

PRECISÃO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Etienne Felix de Lima

Resumo: As linhas de transmissão são o principal meio de transporte de energia elétrica em todo o país. Grande parte dessas linhas é constituída de elementos para compensação de reativos, que são os bancos de capacitores série e os bancos de reatores shunt, os quais são utilizados pelas empresas concessionárias com as seguintes finalidades: redução do efeito Ferranti, aumento da capacidade de transmissão das linhas, regulação de tensão, redução de perdas, regulação de estabilidade estática, entre outros. A utilização de equipamentos de compensação de reativos nos sistemas de transmissão traz grandes vantagens, no entanto, possui a desvantagem de aumentar a complexidade do sistema de proteção, principalmente em relação à proteção de distância, devido às alterações que provocam nos perfis de tensão e corrente de curto-circuito. Este trabalho tem como objetivo simular um sistema de transmissão de energia elétrica com compensação série, de forma a verificar a influência desses equipamentos no desempenho de relés de distância do tipo impedância. As simulações foram realizadas no software ATPdraw.

Palavras-chave: Linhas de transmissão; Compensação; Banco de reatores; Proteção de distância; ATPdraw.

1. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão (LTs) desempenham um papel fundamental no fornecimento confiável de energia elétrica em todo o mundo. Elas são a espinha dorsal do sistema de distribuição de energia, permitindo que a eletricidade gerada em usinas seja transportada para consumidores em áreas remotas e densamente povoadas. No entanto, a importância das linhas de transmissão não se limita apenas ao transporte de energia ativa, aquela que realiza o trabalho de alimentar máquinas e equipamentos eletroeletrônicos. Elas também desempenham um papel crucial na gestão da energia reativa, e é aí que entram os bancos de compensação.

A energia reativa é uma parte essencial do sistema elétrico, mas não realiza trabalho útil diretamente. Em vez disso, ela é usada para criar o campo magnético necessário para a operação de dispositivos elétricos, como motores e transformadores. No entanto, o transporte eficiente de energia reativa ao longo das linhas de transmissão pode ser um desafio. Quando a energia reativa não é controlada adequadamente, ela pode levar a perdas de energia, redução da capacidade da linha e queda na qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Os bancos para compensação de energia reativa são dispositivos projetados para fornecer ou absorver energia reativa conforme necessário para manter o sistema elétrico em equilíbrio. Os bancos de compensação para energia reativa são compostos por capacitores e indutores que podem ser ligados ou desligados de acordo com a demanda. Quando a demanda por energia reativa aumenta, os bancos de compensação fornecem energia reativa adicional para garantir que o sistema funcione de maneira eficiente. Quando a demanda diminui, eles podem ser desligados para evitar o desperdício de energia.

Assim, a utilização de bancos de compensação para energia reativa desempenha um papel fundamental na estabilidade do sistema elétrico e na otimização da capacidade das linhas de transmissão. Isso não apenas reduz as perdas de energia e melhora a qualidade do fornecimento de eletricidade, mas também ajuda a economizar recursos e reduzir os custos operacionais. Em resumo, as linhas de transmissão e os bancos de compensação para energia reativa são componentes interdependentes e cruciais para a entrega confiável e eficiente de eletricidade a todos os lugares da sociedade moderna.

A compensação de reativos feita através dos bancos pode prejudicar o desempenho da proteção de distância de várias maneiras:

- **Alteração nos Perfis de Tensão e Corrente:** bancos de compensação, como os bancos de capacitores série e os bancos de reatores shunt, modificam os perfis de tensão e corrente nas linhas de transmissão. Isso ocorre porque eles afetam a impedância da linha e a distribuição de tensão ao longo da linha. Essas alterações nos perfis podem afetar a interpretação dos sinais pela proteção de distância.
- **Mudanças nas Características de Falta:** devido às alterações nos perfis de tensão e corrente, as características de falta em uma linha de transmissão com bancos de compensação podem parecer diferentes do que em uma linha sem esses dispositivos. Isso pode levar a problemas de discriminação e detecção inadequada de faltas.

