

Proteção Diferencial de Barramentos Baseada na Potência Instantânea

Francis A. Moreno Vásquez* Kleber Melo e Silva**

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília
(UnB) (francisarody@unb.br).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília
(UnB) (klebermelo@unb.br)*

Abstract: This paper presents a differential bus protection algorithm based on the instantaneous power concept. This signal is used to determine the operation and restriction signals in a formulation based on the logic 1-of-1 and 2-of-2, commonly used by commercial relays. The proposed function also includes a harmonic reinforcement on its restraint signal for external faults. The evaluation of the algorithm is done by using a double-bus single-breaker substation (230 kV), modeled in the Alternative Transients Program (ATP). The results show that the decision time of the proposed method can be half of the conventional technique, based on currents, in vast majority of cases, even for different fault instants, fault resistances and fault types. Also, it can be verified that the algorithm offers reliability to act correctly in front of evolving faults. In practice, the speed of decision of the proposed technique allows to reduce eventual damages, caused by the propagation of short circuits, and it represents a greater safety margin for the current transformers when saturated and it meets the requirements of commercial relays in order to guarantee correct actuations.

Resumo: Este artigo apresenta um algoritmo de proteção diferencial de barramentos baseado no conceito da potência instantânea. Esta grandeza é utilizada para determinar os sinais de operação e restrição em uma formulação baseada nas lógicas 1-de-1 e 2-de-2, comumente utilizadas em relés comerciais. Ainda, esta técnica contempla um reforço harmônico no seu sinal de restrição para faltas externas. A avaliação do algoritmo proposto é feita utilizando uma subestação de barra dupla com disjuntor simples (230 kV), modelado no Alternative Transients Program (ATP). Os resultados obtidos mostram que o tempo de decisão do método proposto pode ser na grande maioria dos casos a metade da função tradicional, baseada em correntes, considerando inclusive diferentes instante de falta, resistências de falta e tipos de falta. Também, pode ser constatado que o algoritmo oferece confiabilidade para atuar corretamente diante de faltas evolutivas. Na prática, a rapidez de decisão da técnica apresentada permite reduzir eventuais danos por propagação de curtos-circuitos, representa uma maior margem de segurança para os transformadores de corrente quando saturados e se encaixa com os requerimentos de relés comerciais para garantir atuações corretas.

Keywords: Busbars; differential protection; instantaneous power; harmonic restraint; ATP.

Palavras-chave: Barramentos; proteção diferencial; potência instantânea, restrição harmônica; ATP.

1. INTRODUÇÃO

A grande preocupação para o Sistema Interligado Nacional não é apenas atender a crescente demanda elétrica, mas também garantir ao máximo a continuidade de serviço. Esta é a principal motivação para os sistemas de proteção atuarem com rapidez, segurança e seletividade. Nesse contexto, os barramentos de um sistema de potência são os elementos mais críticos de qualquer sistema de potência por interligarem diferentes subsistemas, o que significa que uma falta dentro da sua zona de proteção causaria o desligamento de todos eles.

Nesse sentido, o ONS (2017) estabelece que um sistema de proteção de barramentos deve ser sensível diante de faltas internas e garantir segurança para evitar atuações indevidas diante de faltas externas que eventualmente ocasionem a saturação do transformador de corrente (TC). Para isso, o esquema deve possuir um elemento diferencial de baixa ou de alta impedância, ou um elemento direcional (IEEE, 2009). Ainda, devido a necessidade de flexibilização das configurações de barramentos para reduzir os impactos de uma falta (ONS, 2015), é necessário incluir uma lógica de zonas de proteção capaz de reconhecer adequadamente os circuitos que devem ou não ser desligados.

Os elementos diferenciais de baixa impedância têm grande importância por permitirem a implementação de algoritmos de proteção capazes de acompanhar eventuais varia-

* Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) durante o desenvolvimento desta pesquisa.

ções na topologia do barramento, assim como o uso de TCs com diferente relação de transformação. Estes algoritmos podem utilizar tanto valores instantâneos quanto os fasores estimados dentro de uma janela de tempo. De fato, diversos fabricantes utilizam a estimação fasorial das correntes (SIEMENS, 2017; TOSHIBA, 2017), enquanto outros utilizam seus valores instantâneos (ABB, 2017; ZIV, 2019). Ainda, tais fabricantes utilizam diretamente as amostras apenas para bloquear a atuação do elemento diferencial diante de faltas externas.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma nova função de proteção diferencial de barramentos baseada em valores instantâneos. O algoritmo proposto utiliza o conceito de potência instantânea, ainda não utilizado comercialmente, e busca reduzir pela metade o tempo de decisão dos relés que tradicionalmente usam apenas sinais de corrente. Também, a técnica utiliza as lógicas de *trip*, 1-de-1 e 2-de-2, amplamente utilizadas por fabricantes para a proteção de barramentos. Adicionalmente, o método utiliza um reforço harmônico adaptativo no sinal de restrição que garante maior segurança diante de faltas externas severas.

2. FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS BASEADA EM CORRENTES

Tradicionalmente, um elemento de proteção diferencial utiliza as correntes medidas pelos TCs para determinar, por fase, uma corrente de operação e uma corrente de restrição, as quais podem ser calculadas, respectivamente, por:

$$i_{\varphi,op}^z[k] = \left| \sum_{r=1}^R f_r^z i_{\varphi,r}^b[k] \right|, \quad (1)$$

$$i_{\varphi,res}^z[k] = \sum_{r=1}^R |f_r^z i_{\varphi,r}^b[k]|. \quad (2)$$

Estas correntes passam pelos circuitos, r , conectados em determinado barramento, b , sendo um cálculo diferente para cada fase, φ . Todavia, a correta inclusão das correntes no cálculo desses sinais depende do estado de um flag, f_r^z , que determina a zona, z , a qual cada vão pertence a partir dos estados das chaves seletoras e dos disjuntores (Ferrer and Schweitzer, 2010). Adicionalmente, o sinal de restrição passa por um processo de suavização e é multiplicado por um fator denominado *slope*, SLP (Ziegler, 2012).

A lógica 1-de-1 verifica se os sinais de operação e restrição suavizada incrementam rapidamente a partir de um mesmo instante, e se a amplitude de corrente de operação é maior que o sinal de restrição. Se esta condição é mantida durante 1/4 de ciclo, esta lógica de proteção reconhece a falta como interna, como mostrado na Fig. 1. Dessa forma, um sinal de *trip* é enviado para os disjuntores dos circuitos conectados no barramento onde aconteceu o evento. Por outro lado, a lógica 2-de-2 enviaria tal sinal de atuação caso duas condições forem satisfeitas; a primeira é o cumprimento da condição que satisfaz a lógica 1-de-1 em dois semiciclos consecutivos e que os inícios ou picos dos lóbulos de operação sejam separados por menos de médio ciclo. Este raciocínio é decorrente de uma eventual operação errada por parte do relé devido a faltas externas com saturação de TC, uma vez que este fenômeno geralmente acontece 1/4 de ciclo após o início da falta, e os intervalos onde a

saturação em cada semiciclo surge estariam separados por um intervalo maior a meio ciclo.

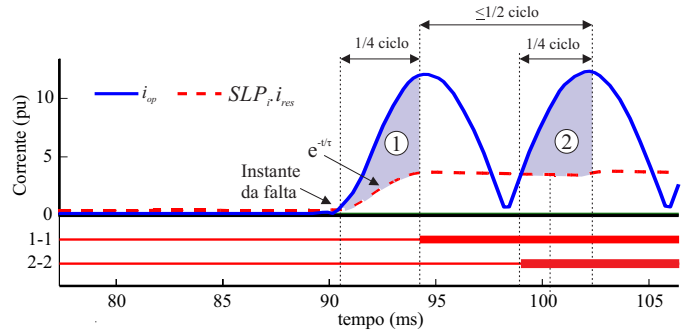


Fig. 1. i_{op} e i_{res} diante de uma falta interna.

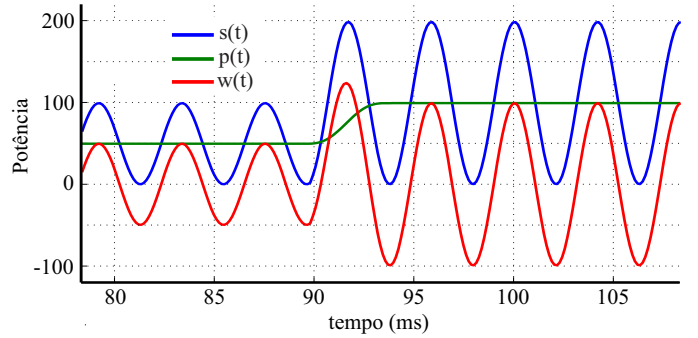


Fig. 2. Potência instantânea com valor médio, $p(t)$ diferente de zero.

3. ALGORITMO PROPOSTO

A potência instantânea, $s(t)$, de um circuito predominantemente indutivo, calculada a partir dos sinais de tensão, $v(t)$, e de corrente, $i(t)$, é um sinal composto por um valor médio, $p(t)$, diferente de zero e uma componente sinusoidal que oscila com duas vezes a frequência de $v(t)$ e $i(t)$ (Akagi et al., 2017), como ilustrado na Figura 2. Cada um dos circuitos conectados tem seu próprio sinal de potência por fase que será utilizado para o cálculo das quantidades de operação e restrição, de forma similar às Equações 1 e 2.

