

Novo método para estimação da corrente de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica considerando a inserção de geração distribuída

Henrique M. Barradas. Ricardo F. Buzo.
Fábio B. Leão.

**Universidade Estadual Paulista, FEIS, Departamento de Engenharia Elétrica, Brasil;
(e-mail: henrique1226@hotmail.com)
(e-mail: ricardobuzo00@hotmail.com)
(e-mail: fabio.bertequini@unesp.br)*

Abstract: This paper presents a new method for calculating the impact on the short circuit current in the lines of radial electric power distribution systems (EPDS) considering the insertion of Distributed Generation (DG). The method was developed from the application of classical electrical circuit concepts, resulting in equations that allow to calculate how much the EPDS short circuit current is impacted with the insertion of DG. The results of the proposed model are validated using a 5-bar system, which is modeled in the DIgSILENT® software. The results of DIgSILENT® are compared with the results obtained through the proposed equations presenting absolute maximum error of 0.67 amperes which demonstrates the efficiency and robustness of the proposed method.

Resumo: Este artigo apresenta um novo método para calcular o impacto na corrente de curto-circuito nas linhas de sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) radiais considerando a inserção de Geração Distribuída (GD). O método foi desenvolvido a partir da aplicação de conceitos clássicos de circuitos elétricos, resultando em equações que permitem calcular o quanto a corrente de curto-circuito no SDEE é impactada com a inserção de GD. Para validação dos resultados do modelo proposto é utilizado um sistema de 5 barras, o qual é modelado no *software* DIgSILENT®. Os resultados do DIgSILENT® são comparados com os resultados obtidos através das equações propostas apresentando erro máximo absoluto de 0,67 A o que demonstra a eficiência e robustez do método proposto.

Keywords: Distributed Generation, Protection Coordination, Protection Reconfiguration.

Palavras-chaves: Geração Distribuída, Coordenação da Proteção, Reconfiguração da Proteção.

1. INTRODUÇÃO

A presença de Geração Distribuída (GD), principalmente a geração fotovoltaica (GF), conectada ao sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) está proporcionando significativas mudanças no setor energético mundial e brasileiro ANEEL (2016). Dentre as vantagens da conexão da GD, ressalta-se a utilização de fontes renováveis de energia, a diversificação da matriz energética, a aproximação da geração de energia aos centros consumidores, a melhoria no perfil de tensão do SDEE e a diminuição das perdas elétricas. Hongxia et al. (2016), Luka (2017), e Husnain. (2018). Entretanto, como desvantagens, a inserção de GDs pode levar ao aumento do nível de tensão, principalmente nos pontos comuns de acoplamento (PCAs), pode levar ao aumento do nível da corrente de curto-circuito e ao surgimento de um fluxo de potência reverso nas condições pré e pós-falta. Hongxia et al. (2016). Luka (2017). Husnain. (2018). Coffele (2015). Shaofei et al. (2017). Barradas (2018). Barradas(2018).

A alteração do nível de curto-circuito do SDEE e os prováveis fluxos de potência reversos provocados pela presença de GD podem causar impactos negativos no funcionamento da proteção. Nestes casos, a não atuação e/ou

o falso “trip” dos dispositivos de proteção, podem levar a perda da coordenação e/ou da seletividade da proteção Vishnuvardhan. (2017).

Visando mitigar os problemas referentes à proteção, Walid. (2008) e Yamaguchi. (2008) propõem a instalação de um limitador de corrente de curto-circuito no PCA de cada GD. Assim, a corrente injetada pelas GDs durante uma falta pode ser significativamente reduzida. Como resultado de tal procedimento afirmam que as características funcionais dos dispositivos de proteção instalados antes da inserção de GDs não requerem ajustes. Seguindo este mesmo princípio, Hongxia (2016) propõe a otimização da potência das GDs e do local onde serão instaladas. Considerando um cenário onde haverá uma alta inserção de GD, os métodos propostos em Walid. (2008) e Yamaguchi. (2008) se tornam inviáveis devido ao custo; e o apresentado em Hongxia (2016) não o analisa.

