

Evaluation of the fault resistance effect of transmission lines on distance protection

Suellen Paula de Oliveira e Silva*
Jéssica Santoro Gonçalves Pena** Kleber Melo e Silva***

* *Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF,
(e-mail: suelleneel@gmail.com)*

** *Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF,
(e-mail: jessicasantorog@gmail.com)*

*** *Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF,
(e-mail: klebermelo@unb.br).*

Abstract: This paper presents a performance evaluation of two algorithms related in the literature to mitigate the fault resistance effect of transmission lines on distance protection. To do so, their performances were compared to the one of the traditional formulation. The ATP (Alternative Transients Program) was used to model a 60 Hz/500 kV transmission line 200 km long. The performances of the algorithms are evaluated by changing parameters of fault location, fault resistance, power source and power system load. The obtained results reveal that the evaluated algorithms present significant improvements, when compared to the traditional formulation.

Resumo: Este artigo apresenta uma avaliação de dois algoritmos relatados na literatura para mitigar o efeito da resistência de falta em linhas de transmissão, na proteção de distância. Para tanto, seus desempenhos foram comparados aos da formulação tradicional. O Programa ATP (*Alternative Transients Program*) foi utilizado para modelar uma linha de transmissão de 60 Hz/500 kV com 200 km de comprimento. Os desempenhos dos algoritmos são avaliados alterando parâmetros de localização de falta, ângulo de carregamento, força da fonte e resistência de falta. Os resultados obtidos revelam que os algoritmos avaliados apresentam melhorias significativas, se comparados a formulação tradicional.

Keywords: transmission lines; distance protection; fault resistance effect.

Palavras-chaves: linhas de transmissão; proteção de distância; efeito da resistência de falta.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda pelo fornecimento de energia elétrica está relacionada ao desenvolvimento da sociedade. As linhas de transmissão (LTs) correspondem ao elemento mais abundante do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo responsáveis pela interligação entre as unidades geradoras e os centros consumidores. Tendo em vista suas dimensões físicas, as LTs são muito suscetíveis às faltas. Assim, para suprir a essa demanda e garantir um fornecimento de energia, com qualidade e continuidade, são necessários sistemas de proteção cada vez mais eficazes (Horowitz and Phadke, 2008).

O tipo de função de proteção mais empregado em LTs é a função de distância, que obtém como grandeza de entrada a relação da distância entre a localização do relé e o ponto de localização da falta. O relé então compara a impedância de sequência positiva do trecho afetado e a impedância de alcance da função de distância. Entretanto, o desempenho da proteção de distância, com base no método tradicional, pode ser afetado negativamente por influências externas

impostas pelo sistema elétrico, como pela resistência de falta, ameaçando a segurança do sistema de fornecimento de energia (Ziegler, 2006).

Muitas pesquisas foram feitas para minimizar a influência da resistência de falta nos relés de distância convencionais. Em Upendar (2012) foi mostrado o ajuste adaptativo do limite de operação da proteção para melhorar sua imunidade à resistência de falta. Em Ying Z. (2014) um critério de proteção baseado no resultado da comparação entre a distância de falta calculada e o alcance da proteção, em vez da zona de proteção medida pela impedância aparente. Em J. Ma and Thorp (2017) o novo critério de proteção é baseado em compensar a impedância suplementar de falta causada pela resistência à falta, para que a impedância medida possa refletir a distância entre o local do relé e o local da falta com mais precisão. J. Ma and Thorp (2016) apresentaram um esquema de proteção para faltas monofásicas, que utiliza informações de fase de tensão para eliminar o efeito negativo da resistência a falta.

Em Xu et al. (2010) foi descrito um novo algoritmo para calcular a impedância por fase entre os pontos de medição e de falta em uma linha de transmissão, considerando o efeito da corrente de carga e da resistência de falta. O

* Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da CAPES, na forma de concessão de bolsas de doutorado.

algoritmo proposto, que foi elaborado para a função de proteção de distância, considera que a tensão no ponto de falta e a corrente de falta estão em fase uma com a outra. Este artigo ilustra as características do algoritmo proposto e avalia seu desempenho.

