

Princípios e Implementação da Nova Proteção de Linha no Domínio do Tempo

E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, M. Mynam, A. Guzmán e V. Skendzic
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
13th International Conference on Developments in Power System Protection
Edimburgo, Reino Unido
7–10 de março de 2016

Traduzido para o português em fevereiro de 2017

Princípios e implementação da nova proteção de linha no domínio do tempo

E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, M. Mynam, A. Guzmán, V. Skendzic

Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2350 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163 USA,
venkat_mynam@selinc.com

Palavras-chave: Proteção de linha, ondas viajantes, grandezas incrementais, proteção diferencial, proteção de distância.

Sumário

Desde os primeiros dias de energia elétrica, os engenheiros têm continuamente melhorado a proteção, conforme indicado pelos níveis de segurança, velocidade e confiabilidade. Hoje, a busca pela eliminação mais rápida de faltas é mais relevante do que nunca. Este artigo analisa os princípios de operação da nova proteção de linha no domínio do tempo usando ondas viajantes e grandezas incrementais. Vamos discutir os princípios de operação dos novos elementos direcionais e diferenciais baseados nas ondas viajantes e dos elementos de distância da Zona 1 e direcionais baseados nas grandezas incrementais. Este artigo fornece detalhes da implementação real destes princípios em uma plataforma de relés de alto desempenho e compartilha os resultados do desempenho de simulações e registros de campo.

1 Introdução

Atualmente, os relés no domínio do tempo estão se tornando disponíveis para a proteção de linha de ultra-alta velocidade. Esses relés usam princípios de ondas viajantes (TW: “Traveling Wave”), bem como princípios da grandeza incremental já comprovados (“tried-and-true”) para fornecer uma proteção de linha segura de ultra-alta velocidade. As elevadas taxas de amostragem, armazenamento de dados, potência de processamento e os recursos de comunicação das novas plataformas de hardware dos relés permitem melhorar os tempos de operação da proteção de linha [1] e a localização de faltas [2].

A Seção 2 deste artigo analisa brevemente a aquisição de dados e processamento de sinais associados à implementação dos elementos de proteção de linha no domínio do tempo. A Seção 3 discute os princípios de operação dos elementos de proteção de linha baseados em TW: elemento direcional TW32 e elemento diferencial TW87. A Seção 4 discute brevemente os princípios de operação dos elementos baseados na grandeza incremental: elemento direcional TD32 e elemento de distância TD21 com subalcance da Zona 1. A Seção 5 ilustra o desempenho de TW32 e TW87 usando simulações digitais. Usamos também um caso de campo capturado pelo localizador de faltas por TW para mostrar o desempenho do elemento TW87. Uma descrição mais detalhada dos elementos e respectivo desempenho é fornecida em [3].

2 Aquisição de dados e processamento de sinais

Esta seção resume a aquisição de dados e processamento de sinais para os elementos de proteção de linha no domínio do tempo. Começamos listando os principais sinais e ajustes comuns aos nossos elementos de proteção de linha.

v_{Φ}	tensão fase-terra do relé, fase Φ .
i_{Φ}	corrente de fase do relé, fase Φ .
v_{TW}	onda viajante de tensão.
i_{TW}	onda viajante de corrente.
T_L	tempo de propagação da linha.
P	pickup do elemento TW87.

A Fig. 1 ilustra um diagrama simplificado de aquisição dos sinais de nosso relé no domínio do tempo. Efetuamos a amostragem das correntes e tensões da linha com uma taxa de 1 MHz, adequada para localização de falta e proteção baseadas em TW. Aplicamos um filtro analógico passa-baixa para evitar *aliasing* do sinal e usamos um filtro diferenciador simples (“simple differentiator-smoother”) [2] para extrair as TWs das correntes e tensões brutas. Reduzimos as amostras de 1 MHz para a taxa de 10 kHz para processar os algoritmos baseados nas grandezas incrementais.

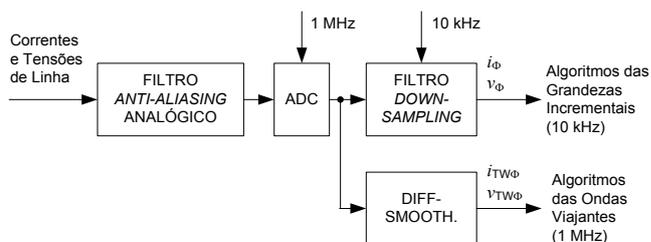


Fig. 1. Diagrama de aquisição de dados simplificado para os algoritmos de proteção baseados em TW e na grandeza incremental.

