

Análise da Proteção de Distância Aplicada a Linhas de Transmissão de Circuito Duplo ^{*}

Jéssica Cristina M. da Silva ^{*} Maria Leonor S. de Almeida ^{*}
Diego Augusto M. Guidini ^{**}

^{*} *Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação,
Universidade Federal de Goiás, GO (e-mail:
jessicacristinamarquess@gmail.com, marialeonor@ufg.br)*

^{**} *Departamento de Subtransmissão da Regional Nordeste, CPFL
Energia, SP (e-mail: diego.a.m.guidini@gmail.com)*

Abstract: Considering the protection of double-circuit transmission lines, this article presents a comparative assessment between traditional and compensated distance protections, which considers the influence of the parallel circuit operating condition on the protected line. In addition, the distance protections are evaluated by phase comparators, such that the results of the impedance units are analyzed. For this, one real subtransmission system of 138 kV is modeled in the software Alternative Transient Program (ATP) and subjected to different single phase-to-ground fault and phase-to-phase-to-ground fault, varying the value of the fault resistance and the location of its application. From the obtained results, it is verified that for faults in the protected line, both protections present similar results. However, for faults in the parallel line, compensated protection provides better performance.

Resumo: Considerando a proteção de linhas de transmissão de circuito duplo, apresenta-se neste artigo uma avaliação comparativa entre as proteções de distância tradicional e compensada, a qual considera a influência da condição operativa do circuito paralelo à linha protegida. No mais, as proteções de distância são avaliadas por meio de comparadores de fase, tal que nos resultados são analisados a atuação das unidades de impedância. Assim, um sistema de subtransmissão real de 138 kV é modelado no *software Alternative Transient Program (ATP)* e submetido a diferentes curtos-circuitos monofásico e bifásico-terra, obtidos variando-se o valor da resistência de falta e o local de sua aplicação. Dos resultados, verifica-se que para curtos-circuitos na linha protegida, ambas as proteções apresentam resultados semelhantes. No entanto, para faltas na linha paralela, a proteção compensada apresenta melhor desempenho.

Keywords: Double-circuit transmission Line; distance protection; mutual coupling; real system; fault.

Palavras-chaves: Linha de transmissão de circuito duplo; proteção de distância; acoplamento mútuo; sistema real; curto-circuito.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo (LTCD), também denominadas neste trabalho de linhas em paralelo, é justificada pelas vantagens associadas a sua operação, quando comparada à operação de Linhas de Transmissão de Circuito Simples (LTCS), como citam Mourad e Eldin (2017). Por exemplo, para os mesmos comprimento e nível de tensão, as LTCD possuem maior capacidade de transferência de energia, pois dois circuitos trifásicos são empregados na transmissão da energia elétrica. Além disso, linhas em paralelo possuem maior confiabilidade operativa, porque caso um circuito fique inoperante, o outro pode continuar em operação suprindo a demanda total de energia. Ademais, como as LTCD compartilham a mesma torre de transmissão e, portanto, a mesma faixa de passagem, há uma redução no desmatamento necessário para a criação de novas faixas de servidão e também uma

economia na construção de novas torres. Dessa forma, e de acordo com Xu *et al.* (2011), o emprego de LTCD possui vantagens operativas, econômicas e ambientais superiores ao uso de LTCS.

Assim como as LTCS, as LTCD têm grande extensão e inevitavelmente são expostas a condições climáticas adversas. Por isso, linhas em paralelo também estão sujeitas a curtos-circuitos, os quais causam interrupção no fornecimento de energia elétrica, podendo resultar em maiores desligamentos no sistema elétrico. Diante disso, é essencial a implementação de um sistema de proteção nas LTCD, cuja função é detectar rapidamente curtos-circuitos no sistema elétrico e isolar as partes afetadas, garantindo então a integridade dos equipamentos elétricos e a continuidade no fornecimento de energia, como cita Silva (2010).

Segundo Ziegler (2011), a proteção de distância (função 21) é uma das mais utilizadas em linhas de transmissão. Simplificadamente, essa lógica calcula a impedância da

^{*} Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da CAPES.

linha como sendo a razão entre a tensão e a corrente medidas nos terminais da linha protegida. De acordo com Gonçalves (2007), se o valor da impedância calculada for menor que o valor pré-estabelecido, o relé atua.

Todavia, Roberts *et al.* (1993) explicam que o cálculo da impedância pelo relé de distância não se resume à razão entre tensão e corrente, uma vez que diversos fatores influenciam nessa medição, dentre eles: o carregamento de pré-falta, o valor da resistência de falta, a corrente capacitiva da linha e a presença de fontes intermediárias que geram correntes de *infeed* e *outfeed*. Esses fatores podem comprometer a correta atuação da função 21.