- Atrasos de Sinal: os bancos de compensação podem introduzir atrasos nos sinais de corrente e tensão, uma vez que esses sinais precisam passar pelos dispositivos de compensação. Esses atrasos podem dificultar a coordenação e a atuação adequada da proteção de distância.
- Coordenação Complexa: a presença de bancos de compensação exige uma coordenação mais complexa e ajustes cuidadosos nos relés de proteção de distância para garantir que eles operem de maneira eficaz e sejam seletivos na detecção de faltas.

Portanto, a presença de bancos de compensação em linhas de transmissão requer um planejamento e ajuste cuidadosos da proteção de distância para garantir seu correto funcionamento, mesmo com as modificações nos perfis elétricos da linha causadas por esses dispositivos. Isso é essencial para manter a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico.

2. LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão transportam energia elétrica de um ponto de origem a um ponto de destino, desempenhando, dessa forma, um papel crucial para a sociedade. Existem diferentes tipos de linhas de transmissão, incluindo:

- Linhas aéreas que utilizam tanto corrente alternada quanto corrente contínua, com condutores separados por um material dielétrico.
- Linhas subterrâneas que empregam um cabo coaxial com um fio central condutor, isolado de um condutor externo coaxial de retorno.
- Trilhas metálicas presentes em placas de circuito impresso, separadas por uma camada dielétrica de uma folha metálica de aterramento, conhecida como microtrilha ou microchip.

Os princípios fundamentais das Linhas de Transmissão podem ser utilizados em todos os tipos de linhas mencionados. No entanto, cada variante de linha apresenta características distintas que estão relacionadas a:

- Frequência;
- Nível de tensão;
- Quantidade de potência a ser transmitida;
- Modo de transmissão;
- Distância entre os terminais.

As linhas de transmissão em corrente alternada (CA) possuem uma distribuição uniforme de resistência, indutância e capacitância ao longo de seu comprimento. A resistência é responsável pela dissipação de energia, resultando em perdas de potência proporcionais a $R I^2$. A indutância, por sua vez, armazena energia no campo magnético gerado pela corrente que flui pela linha. Já a capacitância armazena energia no campo elétrico devido às diferenças de potencial existentes.

2.1 - Linha Longa $l > 250$ km

As equações gerais das linhas de transmissão em corrente alternada, senoidal, operando em regime permanente e com parâmetros distribuídos são:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_r + Z_c \sinh(\gamma x) I_r \quad (2.1)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) V_r + \cosh(\gamma x) I_r \quad (2.2)$$

Em (2.1) e (2.2):

x é o comprimento da linha;

$V(x)$ e $I(x)$ são, respectivamente, a tensão de fase e a corrente de linha em qualquer ponto da LT;

V_r e I_r são, respectivamente, a tensão de fase e a corrente de linha no terminal remoto (receptor);

Z_c é a impedância característica da linha: $Z_c = \sqrt{(z/y)}$, onde z e y são a impedância série e admitância shunt da LT por unidade de comprimento, respectivamente.

γ é a constante de propagação que define a amplitude e fase da onda ao longo da linha, conforme a equação (2.3).

$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2.3)$$

Em (2.3), α é a constante de atenuação [Néper/m] e β é a constante de fase [rad/m], sendo definidas conforme as equações (2.4) e (2.5).

$$\alpha = \operatorname{Re}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(rg - \omega^2 LC) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} \quad (2.4)$$

$$\beta = \operatorname{Im}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\omega^2 LC - rg) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} \quad (2.5)$$

À medida que as ondas percorrem uma linha de transmissão, sofrem uma diminuição na amplitude devido a perdas de energia da onda, que são causadas por fatores como resistência, dispersão, dielétrico e perda corona.

Resolver as equações para as variáveis $V(x)$ e $I(x)$, definidas em (2.1) e (2.2), permite estabelecer uma relação entre as tensões e correntes em qualquer ponto da linha, com base nos valores iniciais de tensão V_r e corrente I_r .