A Fig. 2a exibe a janela de dados do filtro diferenciador e a Fig. 2b ilustra sua operação. Considerada ao longo de um período de algumas dezenas de microssegundos, a corrente na frequência fundamental é quase constante (ou seja, variando muito lentamente). Uma TW é uma variação brusca de um nível quase estacionário para um nível quase estacionário diferente. O filtro diferenciador responde a uma mudança de degrau ideal com uma saída em forma de triângulo, que responde a uma transição de rampa entre dois níveis com uma saída em forma de parábola. Utilizamos o tempo associado ao pico da saída do filtro diferenciador como o tempo de chegada da TW.

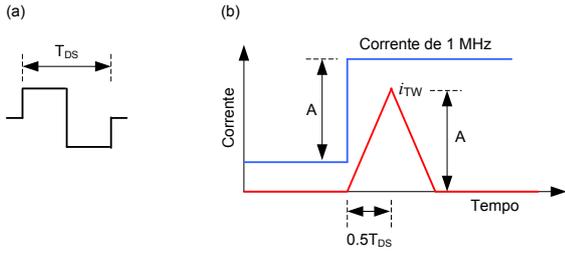


Fig. 2. Janela de dados (a) e operação (b) do filtro diferenciador.

A Fig. 3 detalha um integrador—um bloco comum utilizado em nossos elementos de proteção de linha no domínio do tempo. A função de um integrador consiste em adicionar ou acumular valores de entrada. Um integrador pode ser visto como um equivalente a um estimador de fasor dos relés baseados em fasores. Integrar um sinal que se desenvolve a partir do zero não reduz a velocidade das decisões baseadas no sinal integrado quando comparada com dois ou mais destes sinais.

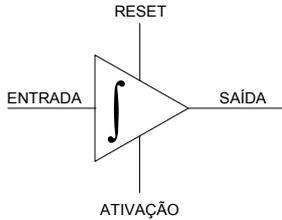


Fig. 3. Integrador de segurança com entradas de controle.

Em nossa implementação, o integrador possui duas entradas de controle (ATIVAÇÃO [“RUN”] e RESET [“RESET”]) que controlam—usando uma lógica interna cuidadosamente selecionada—seu desempenho sob diferentes condições de operação.

3 Elementos baseados em ondas viajantes

3.1 Elemento direcional por ondas viajantes (TW32)

As Referências [1] e [4] explicam os fundamentos do uso das TWs de tensão e corrente para discriminação da direção da falta. Teoricamente, precisamos de um transformador de potencial com ampla largura de banda (alta fidelidade) para medir as TWs de tensão. Contudo, na maioria dos casos podemos medir a primeira TW de tensão mesmo com um transformador de potencial com capacitor de acoplamento, CCVT (devido à capacitância entre enrolamentos através do transformador abaixador e à capacitância entre espiras através do reator de sintonização do CCVT). Esta medição da TW de tensão não é precisa em termos da magnitude da TW de tensão, mas é precisa em termos do tempo de chegada e polaridade, que é suficiente para o elemento TW32.

Usamos as TWs da corrente e tensão de fase, conforme mostrado na Fig. 4. Calculamos o torque de TW como um produto da corrente de TW pela tensão de TW com sinal invertido (logo, o torque é positivo para eventos na direção à

frente). Integramos o torque ao longo do tempo. Por questões de segurança, liberamos o integrador apenas se ambas as TWs de tensão e corrente estiverem acima dos níveis mínimos. Verificamos a saída do integrador (E_{FWD}) após o tempo T_1 (da ordem de dezenas a centenas de microssegundos) desde o início da perturbação. Ativamos a saída de TW32 quando E_{FWD} ultrapassa uma margem de segurança.

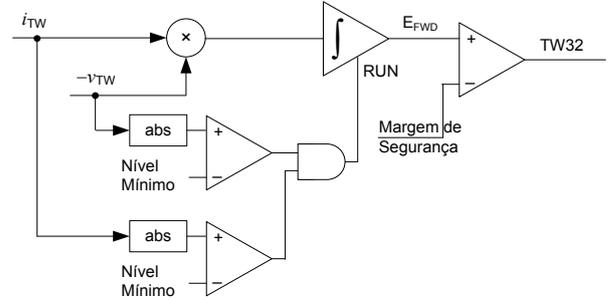


Fig. 4. Lógica simplificada do elemento TW32.

3.2 Elemento diferencial por ondas viajantes (TW87)

A Referência [1] deriva o princípio de proteção de nosso elemento diferencial de corrente de linha baseado em TW. Este elemento compara os tempos, polaridades e magnitudes das TWs de corrente de ambos os terminais da linha. Para um evento externo, a TW de corrente entra em um terminal da linha e, após o tempo de propagação da linha, sai no outro terminal com a polaridade oposta, mas não necessariamente com a mesma magnitude [5].

