

Estudo de Impacto de Geração Solar Fotovoltaica nos Níveis de Curto-Circuito de Subestações de 13,8 kV do Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, usando o Software OpenDSS^R

Anderson N. L. de O. Ramos*. Marcos A. D. de Almeida**. Arrhenius V. da C. Oliveira***.
Max C. P. Filho****. Rodrigo P. de Medeiros *****

* *Divisão de Manutenção do Sistema Elétrico, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN 59078-970, Brasil (e-mail: nicholas.lima@ufrn.br).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN 59078-970, Brasil (e-mail: marcos.dias@ufrn.br).*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN 59078-970, Brasil (e-mail: arrhenius.oliveira@ufrn.br).*

**** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN 59078-970, Brasil (e-mail: max.pimentel@ufrn.br).*

***** *Departamento de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraubas, RN 59780-000, Brasil, (e-mail: rodrigo.prado@ufersa.edu.br).*

Abstract: Recent installation of three photovoltaic generators within Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN) Central Campus energy grid may have a negative effect on the reliability of the present protection system as it was originally set up considering a unidirectional downstream load flow. In this paper, short-circuit current contribution from inverter-based solar generator of the Zila Mamede Central Library will be simulated for different types of faults at the primary and secondary sides of the library substation, as well as short-circuit levels with and without the distributed generators will be shown.

Resumo: A recente instalação de três geradores fotovoltaicos na rede elétrica interna de distribuição do Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pode afetar negativamente a confiança do sistema de proteção atual por ser convencionalmente parametrizado para uma rede com fluxo unidirecional de potência. Neste artigo, serão simulados os valores de corrente injetada pelo gerador fotovoltaico da Biblioteca Central Zila Mamede (BCZM) para diversos tipos de falta no lado primário e secundário da subestação da biblioteca, bem como serão expostos os valores de níveis de curto-circuito com e sem a geração distribuída.

Keywords: Distributed Photovoltaic Generation; Fault in Medium Voltage Systems; Short-Circuit Current Contributions; Electric Power Network; OpenDSS^R simulations.

Palavras-chaves: Geração Fotovoltaica Distribuída; Falta em Sistemas de Média Tensão; Corrente de Contribuições de Curtos-Circuitos; Rede Elétrica de Energia; Simulações com OpenDSS^R.

1. INTRODUÇÃO

Os elementos de proteção são parte fundamental para o bom funcionamento e a confiabilidade de um sistema de energia. Há alguns anos, a configuração das redes de distribuição de energia elétrica existentes se caracterizava por ser predominantemente radial e com única fonte, de modo que o fluxo de potência acontecia sempre em um único sentido da rede. Baseado nessa tipologia, os sistemas elétricos de distribuição e seus componentes de proteção foram projetados e parametrizados.

Contudo, esse modelo unidirecional de potência vem sendo alterado pela inserção da Geração Distribuída (GD), a qual está ganhando cada vez mais popularidade e visibilidade, principalmente a solar. Juntamente com a inclusão de novas fontes no sistema de distribuição, surgem as adequações nas redes, as quais podem ser desde a instalação de novos elementos de proteção e/ou a reparametrização dos existentes até a reestruturação da rede.

Na análise deste trabalho, será demonstrada a influência sob os níveis de curto-circuito em instalações de média e baixa tensão após a inserção de uma usina solar FotoVoltaica (FV).

Em vez de calcular a contribuição do sistema FV para curtos-circuitos por métodos simplificados, tal como descrito no padrão IEC 60909-0 (2016), em que considera-se que toda corrente injetada por um sistema FV escoar para a falta e que soma-se as amplitudes das correntes das diversas fontes distribuídas na rede sem considerar o ângulo dos fasores de corrente de cada contribuição, optou-se por executar fluxos de carga utilizando o OpenDSS^R.

2. INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA, O PONTO DE ACOPLAMENTO COM A REDE E OS CURTOS-CIRCUITOS

O gerador solar instalado na Biblioteca Central Zila Mamede (BCZM) na Zona Central da rede elétrica do Campus Central da UFRN possui 424 módulos fotovoltaicos de 470 Wp e 7 inversores de 25 kW, totalizando potência de placas em

199,28 kWp, porém limitada pelos inversores a 175 kVA com Fator de Potência (FP) de 0,99 indutivo. Não foi considerada a possibilidade de injeção de potência reativa por parte do sistema solar para ajudar a rede elétrica a recuperar mais rapidamente os níveis de tensão (STREZOSKI, 2023).