As LTs modeladas a partir do modelo exato, parâmetros distribuídos, podem ser descritas de acordo com a equação (2.6).

$$\begin{bmatrix} V_x \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Em (2.6):

$$A = \cosh(\gamma x) \quad (2.7)$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma x) \quad (2.8)$$

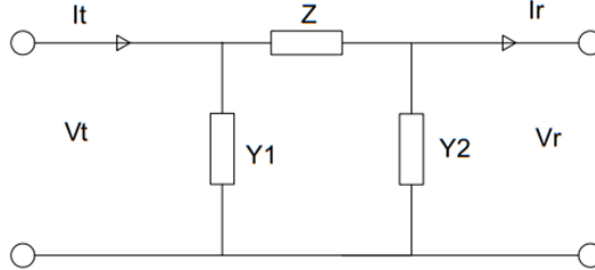
$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \quad (2.9)$$

$$D = A. \quad (2.10)$$

2.2 - Linha Média 100 km > l > 250 km

Uma linha de transmissão média, a parâmetros concentrados, é representada conforme o modelo Pi, Figura 1.

Figura 1: Circuito Pi de uma Linha de Transmissão.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 1, aplicando as leis de Kirchhoff para as tensões e correntes, tem-se que:

$$V_t = V_r + Z(I_r + Y_2 V_r) = (1 + ZY_2)V_r + ZI_r \quad (2.11)$$

$$I_t = Y_1 V_t + (Y_2 V_r + I_r) = Y_1 [V_r + Z(I_r + Y_2 V_r)] + Y_2 V_r + I_r \quad (2.12)$$

$$I_t = [Y_1(1 + ZY_2 + Y_2) + 1]V_r + (1 + ZY_1)I_r. \quad (2.13)$$

Portanto, os parâmetros generalizados (ABCD) do circuito Pi são dados por:

$$A = 1 + ZY_2 \quad (2.14)$$

$$B = Z \quad (2.15)$$

$$C = Y_1(1 + ZY_2) + Y_2 \quad (2.16)$$

$$D = A. \quad (2.17)$$

Em se tratando de uma LT simétrica, isto é, $Y_1 = Y_2 = Y/2$, os parâmetros são representados conforme as equações (2.18) a (2.20).

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} \text{ [pu]} \quad (2.18)$$

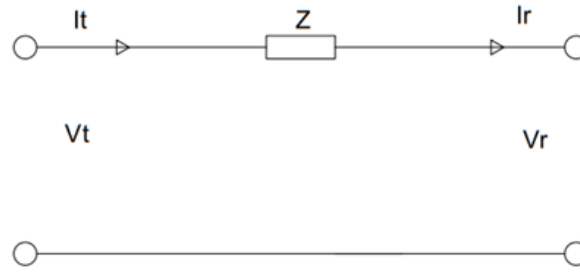
$$B = Z \text{ [\Omega]} \quad (2.19)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) \text{ [S]} \quad (2.20)$$

2.3 - Linha Curta l < 100 km

Para LTs de tamanho inferior a 100 km, a capacitância pode ser desprezada e a linha representada por somente uma impedância série, conforme a Figura 2.

Figura 2: Circuito Equivalente de uma linha curta.



Fonte: Autoria própria.

Analisando o circuito da Figura 2, tem-se que:

$$I_t = I_r \quad (2.21)$$

$$V_t = V_r + ZI_r. \quad (2.22)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

3. COMPENSAÇÃO SÉRIE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Embora a eletricidade seja essencial para o funcionamento da sociedade moderna, seu uso excessivo pode resultar em penalidades e vários outros prejuízos. Nesse contexto, os elementos compensadores de reativos são utilizados na rede elétrica para promover uma utilização eficaz da energia. Nos sistemas de distribuição de energia, por exemplo, bancos de capacitores são muito utilizados para correção de fator de potência e para adequação dos níveis de tensão ao longo do alimentador. No sistema de transmissão de energia elétrica, esses bancos de capacitores são instalados de forma série e empregados para aumentar a capacidade de transporte das LTs, diminuir as perdas globais, melhorar a regulação de tensão e os limites de estabilidade, bem como manter o equilíbrio de potência reativa do sistema.

Os bancos de capacitores podem ser classificados como fixos e variáveis. Os bancos de capacitores fixos ou estáticos são constituídos por capacitores com valores de capacitância predefinidos, não podendo ser ajustados de maneira variável. Assim, a capacidade desses bancos é definida com base numa carga específica. Em contrapartida, os bancos de capacitores variáveis consistem de capacitores que podem ser adaptados dinamicamente de acordo com as oscilações na carga e das condições da rede elétrica.