Implementamos o princípio da seguinte maneira. Primeiro, identificamos o princípio da seguinte maneira. Primeiro, identificamos o índice de tempo (como um índice da amostra) da primeira TW em ambos os terminais local e remoto. Para os terminais local e remoto, identificamos estes dois índices como NL_{FIRST} e NR_{FIRST} , respectivamente. Encontrar estes índices não é difícil, uma vez que estas são as primeiras ondas registradas após o estado estacionário anterior à perturbação.

Em segundo lugar, conhecendo o índice da primeira TW no terminal local, estabelecemos uma janela de tempo para detectar a TW existente no terminal remoto. De forma similar, conhecendo o índice da primeira TW no terminal remoto, estabelecemos a janela de tempo para detectar a TW existente no terminal local. Estas janelas são posicionadas no tempo de propagação da linha nominal, T_L , seguindo a primeira TW. Precisamos também incluir uma margem, ΔT_L , para o erro e variabilidade do tempo de propagação (para acomodar condições como aumento da flecha do condutor).

Em terceiro lugar, inspecionamos o registro de TW no intervalo de tempo de saída de TW e identificamos o valor absoluto máximo neste intervalo de tempo. Rotulamos o índice deste valor máximo identificado pelos relés local e remoto como índice de saída NL_{EXIT} e NR_{EXIT} , respectivamente. A Fig. 5 ilustra a primeira TW no terminal local e a TW de saída no terminal remoto.

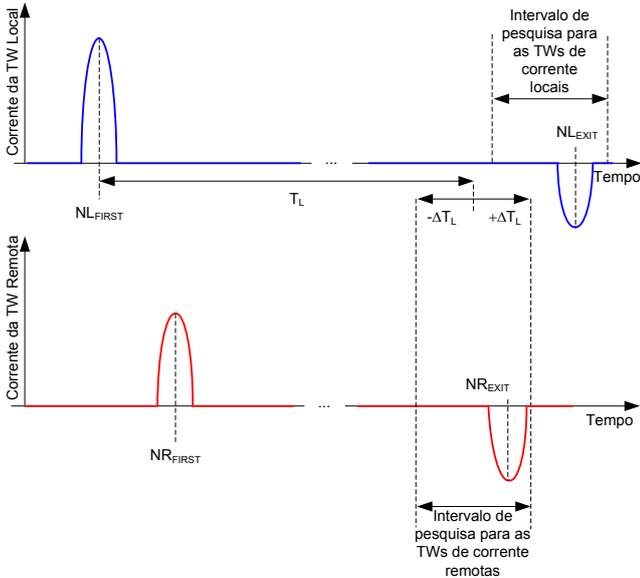


Fig. 5. Definição das TWs FIRST (PRIMEIRA) e EXIT (SAÍDA) para o elemento TW87.

Após identificar os quatro índices, calculamos os seguintes sinais, utilizando M amostras da ordem de metade da janela do diferenciador ($M < 0.5 \cdot T_{DS}$).

Magnitudes das primeiras TWs de corrente:

$$IL = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL(NL_{FIRST}-k)} \right| \quad (1a)$$

$$IR = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWR(NR_{FIRST}-k)} \right| \quad (1b)$$

Selecionamos o fator de escala C para manter um ganho unitário dos valores de (1) para uma TW de degrau ideal.

Corrente da TW de operação:

$$I_{DIF} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWL(NL_{FIRST}-k)} + i_{TWR(NR_{FIRST}-k)}) \right| \quad (2)$$

Corrente da TW de restrição:

Se $NL_{FIRST} < NR_{FIRST}$,

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWL(NL_{FIRST}-k)} - i_{TWR(NR_{EXIT}-k)}) \right| \quad (3a)$$

Ou então,

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWR(NR_{FIRST}-k)} - i_{TWL(NL_{EXIT}-k)}) \right| \quad (3b)$$

Localização da falta:

$$m_{87} = 0.5 \left(1 + \frac{NL_{FIRST} - NR_{FIRST}}{T_L} \right) \quad (4)$$

Após calcular (1) a (4), aplicamos a lógica de TW87 mostrada na Fig. 6.