Em Liang et al. (2019) foi apresentado um novo método de cálculo de impedância de falta, para melhorar o desempenho da função de proteção de distância frente à resistência de falta. A impedância de falta da linha, a impedância suplementar e a impedância medida são rotacionadas simultaneamente no plano complexo até que a impedância suplementar coincida com a direção positiva do eixo real. Após a relação geométrica entre a impedância de falta e a impedância medida rotacionadas no plano complexo, a distância da falta e a impedância de falta da linha são determinadas. Segundo os autores, o método proposto é imune à resistência de falta, às variações do ângulo de carregamento e localização de falta. Os resultados da simulação mostram que o método proposto pode calcular com precisão a distância real da falta e identificar corretamente as faltas dentro e fora da zona de proteção, para vários tipos de faltas.

O presente trabalho visa avaliar dois algoritmos relatados na literatura, para mitigar o efeito da resistência de falta, descritos em Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019). Para tanto, foi analisado o desempenho da proteção de distância aplicada a uma linha de transmissão de 500kV e 200km de comprimento. Os métodos propostos foram avaliados por meio da variação dos parâmetros: resistência e localização de falta, carregamento do sistema e força das fontes. De um modo geral, conclui-se que as estratégias propostas levam à uma melhora significativa do desempenho da proteção de distância frente a formulação tradicional.

2. FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

2.1 Proteção de Distância Tradicional

Para medir a distância entre o ponto em que está instalado o relé e a localização da falta, o relé recebe os sinais de tensão e corrente e então calcula a impedância aparente. De fato, a função de proteção de distância é fundamentada desconsiderando o efeito da resistência de falta que ocasiona o mau funcionamento do relé, influenciando na atuação da função de distância. Neste caso, o valor da impedância medida pelo relé de distância é alterado e, a depender da topologia da rede, podem existir casos de sobrealcançe ou subalcançe. Na equação abaixo é exibida a impedância de unidade monofásica da função de distância convencional (Z_φ).

$$Z_\varphi = \frac{\hat{U}_\varphi}{\hat{I}_\varphi + 3K_0\hat{I}_0} \quad (1)$$

sendo K_0 o fator de compensação de sequência zero; \hat{U}_φ a tensão da fase em falta; \hat{I}_φ a corrente da fase em falta; \hat{I}_0 a corrente de sequência zero.

2.2 Algoritmo Proposto por Xu et al.

Xu et al. (2010) propôs uma solução para mitigar a influência da resistência de falta na atuação da função de

distância, evitando condições de sobrealcançe ou subalcançe. Para eliminar o efeito da resistência de falta e da corrente de carga, considerou-se que para qualquer falta em uma linha de transmissão em um sistema de energia, a impedância de falta é predominantemente resistiva. Como resultado, a tensão do ponto de falta e a corrente de falta estão sempre em fase uma com a outra.

Formulação do algoritmo

$$\Delta\hat{I}_{\phi 12} = (C_1 + C_2)\frac{1}{3}\hat{I}_f \quad (2)$$

$$Arg(\hat{U}_f) = Arg(\Delta\hat{I}_{\phi 12}) \quad (3)$$

onde:

$$\hat{U}_f = \hat{U}_\varphi - Z_1(\hat{I}_\varphi + 3k\hat{I}_0) \quad (4)$$

sendo $k = \frac{(Z_0 - Z_1)}{3Z_1}$ o fator de compensação de sequência zero; $\Delta\hat{I}_{\phi 12}$ representa a corrente de sequência positiva e negativa incremental; C_1, C_2 contribuição de curto-circuito; \hat{I}_f corrente de falta; \hat{U}_f tensão de falta; \hat{U}_φ tensão da fase em falta; x localização da falta; Z_1 impedância de sequência positiva da linha; \hat{I}_φ corrente de fase em falta; \hat{I}_0 corrente de sequência zero.