Neste trabalho, devido à simplicidade matemática, bancos de capacitores série fixos foram utilizados nas simulações. Para obtenção dos resultados, os bancos foram considerados como estando localizados em vários pontos da linha: extremidades, início, meio e fim.

3.1 - Equacionamento

Uma LT pode ser compensada por meio de bancos de capacitores série instalados em cada uma de suas extremidades. O quadripolo equivalente resultante dessa configuração é mostrado a seguir.

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{cap} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_{cap} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A + CZ_{cap} & AZ_{cap} + CZ_{cap}^2 + B + DZ_{cap} \\ C & D + CZ_{cap} \end{bmatrix}$$

Para uma LT simétrica $A = D$, tem-se que:

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A + CZ_{cap} & CZ_{cap}^2 + 2AZ_{cap} + B + DZ_{cap} \\ C & A + CZ_{cap} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Para compensação total da LT, a parte imaginária de B deve ser igual a zero, logo:

$$B_{eq} = b_{eq} + jb'_{eq} = CZ_{cap}^2 + 2AZ_{cap} + B$$

$$B_{eq} = (c' + jc'')(jX_{cap})^2 + 2(a' + ja'')(jX_{cap}) + 2(b' + jb'')$$

$$b''_{eq} = -c''X_{cap}^2 + 2a'X_{cap} + b'' = 0. \quad (3.2)$$

Resolvendo a equação de segundo grau, definida em (3.2), podem-se encontrar as raízes, conforme (3.3).

$$X_{cap} = \frac{2a' \pm \sqrt{(-2a')^2 + 4c''b''}}{2c''} \quad (3.3)$$

Na equação (3.3), a raiz que representa o resultado correto será aquela onde X_{cap} for negativo.

A compensação de LTs geralmente é feita de forma parcial, assim, a capacitância é escolhida de acordo com uma porcentagem do valor calculado para compensação total. Neste trabalho, o grau de compensação adotado foi de 50% em todas as simulações.

Os cálculos para X_{cap} foram feitos para compensação localizada nas extremidades da LT, mas, caso o compensador esteja em funcionamento apenas no início, obtém-se, de forma análoga:

$$X_{cap} = -\frac{b''}{d'}. \quad (3.4)$$

Para compensação instalada apenas no fim da LT:

$$X_{cap} = -\frac{b''}{a'}. \quad (3.5)$$

E, por fim, para compensação no meio da LT,

$$X_{cap} = \frac{-2(a'b'' + a''b')}{(a'^2 - a''^2)}. \quad (3.7)$$

4. PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

A proteção de distância em linhas de transmissão é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade do fornecimento de energia em sistemas elétricos. Esse tipo de proteção é projetado para detectar e localizar faltas na linha, permitindo a rápida identificação e isolamento de problemas para minimizar interrupções no fornecimento de energia.

Os parâmetros de medição na proteção de distância desempenham um papel fundamental na detecção e localização precisa de faltas em sistemas elétricos de potência. Esses parâmetros são essenciais para determinar a impedância da linha e identificar a localização da falta com base em características elétricas. Alguns dos principais parâmetros de medição utilizados incluem corrente, tensão, fase e frequência.

A corrente é um dos parâmetros mais importantes na proteção de distância. Relés de proteção medem a corrente na linha para determinar se há uma condição de falta e a magnitude dessa falta. A análise da corrente permite diferenciar entre condições normais de operação e falhas, ajudando a ativar as proteções apropriadas quando necessário.

A tensão também é medida pelos relés de proteção para determinar o estado do sistema elétrico. Variações na tensão podem indicar a presença de uma falta e ajudar na determinação da localização da mesma. A relação entre a tensão medida em diferentes pontos da linha é usada para calcular a impedância e determinar a distância até a falta.

A fase é outro parâmetro essencial, pois a defasagem entre corrente e tensão é significativa na determinação da impedância da linha. Relés de proteção monitoram a diferença de fase entre corrente e tensão para calcular a impedância e localizar a falta com precisão.