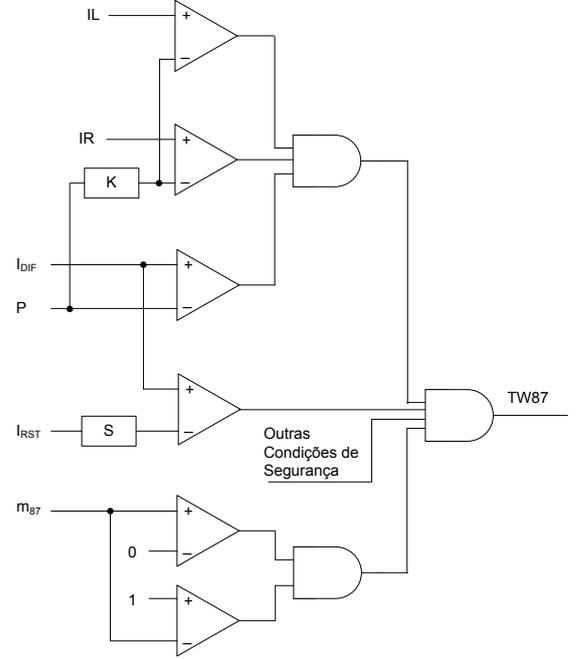


Fig. 6. Lógica simplificada de TW87 (P–pickup mínimo, S–slope, K–fator mínimo de TW).

Acionamos três elementos TW87, um para cada fase. Qualquer tipo de falta vai excitar pelo menos dois condutores com TWs de corrente. Por questões de segurança, exigimos que todos os elementos de fase com correntes de operação, local e remota, maiores do que o correspondente nível de atuação (“pickup”) declarem uma condição de falta interna antes de permitirmos que o TW87 ative sua saída.

Qualquer mudança súbita na tensão em um ponto sobre a linha protegida gera TWs [6]. Tais variações incluem o chaveamento de reatores e capacitores série na linha ou uma descarga elétrica na blindagem dos cabos. Portanto, a lógica de TW87 requer condições de supervisão adicionais para segurança. Esta discussão está fora do escopo deste artigo.

4 Elementos baseados na grandeza incremental

4.1 Elemento direcional por grandeza incremental (TD32)

A Referência [1] deriva a teoria do elemento TD32. Baseamos o elemento em um torque, ou seja, um produto da tensão incremental instantânea pela corrente réplica incremental instantânea. Aplicamos restrições adaptativas para o torque de operação usando o conceito bem conhecido das impedâncias limite (“threshold impedances”). Calculamos o torque de operação usando uma tensão com sinal invertido para que o torque de operação, T_{OP} , seja positivo para eventos à frente. Os dois torques de restrição são proporcionais ao produto das magnitudes da corrente réplica do loop ao quadrado pela

impedância limite correspondente. Usamos um torque de restrição positivo, T_{FWD} , para verificar a direção à frente, e usamos um torque de restrição negativo, T_{REV} , para verificar a direção reversa. Integramos os torques (T_{OP} , T_{FWD} , T_{REV}) e comparamos o torque de operação integrado com os torques de restrição integrados adaptativos e declaramos a direção à frente ou reversa.

4.2 Elemento de distância por grandeza incremental (TD21)

A Referência [1] deriva a teoria do elemento TD21 com base nos fundamentos [7]. O princípio compara a variação da tensão calculada no ponto do alcance pretendido (tensão de operação, V_{21OP}) com a tensão de pré-falta no ponto de alcance (tensão de restrição, V_{21RST}). Para uma falta no ponto de alcance, a maior variação na tensão ocorre quando a tensão de pré-falta colapsa completamente para zero (uma falta sólida, $R_F = 0$). Se a variação for maior ($V_{21OP} > V_{21RST}$), a falta tem de estar entre o relé e o ponto de alcance, e o elemento é ativado.

5 Desempenho da proteção de linha no domínio do tempo

Nesta seção, ilustramos o desempenho da proteção de linha no domínio do tempo usando tanto simulações digitais quanto um caso de campo selecionado.

5.1 Desempenho dos elementos baseados na grandeza incremental

Usamos diversas faltas em linhas do mundo real para ilustrar a operação dos elementos de proteção de linha no domínio do tempo e mostrar a diferença no desempenho em comparação com a tradicional proteção baseada em fasor [3]. Os casos de campo demonstram melhorias na velocidade e confiabilidade. Eles também demonstram a segurança dos elementos TD21 e TD32. Cada falta na extremidade remota da linha é um teste de segurança para nosso elemento de subalcance, e cada falta na direção à frente é um teste de segurança para nosso elemento direcional olhando na direção reversa. Os elementos testados operaram para todas as faltas na linha dentro do respectivo alcance esperado, com tempos de operação mais rápidos em 6 a 20 ms quando comparados com os relés baseados em fasor em serviço (todos os nossos casos considerados foram para sistemas de 60 Hz).