No que diz respeito às LTCD, Eissa (2018) afirma que a proteção de distância pode não atuar corretamente em casos de curtos-circuitos com elevada resistência de falta ou em faltas envolvendo fases de diferentes circuitos. Além disso, segundo Xu *et al.* (2011), o cálculo da impedância deve considerar também a presença do acoplamento mútuo entre os condutores dos diferentes circuitos.

Apostolov *et al.* (2007) destacam a influência do acoplamento mútuo de sequência zero no cálculo da impedância para curtos-circuitos que envolvem o terra. Segundo Mascher (2010), esse acoplamento mútuo resulta na circulação de corrente de sequência zero na linha não envolvida na falta. Ademais, como citam Pritchard *et al.* (2016), o fluxo de corrente em uma linha causa queda de tensão induzida na linha oposta. Com isso, a função 21 pode atuar incorretamente para defeitos na linha paralela ao circuito protegido.

A fim de solucionar essa dificuldade, alguns autores têm proposto novas formas de calcular a impedância de falta pelo relé de distância em LTCD. Por exemplo, Mascher (2010), Santos (2007), Eissa (2018) e Hu *et al.* (2002) sugerem uma proteção de distância compensada, na qual utiliza-se uma corrente de falta compensada no cálculo da impedância para mitigar o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero entre as linhas em paralelo.

Nesse contexto, este trabalho objetiva avaliar comparativamente as proteções de distância tradicional e compensada aplicadas às LTCD. Para tanto, um sistema de subtransmissão real de 138 kV, contendo duas linhas em paralelo de 126 km de comprimento, foi modelado no *software* ATP e submetido a diferentes curtos-circuitos, monofásico e bifásico-terra, obtidos variando-se o valor da resistência de falta e o local de aplicação do curto-circuito. Além disso, as proteções de distância tradicional e compensada são avaliadas por meio de comparadores de fase, sendo os resultados expressos por unidades de impedância.

2. EQUACIONAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO

As LTCD perfeitamente transpostas e equilibradas são definidas pela matriz Z_{abc} descrita na equação (1), na qual Z_S , Z_P e Z_m são, nessa ordem, as impedâncias própria da linha, mútua entre duas fases de um mesmo circuito trifásico e mútua entre duas fases de diferentes circuitos trifásicos. Em situações de desequilíbrio de tensão, as LTCD são representadas, no domínio das sequências, pela matriz Z_{012} , conforme equação (2), na qual Z_0 , Z_1 e Z_2 são as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa,

respectivamente, e Z_{m0} é a impedância de acoplamento mútuo de sequência zero dos circuitos (Neves, 2019). Ressalta-se que, em LTCD perfeitamente transpostas, Z_1 e Z_2 são consideradas iguais (T.Konishi, 1972).

$$\mathbf{Z}_{abc} = \begin{pmatrix} Z_S & Z_P & Z_P & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_P & Z_S & Z_P & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_P & Z_P & Z_S & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_S & Z_P & Z_P \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_P & Z_S & Z_P \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_P & Z_P & Z_S \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}_{012} = \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 & Z_{m0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{m0} & 0 & 0 & Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Por meio de Z_0 e Z_1 , os valores de Z_S , Z_P e Z_m podem ser calculados, conforme apresentado nas equações (3), (4) e (5), respectivamente (Neves, 2019).

$$Z_S = \frac{Z_0 + 2Z_1}{3} \quad (3)$$

$$Z_P = \frac{Z_0 - Z_1}{3} \quad (4)$$

$$Z_m = \frac{Z_{m0}}{3} \quad (5)$$

Fundamentado em Z_S , Z_P e Z_m , calculam-se os dados para modelagem das LTCD no *software* ATP, quais sejam Z_G , Z_L e Z_{IL} , que são determinados pelas equações (6), (7) e (8), nessa ordem (Leuven, 1987). Destaca-se que Z_G é o parâmetro de terra da linha, Z_L é o parâmetro da linha de circuito duplo e Z_{IL} é o parâmetro da linha associado ao acoplamento mútuo de sequência zero entre circuitos.

$$Z_G = Z_S + 2Z_m + 3Z_P \quad (6)$$

$$Z_L = Z_S - Z_m \quad (7)$$

$$Z_{IL} = Z_S + 2Z_m - 3Z_P \quad (8)$$

No presente trabalho, os valores de Z_0 , Z_1 e Z_{m0} , da LTCD do sistema real estudado, foram empregados no equacionamento supramencionado, de forma a permitir a modelagem das linhas em paralelo no *software* ATP.

