

Influência da Componente CC de Decaimento Exponencial Sobre o Desempenho de Elementos Direcionais Aplicados no Domínio do Tempo

João Paulo G. Ribeiro, Felipe V. Lopes e Eduardo J. Leite Jr.

Resumo—As proteções tradicionais baseadas em componentes fundamentais possuem um atraso intrínseco no tempo de atuação devido ao janelamento de dados requerido pelo processo de estimação fasorial. Neste contexto, o uso de funções no domínio do tempo tem se destacado como uma possível solução para aumentar a velocidade de atuação dos relés. Neste trabalho, elementos direcionais baseados em grandezas incrementais no domínio do tempo são avaliados do ponto de vista da confiabilidade e do tempo de atuação perante a influência da componente CC de decaimento exponencial, incluindo uma investigação sobre os efeitos do uso do filtro mímico digital. Para tanto, diversos cenários de faltas em uma linha de 230 kV/60 Hz de 200 km de comprimento são simulados usando o *Alternative Transients Program* (ATP). Dos resultados obtidos, percebe-se que, para a função de proteção aplicada no domínio do tempo em estudo, o uso do filtro mímico digital não é indicado.

Palavras-chaves—Componente CC de decaimento exponencial, domínio do tempo, filtro mímico, proteção direcional.

I. INTRODUÇÃO

VISANDO aumentar a margem de estabilidade dos sistemas elétricos de potência, funções de proteção rápidas têm sido cada vez mais investigadas. De fato, os geradores em sistemas elétricos possuem um tempo crítico de eliminação de faltas, o qual é determinante para a manutenção da estabilidade e para a determinação da potência máxima a ser transmitida em linhas de transmissão (LTs). Caso o defeito não seja eliminado antes do tempo crítico, pode-se perder a estabilidade do sistema elétrico, ocasionado, consequentemente, blecautes.

Em 1976, comprovou-se que uma redução de um ciclo na duração de faltas pode possibilitar uma transferência adicional de potência da ordem de 250 MW, ou seja, 15 MW/ms [1]. Dessa forma, funções de proteção rápidas têm sido cada vez mais incorporadas em dispositivos de proteção [2]. Os sistemas de proteção tradicionais são baseados normalmente na estimação de fasores fundamentais obtidos a partir dos sinais de tensão e corrente do sistema elétrico. Esses sistemas de proteção, embora sejam seguros e largamente utilizados, possuem um atraso intrínseco, o qual depende do tamanho das janelas de dados utilizadas no processo de estimação fasorial.

Este trabalho teve apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

João Paulo G. Ribeiro e Eduardo J. Leite Jr. são alunos de iniciação científica (PIBIC) e mestrado, respectivamente, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB) (e-mails: {joaopauloribeiro,eduardo leite}@aluno.unb.br).

Felipe V. Lopes é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB (e-mail: felipevlopes@unb.br).

O processo de janelamento de dados consiste basicamente na delimitação de um conjunto de amostras consecutivas de um dado sinal cujo fasor será estimado. Assim, durante um curto-circuito, medições corretas dos fasores fundamentais estimados só são obtidas após o período de transição da janela de dados, ou seja, quando a janela contém apenas amostras do período de falta, o que resulta em tempos de atuação da ordem de meio ciclo, um ciclo ou mais, a depender do tamanho das janelas de dados utilizadas [3].

Alguns dos primeiros estudos sobre funções de proteção aplicadas no domínio do tempo são apresentados em [4] e [5], trabalhos estes que embasaram o desenvolvimento de funções de proteção rápidas e seguras, tais como as reportadas em [2], [6]–[9]. Benmouyal & Chano comprovaram em [6] que, para o ganho de velocidade da proteção, é necessário utilizar sinais de tensão e corrente no domínio do tempo. Sirisha & Bhidé apresentaram um método que utiliza grandezas incrementais dos sinais de corrente e de tensão, resultando em atuações rápidas e confiáveis da proteção [7]. Já em [8], utilizam-se comparadores de fase implementados no domínio do tempo para aumentar a velocidade de atuação da proteção. Em [9], comprova-se que o uso de grandezas incrementais no domínio do tempo possibilita atuações mais rápidas e confiáveis dos relés de proteção. Mais recentemente, apresentou-se em [2] a implementação de um relé direcional de potência aplicado no domínio do tempo, função esta chamada de *Time-Domain 32* (TD32), a qual é capaz de identificar curtos diretos e reversos em tempos da ordem de um quarto de ciclo. Para tanto, utilizam-se grandezas incrementais e limiares adaptativos.