A subestação elétrica da BCZM possui dois transformadores a seco de 500 kVA em paralelo, ligação fasorial Dyn1 (defasagem -30°), tensões 13,8-0,38/0,22 kV, impedância reativa de 5,26 % na base dos transformadores e perdas no cobre de 5.920 W cada.

Os curtos-circuitos serão conectados por meio de uma impedância puramente resistiva de 0,1 m Ω . Quanto aos locais das faltas, serão considerados o ponto da rede de 13,8 kV do Campus Central da UFRN mais próximo da biblioteca (ponto de falta 1) e o barramento secundário da subestação da BCZM (ponto de falta 2). No ponto de falta 1, os valores de impedância Thèvenin de sequência positiva (Z_{th1}) e zero (Z_{th0}) em valores por unidade estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Impedância de Thèvenin no ponto de falta 1

| | |
|-----------|-----------------------|
| Z_{th1} | 0.81446+j2.49547 p.u. |
| Z_{th0} | 0.39968+j3.21604 p.u. |

A base utilizada para definição dos valores em p.u. da Tabela 1 foi potência de base $S_b = 100$ MVA e tensão trifásica de base $V_b = 13,8$ kV, logo, a impedância de base é $Z_b = 1,904 \Omega$. A impedância de sequência negativa é equivalente à de sequência positiva.

Uma vez que a impedância do trecho de conexão da central geradora até os transformadores, bem como a impedância do trecho dos transformadores até o ponto de falta, é baixa em relação à impedância dos transformadores, elas podem ser desprezadas.

O diagrama unifilar simplificado da Fig. 1 representa os locais da falta e a ligação entre o Sistema Elétrico de Potência (SEP) do Campus Central da UFRN, a subestação da BCZM e a central de geração solar.

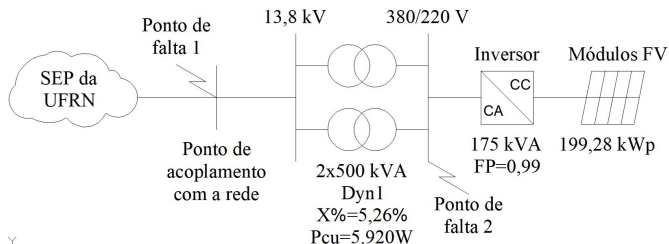


Fig. 1: Diagrama unifilar simplificado da situação de curto-circuito genérico nos pontos de interesse deste trabalho.

Os dados necessários para montagem do SEP da UFRN na simulação foram obtidas do banco de dados criado por Silva (2020), o qual contém informações sobre toda rede de média tensão do Campus Central da UFRN, desde o ponto de entrega na subestação de 69 kV até os transformadores das subestações de 13,8 kV e suas respectivas posições georreferenciadas.

3. MODELAGEM DA PLANTA SOLAR

O Open Distribution System Simulator é uma ferramenta de simulação livre (free) para sistemas de distribuição elétrica, surgindo em 1997 a partir da necessidade por um software capaz de analisar a aplicação de geração distribuída em sistemas de distribuição, porém não se limitando a isso.

Dentre as variadas aplicações do OpenDSS^R, destacam-se: análise e planejamento de redes de distribuição ou circuitos quaisquer; análise da conexão de geração distribuída; análise harmônica; simulação de parques eólicos; simulação de tensões entre neutro e terra; estudo de curtos-circuitos; simulações diárias ou anuais; fluxo de carga; etc.

O programa modela os sistemas elétricos para simulações em regime permanente senoidal, entregando resultados fasoriais. Os blocos de elementos são descritos e conectados aos outros blocos por meio de barras, as quais contêm nós – estes descrevem as ligações elétricas das fases, neutro e terra.

Nas simulações deste trabalho, foram utilizados os seguintes blocos: circuito; linhas; transformadores; falha e o sistema fotovoltaico.