Os valores de \hat{U}_f e $\Delta\hat{I}_{\phi 12}$ podem ser expressos em partes reais e imaginárias. Manipulando as equações, e isolando o valor de x (distância da falta), obtém-se a seguinte expressão:

$$a = Z_1(I_\varphi + 3kI_0) \quad (5)$$

$$x = \frac{Im(\Delta\hat{I}_{\phi 12})Re(U_\varphi) - Re(\Delta\hat{I}_{\phi 12})Im(\hat{U}_\varphi)}{Im(\Delta\hat{I}_{\phi 12})Re[a] - Re(\Delta\hat{I}_{\phi 12})Im[a]} \quad (6)$$

A impedância aparente medida pelo relé pode ser expressa da seguinte forma:

$$Z_\varphi = xZ_1 \quad (7)$$

2.3 Algoritmo Proposto por Liang et al.

O algoritmo proposto por Liang et al. (2019), assim como a proposta de Xu et al. (2010), também considera a influência da resistência de falta em sua formulação, diferentemente do método tradicional. O método de Liang et al. (2019) calcula a impedância da linha de falta e a distância da falta a partir da relação geométrica entre a impedância da linha de falta rotacionada e a impedância medida rotacionada. A relação geométrica da impedância medida, da impedância da linha de falta e da impedância suplementar é mostrada na Fig.1.

Da Fig.1, φ_{linha} é o ângulo de impedância da linha; φ_m é a fase da impedância medida Z_m ; φ_{linha} é a fase da impedância suplementar ΔZ ; Z' é a impedância da linha de falta rotacionada; Z'_m é a impedância medida rotacionada; $\Delta Z'$ é a impedância suplementar rotacionada; φ_{linha} e φ_m são as fases de Z' e Z'_m , respectivamente.

A impedância de falta da linha é expressa como:

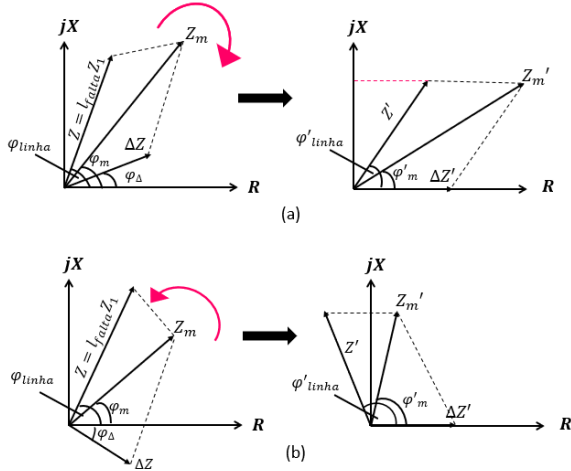


Figura 1. Impedância no plano complexo.(a) ΔZ é resistivo-indutivo.(b) ΔZ é resistivo-capacitivo

$$Z = \frac{|Z_m| \sin(\varphi_m - \varphi_\Delta)}{|Z_1| \sin(\varphi_{linha} - \varphi_\Delta)} \cdot (\cos \varphi_{linha} - j \sin \varphi_{linha}) \quad (8)$$

φ_{linha} é conhecida e Z_m e φ_m podem ser obtidos com uma transformada de Fourier. Portanto, para calcular a impedância de falta da linha Z é necessário resolver φ_Δ , que é expresso sendo:

$$\varphi_\Delta = \text{Arg}(\hat{I}_f) - \text{Arg}(\hat{I}_m) \quad (9)$$

O cálculo da estimação de \hat{I}_f é demonstrado no artigo de Liang et al. (2019).

3. SISTEMA ANALISADO

O sistema elétrico ilustrado na Fig. 2 foi implementado no software ATP. Nos terminais da linha, são representados circuitos equivalente de Thévenin, cujas impedâncias são definidas por meio do SIR (*System-to-line Impedance Ratio*), que é calculado como a razão entre as impedâncias da fonte e da LT, de onde vem a notação SIR_L para o terminal local e SIR_R para o terminal remoto. A LT utilizada para análise é de 500 kV e 200 km, modelada como perfeitamente transposta a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência.

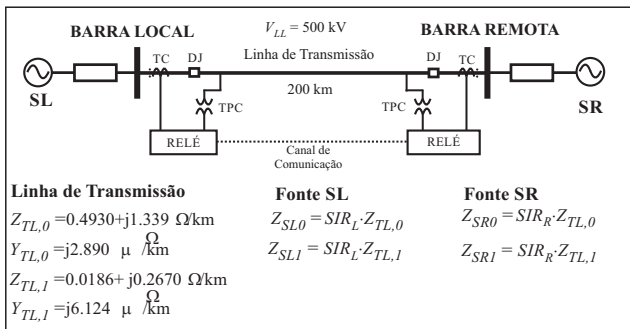


Figura 2. Sistema elétrico analisado.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A avaliação do desempenho dos algoritmos propostos em Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) foi realizada por meio da análise de transitório de curto-circuito e por meio de análises de sensibilidade paramétrica, variando os seguintes parâmetros: resistência de falta, localização de falta, ângulo de carregamento do sistema e força das fontes, a fim de verificar a influência de cada uma das variáveis envolvidas no curto-circuito.