Os resultados apresentados em [10] comprovam que a presença da componente CC de decaimento exponencial nos sinais de corrente pode ocasionar desvios da ordem de 20% nos valores estimados de amplitude. Em [11], mostra-se que a componente CC de decaimento exponencial causa erros substanciais nos sinais utilizados para os cálculos dos parâmetros da proteção. Assim, os sistemas de proteção direcional, os quais utilizam sinais de corrente no cálculo dos parâmetros de operação, podem ter sua velocidade e confiabilidade afetados pela componente CC de decaimento exponencial, mesmo quando aplicados no domínio do tempo [8], [9].

Neste trabalho, apresenta-se uma investigação sobre a influência da componente CC de decaimento exponencial na função TD32 proposta em [2], incluindo um estudo sobre os efeitos de uma possível aplicação do filtro mímico digital apresentado em [12] para diferentes valores de ajuste dos elementos direcionais.

II. SISTEMA TESTE ANALISADO

Apresenta-se na Fig. 1 o sistema teste analisado neste trabalho, o qual consiste em uma LT de 230 kV/60 Hz, 200 km, modelada como perfeitamente transposta com parâmetros distribuídos e constantes na frequência, que interliga dois circuitos equivalentes de Thévenin, os quais representam os sistemas elétricos em torno da LT monitorada.

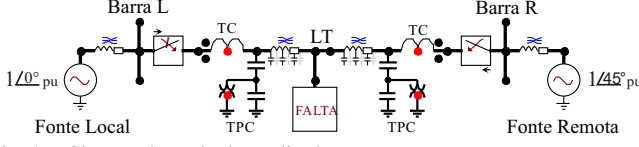


Fig. 1. Sistema de potência analisado.

Os parâmetros de sequência zero e positiva da LT modelada e dos circuitos equivalentes de Thévenin são:

- $Z_{LT0} = 0,418 + j1,524 \Omega/\text{km}$,
- $Z_{LT1} = 0,035 + j0,301 \Omega/\text{km}$,
- $Z_{LOC0} = Z_{REM0} = 0,0418 + j0,1524 \Omega$,
- $Z_{LOC1} = Z_{REM1} = 0,0035 + j0,0301 \Omega$,

em que Z_{LT} , Z_{LOC} e Z_{REM} representam a impedância da linha, do equivalente de Thévenin do terminal local e do equivalente de Thévenin do terminal remoto, respectivamente.

Conforme mencionado anteriormente, o algoritmo implementado de proteção direcional foi avaliado a partir da análise de registros de faltas obtidos de simulações realizadas no ATP. Foi utilizado um passo de integração de $5 \mu\text{s}$, sendo simulada uma frequência de amostragem de 15,36 kHz (256 amostras/ciclo). Para evitar a sobreposição de espectros e eliminar as componentes de alta frequência, filtros anti-aliasing analógicos do tipo Butterworth, passa-baixa de 3ª ordem, com frequência de corte de 180 Hz foram modelados. Os transformadores para instrumentos são iguais em ambos os terminais da LT e foram modelados conforme descrito em [13].

III. INFLUÊNCIA DA COMPONENTE CC DE DECAIMENTO EXPONENCIAL NOS SINAIS DE CORRENTE

Para a seleção dos casos a serem analisados neste trabalho, foram realizadas simulações em massa de curtos francos AT, considerando diferentes ângulos de incidência θ e distâncias de falta d , em pu, em relação ao terminal local. Cientes que o efeito da componente CC de decaimento exponencial altera diretamente o valor de pico máximo das correntes nos primeiros instantes de falta, para cada caso, calculou-se o valor máximo do módulo dos valores instantâneos das correntes medidas no terminal local, viabilizando a construção da superfície apresentada na Fig. 2.

Da Fig. 2(a), nota-se que o valor de pico da corrente varia para diferentes valores de θ e d . A visão superior da superfície é apresentada na Fig. 2(b), sendo possível concluir que os casos mais críticos ocorrem para faltas próximas ao terminal de medição, em uma região de até aproximadamente 0,3 pu de distância desse terminal, e para θ nas seguintes faixas: $-40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ e $150^\circ \leq \theta \leq 250^\circ$. Da figura, observa-se ainda que os menores efeitos da componente CC de decaimento exponencial ocorrem para faltas a partir de $d = 0,4$ pu e para $90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ e $270^\circ \leq \theta \leq 320^\circ$.