Inicialmente as correntes e tensões passam por um processo de amostragem com uma taxa de 64 amostras/ciclo. Estes sinais são normalizados para eliminar o problema de TCs instalados nos vãos e transformadores de potencial (TP) nos barramentos, com relação de transformação diferente, como descreve Altuve and Schweitzer (2010).

A seguir, a corrente deve passar por um filtro capaz de idealmente remover a componente de decaimento exponencial. Isto é importante para eliminar sinais de potência oscilatórios logo após o instante da falta, o que prejudicaria a segurança do relé. Nesse sentido, o filtro mímico proposto por Benmouyal (1995) foi escolhido devido aos resultados aceitáveis que ele ofereceu.

Em paralelo, o algoritmo proposto também requer que os sinais de tensão sejam mantidos no valor de pré-falta a partir do instante da falta, uma vez que seu valor tende a diminuir subitamente nesse cenário. Com essa finalidade, utiliza-se a memória de tensão desenvolvida por Silva and Almeida (2015) que consiste em um filtro digital de

resposta ao impulso infinito com uma determinada taxa de decaimento e posteriormente o sinal de tensão memorizada é reconstruído no tempo com a frequência fundamental.

As correntes e tensões de saída de ambos os filtros são utilizadas para obter a potência instantânea, $s_{\varphi,r}^b[k]$, em cada amostra k , de acordo com a expressão:

$$s_{\varphi,r}^b[k] = v_{\varphi,mem}^b[k] \cdot i_{\varphi,r}^{mimic}[k], \quad (3)$$

onde $v_{\varphi,mem}^b[k]$ é a saída do filtro de tensão e $i_{\varphi,r}^{mimic}[k]$ é a corrente de saída do filtro mímico. Todavia, a presença de um valor médio diferente de zero na potência obtida levaria a ter potências diferenciais com amplitudes alternadas, reduzindo drasticamente a confiabilidade da função de proteção. Nesse sentido, é vital que o elemento diferencial use sinais de restrição e operação a partir de um sinal alternado com valor médio zero, $w_{\varphi,r}^b$. Para isso, extrai-se o valor médio, avr , da potência instantânea em uma janela de tempo, J , que é a metade da janela de um período com frequência fundamental, de acordo com a seguinte expressão:

$$w_{\varphi,r}^b[k] = s_{\varphi,r}^b[k] - avr[s_{\varphi,r}^b(J)]. \quad (4)$$

Vale a pena ainda ressaltar, que esta estimação representa um pequeno atraso para o algoritmo. Finalmente, as potências de operação e restrição são calculadas, considerando as lógicas de zonas de proteção, respectivamente, como:

$$w_{\varphi,op}^z[k] = \left| \sum_{r=1}^R f_r^z w_{\varphi,r}^b[k] \right|, \quad (5)$$

$$w_{\varphi,res}^z[k] = \sum_{r=1}^R |f_r^z w_{\varphi,r}^b[k]|. \quad (6)$$

Adicionalmente, o sinal de restrição passa por uma suavização para dar maior estabilidade ao algoritmo, como descrito por Kumar and Hansen (1993), fazendo:

$$\bar{w}_{\varphi,res}^z[k] = w_{\varphi,res}^z[k] - \frac{w_{\varphi,res}^z[k] - w_{\varphi,res}^z[k_0]}{\tau_{res}}, \quad (7)$$

onde τ_{res} é a constante de tempo do sinal de restrição, k é a amostra atual e k_0 é o instante em que o sinal de restrição original passa de um valor máximo para um valor menor.

Finalmente, $w_{\varphi,op}^z$ e $\bar{w}_{\varphi,res}^z$ são utilizados dentro da lógica de *trip*, que inicia a sua operação com a detecção de distúrbio, caracterizado por uma variação súbita no sinal de restrição, estimada a partir de:

$$d\bar{w}_{\varphi,res}^z[k] = \left| \frac{\bar{w}_{\varphi,res}^z[k] - \bar{w}_{\varphi,res}^z[k-1]}{\Delta t} \right|. \quad (8)$$

Caso o distúrbio for reconhecido, deve-se conferir que

$$w_{\varphi,op}^z > w_{min} \text{ e } w_{\varphi,op}^z > SLP_p \cdot \bar{w}_{\varphi,res}^z. \quad (9)$$

sendo w_{min} um valor mínimo que elimina a possibilidade de atuação indevida devido a apenas erros de transformação dos TCs ou TPs, ou seja:

$$w_{\varphi,op}^z > w_{min} \text{ e } w_{\varphi,op}^z > SLP_p \cdot \bar{w}_{\varphi,res}^z. \quad (10)$$

