

Alteração nas correntes de curto-circuito com elevada integração de geração distribuída fotovoltaica

Amauri Cesar Cristofano Junior * Matheus dos Reis Bravim **
Prof. Dr. Oureste Elias Batista ***

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil (e-mail: amauri.cristofano@edu.ufes.br).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil (e-mail: matheus.bravim@edu.ufes.br).*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES Brasil (e-mail: oureste.batista@ufes.br).*

Abstract: With the advancement of technology, lower prices and low environmental impacts, the use of photovoltaic generators is becoming increasingly viable, studying the effects of the high integration of photovoltaic generators in the electrical system, on short-circuit currents, for example, they will indicate that the electrical system will need to prepare to avoid or mitigate such effects. One of the most used and efficient ways to analyze the effects caused by the massive insertion of photovoltaic generators is to carry out studies in computer simulators, such as OpenDSS and Pycharm software, which mathematically simulate circuits, calculate short-circuit currents and automate the insertion of photovoltaic generators in different scenarios. With this variety of data and scenarios generated, the behavior of the studied systems is very close to reality. In this study, the single-phase and three-phase short-circuit currents were analyzed, verifying the greatest variation during the insertion of photovoltaic distributed generation in the points of the system which have loads. The photovoltaic generators will be inserted in different ways and the short circuit currents will be calculated at each insertion.

Resumo: Com o avanço da tecnologia, diminuição dos preços e baixos impactos ambientais, a utilização de geradores fotovoltaicos está se tornando cada vez mais viável, estudar os efeitos da elevada integração de geradores fotovoltaicos no sistema elétrico, variações nas correntes de curto-circuito, por exemplo, indicarão que o sistema elétrico precisará se preparar para evitar ou mitigar tais efeitos. Uma das maneiras mais utilizadas e eficientes para analisar os efeitos causados pela inserção massiva de geradores fotovoltaicos é a realização de estudos em simuladores computacionais, como os softwares OpenDSS e Pycharm, que simulam matematicamente os circuitos, calculam as correntes de curto-circuito e automatizam a inserção de geradores fotovoltaicos em cenários diferentes. Com esta variedade de dados e cenários gerados, o comportamento dos sistemas estudados fica muito próximo a realidade. Neste estudo foram analisadas as correntes de curto-circuito monofásicas e trifásicas, verificação da maior variação durante a inserção de geração distribuída fotovoltaica nos pontos do sistema os quais possuem cargas. Serão inseridos os geradores fotovoltaicos de maneiras diferentes e calculadas as correntes de curto circuito a cada inserção.

Keywords: current; short-circuit; distributed generation; photovoltaic; OpenDSS.

Palavras-chaves: corrente; curto-circuito; geração distribuída; fotovoltaica; OpenDSS.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento do consumo de energia elétrica, devido a novas plantas industriais e o crescimento populacional, o sistema elétrico em alguns anos chegará em sua capacidade máxima de carga instalada, isto é, quando o consumo de energia elétrica atinge níveis iguais ou muito próximos aos níveis produzidos.

Soluções como construção de novas usinas hidrelétricas, térmicas e nucleares, além do alto valor de investimento agregado e tempo de construção, possuem um impacto ambiental muito grande, o qual vai na contra mão de uma ideologia de desenvolvimento sustentável cada vez mais buscada nos dias de hoje (Alves et al., 2018).

Assim o barateamento e a melhoria nas tecnologias eletrônicas das gerações alternativas, como geração fotovoltaica e eólicas, estão se tornando mais viáveis tanto economi-

camente como ambientalmente (Nemet, 2006). A energia gerada pelo Sol, fonte inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto para obtenção de calor quanto para luz, é hoje uma das alternativas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano (Pinho et al., 2014).

Porém os sistemas elétricos ainda não estão preparados para este tipo de inserção massiva de geração distribuída, gerando ao longo do sistema várias consequências, as quais podem abalar tanto a confiabilidade quanto a estabilidade do sistema elétrico envolvido (Vargas et al., 2018a).

Analisar os impactos da inserção massiva de geração fotovoltaica (GFV) se tornou uma questão muito relevante para garantir a confiabilidade e estabilidade dos sistemas elétricos no futuro; consequências como a modificação no fluxo de carga (Nie et al., 2012), elevação do nível de curto-circuito (Coffele et al., 2014), trip solidário (Fracalossi et al., 2020), descoordenação entre os dispositivos de proteção Costa et al. (2015), aumento no nível de tensão (Queiroz et al., 2020), podem ocasionar situações indesejadas no sistema elétrico.