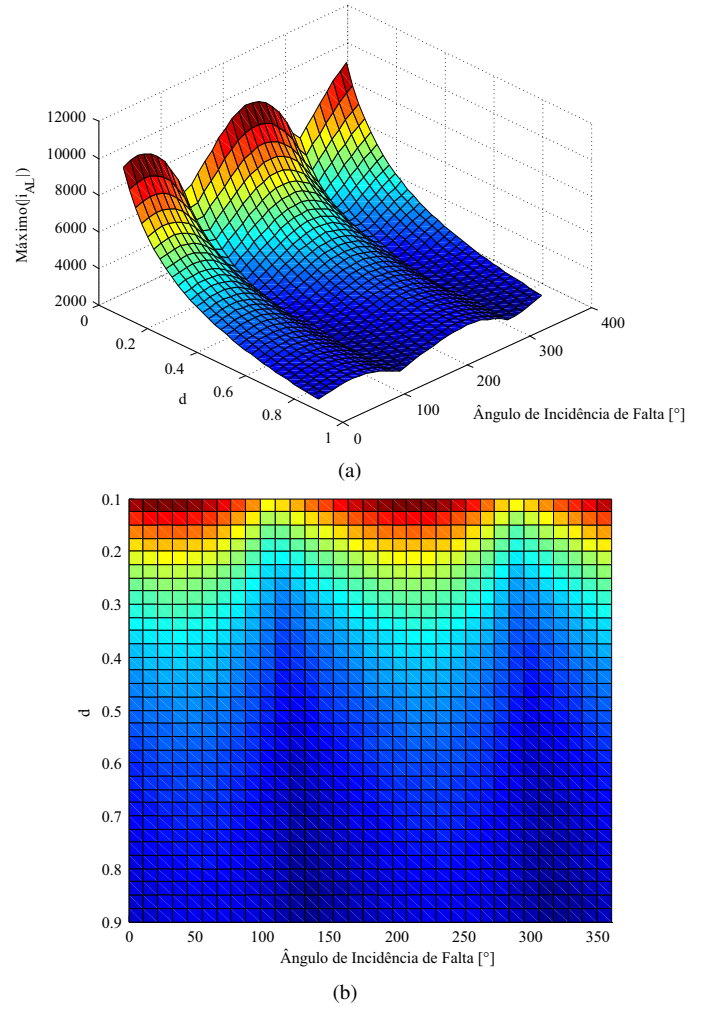


Fig. 2. Correntes medidas na Barra L: (a) Superfície do valor máximo das correntes; (b) Vista superior da superfície.

Neste trabalho, com o objetivo de avaliar o comportamento da função TD32 e dos efeitos do filtro mímico digital quando aplicado em conjunto com os elementos direcionais aplicados no domínio do tempo, são selecionados casos ao longo da superfície 2(a), incluindo situações de influência severa da componente CC de decaimento exponencial e casos menos críticos.

IV. PROTEÇÃO DIRECIONAL TD32

A. Grandezas Incrementais

Os elementos direcionais apresentados em [2] utilizam como entradas tensões e correntes incrementais, as quais podem ser obtidas do seguinte modo:

$$\Delta s(t) = s(t) - s(t - p \cdot T), \quad (1)$$

em que Δs é a grandeza incremental instantânea, s é o valor instantâneo medido do sinal avaliado (tensão ou corrente), T é o período fundamental da grandeza medida e p é um número arbitrário de períodos, geralmente igual a 2 ou 3.

Conforme reportado em [2], as grandezas incrementais apresentam pouca variação durante o regime de pré-falta e apresentam variações relevantes durante curtos-circuitos.

B. Elemento Direcional

Afim de determinar a direção da falta, comparadores são definidos como o produto da tensão incremental Δv e da corrente réplica incremental Δi_Z :

$$S_{OP}(t) = \Delta v(t) \cdot \Delta i_Z(t), \quad (2)$$

sendo a corrente réplica incremental calculada usando:

$$\Delta i_Z(t) = D_0 \cdot \Delta i(t) + D_1 \cdot \frac{d}{dt} \Delta i(t), \quad (3)$$

onde:

$$D_0 = \frac{R_s}{|Z_s|}, \quad D_1 = \frac{L_s}{|Z_s|}, \quad (4)$$

sendo Z_s , R_s e L_s a impedância, resistência e indutância do equivalente de Thévenin do terminal local, respectivamente.

Para melhorar a confiabilidade do elemento direcional, propõe-se em [2] o uso dos limiares adaptativos S_{FWD} e S_{REV} , os quais são definidos como:

$$S_{FWD}(t) = -Z_{FWD} \cdot [\Delta i_Z(t)]^2 - \Delta_{MIN}, \quad (5)$$

$$S_{REV}(t) = Z_{REV} \cdot [\Delta i_Z(t)]^2 + \Delta_{MIN}, \quad (6)$$

em que Δ_{MIN} é o limiar mínimo e Z_{FWD} e Z_{REV} são ajustes do relé, que serão melhor explicados nas próximas seções.

O elemento direcional declara uma falta direta quando:

$$S_{OP}(t) < S_{FWD}(t), \quad (7)$$

e declara uma falta na direção reversa quando:

$$S_{OP}(t) > S_{REV}(t). \quad (8)$$

Se as condições (7) e (8) não forem satisfeitas, assume-se que o sistema elétrico está em regime permanente. Na Fig. 3, mostra-se o comportamento de S_{OP} , S_{FWD} e S_{REV} para uma falta direta e para uma falta reversa. Nota-se que a margem entre S_{OP} e S_{REV} cresce para faltas diretas, garantindo segurança à proteção. Além disso, para faltas reversas, a margem entre S_{OP} e S_{FWD} também cresce, melhorando a confiabilidade do relé [2]. Como resultado, o elemento direcional rapidamente declara a direção da falta sem comprometer a confiabilidade da proteção.