Testamos os elementos TD21 e TD32 contra os elementos da Zona 1 e direcional, respectivamente, de dois relés de proteção de linha, A e B, baseados em fasores de alto desempenho, usando dados gerados por um programa de transientes eletromagnéticos (EMTP: “Electromagnetic Transient Program”). Ajustamos os elementos de subalcance em 80% do comprimento da linha. Todos os relés usam saídas nominais de trip de estado sólido.

Modelamos uma linha de 500 kV, 60 Hz, comprimento de 161 km, com uma SIR de 1.4 em ambos os terminais. Simulamos faltas sólidas para esses testes usando dez tipos de falta e dois “points on wave” (“ponto na onda”) (tensão zero e tensão de pico). Modelamos transformadores de instrumentos ideais nesses testes.

A Fig. 7 apresenta os tempos de operação dos elementos TD21 e da Zona 1 dos Relés A e B. Os Relés A e B operam em menos de um ciclo para faltas próximas. Ambos os Relés A e B exibem uma faixa relativamente grande nos respectivos tempos de operação. O elemento TD21, por sua vez, é consistentemente rápido com o tempo de operação médio abaixo de 4 ms.

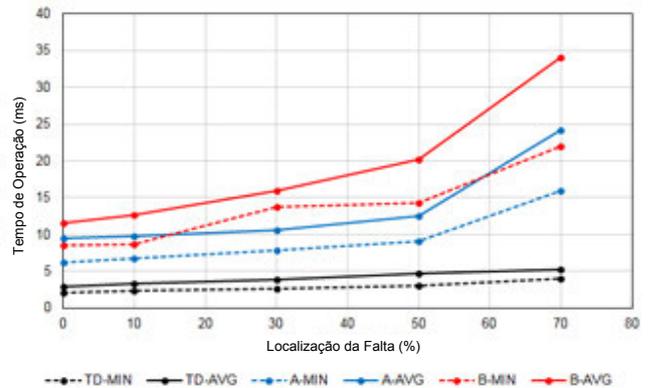


Fig. 7. Tempos de operação dos elementos de subalcance testados.

A Fig. 8 apresenta os tempos de operação para os elementos direcionais de sobrealcance. O Relé A opera em cerca de meio ciclo. O Relé B leva de 1 a 1.5 ciclo para detectar a direção da falta. O elemento TD32 opera consistentemente em aproximadamente 2 ms.

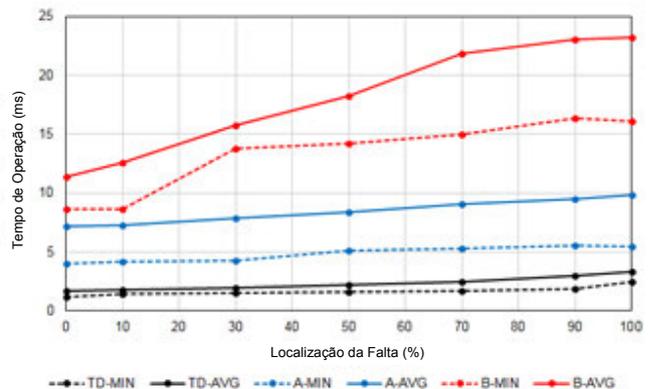


Fig. 8. Tempos de operação dos elementos direcionais testados.

5.2 Exemplos de TW32 e TW87 usando casos simulados no EMTP

Usamos um programa EMTP para simular uma falta da Fase A para terra em três locais diferentes de um sistema simples de 500 kV, 60 Hz, conforme mostrado na Fig. 9. A resistência da falta é zero, e a falta ocorre no pico da tensão. O comprimento da linha é 161 km, e o tempo de propagação de TW é 542 μ s. Simulamos TCs e TPs ideais com relações de 600:1 e 4500:1, respectivamente.

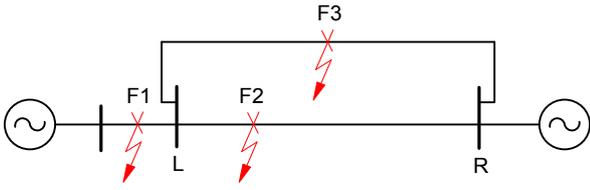


Fig. 9. Sistema simples para ilustração dos princípios de TW32 e TW87.

5.2.1 Falta externa próxima (F1)

A Fig. 10 mostra as TWs de corrente nos terminais local e remoto para uma falta próxima atrás do terminal L. Conforme esperado, as TWs medidas no terminal L com polaridade negativa (Fase A) são medidas no terminal R com polaridade positiva exatamente 542 μ s depois. O mesmo padrão pode ser observado em todas as três fases. A Tabela 1 relaciona os sinais calculados a partir das TWs medidas e usados pela lógica de TW87.