3. PROTEÇÕES IMPLEMENTADAS

Dentre as características de operação da proteção de distância, neste trabalho, avaliou-se a característica mho polarizada por meio dos comparadores de fase, sendo a polarização realizada por memória de tensão de sequência positiva. Esse tipo polarização viabiliza o emprego das tensões de pré-falta ao invés das tensões nas fases defeituosas. Em casos de curtos-circuitos próximos aos terminais da linha, as tensões de fase passam a ter valores próximos de zero, o que pode comprometer a correta atuação de proteções (Ziegler, 2011), como a função 21 que depende de referências confiáveis de tensão, tanto em módulo quanto em ângulo.

Tabela 1. Sinais de entrada dos comparadores.

Unidade	Sinais de Tensão	Sinais de Corrente
Z_{AT}	\widehat{V}_{am}	$\widehat{I}_{Ga} + k_0 \widehat{I}_{G0} + k_{CD}$
Z_{BT}	\widehat{V}_{bm}	$\widehat{I}_{Gb} + k_0 \widehat{I}_{G0} + k_{CD}$
Z_{CT}	\widehat{V}_{cm}	$\widehat{I}_{Gc} + k_0 \widehat{I}_{G0} + k_{CD}$
Z_{AB}	$\widehat{V}_{am} - \widehat{V}_{bm}$	$\widehat{I}_{Ga} - \widehat{I}_{Gb}$
Z_{BC}	$\widehat{V}_{bm} - \widehat{V}_{cm}$	$\widehat{I}_{Gb} - \widehat{I}_{Gc}$
Z_{CA}	$\widehat{V}_{cm} - \widehat{V}_{am}$	$\widehat{I}_{Gc} - \widehat{I}_{Ga}$

Assim, a presente análise utiliza a memória de tensão de sequência positiva, segundo a qual um fator de esquecimento é ajustado para que a memória de tensão seja mantida por alguns ciclos após a falta, tal que prevaleça o valor da tensão de sequência positiva memorizada no instante antes da falta (\widehat{V}_{1m}), em detrimento da tensão de sequência positiva no instante da falta (\widehat{V}_1) (Silva e Almeida, 2016). Ressalta-se que, \widehat{V}_{1m} é determinado para a fase A e as tensões memorizadas nas demais fases são definidos com base na sequência de fases adotada.

Considerando o emprego da memória de tensão, o cálculo da impedância de sequência positiva depende do tipo de falta, conforme descrito na Tabela 1. Nessa tabela também são indicadas as seis unidades de impedância empregadas nos comparadores de fase, quais sejam as unidades fase-terra FT (Z_{AT} , Z_{BT} e Z_{CT}) e as unidades fase-fase FF (Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA}). Essas unidades atuam para todos os curtos-circuitos possíveis (Silva, 2010).

Para implementação da função 21 tradicional, comumente aplicada às LTCS, considera-se nulo o fator k_{CD} da Tabela 1 (Campos *et al.*, 2015). No mais, \widehat{V}_{am} , \widehat{V}_{bm} e \widehat{V}_{cm} são os fasores de tensão de fase memorizados; \widehat{I}_{Ga} , \widehat{I}_{Gb} e \widehat{I}_{Gc} são os fasores de corrente de fase da linha protegida; \widehat{I}_{G0} é o fasor da corrente de sequência zero da linha protegida; e k_0 é o fator de correção da corrente de sequência zero, expresso pela equação (9).

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad (9)$$

No entanto, na ocorrência de uma falta que envolva o terra em uma das linhas do circuito duplo, haverá acoplamento mútuo de sequência zero entre os diferentes circuitos do sistema (Apostolov *et al.*, 2007). Esse efeito do acoplamento mútuo de sequência zero em LTCD afeta a correta medição da impedância calculada pelo relé (Pritchard *et al.*, 2016). Logo, como a função 21 tradicional não considera esse efeito, sua operação pode ser comprometida quando aplicada em linhas em paralelo.

Diante disso, para assegurar a atuação da proteção de distância em LTCD, realiza-se uma compensação no cálculo da impedância, a qual inclui a influência do acoplamento mútuo de sequência zero entre os diferentes circuitos das linhas em paralelo. Para tanto, deve-se considerar a corrente de sequência zero da linha remanescente (\widehat{I}_{H0}). Sendo assim, o fator k_{CD} , indicado na Tabela 1, é diferente de zero e calculado conforme equação (10). Então, na função 21 compensada, são contempladas as correntes de sequência zero da linha defeituosa e da linha sadia.