C. Loops de Falta e Seleção de Fases

O elemento direcional avaliado é aplicável para representações monofásicas do sistema elétrico de potência [2]. Por isso, para aplicações em sistemas trifásicos, o *loop* de falta apropriado deve ser considerado para que a função TD32 atue corretamente. Dessa forma, seis unidades de medição são propostas em [2] para cobrir todos os *loops* de falta possíveis que possam surgir nos sistemas de potência, cujos sinais de entrada de tensão e corrente são listados na Tabela I.

TABELA I
Loop DE TENSÃO E CORRENTE NO DOMÍNIO DO TEMPO

Loop	Tensão	Corrente
AT	Δv_A	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{OZ}$
BT	Δv_B	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{OZ}$
CT	Δv_C	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{OZ}$
AB	$\Delta v_A - \Delta v_B$	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{BZ}$
BC	$\Delta v_B - \Delta v_C$	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{CZ}$
CA	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{AZ}$

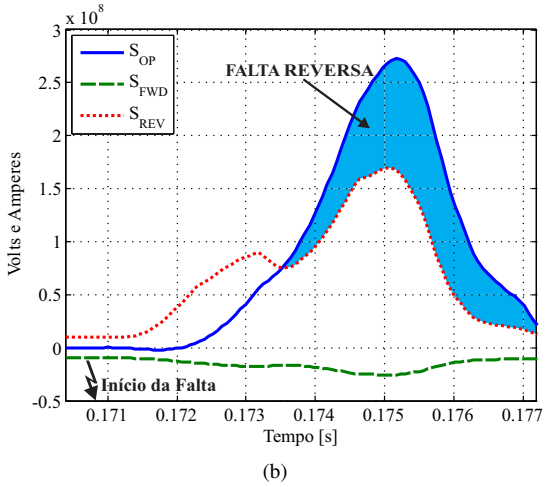
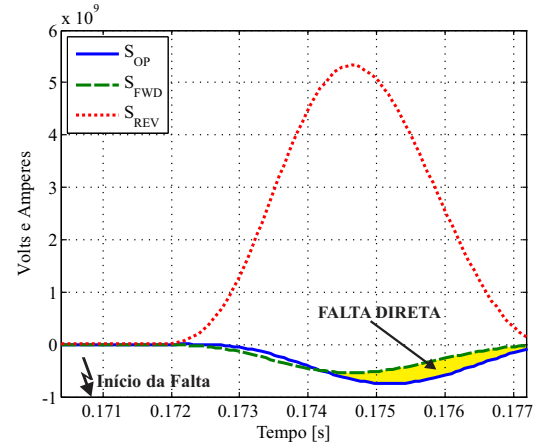


Fig. 3. S_{OP} , S_{FWD} e S_{REV} para uma falta: (a) Direta; (b) Reversa.

Para analisar os *loops* de falta do elemento direcional conforme proposto em [2], utilizam-se as seguintes funções:

$$f_{IZ}(\Delta i, R, L) = D_0(R, L) \cdot \Delta i + D_1(R, L) \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \quad (9)$$

$$\Delta i_0 = \frac{1}{3}(\Delta i_A + \Delta i_B + \Delta i_C) \quad (10)$$

$$\Delta i_{0Z} = f_{IZ}(\Delta i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} f_{IZ}(\Delta i_0, R_0, L_0) \quad (11)$$

$$i_{AZ} = f_{IZ}(i_A, R_1, L_1) \quad (12)$$

$$i_{BZ} = f_{IZ}(i_B, R_1, L_1) \quad (13)$$

$$i_{CZ} = f_{IZ}(i_C, R_1, L_1) \quad (14)$$

em que D_0 e D_1 são calculados conforme (4), porém usando Z_0 , Z_1 , R_0 , R_1 , L_0 e L_1 , que são, respectivamente, a impedância, resistência e indutância de sequência zero e positiva da LT.

Para a seleção de fases no domínio do tempo, S_{OP} é calculado para cada *loop* de falta. Como regra geral, as fases com defeito possuem maiores grandezas incrementais, resultando em maiores valores de S_{OP} [2]. Então, para efetuar a seleção de fases, comparam-se os valores de S_{OP} para cada *loop* de falta, sendo selecionado o *loop* cujos comparadores apresentam maiores valores.