Elemento circuito: representa a barra *slack*, capaz de suportar anomalias sem alterar suas características de tensão e frequência, e conectada ao resto do circuito simulado por meio de uma impedância de Thèvenin. Elemento linha: representa as linhas de transmissão de potência, conectando as barras por meio de impedâncias segundo o modelo pi. Elemento transformador: representa transformador real – descrito com resistência e indutância de enrolamento e de magnetização –, responsável por elevar ou baixar tensões. Elemento falha: representa uma resistência, cujo valor e ligação entre fases e/ou neutro/terra é descrita pelo usuário. Elemento sistema fotovoltaico: representa planta solar conectada à rede por meio de inversor, cuja modelagem pode ser vista na Fig. 2.

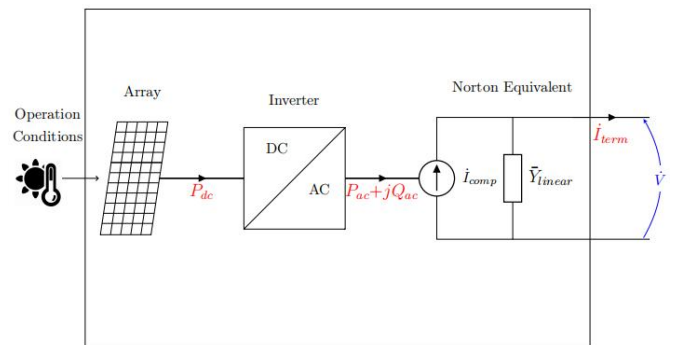


Fig. 2: Modelagem de planta solar no OpenDSS (RADATZ, 2020).

3.1 Condições do sistema FV para as simulações

Foi considerada uma irradiação solar média ao meio dia em natal de 900 W/m² (PRAXEDES, 2017) com temperatura aproximada dos módulos de 57 °C, calculada a partir da equação de Ross e Smokler mostrado por Yang (2018). Assim, a energia exportada fica limitada à potência dos inversores: 175 kVA.

Foi considerado para os inversores um controle de corrente como descrito por Ferreira (2016), de modo que o sistema FV só entrega correntes balanceadas de sequência positiva, mesmo sob condições de curto-circuito, além de limitar a corrente a qualquer instante a 2 p.u. na base do sistema FV. O OpenDSS^R permite a definição de tais configurações. Para a situação simulada, o valor nominal de corrente de um sistema de 175 kVA corresponde cerca de 265,15 A (1 p.u.) em 380/220 V.

3.2 Corrente injetada

Um gerador solar fotovoltaico pode ser modelado como uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância interna, cuja corrente depende da potência gerada e da tensão da rede. Para inversores trifásicos e admitindo-se tensões equilibradas, a corrente nominal exportada é calculada segundo (1).

$$|I_n| = \frac{|S_n|}{3 \cdot |V_{Fase,n}|} \quad (1)$$

Em que:

$|I_n|$ é o módulo da corrente nominal fornecida pelo inversor trifásico;

$|S_n|$ é o módulo da potência nominal aparente do inversor trifásico;

$|V_{Fase,n}|$ é a tensão alternada de fase nominal do inversor trifásico.

Como os inversores trifásicos permitem somente a injeção de correntes de sequência positiva, devido ao controle rígido de corrente, logo, no caso de um sistema elétrico de sequência *ABC* com tensões desbalanceadas, ou seja, de forma genérica, calcula-se a corrente na fase *a* por meio de (2).

$$I_a^* = \frac{S_{Inv}}{V_a + V_b \cdot \alpha + V_c \cdot \alpha^2}, \text{ com } \alpha = 1 \angle 120^\circ \quad (2)$$

Em que:

I_a^* é a corrente conjugada fornecida pelo inversor na fase *a*;

S_{Inv} é o fasor de potência aparente fornecida pelo inversor;

V_a , V_b e V_c são os fasores de tensão de saída nas fases *a*, *b* e *c* do inversor, respectivamente.

Visto que as correntes fornecidas por inversores trifásicos são equilibradas, encontram-se os fasores de corrente nas fases *b* e *c* a partir do defasamento em 240° e 120°, respectivamente, do resultado de (2).

