de faltas simuladas que abrangem dados da maior parte dos terrenos de diversas regiões geográficas, climas e tipos de superfície do solo.

B. Dispositivo de Aquisição de Dados

Para preparar a coleta de dados dos testes com faltas simuladas, foram montados dois sistemas idênticos para aquisição de dados. Os dispositivos utilizados para aquisição de dados foram os Daqbook/2005[®] da IOtech. Esses dispositivos podem amostrar até 16 canais analógicos com frequência de amostragem de até 20 kHz. O equipamento Daqbook/2005 comunica-se com os computadores através de uma porta Ethernet e salva os dados coletados diretamente nos computadores. Para efetuar a interface com os dispositivos Daqbook/2005, utilizamos módulos de interface de sinais que incluem circuitos elétricos típicos de relés microprocessados com filtro analógico passa-baixas e TP/TC. A frequência de corte do filtro passa-baixas RC de dois estágios é aproximadamente 5,8 kHz. Usamos também um roteador sem fios no sistema para propiciar a isolação entre o computador pessoal e os circuitos secundários da subestação. O roteador também propicia flexibilidade na instalação de um dispositivo de aquisição de dados na subestação e no local de testes. Conforme mostrado na foto do equipamento de testes de campo da Figura 11, cada componente do sistema pode ser instalado adequadamente numa maleta.



Figura 11. Dispositivo para aquisição de dados usado nos testes com simulação de faltas de alta impedância

C. Testes com Simulação de Falhas de Alta Impedância

Em 2005, executamos quatro testes com simulação de HIFs em três locais diferentes. Em todos os testes, coletamos tensões e correntes no local dos testes e na subestação. Os dados do local do teste permitiram que estudássemos a forma com que os sinais indicativos das HIFs se propagam de volta para a subestação. Usamos os dados da subestação para desenvolvimento e teste do algoritmo de detecção.

O primeiro teste foi realizado no Alimentador 1503 da subestação South Nacogdoches da TXU Electric Delivery. Esta é uma subestação de 138 kV/12,5 kV. Simulamos as HIFs em dois pontos diferentes do alimentador. Um ponto estava localizado a aproximadamente 2 milhas da subestação e o outro a 12,7 milhas da subestação. As superfícies do solo usadas em ambos os testes incluíam blocos de concreto, terra coberta com grama, cascalhos secos e molhados, areia seca e molhada, asfalto, galhos de árvore e um pneu de carro. No final dos testes, nós também energizamos e desenergizamos dois bancos de capacitores do alimentador e aumentamos e reduzimos o tap de um comutador de cargas em derivação do transformador para registrar eventos de chaveamentos normais do sistema.

A Figura 12(a) e a Figura 12(b) mostram as correntes de uma falta à terra na TXU, no local do teste e na subestação, respectivamente. As escalas de tempo dos dois gráficos não estão sincronizadas. Simulamos a falta derrubando um condutor na terra úmida e coberta com grama. A corrente de pico da falta de aproximadamente 30 amperes aparece com bastante clareza na medição da subestação.