Uma das maneiras de se estudar estas consequências é a realização de simulações computacionais que são baseadas e desenvolvidas através de metodologias e ferramentas matemáticas já consolidadas, estas ferramentas analisam e verificam o comportamento do sistema elétrico em vários cenários, inclusive quando se deseja analisar a inserção massiva de geração distribuída (Vargas et al., 2018b).

Soluções computacionais para os cálculos das correntes, tanto de curto circuito (I_{CC}) quando de operação, fluxo de carga, se tornaram uma ferramenta de grande valia. Estes cálculos são mais complexos, uma vez que utiliza-se a inversão de matrizes de ordens maiores, por exemplo, e utilizando softwares conseguimos simular muitas opções em menor tempo, como realizar um total de 512 iterações num sistemas com inserção de nove geradores, (Mendes et al., 2019), isto nos permite avaliar mais possibilidades de cenários diferentes, deixando a simulação do comportamento do sistema elétrico cada vez mais próximo a realidade, calculando as correntes de cada nó, por exemplo, facilitando assim a análise e visualização dos resultados.

Para modelagem de um sistema exemplo, costuma-se utilizar sistemas já consolidados academicamente, como o sistema de 123 nós do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), com isso algumas características e comportamentos já são conhecidos, trazendo uma maior credibilidade ao estudo.

2. EFEITOS DA INSERÇÃO DE GFV NA I_{CC}

A poucas décadas, o sistema elétrico brasileiro era caracterizado por um fluxo unidirecional de energia. Seus geradores ficavam concentrados distantes dos locais de consumo. Nos últimos anos, as energias renováveis tem tido alta penetração no setor energético, e visto os problemas causados pela inserção massiva dos GFV, o presente estudo tem por objetivo analisar as alterações nas correntes de curto-circuito em um sistema exemplo IEEE de 123 nós, inserindo GFV uma a uma, duas a duas e três a três e avaliar a maior variação nas correntes de curto circuito trifásicas e monofásicas.

O sistema estudado tem como característica o fluxo de potência em apenas um sentido, unidirecional, com isto, a I_{CC} é presumível e possui valor muito maior em relação a corrente nominal. A inserção massiva de GFV, baseado em conversores de potência, ao longo do sistema elétrico altera esta característica, tornando o sistema bidirecional, fluxo de potência muda de sentido em relação a um nó do sistema, e a I_{CC} de cada nó pode receber uma contribuição que varia de 1,06 a 4,00 pu da corrente nominal do GFV inserido. (Vargas et al., 2019).

Com isso as contribuições dos GFVs somam-se a corrente injetada pela fonte principal, de maior potência, causando um aumento na I_{CC} resultante, causando relevantes impactos no sistema elétrico como:

- Elevação da energia incidente em painéis, considerada na proteção de pessoas, em manobras realizadas localmente, abertura de um disjuntor manualmente, por exemplo, o trabalhador deverá utilizar uma roupa antichama com maior nível de proteção (Resende, 2016).;
- Trip solidário, na ocorrência de falta em determinado ponto do sistema elétrico, pode acontecer o desligamento indesejado de uma parte do sistema que não participada falta diretamente (Fracalossi et al., 2020);
- Superação do níveis de I_{CC} que os componentes do sistema foram projetados para suportar, um painel projetado para suportar uma I_{CC} de 5 kA e com inserção de GFV a I_{CC} muda para 7 kA, aumentando o risco de explosão deste painel (Moretti et al., 2013);
- Descoordenação das proteções de sobrecorrente, devido ao aumento das I_{CC} , tanto a coordenação amperimétrica, nível corrente, quanto a cronológica, tempo de atuação, podem ser influenciadas, causando descoordenação entre os dispositivos de proteção, fusíveis, relés entre outros. (Bhise et al., 2017).

3. METODOLOGIA

O elemento PVSystem foi utilizado para modelagem dos geradores fotovoltaicos no software OpenDSS. Serão inseridos no sistema IEEE de 123 nós GFV monofásicos e nos nós os quais possuem cargas instaladas, o sistema elétrico exemplo possui oitenta e cinco cargas conectadas, mas como existem cargas trifásicas e bifásicas, foram conectados noventa e cinco GFV utilizando o elemento PVSystem.