A frequência é um parâmetro adicional que pode ser monitorado para detecção de condições anormais, como desequilíbrios ou oscilações no sistema elétrico. Variações na frequência podem indicar problemas de estabilidade ou desligamentos de unidades geradoras, afetando a operação do sistema e a coordenação da proteção de distância.

O funcionamento da proteção de distância baseia-se na medição das características elétricas da linha de transmissão, como corrente e tensão, em vários pontos ao longo da linha. Essas medições são comparadas com valores pré-estabelecidos e calculadas em termos de impedância. Quando ocorre uma falta na linha, como um curto-circuito, a impedância medida difere dos valores esperados para condições normais de operação.

Existem diferentes técnicas para implementar a proteção de distância, sendo uma delas a proteção de distância por impedância. Nesse método, a distância da proteção é definida em termos de impedância a partir do ponto de medição. Quando uma falta é detectada, a proteção de distância compara a impedância medida com curvas características de impedância predefinidas para determinar a localização da falta ao longo da linha.

Além da proteção por impedância, outras técnicas, como a proteção de distância por ângulo, também são utilizadas para complementar o sistema de proteção. Essa técnica utiliza a diferença de fase entre as ondas de corrente e tensão para calcular a distância até o ponto de falta na linha.

A proteção de distância é uma ferramenta essencial dos sistemas de proteção de linhas de transmissão, proporcionando uma resposta rápida e seletiva a faltas na linha para minimizar os impactos no fornecimento de energia elétrica. A sua eficácia depende da precisão das medições e da configuração adequada dos parâmetros de proteção.

4.1 - Cálculo das impedâncias

Os relés de distância do tipo impedância, os quais são foco deste trabalho, calculam as impedâncias, para um curto-circuito monofásico, conforme a seguir (Silva, 2009).

$$\begin{aligned} Z_{ta} &= \frac{V_{ta}}{I_{ta} + k_0 I_{ta0}} & Z_{ra} &= \frac{V_{ra}}{I_{ra} + k_0 I_{ra0}} \\ Z_{tb} &= \frac{V_{tb}}{I_{tb} + k_0 I_{ta0}} & Z_{rb} &= \frac{V_{ra}}{I_{ra} + k_0 I_{ra0}} \\ Z_{tc} &= \frac{V_{tc}}{I_{tc} + k_0 I_{ta0}} & Z_{rc} &= \frac{V_{rc}}{I_{rc} + k_0 I_{ra0}} \end{aligned}$$

Onde: $k_0 = \frac{Z_{0linha} - Z_{1linha}}{Z_{1linha}}$; Z_{0linha} e Z_{1linha} são as impedâncias totais de sequência zero e positiva, respectivamente, ou seja, multiplicadas pelo comprimento da linha; I_{ta0} e I_{ra0} são as correntes de sequência zero nos terminais transmissor e receptor da LT, respectivamente, detalhadas a seguir.

$$\begin{aligned} I_{ta0} &= \frac{1}{3}(I_{ta} + I_{tb} + I_{tc}) \\ I_{ra0} &= \frac{1}{3}(I_{ra} + I_{rb} + I_{rc}). \end{aligned}$$

5. SISTEMA ANALISADO

O sistema analisado consiste de uma LT de 230 kV, 200 km, com parâmetros elétricos dados a seguir.

$$R_{+} = 0,09127 \, \Omega/\text{km}$$

$$R_{0} = 0,44016 \, \Omega/\text{km}$$

$$L_{+} = 1,376 \, \text{mH}/\text{km}$$

$$L_{0} = 4,153 \, \text{mH}/\text{km}$$

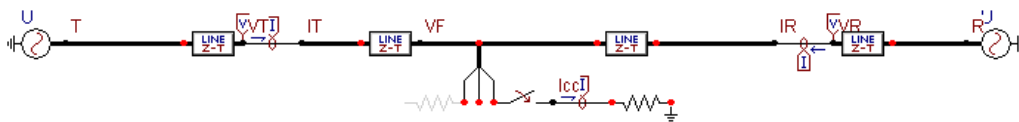
$$C_{+} = 0,00847 \, \mu\text{F}/\text{km}$$

$$C_{0} = 0,0061 \, \mu\text{F}/\text{km}$$

$$g_{+} = 0 \quad g_{0} = 0$$

O circuito simulado no ATPdraw está ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Sistema simulado no ATPdraw.