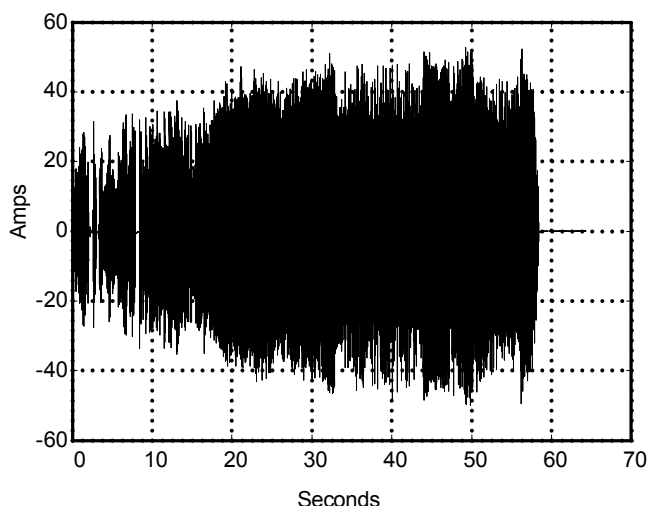


Figura 12(a). Corrente de falta à terra na TXU, no local do teste

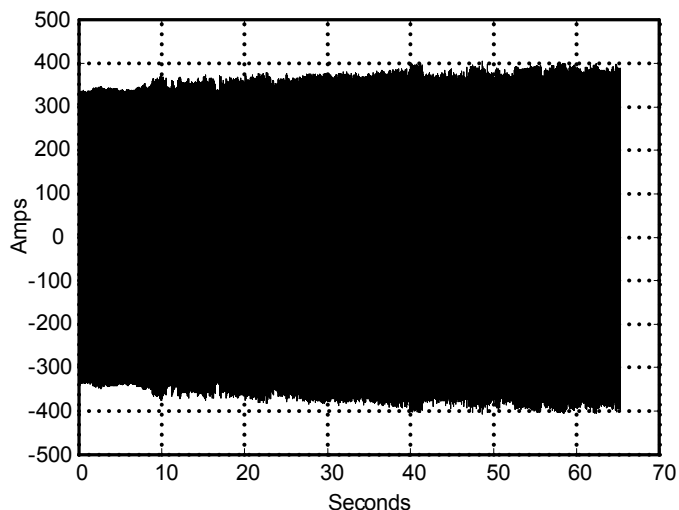


Figura 12(b). Corrente de falta à terra na TXU, na subestação

O segundo teste foi no Alimentador CDAL0017 da subestação Cloverdale de 138 kV/12,5 kV da Idaho Power Company (IPC). O local do teste fica aproximadamente a uma milha da subestação. As superfícies usadas no teste incluíam blocos de concreto, terra, mistura de cascalho e areia, asfalto seco e molhado, rodovia de cascalho seco e molhado, um pneu de carro e árvores de bordo e zimbro.

A Figura 13(a) e a Figura 13(b) mostram as correntes de uma falta à terra/cascalho na IPC, no local do teste e na subestação, respectivamente. Novamente, as escalas de tempo dos dois gráficos não estão sincronizadas. Simulamos a falta derrubando um condutor numa mistura de cascalho e areia de seis polegadas de espessura. É virtualmente impossível observar qualquer sinal dessa corrente de falta de aproximadamente três amperes na medição da subestação.