Em Elmer and Merwin (2015), devido a conexão de GDs no sistema, os autores propõem a substituição das curvas de tempo inverso dos relés por curvas de tempo definido. Entretanto, o problema da corrente de fluxo reverso que poderia fluir pelos relés durante uma falta não é abordado. Considerando a questão de bidirecionalidade de fluxo,

Jalilian et al. (2014) e Mahamad (2019) apresentam soluções empregando relés direcionais.

Em Jalilian et al. (2014), considera-se apenas a corrente pós-falta, a qual servirá para determinar uma corrente fasorial utilizada como referência. A diferença angular das correntes de referência e de pós-falta determinará se a falta ocorreu à montante ou à jusante do dispositivo de proteção. Em Mahamad (2019), utiliza-se relés numéricos capazes de atualizar o valor da corrente de falta em tempo real apenas quando houver variações significativas nos novos valores adquiridos (comparados com os valores pré-armazenados). Sendo assim, calcula-se a corrente de falta do sistema e atualizam-se os parâmetros dos relés.

Os métodos apresentados em Jalilian et al. (2014) e Mahamad (2019) proporcionam a adaptação da proteção. No primeiro, a necessidade de cálculo da corrente de curto-circuito antes de ajustar o novo valor da corrente de pick-up do relé faz com que um tempo significativo seja requerido para extinguir a corrente de falta. Além disso, no segundo, a necessidade de uma rede de comunicação em tempo real, requer um custo elevado e uma estrutura complexa e robusta. Barsali (2002).

Coffele (1015), Shaofei et al. (2017), He et al. (2016), Pukar et al. (2011), Mansour et al. (2013), Abouzar et al. (2015) e Emilio et al. (2017) apresentam, em cada artigo, uma metodologia diferente para resolver os problemas apresentados pelo sistema de proteção causados pela inserção de GDs utilizando relés de sobrecorrente. Pukar et al. (2011) utiliza-se do estado do sistema (ilhado ou não), juntamente com os valores de correntes lidos pelos relés para atualizar seus valores da corrente de pick-up. Mansour et al. (2013) utiliza-se de leituras em tempo real do sistema para estimar os parâmetros dos relés. Coffele (1015) realiza o cálculo de curto-circuito, prevenindo ilhamento, para que seja atualizado os parâmetros dos relés. Abouzar et al. (2015) utilizam medidas locais e um equivalente de Thevenin para atualizar o valor da corrente de pick-up dos relés. O valor da corrente de pick-up obtido da leitura anterior é analisado juntamente com a variação do equivalente de Thevenin proporcionando o novo valor da corrente de pick-up.

Shaofei et al. (2017) utilizam medidas locais durante a falta, comunicação em tempo real, sistema de GPS sincronizado e otimização multi-estado para realizar a adaptação da proteção. Em He et al. (2016) os autores propõem um método que reduz o tempo de atuação da proteção através de um fator de tensão. Este fator de tensão é utilizado para aumentar o alcance do relé, pois, devido à presença da GD, o alcance é reduzido. Emilio et al. (2017) propõem o emprego de relés coordenados com fusíveis considerando a inserção da GD visando o menor custo do sistema de proteção. Sendo assim, para ajustar a corrente de atuação do relé, necessita-se calcular o fluxo de potência, realizar o cálculo de curto-circuito e observar o limite máximo da corrente de atuação do fusível.

No presente artigo propõe-se um novo modelo matemático, utilizando conceitos clássicos de circuitos elétricos que

possibilita calcular a corrente de curto-circuito nas linhas de um SDEE radial podendo ser empregado no ajuste do sistema de proteção considerando a inserção de GDs. Para validar o modelo proposto é empregado o sistema de 5 barras de Shaofei et al. (2017), modelado no *software* DIGSILENT®. Os resultados da injeção de corrente de falta das GDs obtidos com o DIGSILENT® são utilizados para calcular o valor da variação da corrente de curto-circuito do sistema sob análise. As equações para o cálculo do curto-circuito são implementadas no MatLab®. Pode-se notar que os valores obtidos com a aplicação do modelo proposto em comparação com os resultados do DIGSILENT® apresentam erro máximo absoluto de 0,67 A.

2. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Embasando-se em conceitos clássicos de circuitos elétricos, propôs-se obter equações que possibilitem calcular a corrente de curto-circuito nas linhas de um SDEE qualquer considerando a inserção de GD. Para tanto é realizada a análise clássica de circuitos elétricos no sistema trifásico de 3 barras ilustrado na da Fig.1.

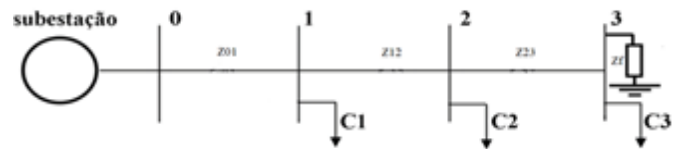


Fig. 1 Diagrama unifilar do sistema elétrico com três barras.

Por se tratar de um sistema trifásico, as equações desenvolvidas nesta seção referem-se as correntes trifásicas fasoriais do sistema. Desta forma as correntes e as tensões são representadas por vetores de dimensão 3x1 e as impedâncias do sistema por matrizes 3x3, como apresentado nas equações de (1) a (5).

$$I_{ij}^f = \begin{bmatrix} I_{ij_A}^f \\ I_{ij_B}^f \\ I_{ij_C}^f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I_{Ci}^f = \begin{bmatrix} I_{Ci_A}^f \\ I_{Ci_B}^f \\ I_{Ci_C}^f \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$V_i^f = \begin{bmatrix} V_{i_A}^f \\ V_{i_B}^f \\ V_{i_C}^f \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} Z_{ij_A} & Z_{ij_AB} & Z_{ij_AC} \\ Z_{ij_BA} & Z_{ij_B} & Z_{ij_BC} \\ Z_{ij_CA} & Z_{ij_CB} & Z_{ij_C} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Z_f = \begin{bmatrix} Z_{f_A} & Z_{f_AB} & Z_{f_AC} \\ Z_{f_BA} & Z_{f_B} & Z_{f_BC} \\ Z_{f_CA} & Z_{f_CB} & Z_{f_C} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sendo V_i^f a matriz da tensão de falta na barra i ; I_{ij}^f é a matriz da corrente de falta no ramo entre as barras i e j ; Z_{ij} é a matriz da impedância do ramo entre as barras i e j ; I_{Ci}^f é a matriz da corrente consumida pela carga conectada na barra i na condição de curto-circuito; Z_f é a matriz da impedância de falta.

Então, através da análise clássica de circuitos elétricos para um curto-circuito localizado na barra 3, com impedância de falta Z_f , do sistema da Fig. 1, obteve-se que as correntes dos ramos 0-1, 1-2 e 2-3 são calculadas por (6), (7) e (8) respectivamente.

$$I_{01}^f = \frac{V_0^f + (Z_{12} + Z_{23} + Z_f) \cdot I_{C1}^f + (Z_{23} + Z_f) \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (6)$$

$$I_{12}^f = \frac{V_0^f - Z_{01} \cdot I_{C1}^f + (Z_{23} + Z_f) \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (7)$$

$$I_{23}^f = \frac{V_0^f - Z_{01} \cdot I_{C1}^f - (Z_{01} + Z_{12}) \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (8)$$

Posteriormente, submeteu-se a barra 2 do sistema da Fig. 1 a um curto-circuito com impedância de falta Z_f . Através da análise clássica de circuitos elétricos obteve (9), (10) e (11) que possibilita calcular as correntes nos ramos 0-1, 1-2 e 2-3, respectivamente.

$$I_{01}^f = \frac{V_0^f + (Z_{12} + Z_f) \cdot I_{C1}^f + Z_f \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (9)$$

$$I_{12}^f = \frac{V_0^f - Z_{01} \cdot I_{C1}^f + Z_f \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (10)$$

$$I_{23}^f = I_{C3}^f \quad (11)$$

Por último, submeteu-se a barra 1 a um curto-circuito com impedância de falta Z_f . Através da análise clássica de circuitos elétricos obteve-se (12), (13) e (14), que possibilitam calcular a corrente nos ramos 0-1, 1-2 e 2-3, respectivamente.

$$I_{01}^f = \frac{V_0^f + Z_f \cdot I_{C1}^f + Z_f \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_f} \quad (12)$$

$$I_{12}^f = I_{C2}^f + I_{C3}^f \quad (13)$$

$$I_{23}^f = I_{C3}^f \quad (14)$$

Considerando o mesmo sistema da Fig.1, entretanto, com GDs conectadas em todas as barras, exceto na barra 0. Submetendo esta nova configuração do sistema às mesmas análises para a obtenção das equações (6)-(14) obteveram-se as equações para o cálculo das correntes de curto-circuito em todos os ramos do sistema.