Na Fig. 4, ilustra-se o comportamento dos comparadores S_{OP} dos *loops* de falta para um curto AT. Embora as unidades de medição que envolvem as fases com falta possuam os maiores variações de S_{OP} , este fato não é verificado nos primeiros instantes do distúrbio. Por isso, neste trabalho, a seleção de fase é realizada somente se um dos seis comparadores indicar uma condição de falta direta ou reversa por 1 ms sem interrupções (≈ 15 amostras consecutivas para uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo). Se assim ocorrer, os comparadores são avaliados e a seleção de fases é realizada.

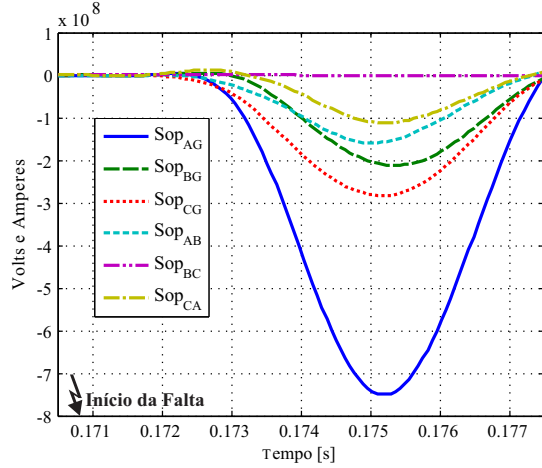


Fig. 4. Comportamento dos comparadores para uma falta AT.

D. Parâmetros da Proteção Utilizados nas Análises

Os ajustes da proteção direcional no domínio do tempo propostos em [2] são utilizados neste artigo. Para o cálculo dos limiares adaptativos, os seguintes parâmetros foram utilizados:

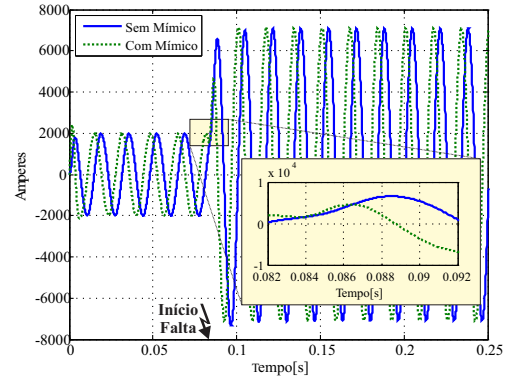
$$Z_{FWD} = 0,5 \cdot |Z_{LOC(MIN)}|, \quad (15)$$

$$Z_{REV} = 0,5 \cdot |Z_{LT}|. \quad (16)$$

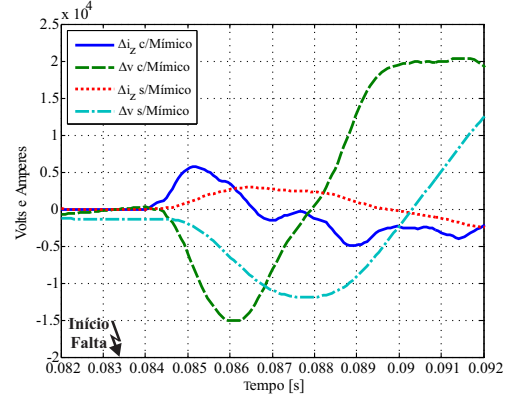
Neste trabalho, $Z_{LOC(MIN)} = Z_{LOC1}$ e $\Delta_{MIN} = 10^7$ ou 10^6 , conforme será explicado na seção seguinte. Uma vez que Δ_{MIN} não é especificado em [2], seus valores foram escolhidos com base na ordem de grandeza da potência natural da LT.

V. ANÁLISES E RESULTADOS

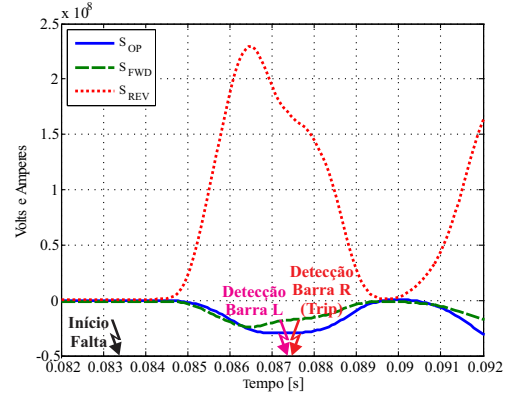
Apresenta-se na Tabela II alguns dos resultados obtidos das simulações em massa realizadas para o estudo de caso da proteção direcional implementada. O tempo de atuação da proteção é analisado para os cenários com e sem a presença do filtro mímico, considerando dois valores diferentes do ajuste Δ_{MIN} , conforme descrito na Tabela II. O filtro mímico utilizado é o proposto por Benmouyal em [12], onde é comprovado que este apresenta um melhor desempenho quando a constante de tempo da componente CC de decaimento exponencial se iguala à constante de tempo de ajuste do filtro mímico digital τ . Neste trabalho, τ foi estimada a partir dos parâmetros da LT, sendo igual a 38 ms. Na Fig. 5, apresentam-se a corrente de falta, as correntes réplica e os comparadores S_{OP} , S_{FWD} e S_{REV} para o caso 2 descrito na Tabela II, com e sem a presença do filtro mímico digital.