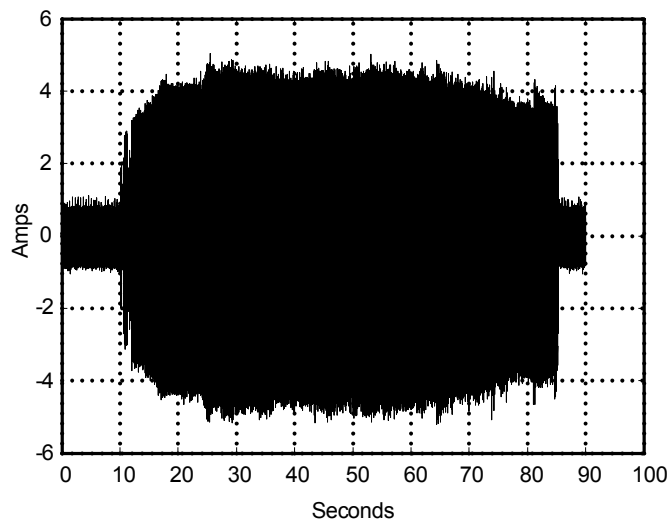


Figura 13(a). Corrente de falta à terra/cascalho na IPC, no local de teste

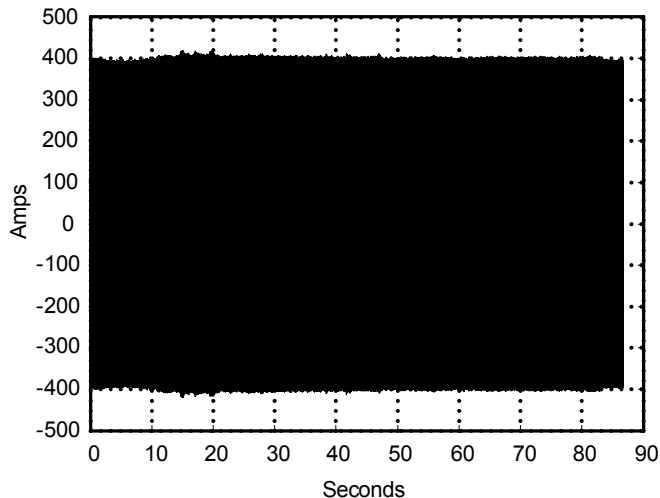


Figura 13(b). Corrente de falta à terra/cascalho na IPC, na subestação

Efetuamos os dois últimos testes no Alimentador 4040 da subestação Patzcuaro de 115 kV/13,8 kV da Comision Federal de Electricidad (CFE), no México central. O ponto do teste estava localizado numa área rural cultivada a aproximadamente oito milhas da subestação. Executamos o primeiro teste em junho de 2005, durante a estação de seca da região. A superfície do solo consistia de uma mistura de areia fina com alguns galhos secos. Iniciamos o teste derrubando um condutor revestido sobre a areia. Em seguida, retiramos em torno de um metro do revestimento do condutor, molhamos o solo e instalamos um eletrodo de aterramento de um metro. Não utilizamos fusível de proteção no local do teste. Executamos o segundo teste em setembro de 2005, durante a estação de chuvas da região, exatamente na mesma localização. Foi efetuada uma seqüência de testes similar, jogando o condutor revestido no chão, mantendo o condutor descoberto no solo e instalando até três eletrodos de aterramento. A corrente de falta obtida no segundo teste foi, em geral, diversas vezes maior do que a corrente registrada no primeiro teste.

A Figura 14(a) e a Figura 14(b) mostram as correntes do segundo teste com uma falta na CFE, no local de teste e na subestação, respectivamente. As escalas de tempo dos dois gráficos não estão sincronizadas. Simulamos a falta derrubando um condutor revestido e, em seguida, forçando a extremidade do condutor a tocar o eletrodo de aterramento. A corrente de falta é de aproximadamente 10 amperes. As medições da subestação mostram grandes variações na envoltória das correntes que não estão relacionadas à falta; essas variações existem também na fase boa.