As GFV além de serem monofásicas, possuem tensão de saída igual a da rede (nó) conectado, mesma potência da carga conectada. Por exemplo, se no nó vinte e sete está conectada uma carga de oito quilo watts, foi conectado no nó vinte e sete um GFV de oito quilo watts. Foram realizadas duzentas rotinas de cálculo de I_{CC} , nas quais se basearam na realização dos cálculos a cada inserção de GFV, e para isso foi utilizado o software Pycharm, linguagem em Python, para "automatizar" a inserção dos GFV e realização cálculos de I_{CC} no software OpenDSS, está interação entre os softwares foi possível através da interface Component Object Model (COM) da Microsoft (MS), e com isso foi possível diminuir os tempos de geração de dados para a análise de impacto da inserção massiva de GFV na variação das I_{CC} .

Foi realizada a comparação das I_{CC} a cada cálculo realizado após a inserção de um GFV e comparando percentualmente, para a verificação da influência que cada GFV causaria nas I_{CC} do sistema elétrico estudado, verificando as maiores variações, extremos.

3.1 Sistema elétrico sob estudo

Alimentadores exemplos utilizados pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) são os mais aceitos pela sociedade acadêmica para simulações. Neste trabalho utilizaremos um alimentador exemplo de 123 nós, Figura 1, o qual possui linhas monofásicas, bifásicas e trifásicas. O sistema opera com potência aparente de 3,86 MVA, possui um transformador na subestação principal de 115/4.16kV. Estão conectadas ao longo do sistema oitenta e cinco cargas, trifásicas, bifásicas e monofásicas, as quais são modeladas como potência constante, impedância e cargas de corrente. Existem quatro reguladores de tensão, e onze chaves seccionadoras, as quais seis estão fechadas e cinco estão abertas, permitindo uma flexibilidade de operação. A extensão total da rede é de doze quilômetros, sendo que a maior distância entre nós, maior rede, é de um quilometro e novecentos metros (Beuning and Salehfar, 2019).

Este alimentador foi criado em 1992 e aprovado pelo Subcomitê Data Science Academy (DAS) durante a conferência 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, estes modelos foram projetados para avaliar e comparar algoritmos na solução de sistemas radiais trifásicos desequilibrados, os quais são baseados em características construtivas reais de circuitos de distribuição e, portanto, trazem resultados satisfatórios em simulações computacionais.

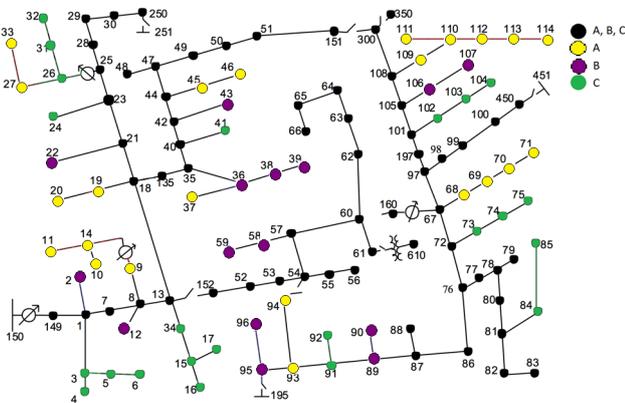


Figura 1. Demonstração gráfica da rede IEEE de 123 nós

3.2 Software utilizado (OpenDSS)

O OpenDSS (Open Distribution System Simulator) é um software de código aberto, e foi desenvolvido com a finalidade de apoio a análises de redes com alta penetração de GFD, operação de forma mais flexível, desenvolvimento constante de suas linhas de código, e capacidade de cálculos que outras ferramentas não faziam, no momento de sua concepção. O software OpenDSS é capaz de calcular fluxo de potência, variação dos níveis de tensão no domínio do tempo, correntes de curto-circuito entre outros tipos de cálculos.

O software tem como característica a programação em linhas de comando, definindo os elementos do circuito por códigos pré existente, outra característica é que os usuários podem definir os circuitos diretamente no executável autônomo ou os importando de um arquivo de texto fixo.

O programa também disponibiliza a interface Component Object Model (COM) da Microsoft (MS), permitindo que programadores possam desenvolver e executar novas soluções customizadas através de programas externos.