Portanto, para o sistema da Fig. 1 com GDs e sob um curto-circuito na barra 3, realizou-se a análise clássica de circuitos elétricos que resultou em (15), (16) e (17).

$$I_{01}^{fGD} = \frac{V_0^{fGD} + (Z_{12} + Z_{23} + Z_f) \left(I_{C1}^{fGD} - I_{GD1}^f \right) + (Z_{23} + Z_f) \left(I_{C2}^{fGD} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (15)$$

$$I_{12}^{fGD} = \frac{V_0^{fGD} - Z_{01} \left(I_{C1}^{fGD} - I_{GD1}^f \right) + (Z_{23} + Z_f) \left(I_{C2}^{fGD} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (16)$$

$$I_{23}^{fGD} = \frac{V_0^{fGD} - Z_{01} \left(I_{C1}^{fGD} - I_{GD1}^f \right) - (Z_{01} + Z_{12}) \left(I_{C2}^{fGD} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (17)$$

Sendo V_i^{fGD} a tensão de falta na barra i ; I_{ij}^{fGD} é a corrente de falta no ramo separado pelas barras i e j ; $I_{GD Ci}^f$ é a corrente de falta consumida pela carga conectada na barra i ; $I_{GD i}^f$ é a corrente de falta injetada pela GD que está conectada na barra i . O índice GD significa que há GD conectada no SDEE.

Através de raciocínio análogo ao que foi apresentado no desenvolvimento das equações anteriores, pode-se obter as equações para o cálculo das correntes de curto-circuito em todos os ramos do sistema da Fig. 1 considerando a inserção de GD em todas as barras, exceto na barra 0, do sistema. Para a ocorrência de curto-circuito na barra 2 com impedância de falta Z_f obtém-se (18), (19) e (20) e para curto-circuito na barra 1 obtém-se (21), (22) e (23), respectivamente.

$$I_{01}^{fGD} = \frac{V_0^{fGD} + (Z_{12} + Z_f) \left(I_{C1}^{fGD} - I_{GD1}^f \right) + Z_f \left(I_{C2}^{fGD} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (18)$$

$$I_{12}^{fGD} = \frac{V_0^{fGD} - Z_{01} \left(I_{C1}^{fGD} - I_{GD1}^f \right) + Z_f \left(I_{C2}^{fGD} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (19)$$

$$I_{23}^{fGD} = I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \quad (20)$$

$$I_{01}^{fGD} = \frac{V_0^{fGD} + Z_f \left(I_{C1}^{fGD} - I_{GD1}^f \right) + Z_f \left(I_{C2}^{fGD} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_f} \quad (21)$$

$$I_{12}^{fGD} = I_{C2}^{fGD} - I_{GD2}^f + I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \quad (22)$$

$$I_{23}^{fGD} = I_{C3}^{fGD} - I_{GD3}^f \quad (23)$$

Tendo em vista que a inserção de GDs provoca alterações nos níveis de corrente de curto-circuito do SDEE, buscou-se, através das equações anteriormente desenvolvidas, determinar qual seria a variação no valor da corrente de curto-circuito que percorre os ramos de um SDEE durante uma falta.

Portanto, utilizando-se das equações desenvolvidas para o sistema da Fig.1, na ocorrência de faltas em todas as barras, sem e com GDs conectadas, determinou-se a diferença da corrente que passa em cada ramo, ou seja, ΔI_{ij} conforme (24).

$$\Delta I_{ij} = I_{ij}^f - I_{ij}^{fGD} \quad (24)$$

Como exemplo adota-se o ramo 0-1 do sistema da Fig. 1, sem e com GDs, considerando a ocorrência de curto-circuito na barra 3, ou seja, (6) e (15).