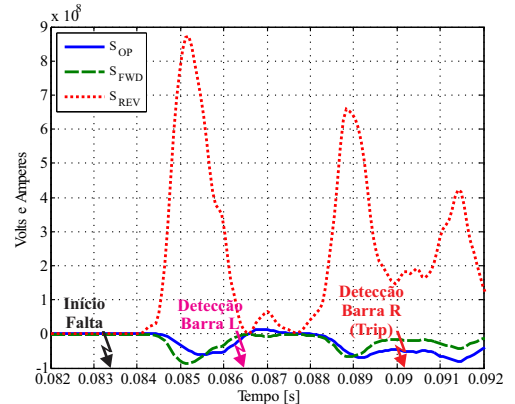
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. Corrente de falta e comportamento da proteção para o Caso 2 da Tabela II: (a) Corrente de falta; (b) Grandezas incrementais de tensão e corrente; (c) Elementos direcionais sem mímico; (d) Elementos direcionais com mímico.

TABELA II
RESULTADOS DA ANÁLISE PARA OS CASOS SELECIONADOS.

Casos	d	θ	Tipo de Falta	Unidade Sensibilizada	Tempo de Atuação			
					Sem Mímico ($\Delta_{\text{MIN}} = 10^7$)	Com Mímico ($\Delta_{\text{MIN}} = 10^7$)	Sem Mímico ($\Delta_{\text{MIN}} = 10^6$)	Com Mímico ($\Delta_{\text{MIN}} = 10^6$)
1	0,1	0°	Interna AT	AT	6,5 ms	5,2 ms	5,3 ms	4,6 ms
2	0,1	90°	Interna AT	AT	4,8 ms	6,9 ms	4,1 ms	6,8 ms
3	0,1	180°	Interna AT	AT	6,5 ms	5,2 ms	5,3 ms	4,6 ms
4	0,1	218°	Interna AT	AT	5,0 ms	3,8 ms	4,1 ms	3,4 ms
5	0,1	270°	Interna AT	AT	4,8 ms	6,9 ms	4,1 ms	6,8 ms
6	0,2	0°	Interna AT	AT	6,6 ms	5,2 ms	5,5 ms	4,6 ms
7	0,2	11°	Interna AT	AT	6,0 ms	4,7 ms	4,8 ms	4,1 ms
8	0,2	44°	Interna AT	AT	4,8 ms	3,6 ms	4,1 ms	3,4 ms
9	0,2	87°	Interna AT	AT	4,6 ms	6,8 ms	4,0 ms	3,3 ms
10	0,2	131°	Interna AT	AT	8,3 ms	6,5 ms	4,1 ms	6,4 ms
11	0,5	0°	Interna AT	AT	6,8 ms	5,5 ms	6,2 ms	5,3 ms
12	0,5	55°	Interna AT	AT	4,8 ms	3,6 ms	4,2 ms	3,5 ms
13	0,5	273°	Interna AT	AT	4,6 ms	3,4 ms	4,1 ms	3,4 ms
14	0,5	330°	Interna AT	AT	7,8 ms	6,2 ms	4,1 ms	6,1 ms
15	0,7	22°	Interna AT	AT	6,6 ms	5,3 ms	5,4 ms	4,7 ms
16	0,7	65°	Interna AT	AT	5,2 ms	3,8 ms	4,4 ms	3,5 ms
17	0,7	360°	Interna AT	AT	7,4 ms	6,1 ms	6,7 ms	5,4 ms
18	0,9	45°	Interna AT	AT	6,4 ms	9,3 ms	4,9 ms	4,1 ms
19	0,9	90°	Interna AT	AT	5,2 ms	7,3 ms	4,5 ms	3,5 ms
20	Barra L	0°	Externa Local	AT	-	-	-	-
21	Barra R	90°	Externa Remota	AT	-	-	-	-

Analisando a Fig. 5(a), nota-se que o filtro mímico defasa os sinais de entrada e, por isso, o mesmo foi aplicado aos sinais de tensão e corrente. Conforme demonstrado na parte ampliada da Fig. 5(a) e na Fig. 5(b), o filtro mímico introduz distorções nos sinais de tensão e corrente nos primeiros instantes da falta. Nas Figs. 5(b), 5(c) e 5(d), apresenta-se o comportamento dos elementos da proteção direcional referentes ao intervalo de tempo em que ocorre a distorção na corrente de falta analisada.