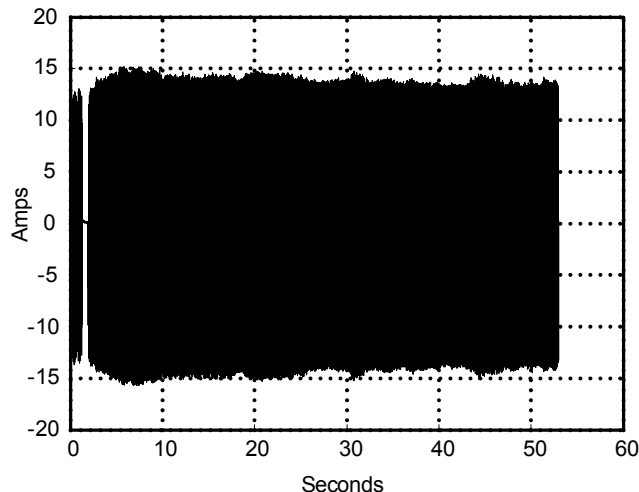


Figura 14(a). Corrente de uma falta à terra na CFE, no local do teste

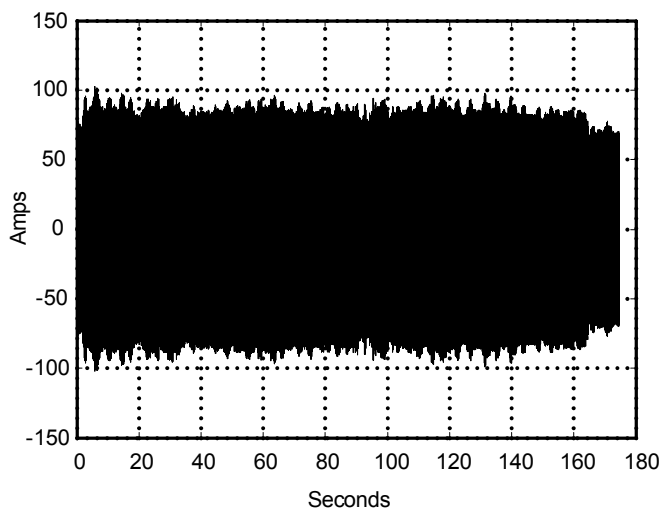


Figura 14(b). Corrente de uma falta à terra na CFE, na subestação

D. Resultados da Simulação do Algoritmo de Detecção

Usamos a linguagem de programação Matlab[®] num arranjo de interface gráfica com o usuário (GUI) para simular completamente o algoritmo de detecção descrito anteriormente. Podemos usar esse arranjo para efetuar o carregamento dos dados, especificações dos canais, alteração nos ajustes e seleção das grandezas a serem plotadas. Salvamos todos os dados de faltas coletados no formato COMTRADE com diferentes frequências de amostragem para verificações adicionais. Devido ao tamanho limitado dos dados de pré-falta, diversas funções do algoritmo de detecção de faltas precisaram de tratamentos especiais no ambiente das simulações. Essas funções incluíam a do Limitador do Valor Médio de IIR e da Sintonização Adaptativa. Usamos um procedimento de carregamento rápido para agilizar o processo de simulação no estado de pré-falta. Através do uso do formato COMTRADE, foi possível estender facilmente a porção da pré-falta de cada evento de falta.

A Figura 15 mostra os resultados da simulação de detecção para o evento da falta simulada na TXU, ilustrado na Figura

12 deste artigo. A porção analógica inferior do gráfico mostra a grandeza SDI para o evento. Essa porção do gráfico também mostra, através de uma linha tracejada, o valor limite sintonizado mais a saída do limitador do valor médio de IIR, ou $d + SDI_REF$. Sempre que SDI ultrapassar este limite, o algoritmo registra o tempo e calcula uma relação, os quais são salvos pela função de Tendências e Memórias para verificações posteriores. Pode ser observado que o valor de SDI aumenta após a aplicação da falta, aproximadamente no instante 8 segundos. Observe também que SDI apresenta diversos picos que são típicos nas HIFs. A porção superior do gráfico mostra quatro elementos digitais denominados, de baixo para cima, A-SDI, B-SDI, C-SDI e G-SDI. Eles representam as saídas de detecção de faltas para, respectivamente, canais das fases A, B, C e canal da corrente residual. Uma barra mais grossa no gráfico digital indica a detecção da falta com um “F” identificando o ponto de partida da detecção. Para este evento, pode ser visto que o algoritmo de detecção é capaz de detectar a falta na fase B corretamente. A atuação no canal da corrente residual também indica a detecção da falta.

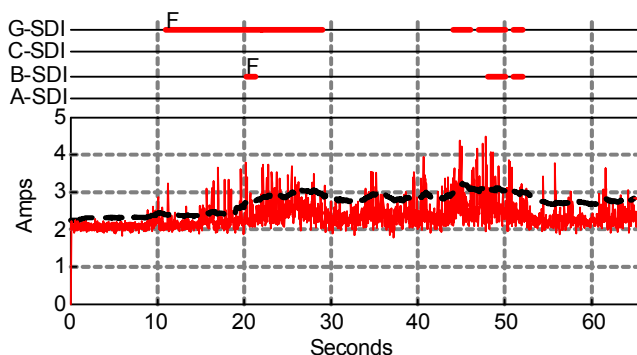


Figura 15. Resultados da simulação de detecção de faltas para uma falta à terra na TXU

A Figura 16 mostra os resultados da simulação de detecção para o evento da falta simulada na IPC, ilustrada na Figura 13 deste artigo. Conforme poderia ser esperado em função da baixa corrente de falta, a atividade com presença de arcos, refletida na grandeza SDI, é insuficiente para causar a atuação do elemento de detecção de faltas. É possível aumentar a sensibilidade dos ajustes para detectar este evento de falta, porém estabelecemos ajustes globais para manter elevada a segurança do algoritmo. Qualquer tentativa para tornar a detecção mais sensível vai sacrificar inadvertidamente a segurança.

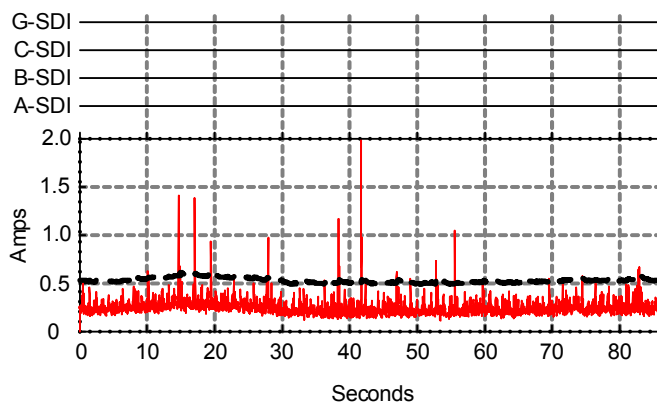


Figura 16. Resultados da simulação de detecção de faltas para uma falta à terra/cascalho na IPC

A Figura 17 mostra os resultados da simulação de detecção do evento na CFE, ilustrado na Figura 14 deste artigo. A forte atividade da SDI torna este evento fácil de ser detectado pelo algoritmo de detecção de HIFs.