$$\Delta I_{01} = I_{01}^f - I_{01}^{fGD} \quad (25)$$

Considerando-se que $v_0^f = v_0^{fGD}$ e que $I_{Ci}^f = I_{Ci}^{fGD}$ em (6) e (15), a equação (25) pode ser reescrita como (26). Fez-se esta aproximação pois a variação da tensão nesta barra é mínima e a variação da corrente da carga é muito pequena quando comparada com a variação da corrente nas linhas conforme Henrique (2018).

$$\Delta I_{01} = \frac{(Z_{12} + Z_{23} + Z_f) \cdot I_{GD1}^f + (Z_{23} + Z_f) \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (26)$$

Portanto para obter as equações da variação da corrente nos ramos 1-2 e 2-3 deve-se realizar o mesmo procedimento e considerações que foram utilizados para determinar (26). Consequentemente, utiliza-se (7) e (16) para obter (27) e; (8) e (17) para obter (28).

$$\Delta I_{12} = \frac{-Z_{01} \cdot I_{GD1}^f + (Z_{23} + Z_f) \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (27)$$

$$\Delta I_{23} = \frac{-Z_{01} \cdot I_{GD1}^f - (Z_{01} + Z_{12}) \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (28)$$

Para faltas nas barras 2 e 1, do sistema da Fig. 1, a variação nos ramos pode ser expressa por (29)-(31) e (32)-(34), respectivamente.

$$\Delta I_{01}^f = \frac{(Z_{12} + Z_f) \cdot I_{GD1}^f + Z_f \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (29)$$

$$\Delta I_{12}^f = \frac{-Z_{01} \cdot I_{GD1}^f + Z_f \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (30)$$

$$\Delta I_{23}^f = I_{GD3}^f \quad (31)$$

$$\Delta I_{01}^f = \frac{Z_f \cdot I_{GD1}^f + Z_f \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_f} \quad (32)$$

$$\Delta I_{12}^f = I_{GD2}^f + I_{GD3}^f \quad (33)$$

$$\Delta I_{23}^f = I_{GD3}^f \quad (34)$$

As equações (26)-(34) podem ser generalizadas para qualquer SDEE radial. A equação (35) é genérica e pode ser utilizada para calcular a corrente de curto-circuito no ramo entre a subestação e a barra adjacente de carga (ramo 0-1 do sistema da Fig. 1), ou um ramo que seja considerado como ramo inicial (de uma derivação, por exemplo), e a barra em falta pode ser qualquer uma do sistema.

A equação genérica (36) pode ser empregada para calcular a variação da corrente de curto-circuito em qualquer ramo, exceto o ramo entre a subestação e a barra adjacente de carga, desde que o ramo se encontre a montante do ponto de curto-circuito considerado. Complementando o conjunto de equações genéricas a equação (37) pode ser empregada para calcular a variação da corrente de curto-circuito em qualquer

ramo que esteja a jusante do ponto de curto-circuito considerado.

$$\Delta I_{ij}^f = \frac{\sum_{k=1}^{NB-1} ((\sum_{i=1}^{BF-1} Z_{ij}) + Z_f) \cdot I_{GDk}^f}{\sum_{l=0}^{BF-1} Z_{lp} + Z_f} \quad (35)$$

Sendo $j=i+1$, $p=l+1$, NB o número de barras e BF a barra em falta.

$$\Delta I_{ij}^f = \frac{-\sum_{k=1}^i \sum_{m=0}^{i-1} Z_{nm} \cdot I_{GDk}^f + \sum_{r=j}^{NB-1} ((\sum_{l=j}^{BF-1} Z_{ls}) + Z_f) \cdot I_{GDk}^f}{\sum_{t=0}^{BF-1} Z_{tw} + Z_{12} + Z_f} \quad (36)$$

sendo $n=m+1$, $s=l+1$ e $w=t+1$.

$$\Delta I_{ij}^f = \sum_{k=j}^{NB-1} I_{GDk}^f \quad (37)$$

3. RESULTADOS

Para obter os resultados apresentados neste artigo, é empregado o sistema da Fig. 2, Shaofei et al. (2017) com algumas alterações conforme dados apresentados na Tabela 1. As equações do modelo proposto são implementadas no MATLAB®. Os dados necessários de corrente da Fig. 2, sem e com a presença de GD conectada, são obtidos empregando o software DIGSILENT®.