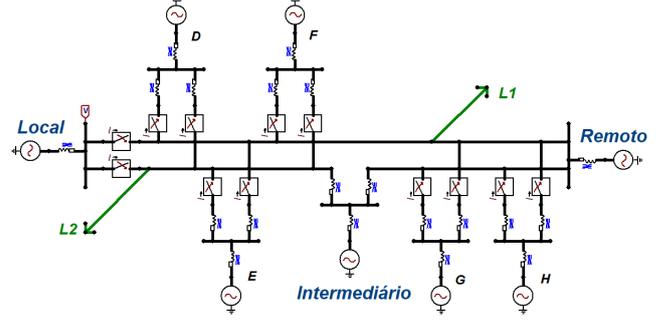


Figura 1. Modelo simplificado do sistema analisado.

$$k_{CD} = \frac{Z_{m0}}{3Z_1} \widehat{I}_{H0} \quad (10)$$

Para que o relé de distância seja interpretado como um comparador de fase, avalia-se a defasagem entre os fasores de tensão de operação (\widehat{V}_{op}) e tensão de polarização (\widehat{V}_{pol}), os quais são determinados como descrito nas equações (11) e (12), respectivamente (Silva, 2010).

$$\widehat{V}_{op}(k) = -\widehat{V}_R(k) + \frac{hZ_{L1}}{\cos(\theta_{L1} - \tau)} \widehat{I}_C(k) \quad (11)$$

$$\widehat{V}_{pol}(k) = \widehat{V}_{1m}(k) \quad (12)$$

Sendo: k o k -ésimo instante de amostragem; \widehat{V}_R o fasor tensão medido no terminal da linha protegida; \widehat{I}_C o fasor de corrente definido a depender da unidade, conforme indicado na Tabela 1; h a porcentagem a ser protegida do comprimento total da linha; Z_{L1} a impedância de sequência positiva calculada como a razão entre os fasores de tensão e corrente para cada unidade, como apontado na Tabela 1; θ_{L1} o ângulo de Z_{L1} ; e τ o ângulo de projeto da característica mho, ou ângulo de torque máximo do relé. Assim, o comparador de fase detecta uma falta interna a sua zona de proteção, caso o ângulo entre os fasores \widehat{V}_{op} e \widehat{V}_{pol} esteja entre -90° e 90° .

4. SISTEMA ANALISADO

A avaliação comparativa das proteções de distância, tradicional e compensada, foi realizada empregando-se o *software* ATP para simular a operação de um sistema real composto por LTCD, quando submetido a diferentes curtos-circuitos. Na Figura 1 apresenta-se um modelo simplificado do sistema analisado, o qual é composto por três fontes de tensão de 138 kV (60 Hz), implementadas como Equivalentes de Thévenin e denominadas de terminais *Local*, *Remoto* e *Intermediário*. Destaca-se que, os terminais *Local* e *Remoto* são conectados por duas linhas em paralelo de 138 kV e 126 km de extensão, sendo elas $L1$ e $L2$, as quais foram modeladas em trechos, respeitando os comprimentos reais entre as derivações do sistema. O terminal *Intermediário* está conectado na linha $L2$, entre os terminais *Local* e *Remoto*.

Além do terminal *Intermediário*, há derivações em paralelo nas linhas $L1$ e $L2$, que correspondem às cidades, as quais são alimentadas por esse sistema de subtransmissão. Destaca-se que, apesar dessas cidades estarem conectadas

Tabela 2. Parâmetros das linhas de transmissão em paralelo.

Parâmetro	Símbolo	Valor [Ω/km]
Resistência	R_G	$4,3901 \cdot 10^{-4}$
	R_L	$6,765 \cdot 10^{-5}$
	R_{IL}	$6,765 \cdot 10^{-5}$
	X_G	$1,4471 \cdot 10^{-3}$
Reatância Indutiva	X_L	$2,49583 \cdot 10^{-5}$
	X_{IL}	$1,87668 \cdot 10^{-4}$
	Y_G	$3,15444 \cdot 10^{-3}$
Admitância	Y_L	$4,25537 \cdot 10^{-3}$
	Y_{IL}	$5,3563 \cdot 10^{-3}$

em ambas as linhas do circuito duplo, elas são alimentadas por apenas uma das linhas, pois em uma das ramificações a chave de conexão é mantida aberta, enquanto na outra ramificação, a chave fica fechada. Assim, as cidades D e F estão conectadas à $L1$ e as cidades E , G e H estão conectadas à $L2$. Esse esquema de ligação, na qual há possibilidade de conectar as cidades em ambas as linhas do circuito duplo, proporciona maior confiabilidade ao sistema, podendo manter todas cidades alimentadas, mesmo quando ocorrer falta em uma das linhas.