Fonte: Autoria própria.

6. RESULTADOS

Foi realizada a simulação no software ATPDraw para estudar o efeito de um curto-circuito na fase A de um sistema elétrico com bancos de capacitores instalados no início, meio, fim e extremidades da linha, considerando a ocorrência desses curtos ao longo de 30, 50 e 90% da extensão da linha. Além disso, em todos os casos de falta simulados admitiu-se que os bancos de capacitores série instalados nos diversos pontos possuem grau de compensação de 50%.

Durante a simulação, após a ocorrência do curto-circuito na fase A, foram realizados cálculos para determinar as impedâncias de cada fase do sistema. Essas impedâncias são fundamentais para a proteção de distância, pois permitem que a proteção atue de forma apropriada, garantindo uma resposta rápida e precisa em caso de falta. Os dados obtidos para cada situação serão apresentados e discutidos a seguir.

6.1 - Sistema sem compensação

Nas tabelas a seguir serão apresentados os dados obtidos ao simular um curto-circuito na fase A para as extensões de 30%, 50% e 90% da linha, ou seja, para uma linha de 100 km seria simulado um curto-circuito em 30 km, outro em 50 km e outro em 90 km, porém, como a proteção de distância “enxerga” uma impedância, vamos tratar o assunto em termos dessa medida. Mesmo as faltas tendo sido simuladas apenas na fase A do sistema, as impedâncias das fases B e C calculadas nos terminais T e R serão detalhadas nas tabelas a seguir,

para melhor análise da precisão do equipamento.

Tabela 1: Impedâncias para linha de transmissão sem compensação.

30% (31,44 Ω)	50% (52,42 Ω)	90% (94,36 Ω)
Zta = 31.5031 $\angle$ 80.0705 Ω	Zta = 52.1726 $\angle$ 86.0596 Ω	Zta = 95.3149 $\angle$ 80.2486 Ω
Ztb = 98.0657 $\angle$ -36.8677 Ω	Ztb = 130.315 $\angle$ -28.3623 Ω	Ztb = 189.8753 $\angle$ -27.9968 Ω
Ztc = 127.0473 $\angle$ -140.4654 Ω	Ztc = 180.5109 $\angle$ -130.4261 Ω	Ztc = 312.349 $\angle$ -126.0151 Ω
Zra = 73.7747 $\angle$ 80.0174 Ω	Zra = 52.6405 $\angle$ 79.9992 Ω	Zra = 10.4944 $\angle$ 79.9254 Ω
Zrb = 268.0261 $\angle$ -55.5484 Ω	Zrb = 200.1929 $\angle$ -51.7952 Ω	Zrb = 76.4064 $\angle$ -49.9618 Ω
Zrc = 174.0988 $\angle$ -160.5772 Ω	Zrc = 143.1084 $\angle$ -157.7107 Ω	Zrc = 68.3462 $\angle$ -147.3732 Ω

Fonte: Autoria própria.

No sistema simulado, a impedância série total da linha é:

$$z = (0,09127 + 2 * \pi * 60 * 0,00137) * 200 = 18,25 + i103,24 = 104,84 \angle 80 \Omega.$$

Pode-se entender que 100% do sistema tem uma impedância próxima de 105 Ω , logo teríamos valor equivalente para fins de comparação em 30% do sistema que seria 31,44 Ω para o lado transmissor e 73,5 Ω para o lado receptor, em 50% do sistema seria 52,42 Ω para o lado transmissor e o mesmo valor par ao lado receptor, em 90 % do sistema o valor seria 94,36 Ω para o lado transmissor e 10,49 Ω para o lado receptor, e portanto, para o sistema sem compensação, foi feita a leitura correta da distância. Visto que, para os três casos (simulações de curto circuito em 30, 50 e 90% de extensão da linha), foram obtidas impedâncias próximas das reais: 30% (31,5031 Ω), 50% (52,1726 Ω) e 90% (94,3149 Ω), assim como do lado receptor do sistema: 30% (73,7747 Ω), 50% (52,6405 Ω) e 90% (10,4944 Ω). Nesse caso, portanto, entende-se que não há qualquer erro na proteção, já que não se tem influência do sistema de compensação.