Tabela 1. Dados do sistema teste.

	Linha Ω	Carga MVA	GD MW
1	1,5 + j2,5	0,3 + j0,2	0,3
2	0,9 + j2,5	0,8 + j0,2	0,5
3	0,9 + j1,5	0,3 + j0,2	0,3
4	0,9 + j1,5	0,3 + j0,2	0,5

Uma vez que as equações foram implementadas no MATLAB®, foi possível analisá-las. Isso foi feito com a finalidade de validá-las e, consequentemente, para que se pudesse ter um método de cálculo da variação da corrente de curto-circuito nas linhas de um SDEE utilizando equações obtidas através da análise clássica de circuitos elétricos. Para tal finalidade, utilizaram-se os resultados obtidos nos ramos da Fig. 2.

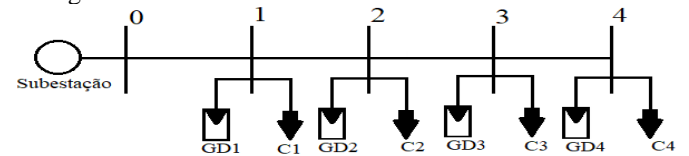


Fig. 2 Sistema teste utilizado para validar o método.

Nas Tabelas 2, 3 e 4 estão contidos os módulos dos valores, em ampères, para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ localizado na barra 4. A Tabela 2 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o DIGSILENT®, a Tabela 3 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o método proposto e na Tabela 4 é apresentado o erro absoluto destes valores. Para

obter os valores contidos na Tabela 3 utilizou-se de (35) para calcular a corrente no ramo 0-1 e (36) para calcular a corrente nos demais ramos, uma vez que o curto-circuito ocorreu na última barra do sistema. Nota-se que os erros apresentados na Tabela 4 possuem um valor muito pequeno (décimos de ampéres), ou seja, o método proposto se mostra eficiente.

Tabela 2. Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para a falta trifásica com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4 - DIGSILENT®.

Fases	$ \Delta I_{01}^f _D$	$ \Delta I_{12}^f _D$	$ \Delta I_{23}^f _D$	$ \Delta I_{34}^f _D$
A	69,67869	40,15216	73,36611	83,61927
B	69,86647	40,33054	73,61231	83,86901
C	69,84813	40,33594	73,60087	83,851

Tabela 3. Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para a falta trifásica com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4 - Método Proposto.

Fases	$ \Delta I_{01}^f $	$ \Delta I_{12}^f $	$ \Delta I_{23}^f $	$ \Delta I_{34}^f $
A	70,34756	40,66974	73,68322	84,07395
B	70,34756	40,66974	73,68322	84,07395
C	70,34756	40,66974	73,68322	84,07395

Tabela 4. Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido à falta trifásica com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4.

Fases	Erro 0-1	Erro 1-2	Erro 2-3	Erro 3-4
A	0,668866	0,517585	0,317108	0,454685
B	0,48109	0,339204	0,070911	0,204942
C	0,499423	0,333795	0,082344	0,222948

Nas Tabelas 5, 6 e 7 estão contidos os módulos dos valores, em ampéres, para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ localizado na barra 2. A Tabela 5 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o DIGSILENT®, a Tabela 6 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o método proposto e na Tabela 7 são apresentados os erros absolutos destes valores. Para obter os valores contidos na Tabela 5 utilizou-se (35) para calcular a corrente no ramo 0-1, (36) para calcular a corrente no ramo 1-2 e (37) para calcular as correntes nos ramos 2-3 e 3-4. Neste caso os erros apresentam valores inferiores aos apresentados no caso anterior, sendo assim, o modelo proposto possui alta eficiência no cálculo da variação da corrente de curto-circuito dos ramos quando estes são trifásicos.

Tabela 5. Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para a falta trifásica com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 2 - DIGSILENT®.