A partir dessa interface o programa pode ser acionado de forma totalmente independente de qualquer banco de dados ou arquivo de texto fixo que defina um circuito. O software OpenDSS pode ser controlado por programas como Python, utilizado neste trabalho, MATrix LABoratory (MATLAB), dentre outros e, também, por ferramentas do MS Office, como o Visual Basic for Applications (VBA).

3.3 Modelo de geração fotovoltaica

O modelo PVSystem combina as características da geração fotovoltaica com a conversão da energia elétrica por inversores de frequência (Radatz et al., 2016), Figura 2, mas basicamente injeta no sistema a potência nominal, considerando variáveis como fator de potência eficiência, níveis de tensão, nós conectados, números de fase, entre outros.

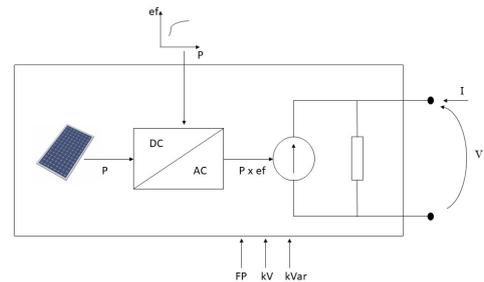


Figura 2. Modelo do PVSystem simplificado

3.4 Alocação das GFV

Para produzir diferentes cenários com elevada penetração de GFV, os geradores foram posicionados nos oitenta e cinco nós do alimentador que possuem cargas instaladas, e simulados três tipos de situações, na primeira foi inserido um gerador por vez e calculado o I_{CC} a cada conexão, gerando um total de noventa e seis cenários, na segunda foram inseridos dois geradores por vez e calculado o I_{CC} a cada conexão, gerando um total de quarenta e oito cenários, na terceira foram inseridos três geradores por vez e calculado o I_{CC} a cada conexão, gerando um total de trinta e dois cenários. Foram analisadas as faltas trifásica e faltas fase-terra, para cada nó do alimentador comparando a variação ao longo dos cenários.

Dessa forma obtemos como banco de dados para avaliação: conexão de um GFV por vez, mantendo o anterior e cálculo de I_{CC} trifásico e monofásico, conexão de dois GFV por vez, mantendo os anteriores e cálculo de I_{CC} trifásico e

monofásico, e conexão de três GFV por vez, mantendo os anteriores e cálculo de I_{CC} trifásico e monofásico.

3.5 Ramo do sistema IEEE de 123 nós

A fim de estudar o impacto da alta penetração de GFV nas I_{CC} , neste artigo foi avaliado apenas um ramo do sistema exemplo IEEE de 123 nós, o qual está situado entre o nó quarenta e cinquenta e um, demonstrado na Figura 3, mas serão inseridos todos os noventa e cinco GFV no sistema elétrico.

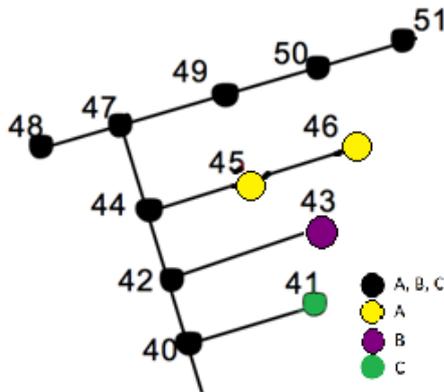


Figura 3. Nós a serem estudados.

O motivo de estudar apenas este ramo é de não deixar a análise muito extensa e massiva, realizando apenas uma amostragem do sistema escolhido, já que este ramo possui várias características que podem nos ajudar a compreender melhor o impacto da inserção massiva de GFV no sistema elétrico, como: cargas desequilibras, monofásicas, trifásicas, tipos de linhas de transmissão de tamanhos e formatos diferentes, e está localizado aproximadamente no meio do sistema exemplo IEEE de 123 nós, tanto fisicamente quanto numericamente, portanto nos é fornecido um banco de dados complexo e com características similares ao sistema completo, para analisar as variações das I_{CC} .

4. RESULTADOS

Para verificar o impacto nas correntes de I_{CC} trifásicas, foram realizados os cálculos nos nós quarenta, quarenta e dois, quarenta e quatro, quarenta e sete, quarenta e oito, quarenta e nove, cinquenta e cinquenta e um, o cálculo de I_{CC} monofásica foi realizado em todos os nós do ramo escolhido.