6.2 - Compensação série no início da LT

Tabela 2: Impedâncias para linha de transmissão com compensação série no início da LT.

30% (31,44 Ω)	50% (52,42 Ω)	90% (94,36 Ω)
Zta = 9.099 $\angle$ -24.3935 Ω	Zta = 23.2392 $\angle$ 43.504 Ω	Zta = 62.3126 $\angle$ 70.2156 Ω
Ztb = 55.1369 $\angle$ -69.1633 Ω	Ztb = 105.835 $\angle$ -53.4109 Ω	Ztb = 168.1344 $\angle$ -29.5391 Ω
Ztc = 56.6227 $\angle$ -168.8699 Ω	Ztc = 168.59 $\angle$ -158.1371 Ω	Ztc = 313.1245 $\angle$ -110.3139 Ω
Zra = 73.4353 $\angle$ 79.7781 Ω	Zra = 52.5045 $\angle$ 79.9856 Ω	Zra = 10.4978 $\angle$ 79.927 Ω
Zrb = 97.0834 $\angle$ -92.1397 Ω	Zrb = 143.6782 $\angle$ -68.1106 Ω	Zrb = 73.3427 $\angle$ -53.3138 Ω
Zrc = 65.057 $\angle$ 171.6753 Ω	Zrc = 94.5541 $\angle$ -170.0114 Ω	Zrc = 52.8121 $\angle$ -150.8113 Ω

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, entende-se que houve um erro no lado do transmissor (quando comparados aos valores reais) de 71,06% (22,3 Ω) para um curto circuito em 30% da linha, 55,68% (28,93 Ω) para 50% da linha e 33,96% (32,05 Ω) para 90% da linha. Para o lado receptor, observa-se que foram feitas as medições esperadas, portanto, a proteção deste lado não foi influenciada pela compensação.

6.3 - Compensação série no meio da LT

Tabela 3: Impedâncias para linha de transmissão com compensação série no meio da LT.

30% (31,44 Ω)	50% (31,44 Ω)	90% (31,44 Ω)
Zta = 52.5961 $\angle$ 80.1332 Ω	Zta = 52.5961 $\angle$ 80.1332 Ω	Zta = 92.7448 $\angle$ 47.7455 Ω
Ztb = 92.3269 $\angle$ -42.3145 Ω	Ztb = 92.3269 $\angle$ -42.3145 Ω	Ztb = 120.5855 $\angle$ 178.17 Ω
Ztc = 134.1118 $\angle$ -143.834 Ω	Ztc = 134.1118 $\angle$ -143.834 Ω	Ztc = 72.8233 $\angle$ 34.5004 Ω
Zra = 22.0502 $\angle$ 60.2664 Ω	Zra = 22.0502 $\angle$ 60.2664 Ω	Zra = 23.3581 $\angle$ -79.6231 Ω
Zrb = 163.958 $\angle$ -54.7815 Ω	Zrb = 163.958 $\angle$ -54.7815 Ω	Zrb = 42.6196 $\angle$ -137.4818 Ω
Zr = 106.9337 $\angle$ -160.101 Ω	Zrc = 106.9337 $\angle$ -160.101 Ω	Zrc = 17.7146 $\angle$ 98.5462 Ω

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, pôde-se perceber que no lado transmissor houve um erro de 67,2% (21,12 Ω) de erro para um curto circuito em 30% porem para 50 e 90% da linha foram feitas as medições corretas. Nas medições no receptor tiveram erros de 69,95% (51,6 Ω) para 30% da linha, 57,93% (30,47 Ω) para 50% da linha e 122%

(12,81 Ω) para 90% da linha.

6.4 - Compensação série no fim da LT

Tabela 4: Impedâncias para linha de transmissão com compensação série no fim da LT.