Adicionalmente, pode-se deduzir que, considerando a potência fornecida pela geração constante durante o curto-circuito, quanto menor as tensões nos terminais dos inversores, maior a corrente exportada.

Portanto, espera-se que, quanto mais fases forem envolvidas em uma falta, menor se configure o denominador de (2) e

consequentemente maiores os valores de contribuição da geração solar, porém limitados a 2 p.u. na base do sistema FV.

É possível utilizar o teorema de componentes simétricas de Fortescue (1918) para estimar a amplitude e ângulo das tensões em cada fase para cada tipo de falta e com isso estimar a amplitude e fase das correntes injetadas pela GD, contudo isso não será objetivo deste trabalho.

4. RESULTADOS

Nas simulações realizadas, o sistema elétrico foi considerado em vazio, sendo as únicas correntes na rede referente à geração solar, às correntes do ramo magnetizante dos transformadores e aos curtos-circuitos. Além disso, a barra *slack* do sistema se encontra conectada ao ponto de acoplamento da subestação de 69 kV da UFRN com a linha de subtransmissão em 69 kV da Concessionária de Energia do Rio Grande do Norte (COSERN) por meio da impedância de Thévenin local. A rede de distribuição em 13,8 kV do Campus Central da UFRN recebe a tensão abaixada por um transformador Dyn1.

Pelo teorema da superposição, a corrente de curto-circuito é a soma das contribuições das diversas fontes existentes no sistema elétrico. No estudo em questão, existem apenas duas contribuições para o curto-circuito: a contribuição da rede e a contribuição do sistema FV, assim como descrito na Fig. 3.

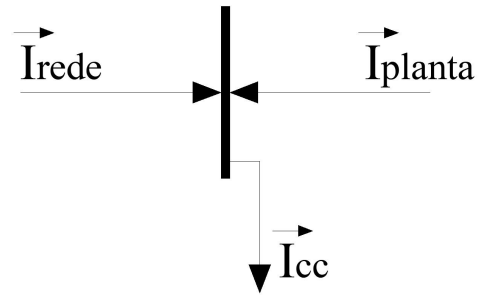


Fig. 3: Representação das correntes no local de falta genérico.

4.1 Curtos-circuitos no ponto de falta 1 (13,8 kV)

A Tabela 2 apresenta os valores de corrente de curto-circuito no ponto de conexão da subestação da BCZM e as contribuições de corrente de ambos lados da falta, sem o sistema FV.

Tabela 2. Contribuição de curto-circuito no ponto de falta 1 sem a planta solar

| Tipos de curto-circuito | Valores de corrente sem a planta solar [A] | | |
|-------------------------|--|-------------------|------------------------------------|
| | À montante (Contribuição da rede) | De curto-circuito | À jusante (Contribuição da planta) |
| Trifásico | 3035 | 3035 | 0 |
| Bifásico | 2628 | 2628 | 0 |
| Fase-terra | 2827 | 2827 | 0 |

A Tabela 3 apresenta os valores de corrente de curto-circuito no ponto de conexão da subestação da BCZM e as contribuições de corrente de ambos lados da falta, com o sistema FV.

Tabela 3. Contribuição de curto-circuito no ponto de falta 1 com a planta solar

| Tipos de curto-circuito | Valores de corrente com a planta solar [A] | | |
|-------------------------|--|-------------------|------------------------------------|
| | À montante (Contribuição da rede) | De curto-circuito | À jusante (Contribuição da planta) |
| Trifásico | 3035 | 3031 | 14,55 |
| Bifásico | 2628 | 2633,5 | 14,43 |
| Fase-terra | 2827 | 2831 | 10,51 |

4.2 Curtos-circuitos no ponto de falta 2 (380/220 V)

A Tabela 4 apresenta os valores de corrente de curto-circuito no barramento secundário da subestação da BCZM e as contribuições de corrente de ambos lados da falta, sem o sistema FV.

Tabela 4. Contribuição de curto-circuito no ponto de falta 2 sem a planta solar

| Tipos de curto-circuito | Valores de corrente sem a planta solar [A] | | |
|-------------------------|--|-------------------|------------------------------------|
| | À montante (Contribuição da rede) | De curto-circuito | À jusante (Contribuição da planta) |
| Trifásico | 21840 | 21840 | 0 |
| Bifásico | 18892 | 18892 | 0 |
| Fase-terra | 23383 | 23383 | 0 |

A Tabela 5 apresenta os valores de corrente de curto-circuito no barramento secundário da subestação da BCZM e as contribuições de corrente de ambos lados da falta, com o sistema FV.