4.1 Análise de Transitório de Curto-Circuito(ATC)

No Caso 1, cujo resultado é apresentado nas Figuras 3 e 4, foi simulado um curto-circuito AT com resistência de falta de $50 \ \Omega$, considerando uma falta em 50 % da linha, o sistema operando com ambas as fontes fracas e com carregamento de $\delta = 15^\circ$ ($SIR_L = 1,0$; $SIR_R = 1,0$).

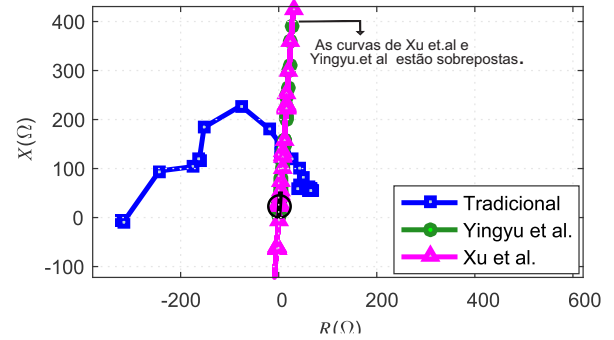


Figura 3. Caso 1- curto-circuito AT com resistência de falta de $50 \ \Omega$

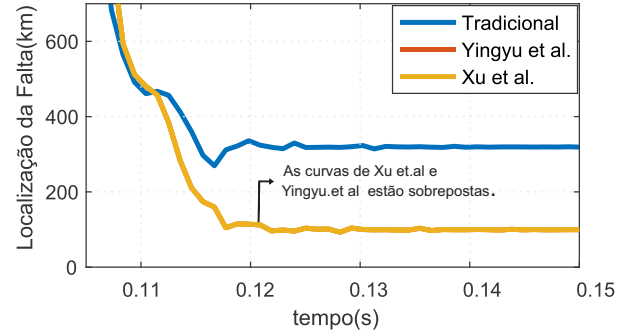


Figura 4. Caso 1 - Localização do curto-circuito AT com resistência de falta de $50 \ \Omega$.

Para esse cenário, observa-se que a formulação tradicional não atua, já que não contempla o efeito da resistência de falta, fazendo com que a impedância medida pelo relé de distância seja deslocada a direita do eixo resistivo. Já nas formulações propostas por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) as estratégias de remoção do efeito da resistência de falta localizam o ponto do defeito corretamente, entretanto os algoritmos apresentam comportamento instáveis até alcançarem o regime permanente de falta. Na Figura 4 é apresentada a localização da falta obtida pelos métodos em análise. Observa-se que o método tradicional subalcança, já que a linha de transmissão em análise tem 200 km mas a função de distância localiza a falta em 300 km. As curvas

referentes aos métodos de Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) estão sobrepostas, e localizam corretamente a falta em 50% da linha (100 km).

4.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica (ASP)

No caso 1, de análise de sensibilidade paramétrica, cujo resultado é apresentado nas Figuras 5 e 6, foi simulado um curto-circuito AT com resistência de falta de 10Ω , variando a localização da falta, o sistema operando com ambas as fontes fortes e com carregamento baixo de -5° ($SIR_L = 0, 1; SIR_R = 0, 1$).

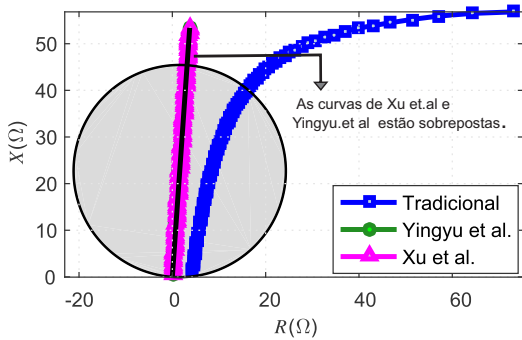


Figura 5. Caso 1 (ASP)- curto-circuito AT com resistência de falta de 10Ω .