Na modelagem das LTCD no *software* ATP, ambos os circuitos trifásicos foram representados como um único circuito duplo, com transposição individual por fase (Leuven, 1987). Além disso, as linhas foram modeladas a parâmetros distribuídos e considerando o acoplamento mútuo de sequência zero entre elas.

Fundamentado no equacionamento desenvolvido na seção 2 e nos dados das linhas em paralelo, determinaram-se os valores de Z_G , Z_L e Z_{IL} , os quais são descritos na Tabela 2. Destaca-se que os dados obtidos para a implementação do sistema real foram a resistência elétrica, a reatância indutiva, a admitância, a resistência elétrica mútua e a reatância indutiva mútua, tanto de sequência positiva quanto de sequência zero.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas análises desenvolvidas neste trabalho, considerou-se a instalação do relé 21 na extremidade *Local* de $L1$ e avaliou-se a atuação da 1° zona, tal que a proteção atua para faltas em até 85 % de $L1$ ($h = 0,85$), sem retardo de atuação intencional (Silva, 2010). Avaliou-se ainda a atuação em 2° zona, tal que a proteção atua para faltas em $L2$, com retardo de atuação intencional de 400 ms, mais o tempo para detecção da falta.

Algoritmos de seleção de fases são utilizados para identificar a fase defeituosa e habilitar a operação da unidade de impedância dessa fase (Stokes-Waller, 2006). Todavia, neste trabalho, foi desconsiderada a utilização de qualquer lógica para seleção da fase defeituosa, tal que a característica mho polarizada foi interpretada e avaliada com base em todos os comparadores, tanto unidades de impedância FT quanto FF .

Para a lógica da proteção de distância tradicional, foram efetuadas as medições de tensões e correntes por fase, próximo ao terminal *Local* de $L1$. Além dessas medições, para implementação da proteção de distância compensada, também foram efetuadas as medições de correntes por fase

Tabela 3. Características das faltas simuladas.

Caso	Linha em falta	Tipo de Falta	R_f
1	L_1	AT	0Ω
2	L_1	AT	25Ω
3	L_1	ABT	0Ω
4	L_1	ABT	25Ω
5	L_2	AT	0Ω
6	L_2	AT	25Ω
7	L_2	ABT	0Ω
8	L_2	ABT	25Ω

Tabela 4. Atuação das unidades FF .

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8
Z_{AB}	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
Z_{BC}	-	-	✓	✓	-	-	-	-
Z_{CA}	✓	-	✓	✓	-	-	-	-

próximo ao terminal *Local* de $L2$. Com as medições das correntes por fase, calcularam-se os valores de corrente de sequência zero nas duas linhas.

Para avaliar comparativamente o desempenho das funções 21 tradicional e compensada, foram simulados diferentes curtos-circuitos, cujas características são descritas na Tabela 3, sendo R_f a resistência de falta. Ressalta-se que o ângulo τ é ajustado para ser igual a θ_{L1} e as faltas são sempre aplicadas em 100 ms e na metade do trecho entre as ramificações D e E , na LTCD.

Vale justificar que apenas curtos-circuitos monofásicos e bifásicos-terra foram avaliados, pois em faltas que não envolvem o terra não há circulação de corrente de sequência zero. Dessa forma, o desenvolvimento matemática das proteções de distância tradicional e compensada são iguais, tornando desnecessária a avaliação comparativa das proteções para as faltas trifásicas e bifásicas. Logo, como as unidades de impedância FF não dependem da sequência zero, conforme descrito na Tabela 1, em ambas as proteções o desempenho das unidades FF são iguais.

Assim, como o objetivo principal deste trabalho é analisar a influência da corrente de sequência zero, e essa não é contemplada diretamente nas unidades FF , apenas os gráficos das unidades de impedância FT são exibidos. Nesse contexto, apresentam-se os gráficos das unidades FT da função tradicional (Z_{ATtr} , Z_{BTtr} e Z_{CTtr}) e da função compensada (Z_{ATco} , Z_{BTco} e Z_{CTco}). Os resultados da operação das unidades de FF , definidos como Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA} , são apresentados na Tabela 4.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 2, referente ao Caso 1, aplicando um curto-circuito franco monofásico na fase A em $L1$, as unidades Z_{ATtr} , Z_{ATco} são sensibilizadas em 1° zona e operam de forma instantânea. As unidades Z_{AB} e Z_{CA} também atuam instantaneamente, uma vez que envolvem a fase A , que é a fase defeituosa. Ambas as proteções atuam corretamente para este caso.