Tabela 5. Contribuição de curto-circuito no ponto de falta 2 com a planta solar

| Tipos de curto-circuito | Valores de corrente com a planta solar [A] | | |
|-------------------------|--|-------------------|------------------------------------|
| | À montante (Contribuição da rede) | De curto-circuito | À jusante (Contribuição da planta) |
| Trifásico | 21840 | 22314 | 531,77 |
| Bifásico | 18892 | 19057 | 526,55 |
| Fase-terra | 23383 | 23484 | 410,09 |

5. CONCLUSÕES

De acordo com o exposto, a elevação dos níveis de curto-circuito, devido à inserção do sistema FV na BCZM, é mais preocupante no nível secundário de tensão (380/220 V). Ainda que a contribuição de ambas as fontes possuíssem o mesmo ângulo, de modo que a corrente de falta equivalesse ao somatório da amplitude das correntes de contribuição, o nível de curto-circuito no lado primário (13,8 kV) aumentaria em no máximo 2 vezes a corrente nominal de geração da planta solar referida para o lado de média tensão (contribuição máxima de 14,55 A em 13,8 kV).

Já nos curtos-circuitos no lado secundário da subestação da BCZM, a contribuição do sistema FV permanece em no máximo 2 p.u. na base da planta solar, porém se torna mais expressiva devido ao nível de tensão ser muito baixo (contribuição máxima de 531,77 A em 380/220 V).

A soma das contribuições é vetorial, portanto, a corrente de falta pode ser menor ou maior após a inclusão da planta solar.

Entretanto, o mais comum é haver a elevação da intensidade de curto-circuito com a instalação de GDs. Um exemplo de queda do nível de curto-circuito depois da inserção da geração FV está apresentado no resultado da falta trifásica no lado de média tensão (13,8 kV) na Tabela 3.

Também pode-se verificar que, para a situação simulada, a contribuição da rede para um curto-circuito independe da presença da geração solar, tendo em vista que a impedância da rede até o curto-circuito não se altera e não há outras gerações distribuídas instaladas ao longo do trecho.

Logo, com a inserção do sistema FV, deve-se garantir que os disjuntores no lado secundário (380/220 V) da subestação da biblioteca tenham uma capacidade de interrupção compatível com o acréscimo no nível de corrente de curto-circuito. Além disso, deve-se prever uma proteção direcional no disjuntor de média tensão da BCZM, a qual limitará a corrente máxima reversa ao valor de corrente nominal de geração referida para o lado primário (7,30 A em 13,8 kV).

REFERÊNCIAS

- FERREIRA, D. J. Estudos dos Impactos da Contribuição de Geradores Fotovoltaicos na Proteção de Sobrecorrente dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2016.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, IEEE, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918.
- IEC 60909-0. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, Part 0: Calculation of currents. International Electrotechnical Commission, IEC, Janeiro de 2016.
- PRAXEDES, K. C. Estudo de Modelos de Banda Larga para Estimativa da Irradiação Direta Normal. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, Agosto de 2017.
- RADATZ, P., ROCHA, C., SUNDERMAN, W., RYLANDER, M., E PEPPANEN, J. OpenDSS PVSystem and InvControl Element Models. EPRI – Electric Power Research Institute, Califórnia, Palo Alto, pg. 1–12, Agosto de 2020.
- SILVA, F. O. C. Sistema Elétrico da UFRN - Criação de Base de Dados Geográfica e Realização de Estudos de Proteção. Monografia de graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, Dezembro de 2020.
- STREZOSKI, L. V., SIMIC, N. G. Quantifying the impact of inverter-based distributed energy resource modeling on calculated fault current flow in microgrids. Artigo científico, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Abril de 2023.
- YANG, R. L., TIEPOLO, G. M., TONOLO, E. A., URBANETZ JR., J., SOUZA, M. B. Estimativa da Temperatura em Células Fotovoltaicas para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba. Artigo científico, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2018.