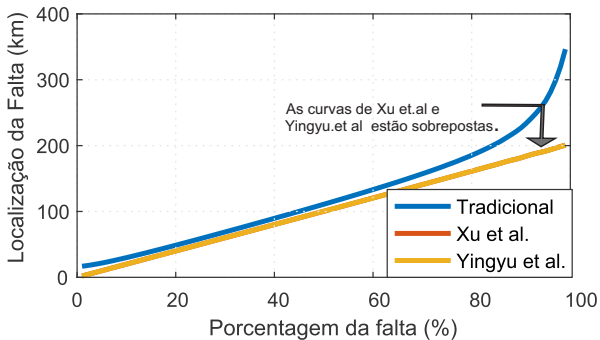


Figura 6. Caso 1(ASP) - Localização x % da Localização da Falta.

Para esse cenário, observa-se que os algoritmos propostos por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) apresentam vantagem com relação à formulação tradicional da proteção de distância, calculando a impedância que deve ser vista pelo relé corretamente, enquanto a formulação tradicional subalcança, já que não contempla em sua formulação o efeito da resistência de falta, fazendo com que a impedância medida pelo relé de distância seja deslocada a direita do eixo resistivo. Na Figura 6, em que as curvas referentes aos métodos de Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) estão sobrepostas, fica evidente que de acordo com a variação da localização da falta (referente ao eixo das abscissas) ambos algoritmos localizam corretamente a falta. Já na formulação tradicional observa-se um comportamento de subalcançe a medida que se aumenta a porcentagem do local da falta, fato que acontece devido ao efeito da resistência de falta.

No caso 2, de análise de sensibilidade paramétrica, cujo resultado é apresentado nas Figuras 7 e 8, foi simulado

um curto-circuito AT com resistência de falta de 100Ω , variando a localização da falta, o sistema operando com ambas as fontes fortes e com carregamento de -30° ($SIR_L = 0, 1; SIR_R = 0, 1$).

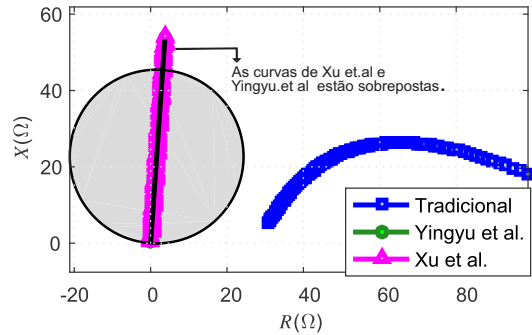


Figura 7. Caso 2 (ASP)- curto-circuito AT com resistência de falta de 100Ω .

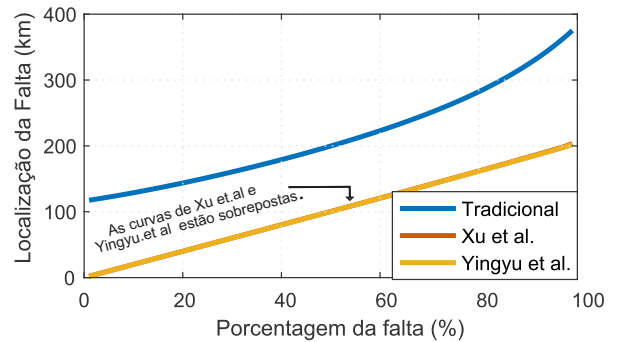


Figura 8. Caso 2 (ASP) - Localização x % da Localização da Falta .

Para esse cenário, fica evidente que as estratégias propostas por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019), mais uma vez apresentam vantagens quando comparadas à proteção de distância tradicional, calculando a impedância que deve ser vista pelo relé corretamente, enquanto a formulação tradicional apresenta maior subalcançe, que no caso anterior esse comportamento deve-se ao fato do valor maior da resistência de falta. Na Figura 8, em que as curvas referentes aos métodos de Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) estão sobrepostas nota-se que ambas metodologias localizam corretamente a falta. Já na formulação tradicional observa-se a sensibilidade da função de distância à resistência de falta resultando em um subalcançe a medida que se aumenta a porcentagem do local da falta.