Quando estas condições são satisfeitas durante no mínimo 1/8 ciclo, pode-se dizer a princípio que existe um curto-circuito dentro da zona de proteção do barramento, como ilustra a Fig. 3. Contudo, o comando de *trip* com a lógica-1-de-1 é de fato enviado caso o *flag* de falta externa

não tenha sido antes ativado. Isto porque o algoritmo bloqueia a operação do relé durante 150 ms em caso de reconhecimento de faltas externas. Neste caso, o distúrbio é detectado mas sem crescimento súbito do sinal de operação, o que acontece em um cenário de saturação de TC, decorrente de uma falta externa severa. Se estas condições são permanentes durante no mínimo 1/8 ciclo, a falta externa é de fato detectada. Nesse caso, o sinal de restrição recebe um reforço harmônico adicional, que é uma potência instantânea harmônica calculada a partir das componentes de segunda ordem dos sinais de tensão e corrente.

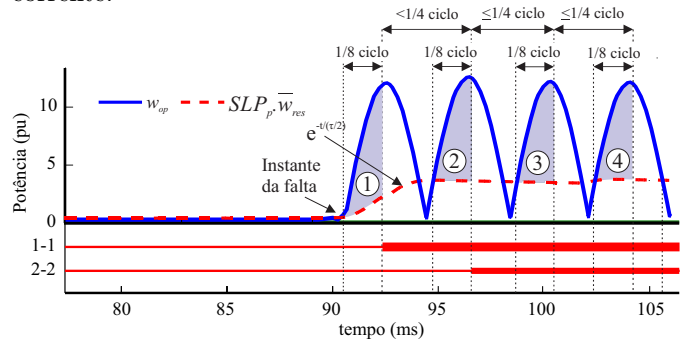


Fig. 3. Sinais de operação e restrição utilizando a potência instantânea.

Para isso, a corrente de segunda harmônica é inicialmente estimada a partir do algoritmo de estimação fasorial filtro coseno (Hart et al., 2000) e depois reconstruída no tempo, mas com a mesma frequência fundamental, como expressado na Equação 11:

$$i_{2h}[k] = I_{2h}[k] \cos(k\delta + \theta_{2h}[k]), \quad (11)$$

sendo θ_{2h} o ângulo proveniente da estimação fasorial e $\delta = 2\pi/N$, a frequência angular digital. Assim, este sinal é multiplicado pela tensão que também é reconstruída no tempo com a frequência fundamental, de forma a ter um novo sinal que oscila com duas vezes a frequência fundamental. A extração do valor médio também é aplicada a este sinal, tendo no final, a potência instantânea de segunda ordem sobreposta à potência instantânea original. Ainda, o sinal de restrição harmônica também é suavizado com a metade da taxa de decaimento da função 87B e somado à potência de restrição original. Ou seja, o sinal resultante $w_{\varphi,res}^{z,h}$ descrito por:

$$w_{\varphi,res}^{z,h}[k] = w_{\varphi,res}^z[k] + \frac{K_{comp}}{SLP_p} w_{\varphi,res}^{z,2h}[k], \quad (12)$$

onde K_{comp} representa o fator multiplicador de $w_{\varphi,res}^{z,2h}$ e é estimado de forma a dar maior segurança para o algoritmo no caso de faltas externas, como ilustrado na Figura 4.

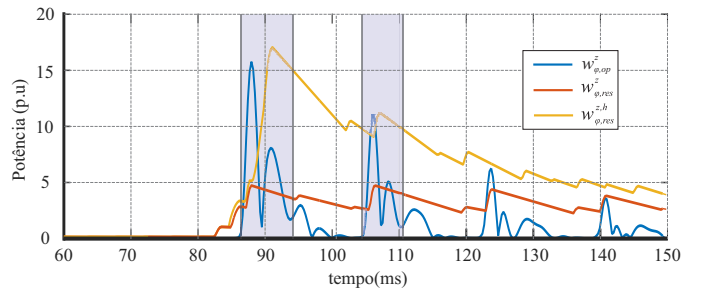


Fig. 4. Efeito do reforço harmônico no sinal da potência de restrição.