30% (31,44 Ω)	50% (31,44 Ω)	90% (31,44 Ω)
$Z_{ta} = 31.5153 \angle 80.0812 \Omega$	$Z_{ta} = 52.5909 \angle 80.1301 \Omega$	$Z_{ta} = 95.7845 \angle 79.3959 \Omega$
$Z_{tb} = 78.001 \angle -40.8956 \Omega$	$Z_{tb} = 92.5079 \angle -41.5553 \Omega$	$Z_{tb} = 131.1221 \angle -143.946 \Omega$
$Z_{tc} = 107.593 \angle 146.3256 \Omega$	$Z_{tc} = 136.1312 \angle -145.0404 \Omega$	$Z_{tc} = 88.5891 \angle 67.9537 \Omega$
$Z_{ra} = 40.8558 \angle 69.9895 \Omega$	$Z_{ra} = 22.178 \angle 60.0438 \Omega$	$Z_{ra} = 24.1461 \angle -79.9768 \Omega$
$Z_{rb} = 282.0497 \angle -58.3301 \Omega$	$Z_{rb} = 160.9201 \angle -56.254 \Omega$	$Z_{rb} = 44.2362 \angle -140.1541 \Omega$
$Z_{rc} = 147.1374 \angle -161.1993 \Omega$	$Z_{rc} = 105.943 \angle -159.2224 \Omega$	$Z_{rc} = 20.1207 \angle 93.8293 \Omega$

Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, nota-se que foram feitas as medições esperadas no lado transmissor, entretanto, houve erros de 44,33% (32,7 Ω) para um curto-circuito em 30% da linha, 57,7% (18,81 Ω) para 50% da linha e 130% (13,6 Ω) para 90% da linha.

6.5 - Compensação nas extremidades

Tabela 5: Impedâncias para linha de transmissão com compensação nas extremidades.

30% (31,44 Ω)	50% (31,44 Ω)	90% (31,44 Ω)
$Z_{ta} = 16.4283 \angle 64.2756 \Omega$	$Z_{ta} = 37.9846 \angle 72.6688 \Omega$	$Z_{ta} = 85.7072 \angle 77.4138 \Omega$
$Z_{tb} = 73.7239 \angle -44.5729 \Omega$	$Z_{tb} = 101.781 \angle -37.7424 \Omega$	$Z_{tb} = 99.5047 \angle -45.843 \Omega$
$Z_{tc} = 97.6604 \angle -144.8812 \Omega$	$Z_{tc} = 155.2918 \angle -137.7995 \Omega$	$Z_{tc} = 148.3618 \angle -149.7805 \Omega$
$Z_{ra} = 60.6952 \angle 78.3916 \Omega$	$Z_{ra} = 37.5366 \angle 75.9625 \Omega$	$Z_{ra} = 5.9023 \angle -64.009 \Omega$
$Z_{rb} = 192.3792 \angle -64.4347 \Omega$	$Z_{rb} = 166.6558 \angle -56.2 \Omega$	$Z_{rb} = 46.0634 \angle -67.6753 \Omega$
$Z_{rc} = 117.3353 \angle -167.214 \Omega$	$Z_{rc} = 108.5932 \angle -161.7088 \Omega$	$Z_{rc} = 38.2272 \angle -148.8594 \Omega$

Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, houve erros em todos os casos, na transmissora houve erros de 47,8% (15,06 Ω), 27,5% (14,4 Ω) e 9,17% (86,5 Ω) para curtos simulados em 30, 50 e 90% da linha, respectivamente. No terminal receptor, houve erros de 17,3% (12,76 Ω), 28,4% (14,81 Ω) e 43,72% (4,6 Ω) para 30, 50 e 90% da linha, respectivamente.

7. CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados, foi possível quantificar a influência dos bancos de capacitores série no cálculo da distância de falta realizado por relés de distância do tipo impedância, confirmando portanto, a alteração dos parâmetros da rede devido a existência de tais equipamentos. Na análise realizada, encontraram-se erros que chegaram a 122% do valor esperado para a distância de falta.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica – Volume 1. Rio de Janeiro: LTC, 1977.
HOROWITZ, S. H., PHADKE, A. G. (2008). Power System Relaying. Wiley-IEEE Press.
MONTICELLI, A; GARCIA, A. Introdução a Sistemas de Energia Elétrica. São Paulo: Ed. Unicamp, 2000.
SILVA, K. M. 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, Brasil, 2009.
ZANETTA JR, L. C. Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2005.