No caso 3, de análise de sensibilidade paramétrica, cujo resultado é apresentado nas Figuras 9 e 12, foi simulado um curto-circuito AT variando a resistência de falta, com a localização da falta em 50 % da linha, o sistema operando com ambas as fontes fortes e com carregamento de -30° ($SIR_L = 0, 1; SIR_R = 0, 1$ e $\delta = -30^\circ$).

Para esse cenário, nota-se que as estratégias propostas por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019), identificam exatamente o ponto do defeito, enquanto a formulação tradicional subalcança, já que não contempla em sua formulação o efeito da resistência de falta, fazendo com que a impedância medida pelo relé de distância seja

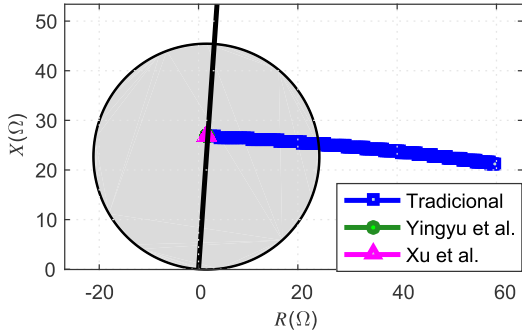


Figura 9. Caso 3 (ASP)- curto-circuito AT com variação da resistência de falta.

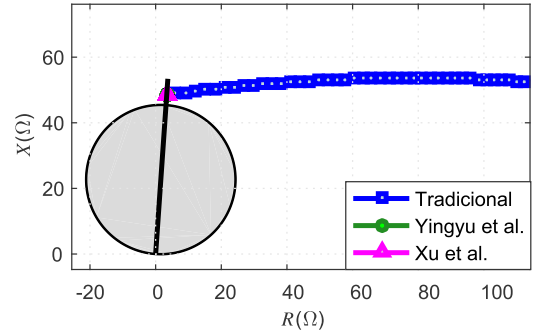


Figura 11. Caso 4 (ASP)- curto-circuito AT com variação da resistência de falta.

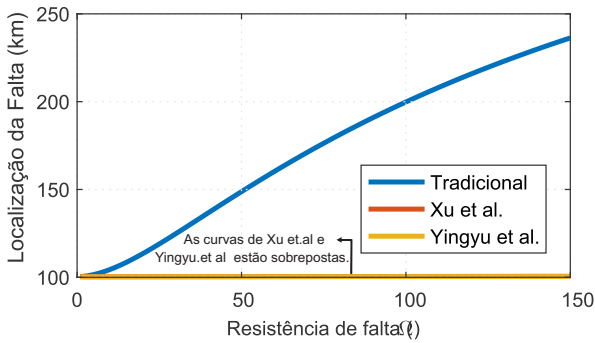


Figura 10. Caso 3 (ASP) - Localização x Resistência de Falta.

deslocada a direita do eixo resistivo. Na Figura 10, em que as curvas referentes aos métodos de Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) estão sobrepostas, fica evidente que os algoritmos localizam a falta corretamente em 50% da linha (100km), mostrando que ambos algoritmos não tem desempenho afetado devido a resistência de falta. Já a função de distância tradicional localiza erroneamente a falta e fica evidente quão afetado é seu desempenho devido a resistência de falta.

No caso 4 de análise de sensibilidade paramétrica, cujo resultado é apresentado nas Figuras 11 e 12, foi simulado um curto-circuito AT variando a resistência de falta no intervalo de 0 a 150 Ω , com a localização da falta em 90% da linha, o sistema operando com ambas as fontes fortes ($SIR_L = 0,1$; $SIR_R = 0,1$) e com carregamento de ($\delta = -5^\circ$). Para esse cenário, nota-se que as estratégias propostas por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019), calculam a impedância que deve ser vista pelo relé corretamente, identificando exatamente o ponto do defeito, enquanto a função de distância tradicional subalcança, já que não contempla em sua formulação o efeito da resistência de falta, fazendo com que a impedância medida pelo relé de distância seja deslocada a direita do eixo resistivo. Na Figura 12, em que as curvas referentes aos métodos de Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) estão sobrepostas, fica evidente que os algoritmos localizam a falta corretamente em 90% da linha. Já a função de distância localiza erroneamente a falta e fica evidente quão afetado é seu desempenho devido a resistência de falta.