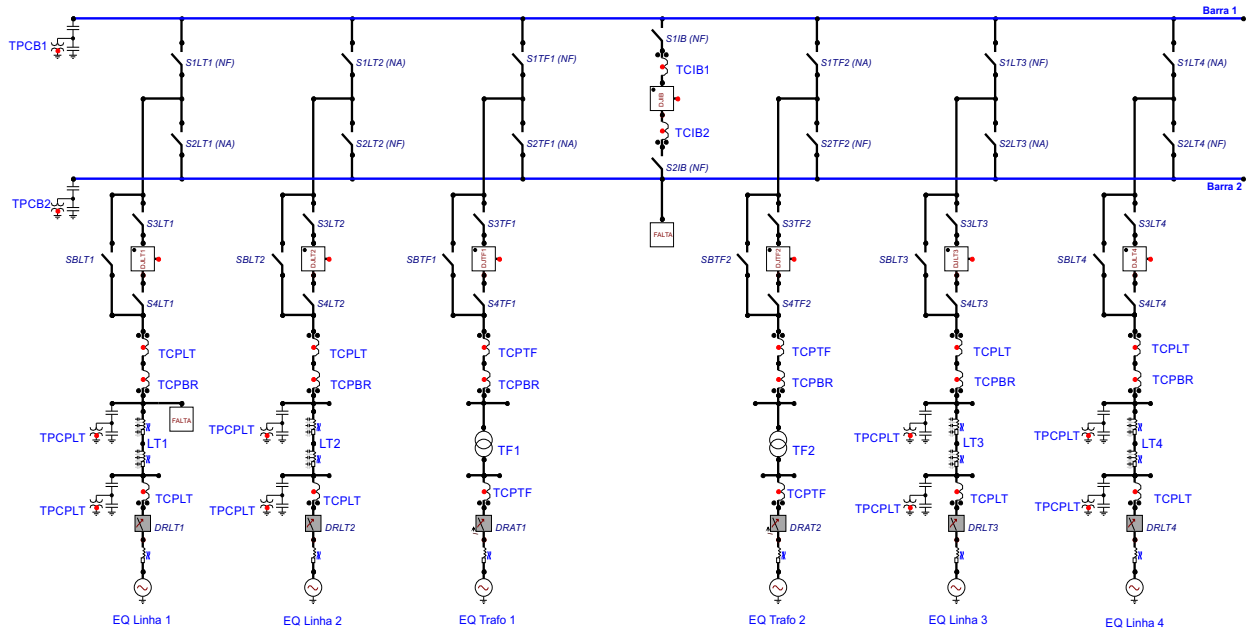


Fig. 5. Sistema de potência modelado no ATPdraw.

4. RESULTADOS

O sistema utilizado foi modelado no *Alternative Transients Program* (ATP) e consiste em uma subestação de barra dupla, com disjuntor simples a cinco chaves (230kV), sendo duas delas utilizadas para escolher a barra de conexão de cada vão, duas nos extremos de cada disjuntor e outra de *bypass*, como ilustrado na Figura 5. Nesse sistema, existem quatro linhas de transmissão (LT1, LT2, LT3 e LT4) e dois transformadores de potência (TF1 e TF2). Os barramentos são ligados com um disjuntor de amarre, de forma a transferir os vãos entre eles no caso de procedimentos de manutenção dos disjuntores. Os parâmetros deste sistema são detalhados por Vásquez et al. (2016). Nos resultados são visualizados os lóbulos de operação, que são a parte dos sinais de operação acima do sinal de restrição. Também, a ativação do detector de distúrbio, falta externa, lógica 1-de-1 e lógica 2-de-2 para a função proposta, 87BP, e a função tradicional, 87B, é reconhecida através dos *flags* FDD, EFD, 1-1 e 2-2, respectivamente.

4.1 Curto-circuito interno

Um curto-circuito entre a fase B e terra, BT, na Barra 2 foi aplicado em 80 ms. Pode ser observado na Figura 6 que o primeiro lóbulo de operação de potência foi muito pequeno para viabilizar a contagem mínima para reconhecer a falta como interna. Isso apenas acontece no segundo lóbulo, em 84,04 ms, que representa um tempo ainda menor do que o tempo necessário para a atuação da proteção tradicional de corrente, como indica o *flag* 1-1 87B.

4.2 Curto-circuito externo com saturação

Uma falta BT ocorre na linha de transmissão LT2, em 100 ms e ocasiona uma saturação severa no TC. A Figura 7 mostra que ambas as funções detectam a falta externa e que existem lóbulos de operação de potência e de corrente, que sempre ocorrem nos intervalos de saturação.

Contudo, os lóbulos de potência visualizados têm durações individuais muito reduzidas e o intervalo entre eles é muito maior que 1/4 ciclo para atuar pela lógica 2-de-2. Já a função 87B pode gerar algumas dúvidas em relação à segurança devido à amplitude e duração dos lóbulos de corrente, que cumprem a contagem de 1/4 de ciclo nos instantes 113,3 ms e 131 ms, o que poderia ocasionar a operação caso o intervalo entre tais lóbulos fosse menor que 1/2 ciclo.