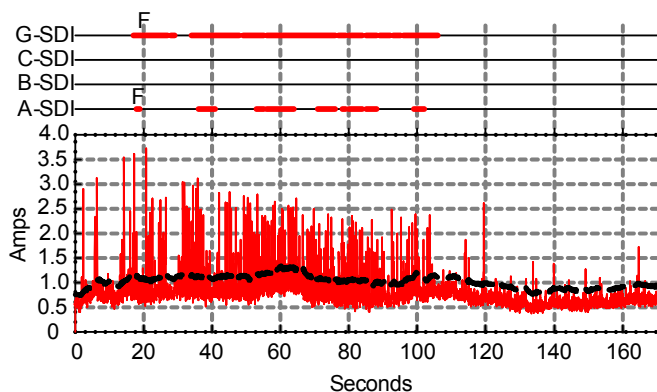


Figura 17. Resultados da simulação de detecção de faltas para os testes de uma falta à terra na CFE

E. Teste de Segurança com Cargas de Subestações com Ruídos

Conforme indicado nos estudos anteriores, é difícil criar um algoritmo de detecção de HIFs que seja totalmente imune aos alarmes falsos. Além disso, é um grande desafio testar o aspecto segurança de um algoritmo de detecção. A coleta de todas as condições de operação ou eventos previsíveis do sistema que possam causar problemas à segurança de um algoritmo de detecção leva tempo e é uma tarefa contínua.

Após testar o algoritmo com eventos de chaveamento do sistema incluindo dispositivos como capacitores e comutadores de cargas em derivação, identificamos alimentadores com cargas com muito ruído; coletamos as tensões e correntes dessas cargas por um período de até 24 horas para efetuar testes adicionais em relação à segurança do algoritmo de detecção. As cargas coletadas incluíam as de um fabricante de queijos, bombas de motores, uma fundição, britadeiras e um sistema de transporte ferroviário metropolitano.

A Figura 18 mostra a carga do fabricante de queijos durante um período de cinco minutos. O gráfico superior representa

a corrente da fase A. O gráfico inferior contém a distorção harmônica total no traço superior e a grandeza SDI no traço inferior. A distorção harmônica total e a SDI estão representadas em valor porcentual da componente da frequência fundamental. A carga consiste principalmente de dispositivos de acionamento de motores. A distorção harmônica total é cerca de 28%, cuja maior parte é de quinto harmônico (26%) e terceiro harmônico (8%). É uma carga com bastante ruído em termos de conteúdo de harmônicos. Entretanto, a carga é “sem ruídos” no sentido de que ela não gera e não altera a grandeza SDI que é usada pelo algoritmo de detecção.

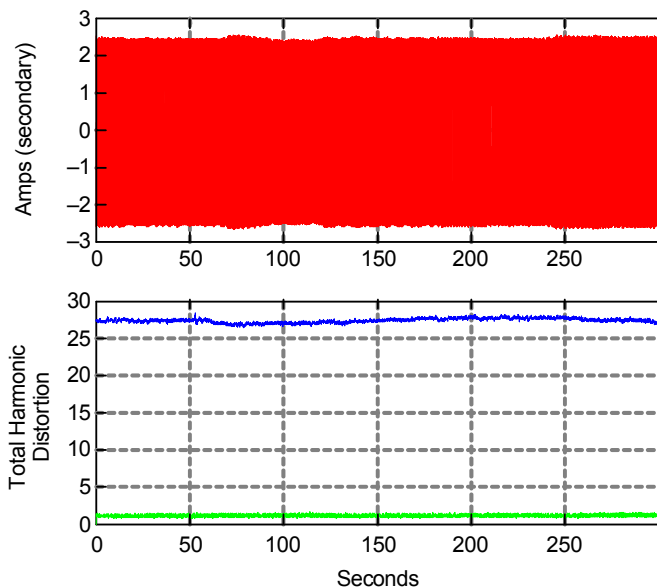


Figura 18. Carga do fabricante de queijos, período de cinco minutos, fase A (secundário)