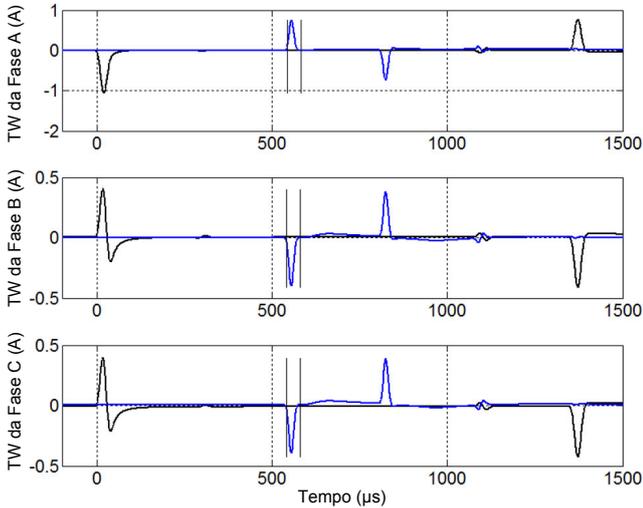


Fig. 10. TWs das correntes locais (preto) e remotas (azul) para a falta externa F1.

Para a falta externa F1, o algoritmo de TW87 calcula o sinal de operação bem abaixo do sinal de restrição (0.66 A vs. 2.16 A na Fase A, por exemplo) e o elemento restringe com uma ampla margem de segurança.

A Fig. 11 apresenta as TWs de tensão e corrente da Fase A no terminal local e o torque de TW32 integrado. O torque é decisivamente negativo, e o elemento TW32 indica uma direção reversa da falta.

Falta	Φ	I_L (A)	I_R (A)	I_{DIF} (A)	I_{RST} (A)	m_{87} (pu)
F1	A	1.41	0.75	0.66	2.16	1.0
	B	0.40	0.40	0.01	0.80	1.0
	C	0.38	0.38	0.00	0.76	1.0
F2	A	1.22	0.76	1.98	1.22	0.4
	B	0.51	0.39	0.90	0.51	0.4
	C	0.54	0.38	0.92	0.54	0.4
F3	A	0.92	0.53	1.45	1.70	0.3
	B	0.31	0.27	0.58	0.74	0.3
	C	0.30	0.28	0.57	0.72	0.3

Tabela 1: Medições de TW87 para os exemplos do EMTP.

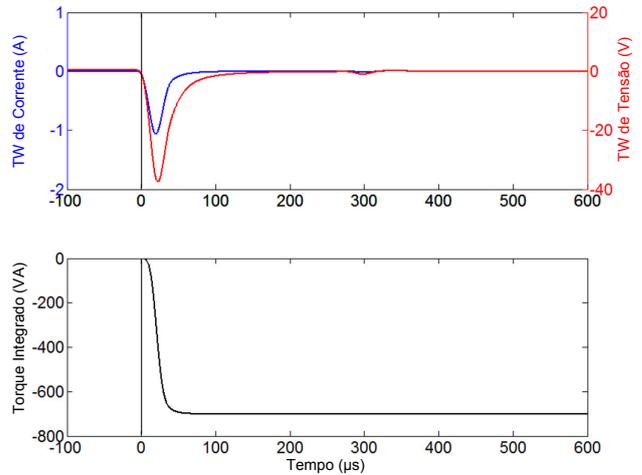


Fig. 11. TWs de corrente e tensão e o torque de TW32 integrado no terminal local para a falta externa F1.

5.2.2 Falta interna (F2)

A Fig. 12 exibe as correntes de TW87 para a falta interna F2 a 40% do terminal local. A Fig. 13 mostra as grandezas de TW32 no terminal local. A Tabela 1 lista os sinais calculados a partir das TWs medidas e usados pela lógica de TW87.

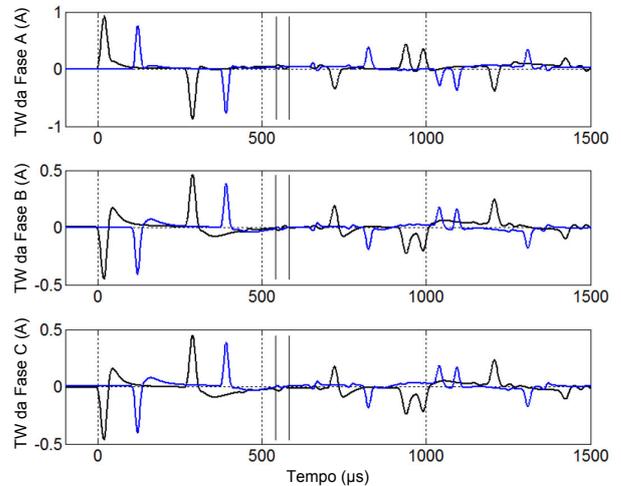


Fig. 12. TWs das correntes locais (preto) e remotas (azul) para a falta interna F2.