Fases	$ \Delta I_{01}^f _D$	$ \Delta I_{12}^f _D$	$ \Delta I_{23}^f _D$	$ \Delta I_{34}^f _D$
A	19,50525	32,87652	33,06447	20,65327
B	19,50507	32,87626	33,06625	20,65438
C	19,50434	32,87501	33,06911	20,65615

Nas Tabelas 8, 9 e 10 estão contidos os módulos dos valores, em ampéres, para um curto-circuito monofásico, fase A, com $Z_f = 10 \Omega$ localizado na barra 2. A Tabela 8 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o DIGSILENT®, a Tabela 9 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o método proposto e a Tabela 10 apresenta o erro absoluto destes

valores. Para obter os valores contidos na Tabela 8 utilizou-se (35) para calcular a corrente no ramo 0-1, (36) para calcular a corrente nos demais ramos. Neste caso os erros apresentam valores pequenos, também na casa de décimos de ampéres. Sendo assim, o modelo proposto possui alta eficiência no cálculo da variação da corrente de curto-circuito dos ramos quando estes são monofásicos.

Tabela 6. Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para a falta trifásica com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 2 - Método Proposto.

Fases	$ \Delta I_{01}^f $	$ \Delta I_{12}^f $	$ \Delta I_{23}^f $	$ \Delta I_{34}^f $
A	19,63632	32,7272	33,33703	20,82229
B	19,63632	32,7272	33,33703	20,82229
C	19,63632	32,7272	33,33703	20,82229

Tabela 7. Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido à falta trifásica com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 2.

Fases	Erro 0-1	Erro 1-2	Erro 2-3	Erro 3-4
A	0,131068	0,149328	0,272553	0,169019
B	0,131246	0,149069	0,270777	0,167909
C	0,131977	0,147818	0,267913	0,166143

Tabela 8. Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para a falta monofásica com $Z_f = 10 \Omega$ na barra 4 - DIGSILENT®.

Fases	$ \Delta I_{01}^f _D$	$ \Delta I_{12}^f _D$	$ \Delta I_{23}^f _D$	$ \Delta I_{34}^f _D$
A	65,25998	50,75539	20,28165	20,51102
B	88,38099	72,14539	34,75214	21,82456
C	88,4324	72,28887	34,40112	21,63274

Tabela 9. Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para a falta monofásica com $Z_f = 10 \Omega$ na barra 4 - Método Proposto.

Fases	$ \Delta I_{01}^f $	$ \Delta I_{12}^f $	$ \Delta I_{23}^f $	$ \Delta I_{34}^f $
A	65,74932	51,08757	20,62143	20,82569
B	88,42913	72,1578	34,82827	21,83853
C	88,41599	72,14471	34,81493	21,82525

Tabela 10. Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido à falta monofásica com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4.

Fases	Erro 0-1	Erro 1-2	Erro 2-3	Erro 3-4
A	0,491294	0,334862	0,345513	0,320878
B	0,067019	0,030799	0,097876	0,035057
C	0,015552	0,112736	0,448892	0,226874

4. CONCLUSÃO

Observando os erros das tabelas da seção 3, nota-se que as equações propostas através dos conceitos clássicos de circuitos elétricos mostraram-se eficientes, pois apresentaram erros reduzidos independentemente do tipo de curto-circuito que o sistema é submetido. Portanto, a metodologia desenvolvida neste artigo pode ser empregada para realizar análises rápidas, simplificadas e com boa precisão do impacto nos níveis de curto-circuito em SDEEs provocado devido à inserção de GDs. Uma aplicação refere-se ao ajuste rápido da proteção de sobrecorrente empregando a variação da corrente estimada devido a inserção da GD no sistema.