Utilizou-se o Pycharm ,através da interface COM, para habilitar os GFV e cálculo de I_{CC} trifásicas e monofásicas no software OpenDSS, e compilar todos os dados dos cenários realizados, foram realizadas duzentos cálculos de I_{CC} em cada nó do sistema escolhido, gerando vinte e quatro mil e seiscentas I_{CC} a serem analisadas.

4.1 Inserção de um GFV por vez

Foram realizados um total de noventa e seis cenários, inserção de um GFV por vez e cálculo das I_{CC} trifásicas e monofásicas até a integração de todos GFV no sistema elétrico estudado, sendo que no primeiro cálculo considerouse o sistema sem GFV conectado, e nos próximos cálculos

foram habilitados um GFV por vez até todos estarem conectados na rede IEEE de 123 nós, e a cada inserção foram calculadas as I_{CC} trifásicas e monofásicas para todos os nós. Os resultados foram apresentados na Figura 4 e 5, representando as I_{CC} trifásicas e monofásicas calculadas respectivamente.

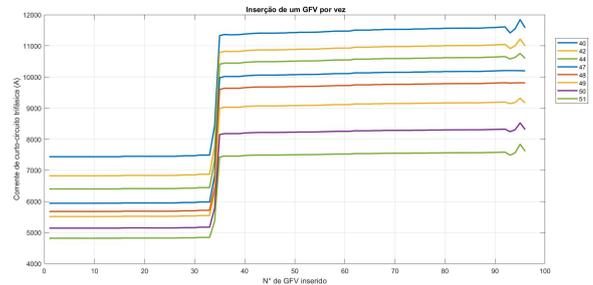


Figura 4. Variação de I_{CC} trifásicas após inserções

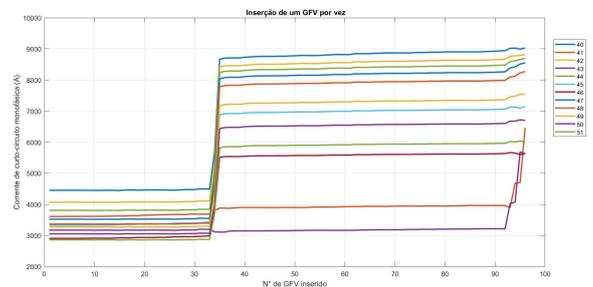


Figura 5. Variação de I_{CC} monofásicas após inserções

Na Tabela 1, verificou-se a máxima variação das I_{CC} trifásicas e monofásicas em cada nó do ramo escolhido, comparando o menor com o maior valor obtido em porcentagem.

Tabela 1. Variação I_{CC} trifásicas e monofásicas inserindo um GFV por vez

Nós	$\Delta I_{CC}^{3\phi}$	$\Delta I_{CC}^{1\phi}$
40	59	103
41	-	79
42	64	117
43	-	82
44	68	128
45	-	115
46	-	95
47	71	143
48	72	146
49	68	130
50	65	120
62	59	111

4.2 Inserção de dois GFV por vez

Foram realizados um total de quarenta e oito cenários, inserção de dois GFV por vez e cálculo das I_{CC} trifásicas e monofásicas até a integração de todos GFV no sistema elétrico estudado, sendo que no primeiro cálculo considerouse o sistema sem GFV conectado, e nos próximos cálculos foram habilitados dois GFV por vez até todos estarem conectados na rede IEEE de 123 nós, e a cada inserção foram calculadas as I_{CC} trifásicas e monofásicas para todos os

nós. Os resultados foram apresentados na Figura 6 e 7, representando as I_{CC} trifásicas e monofásicas calculadas respectivamente.

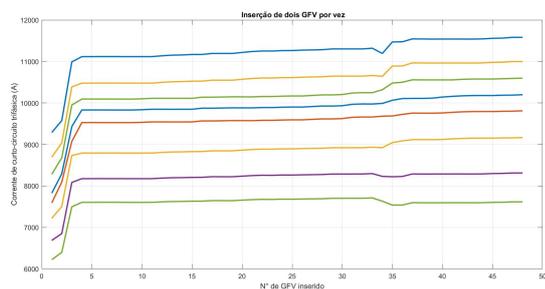


Figura 6. Variação de I_{CC} trifásicas após inserções

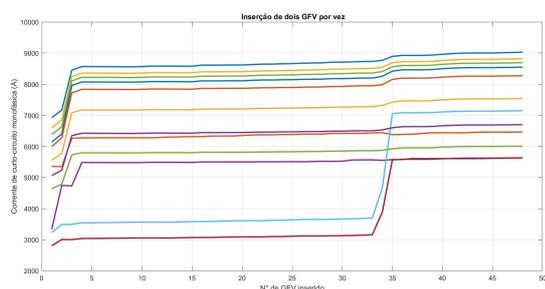


Figura 7. Variação de I_{CC} monofásicas após inserções

Na Tabela 2, verificou-se a máxima variação das I_{CC} trifásicas e monofásicas em cada nó do ramo escolhido, comparando o menor com o maior valor obtido em porcentagem.