Considerando o Caso 2, cujos resultados são exibidos na Figura 3, na ocorrência de uma falta monofásica na fase A , com $R_f = 25 \Omega$, em $L1$, as unidades Z_{ATtr} e Z_{ATco} são sensibilizadas em 1° zona e atuam instantaneamente. As unidades da fase C também operam em 1° zona, porém com tempos de detecção maiores, de 6 ms e 13 ms, para Z_{CTtr} e Z_{CTco} , respectivamente. A unidade FF Z_{AB} opera com tempo de detecção de 5 ms. Nota-se que, com

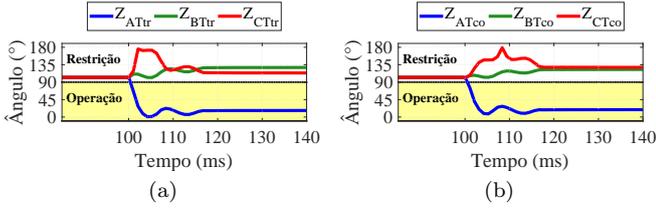


Figura 2. Caso 1: (a) Tradicional; (b) Compensada.

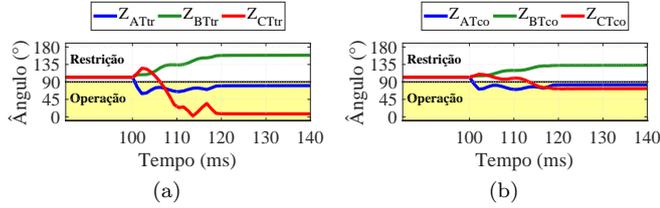


Figura 3. Caso 2: (a) Tradicional; (b) Compensada.

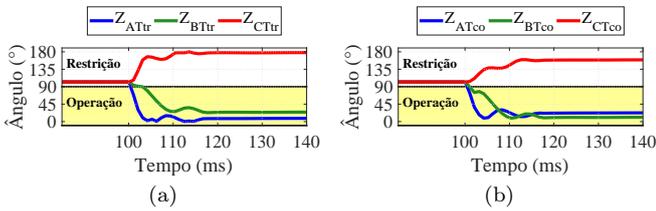


Figura 4. Caso 3: (a) Tradicional; (b) Compensada.

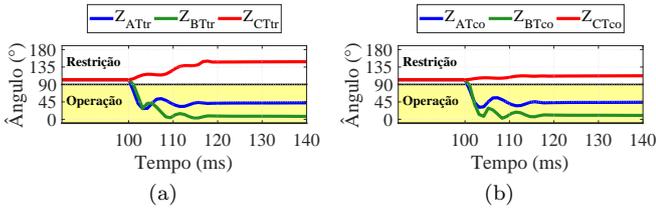


Figura 5. Caso 4: (a) Tradicional; (b) Compensada.

o aumento de R_f , as unidades de impedância das fases sãs passam a ser sensibilizadas em ambas as funções 21.

Para os Casos 3 e 4, cujos resultados são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente, verifica-se que na ocorrência de uma falta bifásica-terra entre as fases A e B, sendo ela franca ou com $R_f = 25\Omega$, as unidades Z_{ATr} , Z_{ATco} , Z_{BTr} , Z_{BTco} são sensibilizadas em 1° zona e atuam de forma instantânea. As unidades Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA} também são sensibilizadas, sendo que Z_{BC} opera com tempo de detecção de 5 ms, enquanto as outras unidades FF atuam instantaneamente. Observa-se que as unidades FF são sensibilizadas quando pelo menos uma das fases está envolvida na falta.

Verifica-se, dos resultados obtidos nos Casos 1 a 4, que para curtos-circuitos envolvendo o terra na linha protegida LL , as funções de distância tradicional e compensada atuam de forma semelhante, por meio das mesmas unidades de impedância. Dessa forma, conclui-se que para faltas na linha protegida, o parâmetro de compensação do acoplamento mútuo entre as LTCD não interfere na atuação da proteção compensada, tal que ela não apresenta benefícios relevantes em relação à proteção tradicional.