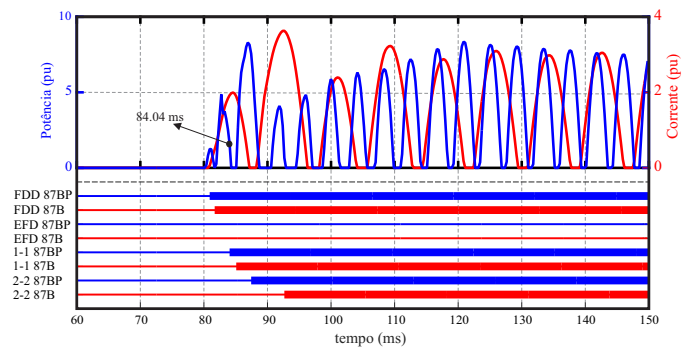


Fig. 6. Lóbulos e *flags* de operação diante de um curto-circuito interno monofásico BT.

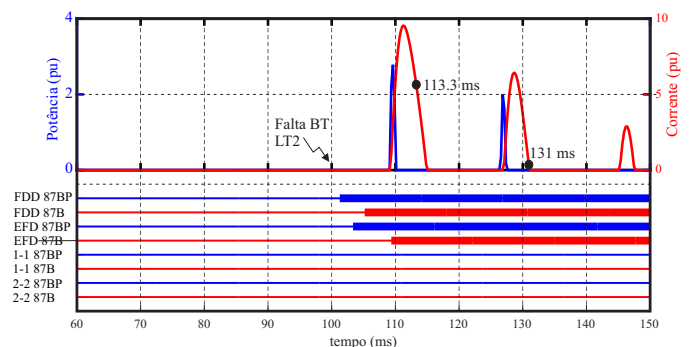


Fig. 7. Lóbulos e *flags* de operação das funções 87BP e 87B na fase B.

4.3 Curto-circuito evolutivo

Neste caso, a falta externa AT na linha LT1 acontece em 80 ms e evolui para uma falta interna bifásica, ABT, em 102 ms. As Figuras 8 e 9 mostram que a falta externa é reconhecida por ambas funções 87B e 87BP. Posteriormente, a lógica 2-de-2 da função 87BP atua mais rápido que a função 87B, o que pode ser atribuído não só a ter um sinal que oscila com duas vezes a frequência fundamental, como ao fato de ter incluído um decaimento mais acentuado no sinal de restrição no caso de detecção de uma falta externa. Por outro lado, observa-se uma alternância de amplitudes de lóbulos de operação de corrente por parte da função 87B, causada pela não eliminação da componente de decaimento exponencial, ocasionando um atraso considerável na sua atuação, principalmente na fase B.

4.4 Impacto do instante de falta

Uma análise de sensibilidade paramétrica com variação apenas do ângulo de falta interna mostra que o algoritmo tradicional apresenta dois instantes onde o tempo de atuação pode atingir até 9,38 ms, os quais estão perto dos 90° e 270° em relação ao sinal de tensão, ou seja, quando a corrente passa aproximadamente pelo zero. Por sua vez, o algoritmo proposto apresenta quatro instantes onde seu valor passa pelo zero e, conseqüentemente, onde surgem os maiores atrasos, mas eles são sempre menores que os tempos de atuação da função 87B. Os seis casos de maior atraso mencionados são visualizados na Fig. 10.

4.5 Limite de resistência de falta

A Figura 11 mostra o tempo de atuação através da lógica 1-de-1 das funções 87 e 87BP diante de uma falta AT na Barra 1 no instante 100 ms com diferentes resistências de falta, na faixa de 1 até 400Ω , com passo de 1Ω . Percebe-se que a função proposta reconheceria um curto-circuito interno com resistências de falta de até 306Ω , enquanto que o limite da função 87B é de 193Ω . Contudo, quando o instante de falta muda para $97,66$ ms, existe uma redução da capacidade de resistência de falta do curto-circuito que a função 87BP pode reconhecer, como mostra a Figura 12, trazendo à tona a influência do instante de falta.

4.6 Análise de sensibilidade paramétrica

A avaliação geral da função 87B contempla a variação da resistência de falta fase-fase (R_F) e fase-terra (R_G), assim como do ângulo de incidência (θ) de falta e das fases envolvidas no curto-circuito, de acordo com a Tabela 1. Esta análise é feita para faltas internas e faltas evolutivas, sendo considerado que estas últimas começam a partir de uma falta interna AT com uma resistência para terra de 150Ω . O tempo médio de operação (μ) e o desvio padrão (σ) da função proposta, 87BP, e da função tradicional são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros da análise em massa.