O elemento TW87 calcula a localização da falta em cerca de 0.4 pu, e há uma grande concordância entre os cálculos de todas as três fases. O sinal de operação de TW87 está consideravelmente acima do sinal de restrição (1.98 A vs. 1.22 A na Fase A, por exemplo), e o elemento opera com confiabilidade.

O elemento TW32 mede um torque decisivamente positivo (Fig. 13) e indica uma direção de falta à frente com confiabilidade. O elemento TW32 responde no tempo T1 ou não responde de modo algum. Como resultado, o tempo de operação do elemento TW32, quando medido a partir do tempo de chegada de TW no terminal, é um valor constante, bem abaixo de 1 ms.

O tempo de operação de TW87 depende do tempo de propagação da linha, atrasos nas comunicações e atrasos no processamento do relé, bem como da localização da falta. Utilizamos tempos de propagação de 0.98 e 0.6 da velocidade da luz no espaço livre para as velocidades de propagação da linha de transmissão e da fibra óptica, respectivamente. Assumimos 0.05 ms para os atrasos de cada um dos tempos de transmissão e recepção de TW87 (usando fibra óptica privada de alta velocidade), e 0.1 ms para o tempo de processamento da lógica. Baseando-se em nosso projeto, para uma linha de 100 km, o tempo de operação do TW87 é de 1.2 ms.

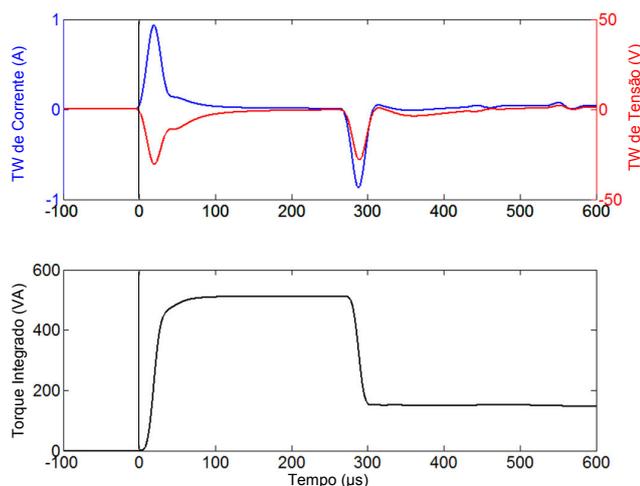


Fig. 13. TWs de corrente e tensão e o torque de TW32 integrado no terminal local para a falta interna F2.

5.2.3 Falta externa F3

A falta externa F3 emula uma falta em um caminho paralelo de tal forma que as TWs alcançaram os terminais local e remoto aproximadamente ao mesmo tempo (a diferença é menor do que o tempo de propagação da linha) e com a mesma polaridade. A Tabela I lista os sinais calculados a partir das TWs medidas e usados pela lógica de TW87.

A Fig. 14 mostra as TWs de corrente locais e remotas. O elemento TW87 calcula a localização da falta como 0.3 pu. Considerando as polaridades e a diferença de tempo entre a primeira das TWs registradas em cada terminal da linha, a falta parece ser interna, localizada em 0.3 pu a partir do terminal local. No entanto, o elemento TW87 verifica o tempo de propagação da linha das TWs decorrido das ondas iniciais e

observa as TWs com a polaridade oposta quando elas deixam a linha protegida. Como resultado, o sinal de operação é menor do que o sinal de restrição (1.45 A vs. 1.70 A na Fase A, por exemplo), e o elemento TW87 restringe com uma margem adequada.

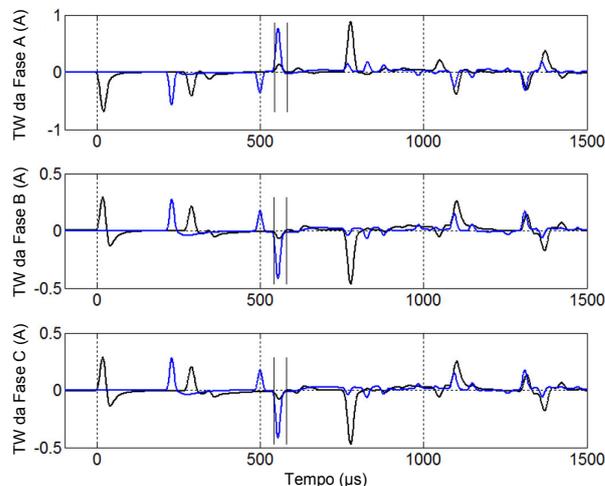


Fig. 14. TWs das correntes locais (preto) e remotas (azul) para a falta externa F3.