No caso 5, de análise de sensibilidade paramétrica, cujo resultado é apresentado nas Figuras 13 e 14, foi simulado

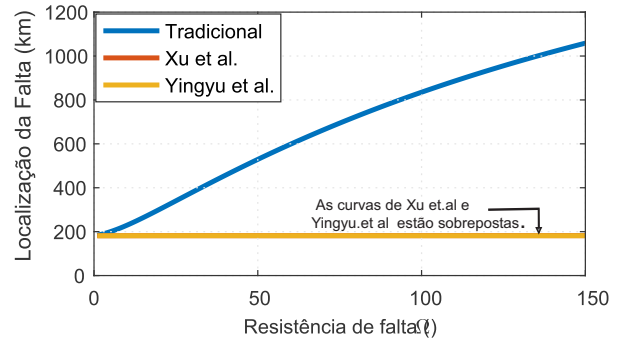


Figura 12. Caso 4 (ASP) - Localização x Resistência de Falta.

um curto-circuito AT, com a localização da falta em 10% da linha de transmissão, o sistema operando com ambas as fontes fortes ($SIR_L = 0,1$; $SIR_R = 0,1$), com resistência de falta de 50 Ω e o carregamento variando no intervalo de $-50^\circ < \delta < +50^\circ$ afim de obter uma análise mais abrangente da influência do carregamento. Entretanto, na prática, esses valores tipicamente ficam limitados a $\pm 35^\circ$.

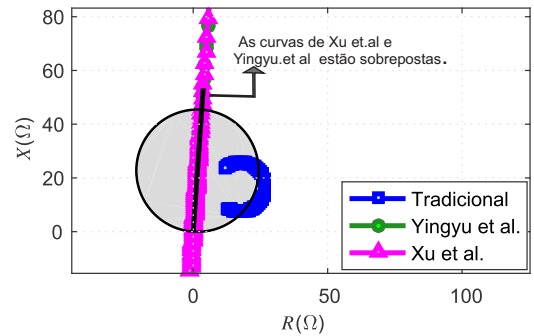


Figura 13. Caso 5 (ASP)- curto-circuito AT com resistência de falta de 50 Ω .

Para este cenário, nota-se na Figura 13 que a metodologia tradicional bem como as estratégias propostas por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) mostram-se sensíveis a variação do carregamento, identificando de maneira errada o ponto do defeito. No caso da formulação tradicional, a impedância medida pelo relé de distância é deslocada a direita do eixo resistivo devido à influência da resistência de falta. Na Figura 14, nota-se que nenhum dos métodos avaliados neste trabalho apresentou desempenho

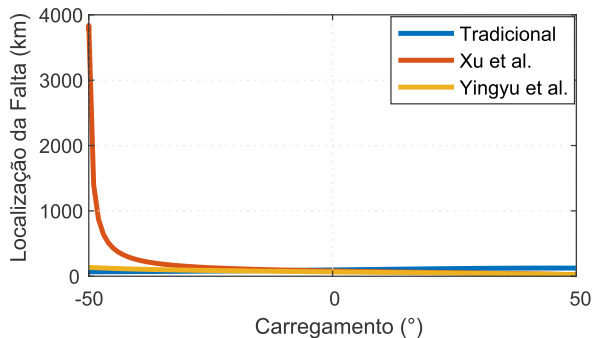


Figura 14. Caso 5 (ASP) - Localização x Carregamento

satisfatório, evidenciando o quanto a função de proteção de distância é sensível ao carregamento na presença da resistência de falta. Destaca-se que o método proposto por Xu et al. (2010) apresentou valores muito altos de localização da falta, comprometendo diretamente o desempenho da proteção.

No caso 6, de análise de sensibilidade paramétrica, cujo resultado é apresentado nas Figuras 15 e 16, foi simulado um curto-circuito AT, onde SIR_L varia de 0,1 a 10, o carregamento é fixado em -5° , a localização da falta em 70% da linha, o sistema operando com ambas as fontes fortes ($SIR_L = 0,1$; $SIR_R = 0,1$) e com resistência de falta de 150Ω .