Como trabalho futuro os autores estão investigando métodos que tornem possível estimar a corrente injetada pelas GDs durante um curto-circuito utilizando dados construtivos das GDs e de pré-falta do SDEE.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (concessão: 2015/21972-6), pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Abouzar Rahmati, Mahmoud A. Dimassi, Reza dhami and Daniel Bumblauskas. (2015). An Overcurrent Protection Relay Based on Local Measurements. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 51, NO. 3, pp. 2081-2085.
- Agência Nacional De Energia Elétrica - ANEEL, Assessoria de Imprensa, “Brasil Ultrapassa 5 mil Conexões de micro e mineração”, 2016.
- Barradas, Henrique Molina. Buzo, Ricardo Fonseca. Leão, Fábio Bertequini. (2018). Analysis of voltage and short-circuit current on photovoltaic generation dominated distribution systems. *Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. Niteroi, Brazil.
- Barradas, Henrique Molina. Leão, Fábio Bertequini. (2018). Análise da inserção massiva de geração distribuída fotovoltaica nos níveis de curto-circuito em redes de distribuição de energia elétrica. Dissertação em Engenharia Elétrica - FEIS UNESP.
- Barsali, S. Ceraolo, M. Pelacchi, P and Poli, D. (2002). Control techniques of dispersed generators to improve the continuity of electricity supply, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. vol. 2, pp. 789–794.
- Coffe, F, Booth, C and Dyško, A. (2015). An Adaptive Overcurrent Protection Scheme for Distribution Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 30, NO. 2, pp 561-568.
- Elmer Sorrentino and Merwin Navas. (2015). Two Improvements Related to Overcurrent Functions for Bus Protection in Distribution Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 30, NO. 3, pp. 1634-1635.
- Emilio C. Piescorovsky and Noel N. Schulz. (2017). Fuse relay adaptive overcurrent protection scheme for microgrid with distributed generators. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, Iss. 2, pp. 540–549.
- He, J. H, Cheng, Y H, Hu, J. Yip, H, T. (2016). An Accelerate Adaptive Overcurrent Protection for Distribution Networks with High DG Penetration. *13th International Conference on Development in Power System Protection (DPSP)*. Edinburgh, UK.
- Hongxia Zhan, Caisheng Wang, Yang Wang, Xiaohua Yang, Xi Zhang, Changjiang Wu and Yihuai Che. (2016). Relay Protection Coordination Integrated Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Sources in Distribution Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, VOL. 7, NO. 1, pp.55-65.
- Husnain Sadiq, Usman Hameed, Muhammad Nauman rafique, Syed Ahmed Hassan Raza and Kashif Imran. (2018). Impact of PV Penetration on Short Circuit Current of Radial Distributed Feeder and Existing Power System Protection of NUST. *International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube)*, Quetta, Pakistan.
- Jalilian, A. Tarafdar, M Hagh and Hashemi, S M, (2014). An Innovative Directional Relaying Scheme Based on Postfault Current. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 29, NO. 6, pp. 2640-2647.
- Luka V. Strezoski and Marija D. Prica. (2017). Short circuit Analysis in Large-scale Distribution Systems With High Penetration of Distributed Generators. *IEEE/CAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA*, VOL. 4, NO. 2, pp. 243-251.
- Mahamad Nabab Alam. (2019). Adaptive Protection Coordination Scheme Using Numerical Directional Overcurrent Relays. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, VOL. 15, NO. 1, pp. 64-73.
- Mamede Filho, João. (2013). Proteção de sistemas elétricos de potência. Editora LTC, Rio de Janeiro.
- Mansour Ojaghi, Zeinab Sudi, and Jawad Faiz. (2013). Implementation of Full Adaptive Technique to Optimal Coordination of Overcurrent Relays. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 28, NO. 1, pp. 235-244.
- Pukar Mahat, Zhe Chen, Birgitte Bak-Jensen and Claus Leth Bak. (2011). A Simple Adaptive Overcurrent Protection of Distribution Systems With Distributed Generation. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, VOL. 2, NO. 3, pp. 428-437.
- Shaofei Shen, Da Lin, Huifang Wang, Peijun Hu, Kuan Jiang, Dongyang Lin, and Benteng He. (2017). An Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With DGs Based on Optimized Thevenin Equivalent Parameters Estimation. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 32, NO. 1, pp. 411-419.
- Vishnuvardhan Telukunta, Janmejaya Pradhan, Anubha Agrawal, Manohar Singh and Sankighatta Garudachar Srivani. (2017). Protection Challenges Under Bulk Penetration of Renewable Energy Resources in Power Systems: A Review. *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS*, VOL. 3, NO. 4, pp. 365-379.
- Yamaguchi, H and Kataoka, T. (2008). Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter With Shunt Impedance and Inductive Load. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*. VOL. 18, NO. 2, pp. 668-671.
- Walid El-Khattam and Tarlochan S. Sidhu. (2008). Restoration of Directional Overcurrent Relay Coordination in Distributed Generation Systems Utilizing Fault Current Limiter. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 23, NO. 2.