5.2.4 Exemplo de TW87 Usando Dados do Campo

Uma falta da Fase B para terra atingiu uma linha de 161 kV, comprimento de 117 km, a 81% de distância do terminal. O tempo de propagação da onda medido nesta linha durante o comissionamento do relé é 396 μ s. Estas TWs foram capturadas e medidas usando os circuitos desenvolvidos para a função de localização de faltas [1]. No entanto, podemos usá-las para ilustrar o princípio e implementação de TW87. A Fig. 15 mostra as TWs de corrente locais e remotas.

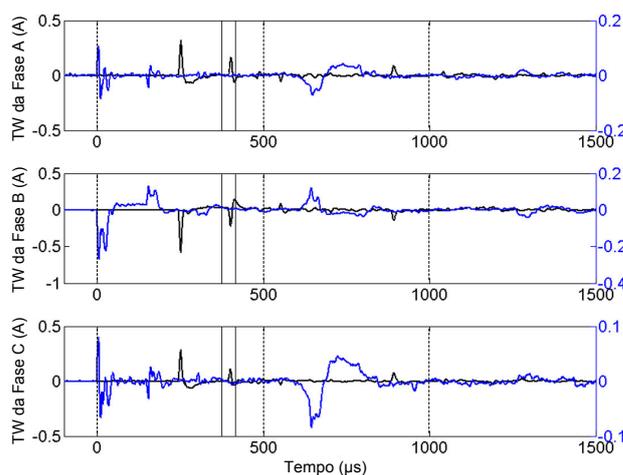


Fig. 15. TWs das correntes locais (preto) e remotas (azul) capturadas para os Casos 10 e 11.

O algoritmo de TW87 verifica a localização da falta corretamente (0.798–0.811 pu calculada por m_{87} em tempo real vs. 0.81 pu pelo localizador de falta por TW) e opera com confiabilidade para esta falta, porque o sinal de operação na Fase B é consideravelmente maior do que o sinal de restrição (1.03 A vs. 0.13 A).

6 Conclusões

Explicamos os princípios de operação dos elementos de proteção de linha no domínio do tempo: elementos de distância e direcional baseados na grandeza incremental, e direcional e diferencial de corrente de linha baseados em TW.

Avaliamos os elementos no domínio do tempo em relação a diversos fatores que afetam o desempenho da proteção de linha—incluindo a localização da falta, suportabilidade do sistema e “point-on-wave”—usando dois diferentes relés baseados em fasor para comparação. Nossos testes mostram que os tempos de operação típicos para os nossos elementos de proteção de linha no domínio do tempo são da ordem de 2 ms para o TD32, menos de 1 ms para o TW32, 4 ms para o TD21, e menos de 1 ms mais o tempo do canal para o TW87 (para uma linha de 100 km).

De forma intencional, nossos elementos no domínio do tempo foram baseados principalmente nas questões de velocidade e segurança ao invés de confiabilidade perfeita. Portanto, eles exigem elementos de proteção confiáveis, tipicamente baseados em fasor, operando em paralelo, seja como parte do mesmo relé, ou como um relé separado. Contudo, esses elementos rápidos operam para uma grande porcentagem de faltas na linha. Como resultado, a retaguarda confiável, porém mais lenta, é raramente solicitada, resultando em excelente média dos tempos de operação da aplicação completa.

Referências

- [1] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, “Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?” proceedings of the 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2014.
- [2] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, and S. Marx, “Locating Faults by the Traveling Waves They Launch,” proceedings of the 40th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2013.
- [3] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, and M. V. Mynam, “Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults,” proceedings of the 42nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2015.
- [4] A. T. Johns, “New Ultra-High-Speed Directional Comparison Technique for the Protection of EHV Transmission Lines,” IEE Proceedings C: Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 127, Issue 4, July 1980, pp. 228–239.
- [5] T. Takagi, J. Barbar, U. Katsuhiko, and T. Sakaguchi, “Fault Protection Based on Travelling Wave Theory, Part I: Theory,” IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Mexico, Paper A77, July 1977, pp. 750–753.
- [6] H. W. Dommel and J. M. Michels, “High Speed Relaying Using Traveling Wave Transient Analysis,” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, Paper No. A78, January/February 1978, pp. 214–219.
- [7] M. Vitins, “A Fundamental Concept for High Speed Relaying,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS–100, Issue 1, January 1981, pp. 163–173.