Nota-se que as distorções introduzidas nas tensões incrementais e correntes réplica resultam em oscilações em S_{OP} , o que pode ser observado nas Figs. 5(b) e Fig. 5(d), respectivamente. Esse comportamento pode aumentar o tempo de atuação da proteção, visto que as condições (7) e (8) passam a ser satisfeitas de forma intermitente. Das análises realizadas, verifica-se que esse feito é mais crítico em casos de ângulos de incidência próximos a 90°. Nos casos 2, 5, 10 e 14, para $\Delta_{\text{MIN}} = 10^6$ e nos casos 2, 5, 14, 18 e 19, para $\Delta_{\text{MIN}} = 10^7$, a presença do filtro mímico provocou um aumento no tempo de atuação da proteção. De fato, o filtro mímico digital é um filtro passa-alta [12], de forma que essa característica pode afetar a atuação da função TD32 devido à amplificação de componentes de alta frequência nos sinais analisados. Neste contexto, nota-se ainda que o uso de (3) já equivale à aplicação de uma espécie de filtro mímico e, portanto, a aplicação adicional do filtro proposto em [12] não é indicado para a função em estudo, conforme analisado a seguir.

Conforme demonstrado na Fig. 2, as correntes de curto-circuito são maiores para faltas próximas aos pontos de medição, sendo a influência da componente CC de decaimento exponencial mais crítica nos casos em que θ tem valores

próximos de 0° ou 180°. Para alguns cenários de falta no meio da LT, como no caso 14 (para ambos os valores de Δ_{MIN}) e no caso 17 (para $\Delta_{\text{MIN}} = 10^7$), houve um aumento no tempo de atuação da proteção em relação às demais simulações. Nesses casos, entende-se que, se a componente CC de decaimento exponencial fosse significativa na corrente réplica, haveriam variações mais rápidas em S_{OP} nos primeiros instantes de falta, acelerando a atuação da proteção. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, o uso de (3) promove uma boa remoção da componente CC de decaimento exponencial, de forma que as análises dos tempos de atuação devem ser baseadas na energia inicial da falta, ao invés da criticidade da componente CC de decaimento exponencial. De fato, após a remoção da componente CC de decaimento exponencial, a variação inicial de S_{OP} é menor para $\theta \approx 0^\circ$ ou 180° , resultando em atuações mais lentas. Por outro lado, para valores de $\theta \approx 90^\circ$ ou 270° , S_{OP} varia mais rapidamente nos primeiros instantes de falta, acelerando a atuação da proteção. Do exposto, pode-se então concluir que o aumento no tempo de atuação da função TD32 para $\theta \approx 0^\circ$ ou 180° é proveniente da baixa energia inicial de curto-circuito e não especificamente da componente CC de decaimento exponencial, a qual não é relevante na corrente réplica.

Analisando os casos 1, 3, 6, 11, 15 e 17, para $\Delta_{\text{MIN}} = 10^6$, percebe-se que o uso do filtro mímico reduziu o tempo de atuação da proteção, com uma redução máxima de 1,3 ms (caso 17). Igualmente, para $\Delta_{\text{MIN}} = 10^7$, o uso do filtro mímico reduziu o tempo de atuação em até 1,8 ms (caso 10). Entretanto, ainda para $\Delta_{\text{MIN}} = 10^7$, nota-se que a proteção é mais lenta quando comparada aos resultados obtidos para

$\Delta_{\text{MIN}} = 10^6$. Para alguns casos cuja presença da componente CC de decaimento exponencial nas correntes medidas é moderada, a exemplo dos casos 4, 7, 8, 12, 13 e 16, para ambos os ajustes de Δ_{MIN} , o tempo de atuação da proteção com e sem filtro mímico apresentou reduções, sendo de até 1,4 ms e 0,9 ms para Δ_{MIN} igual a 10^7 e 10^6 , respectivamente, no caso 16. Assim, do exposto anteriormente, conclui-se que tais reduções não são decorrentes da eliminação da componente CC de decaimento exponencial (a qual não é relevante na corrente réplica), mas sim, das variações impostas pelo filtro mímico, o qual, quando aplicado, resulta em uma derivada de segunda ordem da corrente medida. Com isso, as componentes de alta frequência em S_{OP} são amplificadas, aumentando, em alguns casos, a quantidade de energia inicial de curto-circuito, o que justifica a diferença observada nos tempos de atuação da proteção em alguns dos casos simulados com e sem filtro mímico. Deve-se destacar também que, nos casos de faltas externas à LT, com ou sem a presença do filtro mímico e para ambos os valores de ajustes da proteção utilizados, a função TD32 restringiu corretamente a operação da proteção.