A Figura 19 mostra no seu gráfico superior a corrente da fase A da carga do sistema de transporte ferroviário metropolitano. O gráfico inferior mostra a distorção harmônica total (traço superior) e a grandeza SDI (traço inferior). Embora a distorção harmônica total porcentual dessa carga não seja grande, a carga da ferrovia apresenta ruídos, causando grandes variações no valor RMS, conteúdos de harmônicos e na grandeza SDI das correntes. A carga não apresenta sempre tantos ruídos, conforme mostrado na Figura 19. No início da manhã, quando os trens não estão operando, a carga é tão “sem ruídos” quanto as cargas típicas comerciais e residenciais.

O algoritmo de detecção “aprende” esse ruído da carga através do uso da função de sintonia adaptativa e mantém sua segurança neste ambiente de cargas com muito ruído. As HIFs têm de apresentar sinais consistentes associados às assinaturas da falta antes que o algoritmo indique a detecção da falta. Considerando que as características da carga ultrapassam os limites das assinaturas de uma HIF, a segurança é garantida embora a confiabilidade da detecção de faltas seja comprometida.

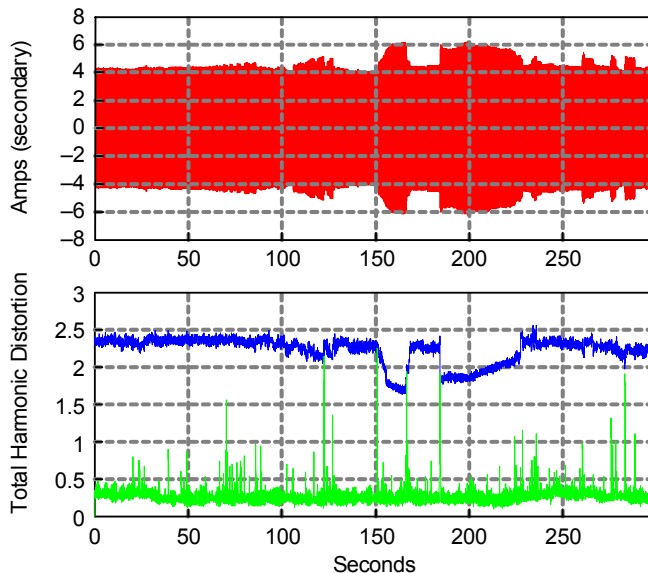


Figura 19. Carga do sistema de transporte ferroviário, período de cinco minutos, fase A (secundário)

A Figura 20 mostra os gráficos das mesmas grandezas apresentadas na Figura 18 e Figura 19 para a carga de uma britadeira, durante horas de trabalho. Enquanto a envoltória da corrente da fase A se parece com a de algumas HIFs, o seu conteúdo de harmônicos e a grandeza SDI apresentam poucas variações relacionadas às HIFs. Este tipo de carga não representa nenhum problema para a segurança da detecção e não compromete a confiabilidade das detecções de faltas.

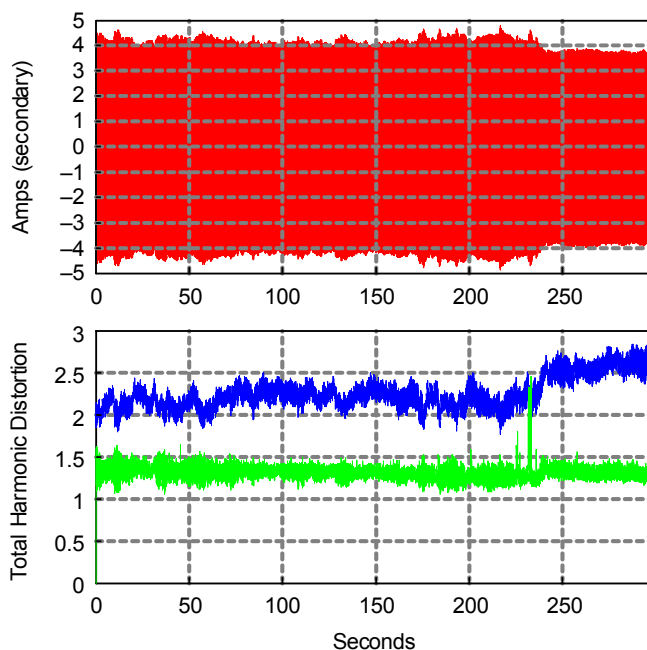


Figura 20. Carga da britadeira, período de cinco minutos, fase A (secundário)

IV. CONCLUSÕES

As HIFs resultantes de condutores caídos geram preocupações em relação à segurança pública. Dependendo das condições e materiais da superfície do solo, algumas HIFs geram pouca ou nenhuma corrente de falta. Portanto, é impossível desenvolver um dispositivo baseado na subestação para detecção de todas as condições de condutores caídos e HIFs.