De acordo com a Figura 6, correspondente ao resultado do Caso 5, nota-se que na ocorrência de curto-circuito

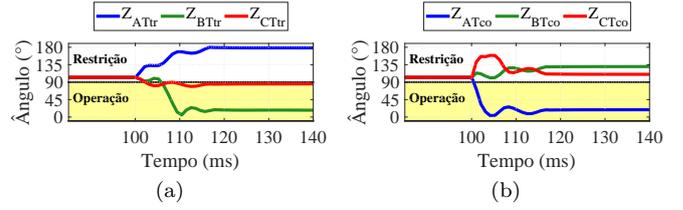


Figura 6. Caso 5: (a) Tradicional; (b) Compensada.

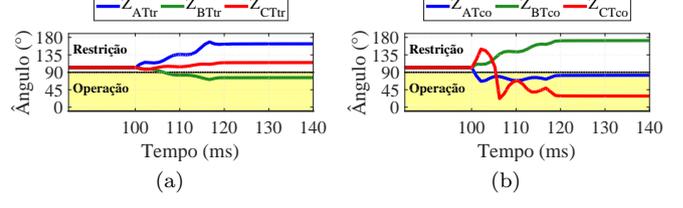


Figura 7. Caso 6: (a) Tradicional; (b) Compensada.

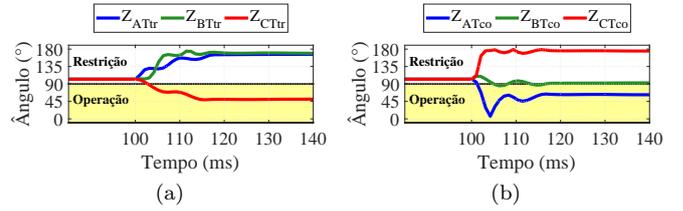


Figura 8. Caso 7: (a) Tradicional; (b) Compensada.

monofásico franco na fase A em $L2$, as unidades Z_{BTr} e Z_{CTr} foram sensibilizadas em 2° zona com tempos de detecção de 2 ms e 7 ms, respectivamente. A unidade Z_{ATco} também foi sensibilizada em 2° zona, porém sem atraso na detecção. As unidades FF não atuaram para essa falta. Assim, afirma-se que a proteção compensada apresentou melhor desempenho, pois somente sua unidade FT da fase defeituosa identificou a falta, e o fez instantaneamente. Enquanto as unidades FT das fases sãs atuaram, de forma mais demorada, para a proteção tradicional.

Com base na Figura 7, correspondente ao resultado do Caso 6, observa-se que na ocorrência de uma falta monofásica na fase A com $R_f = 25\Omega$ em $L2$, a unidade Z_{BTr} operou em 2° zona, com tempo de detecção de 7 ms. As unidades Z_{ATco} e Z_{CTco} também foram sensibilizadas em 2° zona, porém detectaram a falta instantaneamente. As unidades FF não atuaram para essa falta. Afirma-se, portanto, que a proteção compensada apresentou melhor desempenho ao identificar a falta na fase defeituosa, mesmo operando para Z_{CTco} , enquanto a proteção tradicional falhou sensibilizando apenas uma fase sã.

De acordo com a Figura 8, correspondente ao resultado do Caso 7, nota-se que na ocorrência de curto-circuito bifásico-terra entre as fases A e B franco em $L2$, a unidade Z_{CTr} foi sensibilizada com tempo de detecção de 3 ms, enquanto a unidade Z_{ATco} detectou instantaneamente, ambas em 2° zona. No mais, as unidades FF não atuaram para essa falta. Assim, a proteção compensada detectou apenas uma das fases defeituosas, enquanto a outra fase esteve no limiar de operação.

Com base na Figura 9, correspondente ao resultado do Caso 8, observa-se que na ocorrência de curto-circuito bifásico-terra entre as fases A e B com $R_f = 25\Omega$ em $L2$, nenhuma das unidades de impedância FT ou FF foi

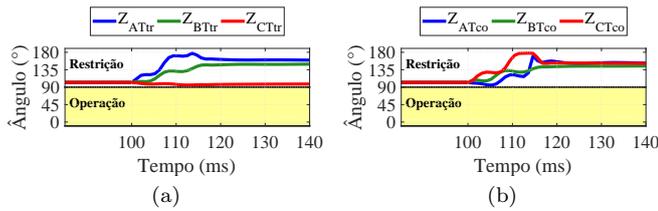


Figura 9. Caso 8: (a) Tradicional; (b) Compensada.

sensibilizada. Conclui-se dos Casos 5 a 8, que a função 21 tradicional não atua corretamente para faltas na linha paralela, enquanto a função 21 compensada detectou, na maioria dos casos, a fase defeituosa.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se comparativamente o desempenho das proteções de distância tradicional e compensada, quando aplicadas em um sistema real com LTC D 138 kV. Para tanto, diferentes curtos-circuitos envolvendo o terra foram aplicados em ambas as linhas do sistema, variando-se também o valor da resistência de falta.