Parâmetro	Valor
R_G	0, 25, 50, 75 e 100Ω
R_F	0, 5, 10, 15 e 20Ω
θ	$0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots, 150^\circ$ e 180°
Tipo de falta	AG, BG, CG, AB, BC, CA, ABG, BCG, CAG e ABC

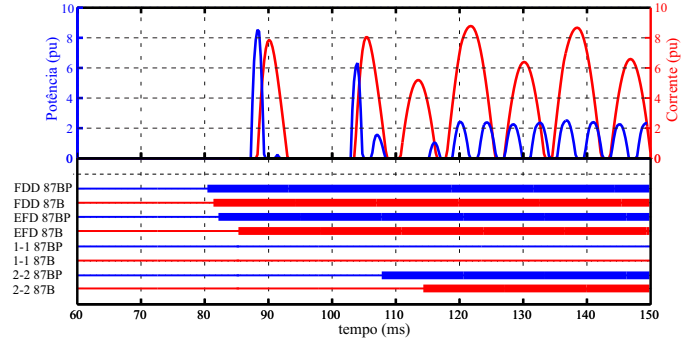


Fig. 8. ω_{op}^* e i_{op}^* na fase A no caso 4.3.

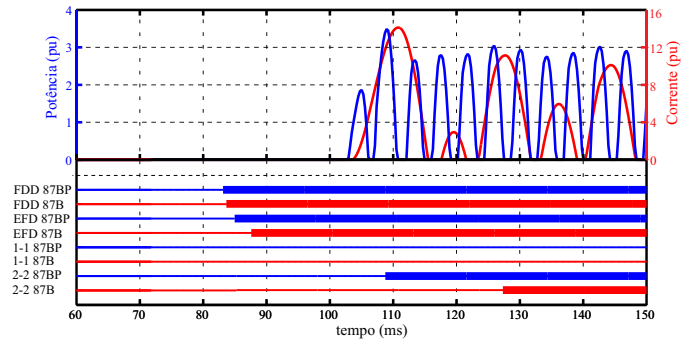


Fig. 9. ω_{op}^* and i_{op}^* na fase B no caso 4.3.

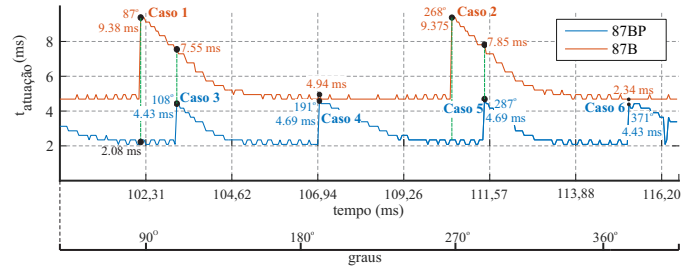


Fig. 10. Impacto do instante de falta no algoritmo proposto.

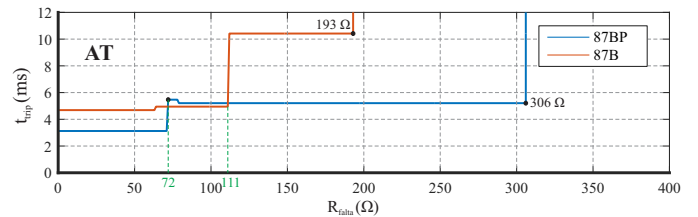


Fig. 11. Limite de resistência de falta para envio de *trip* diante de um curto-circuito AT em 100 ms.

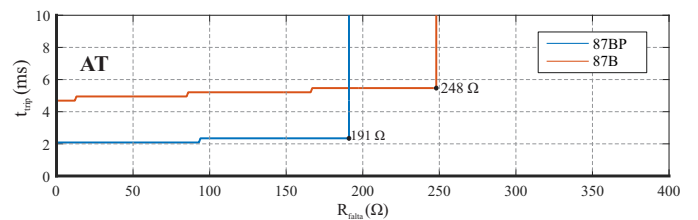


Fig. 12. Limite de resistência de falta para envio de *trip* diante de um curto-circuito AT em 97,66 ms.

Tabela 2: Estatísticas dos tempos de operação em milissegundos.

Medida	Faltas Internas	Faltas evolutivas
μ_{prop}	2,4804	3,1652
σ_{prop}	0,6878	2,9112
μ_{87B}	5,1855	6,9581
σ_{87B}	1,1721	5,9953