No entanto, é possível detectar diversas HIFs através do uso de alguns sinais indicativos (“assinaturas”) de HIFs contidos nos sinais de grandezas que não sejam as componentes da frequência fundamental ou valor RMS das correntes.

Neste artigo, introduzimos um algoritmo de detecção de HIFs que é simples de ser compreendido e econômico para ser implementado. O algoritmo usa uma grandeza SDI que exhibe as assinaturas das HIFs ao mesmo tempo em que permanece livre de ser afetada pelas cargas da distribuição. Através do uso de um processo de sintonização adaptativa, o algoritmo pode “aprender” o perfil de ruídos do ambiente dos alimentadores da distribuição e, então, aumentar a segurança das detecções das faltas. Um circuito recente com função de Limitador do Valor Médio de IIR fornece uma referência estável para SDI durante condições de faltas e chaveamentos. A lógica de detecção usa as grandezas de restrição e operação e considera ambas as características temporal e de amplitude de uma HIF.

Os testes do algoritmo de detecção usaram dados reais de HIFs, os quais incluíram grandes regiões geográficas, inúmeras condições climáticas e diversos tipos previsíveis de superfícies do solo. O algoritmo comprovou ter capacidade superior à dos tradicionais relés de sobrecorrente para detecção de porções elevadas de HIFs.

Os dados reais também confirmaram a segurança do algoritmo. Esses dados foram obtidos de testes que incluíram condições de chaveamentos no sistema e cargas de alimentadores com ruídos durante períodos de até 24 horas, tais como britadeiras, fundições, sistemas de transporte ferroviário, bombas de motores e centros de motores.

Se um alimentador da distribuição tiver cargas com muito ruído que ultrapassem os limites dos sinais indicativos das HIFs, a função de sintonia adaptativa do algoritmo de detecção efetua automaticamente a sintonização para melhorar a segurança. Na clássica troca entre segurança e confiabilidade, tais situações provocam um impacto não intencional na confiabilidade da detecção de faltas.