Dos resultados obtidos, observou-se que faltas na linha protegida ($L1$) causam atuações semelhantes, na 1^o zona das unidades FT , das proteções tradicional e compensada, independente do valor da resistência de falta. Todavia, curtos-circuitos na linha paralela ($L2$) afetam significativamente a função 21 tradicional, comprometendo a atuação de suas unidades FT . Em contrapartida, para faltas em $L2$, verifica-se que a proteção compensada, a qual atua em 2^o zona por meio das unidades FT , apresenta melhor desempenho, mesmo quando o valor de R_f é diferente de zero. Além disso, a função 21 compensada possui tempo de detecção menor e pelo menos uma das fases defeituosas foi identificada, na maioria dos casos. Ademais, verifica-se que as unidades FF são menos sensíveis para curtos-circuitos em 2^o zona, uma vez que nenhuma atuou para faltas em $L2$.

Nesse contexto, conclui-se que a proteção de distância compensada apresenta desempenho superior à lógica tradicional, pois em sua implementação é minimizado o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero entre as linhas em paralelo. Não obstante, a função 21 compensada também apresentou falhas na operação, deixando de identificar o curto-circuito bifásico terra com elevada resistência de falta. Dessa forma, a fim de solucionar esse problema, propõe-se analisar futuramente a implementação da característica quadrilateral para proteção do sistema analisado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Goiás e a CAPES pelo suporte à pesquisa deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Apostolov, A., Tholomier, D., Sambasivan, S., e Richards, S. (2007). *Protection of double circuit transmission lines*. Em *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 85–101. IEEE.

Campos, A.K.X.S., Júnior, D.F., Nascimento, J.P., e Neves, W.L.A. (2015). Influência dos erros transitórios

apresentados pelos TC e TPC na atuação de um relé de distância. Em *XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica-CBQEE*.

Eissa, M.M. (2018). *A new wide-area protection scheme for single-and double-circuit lines using 3-D-phase surface*. IEEE Transactions on Power Delivery, 33(6), 2613–2623.

Gonçalves, D.N. (2007). Desempenho do relé de distância em linhas de transmissão compensadas com tcsc. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Hu, Y., Novosel, D., Saha, M.M., e Leitloff, V. (2002). *An adaptive scheme for parallel-line distance protection*. IEEE Transactions on Power Delivery, 17(1), 105–110.

Leuven, E.C. (1987). ATP - Alternative Transients Program: Rule Book. EMTP.

Mascher, L.J.D. (2010). Análise do desempenho de algoritmos de proteção de distância frente às faltas monofásicas ‘abordagem tendo em vista uma proteção adaptativa’. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá.

Mourad, D. e Eldin, E.H.S. (2017). *Adaptive single ended protection scheme for parallel transmission lines*. Em *19th International Middle East Power Systems Conference*, 1208–1215. IEEE.

Neves, E.T. (2019). Proteção diferencial longitudinal e transversal de linhas de transmissão de circuito duplo: ‘modelagem e simulação do plano alfa’. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

Pritchard, C., Hensler, T., Coronel, J., e Gachuz, D. (2016). *Test and analysis of protection behavior on parallel lines with mutual coupling*. Em *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America*, 1–5. IEEE.

Roberts, J., Guzman, A., Schweitzer, E.O., et al. (1993). *Z = V/I does not make a distance relay*. Em *20th Annual Western Protective Relay Conference*, 19–21.

Santos, V.A. (2007). Proteção de distância aplicada a linhas de transmissão em circuito duplo. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Silva, K.M. (2010). Estimativa de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande.

Silva, K.M. e Almeida, M.L.S. (2016). Filtro de memória de tensão de sequência positiva para uso em relés numéricos microprocessados. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. Natal, Brasil, 46.

Stokes-Waller, E. (2006). *Distance Protection: Pushing the Envelope*. Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, USA.

T.Konishi (1972). Comportamento dos relés de distância em linha de circuito duplo. Em *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Grupo de Estudos de Sistema de Potência da CESP.

Xu, Z.Y., Li, W., Bi, T.S., Xu, G., e Yang, Q.X. (2011). *First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross-country nonearthed faults*. IEEE Transactions on Power Delivery, 26(4), 2486–2494.

Ziegler, G. (2011). Numerical distance protection: principles and applications. John Wiley & Sons.