Por fim, das análises realizadas, pode-se dizer que os elementos direcionais propostos em [2] são de fato capazes de alcançar tempos de atuação da ordem de 1/4 de ciclo. A componente CC de decaimento exponencial mostrou ter pouca influência sobre o tempo de atuação da proteção devido ao uso da corrente réplica incremental, a qual não possui conteúdo significativo da referida componente. Identifica-se ainda que podem ocorrer atrasos adicionais na atuação da função TD32 quando $\theta \approx 0^\circ$ ou 180° . Entretanto, destaca-se que isso se deve às baixas variações verificadas nos primeiros instantes do distúrbio e não à componente CC de decaimento exponencial, conforme se imaginava inicialmente. Assim, embora o filtro mímico proposto em [12] tenha reduzido o tempo de atuação em alguns casos, o seu uso em conjunto com a função TD32 reportada em [2] não é recomendado, mesmo que esse filtro seja adaptativo, pois introduz distorções nos operadores, o que pode tornar a proteção instável, comprometendo sua atuação em alguns casos.

VI. CONCLUSÕES

A influência da componente CC de decaimento exponencial em um algoritmo de proteção direcional no domínio do tempo foi avaliada neste artigo para diferentes ajustes. O algoritmo é baseado na análise de grandezas incrementais e utiliza limiares adaptativos para identificar a direção da falta. Para a análise proposta, foram realizadas simulações em massa de faltas em uma linha de transmissão de 230 kV e 200 km de comprimento utilizando o ATP. Foram consideradas faltas ao longo de todo o comprimento da linha de transmissão com diferentes ângulos de incidência. Para algumas simulações, dentre as realizadas, o tempo de atuação da proteção direcional foi avaliado, abordando os efeitos de diferentes ajustes e do uso ou não do filtro mímico digital.

Das casos avaliados, 21 simulações foram discutidas. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os elementos direcionais são confiáveis e capazes de promoverem tempos de atuação da ordem de 4 ms, a depender dos ajustes utilizados. O

filtro mímico aplicado para reduzir o efeito decorrente da componente CC decaimento exponencial nas correntes medidas é equivalente a uma diferenciação de segunda ordem na corrente réplica incremental, provocando, em alguns casos, retardos no tempo de atuação da proteção, os quais são provenientes das oscilações em demasia que surgem nos sinais. Em outros casos, verifica-se a redução do tempo de atuação. Entretanto, isso se deve à amplificação das componentes de alta frequência nos sinais monitorados, o que pode tornar a proteção instável em diversas situações. Tal conclusão se baseia no fato da corrente réplica ser isenta dos efeitos da componente CC de decaimento exponencial, ou seja, sua fórmula equivale a um filtro mímico, dispensando a necessidade de utilização de filtros adicionais. Portanto, de uma forma geral, pode-se concluir que a proteção se mostrou confiável e rápida, a depender dos ajustes utilizados, apresentando atuações mais rápidas do que as funções tradicionais baseadas em fasores, sem requerer a aplicação do filtro mímico.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] R. Eastvedt, "The need for ultra-fast fault clearing," in *Third Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, October 1976.
- [2] E. Schweitzer, B. Kasztenny, A. Guzman, V. Skendzic, and M. Mynam, "Speed of line protection - can we break free of phasor limitations?" in *Protective Relay Engineers, 2015 68th Annual Conference for*, March 2015, pp. 448–461.
- [3] E. Schweitzer and D. Hou, "Filtering for protective relays," in *WES-CANEX 93. 'Communications, Computers and Power in the Modern Environment' Conference Proceedings., IEEE*, 1993, pp. 15–23.
- [4] M. Vitins, "A fundamental concept for high speed relaying," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-100, no. 1, pp. 163–173, Jan 1981.
- [5] O. Lanz, M. Hanggli, G. Bacchini, and F. Engler, "Transient signals and their processing in an ultra high-speed directional relay for ehv/uhv transmission line protection," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-104, no. 6, pp. 1463–1473, June 1985.
- [6] G. Benmouyal and S. Chano, "Characterization of phase and amplitude comparators in uhs directional relays," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 2, pp. 646–653, May 1997.
- [7] A. Sirisha and S. Bhide, "Incremental quantities based relays," in *Power, Automation and Communication (INPAC), 2014 International Conference on*, Oct 2014, pp. 27–32.
- [8] G. Benmouyal and J. Roberts, "Superimposed quantities: Their true nature and their application in relays," in *26th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, October 1999.
- [9] G. Benmouyal, "Amplitude-independent comparators for uhs directional relays," in *Developments in Power System Protection, Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 434)*, Mar 1997, pp. 78–82.
- [10] Y. Guo, M. Kezunovic, and D. Chen, "Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dc-offset on the fourier algorithm," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 711–717, July 2003.
- [11] A. Phadke, T. Hlibka, and M. Ibrahim, "A digital computer system for ehv substations: Analysis and field tests," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 95, no. 1, pp. 291–301, Jan 1976.
- [12] G. Benmouyal, "Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 2, pp. 621–630, Apr 1995.
- [13] *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*, IEEE Power System Relaying Committee, 2004.