V. RECONHECIMENTO

Agradecemos à TXU Electric Delivery, Idaho Power Corporation e Comision Federal de Electricidad por seu suporte nesta pesquisa. Também somos gratos ao Raymond F. Hoad, Dave Angell, Nabucodonosor Solis Ramos e Alberto Avalos por seu entusiasmo e dedicação na preparação dos testes com simulação de HIFs e estudos de soluções para detecção de HIFs.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] D. Hou and N. Fischer, “Deterministic High-Impedance Fault Detection and Phase Selection on Ungrounded Distribution Systems,” in *2005 32nd Annual Western Protective Relay Conference Proceedings*.
- [2] IEEE Power Engineering Society, *Downed Power Lines: Why They Can't Always Be Detected*, New York: IEEE, 1989.
- [3] PP&L, “Report of Distribution Conductor Staged Fault Tests,” Oct. 1973.
- [4] J. Carr, G. L. Hood, “High Impedance Fault Detection on Primary Distribution Systems,” CEA Final Report, Project No. 78-75, Nov. 1979.
- [5] I. Lee, “High Impedance Fault Detection Using Third Harmonic Current,” EPRI Final Report, EPRI EL-2430, June 1982.
- [6] S. J. Balsler, K. A. Clements, E. Kallaur, “Detection of High Impedance Faults,” EPRI Final Report, EPRI EL-2413, June 1982.
- [7] B. D. Russell, B. M. Aucoin, T. J. Talley, “Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders,” EPRI Final Report, EPRI EL-2757, Dec. 1982.
- [8] S. J. Balsler, K. A. Clements, D. J. Lawrence, “A Microprocessor-Based Technique for Detection of High Impedance Faults,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, pp. 252–258, July 1986.
- [9] C. J. Kim, B. D. Russell, “Classification of Faults and Switching Events by Inductive Reasoning and Expert System Methodology,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, pp. 1631–1637, July 1989.
- [10] S. Ebron, D. L. Lubkeman, M. White, “A Neural Network Approach to The Detection of Incipient Faults on Power Distribution Feeders,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 2, pp. 905–914, April 1990.
- [11] A. P. Apostolov, J. Bronfeld, C. H. M. Saylor, P. B. Snow, “An Artificial Neural Network Approach to the Detection of High Impedance Faults,” in *1993 International Conference on Expert System Applications for the Electrical Power Industry Proceedings*.
- [12] D. I. Jeerings, J. R. Linders, “A Practical Protective Relay For Down-Conductor Faults,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 2, pp. 565–574, April 1991.
- [13] J. Liang, S. Elangovan, J. B. X. Devotta, “A Wavelet Multiresolution Analysis Approach to Fault Detection and Classification in Transmission Lines,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 20, Issue 5, pp. 327–332, June 1998.
- [14] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, “Wavelet Transformation Based Algorithm for the Detection of Stochastic High Impedance Faults,” in *Proc. International Conference on Power System Transients (IPST 2003)*, New Orleans, LA, September 2003.
- [15] Y. Sheng and S. M. Rovnyak, “Decision Tree-Based Methodology For High Impedance Fault Detection,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 2, pp. 533–536, April 2004.
- [16] F. G. Jota and P. R. S. Jota, “High-Impedance Fault Identification Using a Fuzzy Reasoning System,” *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, Issue 6, pp. 656–661, Nov. 1998.
- [17] *Detection of Downed Conductors on Utility Distribution Systems*, IEEE PES Tutorial Course, 90EH0310-3-PWR, Piscataway, NJ: IEEE, 1989.
- [18] “The Interruption of Downed Conductors on Low Voltage Distribution Systems,” Report prepared by the IEEE Power System Relaying Committee for the Electric Power Research Institute, Oct. 1976.
- [19] J. T. Tengdin, E. E. Baker, J. J. Burke, B. D. Russell, R. H. Jones, and T. E. Wiedman, “Application of High Impedance Fault Detectors: a Summary of the Panel Session Held at the 1995 IEEE PES Summer Meeting” in *Proc. Transmission and Distribution Conference*, Los Angeles, CA, Sept. 1996.
- [20] “High Impedance Fault Detection Technology,” Report of IEEE PSRC Working Group D15, March 1996. [Online] Available: <http://grouper.ieee.org/groups/td/dist/documents/highz.pdf>.
- [21] H. J. Songster, “High Impedance Fault Detection,” in *1980 7th Annual Western Protective Relay Conference Proceedings*.
- [22] J. J. Zuercher and C. J. Tennes, “Arc Detection Using Current Variation,” U.S. Patent 5,452,223, Sept. 19, 1995.



- [23] J. B. Roberts and D. Hou, "Adaptive Polarizing Memory Voltage Time Constant," U.S. Patent 5,790,418, Aug. 4, 1998.
- [24] S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang, and T. H. Kim, "A Modeling Method of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-Varying Resistances in EMTP," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1175–1180, July 2001.
- [25] D. I. Jeerings, J. R. Linders, "Ground Resistance – Revisited," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 2, pp. 949–956, April 1989.

VII. BIOGRAFIA

Daqing Hou recebeu seu B.S. e M.S. em Engenharia Elétrica da *Northeast University*, China, em 1981 e 1984, respectivamente. Recebeu seu Ph.D. em Engenharia Elétrica e Computacional da *Washington State University* em 1991. Desde 1990, ele trabalha na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington, USA, onde ocupou diversas posições, incluindo engenheiro de desenvolvimento, engenheiro de aplicação e gerente de R&D. Atualmente, ele é um engenheiro de pesquisas avançadas. Seu trabalho inclui modelagem de sistemas, simulação e processamento de sinais para sistemas de potência e relés de proteção digitais. Suas pesquisas incluem sistemas lineares multivariáveis, identificação de sistemas e processamento de sinais. Ele detém diversas patentes e é autor e co-autor de diversos artigos técnicos. É Membro Sênior do IEEE.

Copyright © 2006
(Todos os direitos reservados)
20060914
TP6248-01