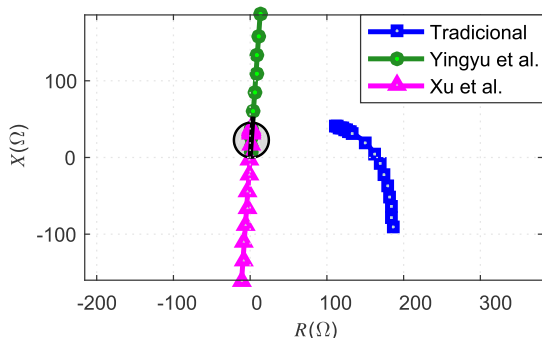


Figura 15. Caso 6 (ASP)- curto-circuito AT com resistência de falta de 150Ω .

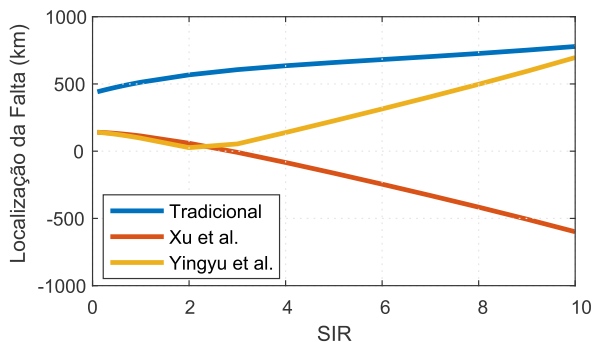


Figura 16. Caso 6 (ASP) - Localização x SIR

Para este cenário, nota-se na Figura 15 que a metodologia tradicional bem como as estratégias propostas por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) mostram-se sensíveis a variação do SIR, identificando de maneira errada o

ponto do defeito. Na Figura 16 nota-se que nenhum dos métodos avaliados neste trabalho apresentou desempenho satisfatório, evidenciando o quanto a função de proteção de distância é sensível a força da fonte (SIR). Destaca-se que o método proposto por Xu et al. (2010) apresentou valores negativos de localização da falta, comprometendo diretamente o desempenho da proteção.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho, avaliou-se o desempenho de dois algoritmos para mitigar o efeito da resistência de falta em linhas de transmissão, comparando a atuação das duas estratégias propostas ao da formulação tradicional de proteção de distância. A partir da análise dos resultados obtidos, verifica-se que a estratégia proposta por Xu et al. (2010) e Liang et al. (2019) apresentaram vantagens frente à formulação tradicional da proteção de distância, entretanto para os casos 5 e 6 de ASP, observou-se a sensibilidade dos algoritmos ao carregamento e ao SIR atrelado ao efeito da resistência de falta.

De acordo com as análises realizadas, conclui-se que a estratégia proposta por Liang et al. (2019) se mostrou mais consistente que o método proposto por Xu et al. (2010). No que se refere ao caso de ATC, o resultado obtido a partir da formulação de Liang et al. (2019) apresentou maior estabilidade até alcançar o regime permanente de falta. Para os casos de ASP, apesar da sensibilidade do método ao carregamento e ao SIR, obteve valores dentro de limites plausíveis.

REFERÊNCIAS

- Horowitz, S.H. and Phadke, A.G. (2008). *Power System Relaying*. John Wiley and Sons Inc, England.
- J. Ma, X. Yan, B.F.C.L. and Thorp, J.S. (2016). A novel line protection scheme for a single phase-to-ground fault based on voltage phase comparison,. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31, 2018–2027.
- J. Ma, X. Yan, B.F.C.L. and Thorp, J.S. (2017). Adaptive distance protection scheme with quadrilateral characteristic for extremely high-voltage/ultra-high-voltage transmission line. *IET Generation, Transmission and Distribution*.
- Liang, Y., Lu, Z., Li, W., Zha, W., and Huo, Y. (2019). A novel fault impedance calculation method for distance protection against fault resistance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–11.
- Uppendar, J., G.C.S.G. (2012). A new digital distance relaying scheme for compensation of high-resistance faults on transmission line,. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27, 2133–2140,.
- Xu, Z.Y., Xu, G., Ran, L., Yu, S., and Yang, Q.X. (2010). A new fault-impedance algorithm for distance relaying on a transmission line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25, 1384–1392.
- Ying Z., Xiaoning K., Z.J. (2014). A novel distance protection algorithm for the phase-ground fault. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29.
- Ziegler, G. (2006). *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Siemens, Germany.