Os gráficos de dispersão, apresentados nas Figuras 13.a e 13.b, mostram que a função 87BP pode ser, em muitos casos, duas ou quatro vezes mais rápida que a função 87B, tanto para faltas internas como para as faltas evolutivas. Contudo, em alguns casos de faltas internas, a função 87BP apresenta um atraso na sua atuação em relação à função 87B. Isso acontece porque o filtro mímico, aplicado apenas na função 87BP, reduziu drasticamente a amplitude do primeiro lóbulo de operação, o que inviabiliza a sua atuação imediata. Nesses casos, a não inclusão desse filtro na função 87B ocasiona a criação de um primeiro lóbulo de operação grande o suficiente para enviar o sinal de *trip* pela lógica 1-de-1. No que diz respeito às faltas evolutivas, os casos em que a função 87BP atua mais devagar que a função 87B são pontualmente ocasionados pela inclusão do reforço harmônico no sinal de restrição, reduzindo os lóbulos de operação após a evolução da falta para dentro da zona de proteção. Apesar destas exceções, o método proposto ainda oferece, na grande maioria dos casos, menores tempos de decisão que a função tradicional. Vale a pena ressaltar que os casos em que esta tendência não é seguida não são consequência direta do princípio que governa o funcionamento do método proposto, mas dos parâmetros impostos e da técnica utilizada para a eliminação da componente de decaimento exponencial.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho utiliza o conceito da potência instantânea para a formulação de um algoritmo de proteção diferencial de barramentos utilizando as lógicas 1-de-1 e 2-de-2, comercialmente utilizadas. Os resultados mostram que o algoritmo proposto é capaz de fornecer tempos de operação duas ou mais vezes mais rápido que a proteção diferencial convencional. Também, uma lógica adaptativa de reforço harmônico no sinal de restrição foi construída para garantir a confiabilidade de faltas externas com presença de saturação de TCs. O tempo de decisão do algoritmo permite pensar em aliviar os critérios de dimensionamento do TC em vista da redução do tempo mínimo para o TC saturar e garante a correta operação mesmo diante de saturações de TC rápidas, o que torna factível a sua implementação em relés comerciais. Finalmente, os transformadores de potência presentes em subestações fornecem informação aos relés multifuncionais para reconhecimento de sobretensões ou de subtensão nas barras, o que poderia ser aproveitado pelo algoritmo de proteção proposto sem nenhum acréscimo econômico.

REFERÊNCIAS

ABB (2017). *REB670 Busbar Protection, Version 2.2 ANSI*.
 Akagi, H., Watanabe, E.H., and Aredes, M. (2017). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power*

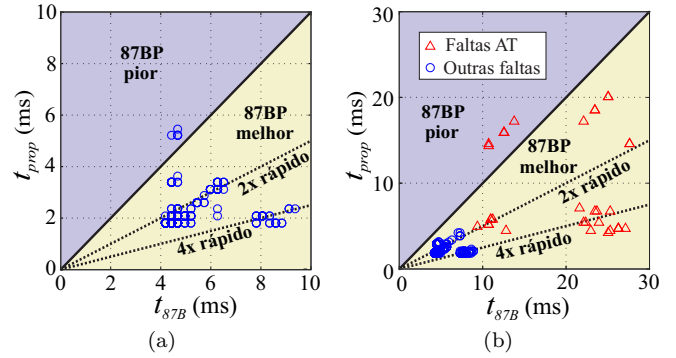


Fig. 13. Gráficos de dispersão dos tempos de operação do algoritmo proposto (t_{prop}) e da função 87B, (t_{87B}): (a) faltas internas; (b) faltas evolutivas.

Conditioning. 2nd Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, UE.

Altuve, H.J. and Schweitzer, E.O. (2010). *Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, USA.

Benmouyal, G. (1995). Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(2), 621–630. doi:10.1109/61.400869.

Ferrer, H.J.A. and Schweitzer, E.O. (2010). *Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Hart, D.G., Nosovel, D., and Smith, R.A. (2000). *Modified cosine filters*. November, U.S. Patent 6,154,687.

IEEE (2009). Guide for protective relay applications to power system buses. *IEEE Std C37.234-2009*, 1–115.

Kumar, A. and Hansen, P. (1993). Digital bus-zone protection. *Computer and Applications in Power, IEEE*, 6(4), 29–34.

ONS (2015). *Propostas para melhoria das instalações estratégicas do Sistema Interligado Nacional - Avaliação dos aspectos relacionados aos arranjos de barramentos. Anexo V: Consolidação de Obras de Transmissão 2015*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil.

ONS (2017). *Procedimentos de rede: Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil.

SIEMENS (2017). *Low-Impedance Busbar Protection SI-PROTEC 7SS85, Technical Data*.

Silva, K.M. and Almeida, M.L.S. (2015). Positive sequence voltage memory filter for numerical digital relaying applications. *Electronic Letters*, 51(21), 1697–1699.

TOSHIBA (2017). *Instruction Manual GRB100 Busbar Protection Relay, Version 3.5*.

Vásquez, F.A.M., Escudero, A.P., Bairy, R.G., and e Silva, K.M. (2016). Fundamentals of instantaneous-values-based busbar differential protection. In *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE*.

Ziegler, G. (2012). *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. Siemens, Berlin, Germany, 2 edition.

ZIV (2019). *DBN Bus Differential Protection, Instructions Manual for DBN Models*.