Tabela 2. Variação I_{CC} trifásicas e monofásicas inserindo dois GFV por vez

Nós	$\Delta I_{CC}^{3\phi}$	$\Delta I_{CC}^{1\phi}$
40	56	102
41	-	79
42	61	116
43	-	77
44	65	128
45	-	121
46	-	100
47	71	142
48	73	145
49	66	130
50	62	119
62	60	110

4.3 Inserção de três GFV

Foram realizados um total de trinta e dois cenários, inserção de um GFV por vez e cálculo das I_{CC} trifásicas e monofásicas até a integração de todos GFV no sistema elétrico estudado, sendo que no primeiro cálculo considerou-se o sistema sem GFV conectado, e nos próximos cálculos foram habilitados três GFV por vez até todos estarem conectados na rede IEEE de 123 nós, e a cada inserção foram calculadas as I_{CC} trifásicas e monofásicas para todos os nós. Os resultados foram apresentados na Figura 8 e 9,

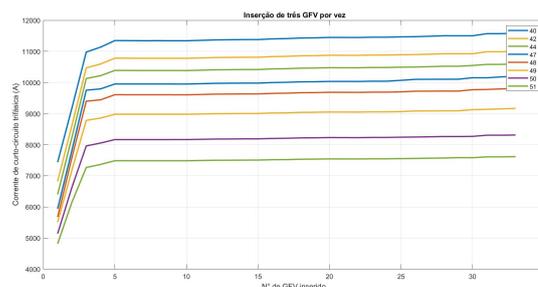


Figura 8. Variação de I_{CC} trifásicas após inserções

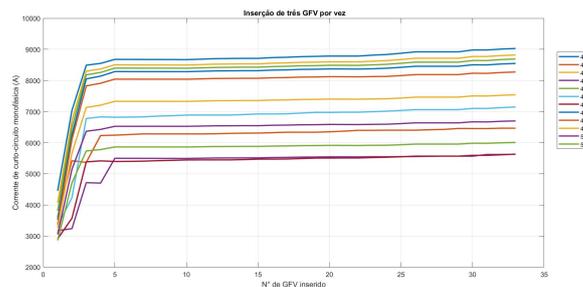


Figura 9. Variação de I_{CC} monofásicas após inserções

Tabela 3. Variação I_{CC} trifásicas e monofásicas inserindo três GFV por vez

Nós	$\Delta I_{CC}^{3\phi}$	$\Delta I_{CC}^{1\phi}$
40	56	103
41	-	79
42	61	117
43	-	77
44	66	128
45	-	115
46	-	94
47	72	142
48	73	145
49	66	130
50	62	119
62	58	110

representando as I_{CC} trifásicas e monofásicas calculadas respectivamente.

Na Tabela 3, verificou-se a máxima variação das I_{CC} trifásicas e monofásicas em cada nó do ramo escolhido, comparando o menor com o maior valor obtido em porcentagem.

4.4 I_{CC} nos 123 nós do sistema IEEE

Apesar de ter escolhido apenas um ramo do sistema IEEE de 123 nós para realizar a análise de dados, com as simulação foram geradas as I_{CC} de todo o sistema elétrico simulado, e com a utilização do software Pycharm para otimizar a aquisição dos dados e geração de gráficos foi possível comparar os dados de todo o sistema.

Afim de avaliar os impactos e mostrar que as variações não ocorrem somente apenas no ramo escolhido, mas também acontecem em todo o sistema IEEE de 123 nós, foi plotado os extremos encontrados, os valores mínimo e máximo das I_{CC} trifásicas e monofásicas obtidos nas simulações

realizadas, Figuras 10 e 11. E com isso a comparação dos valores mínimos e máximos confirma que a inserção massiva de GFV ocasiona aumento das I_{CC} em todo o sistema elétrico estudado.

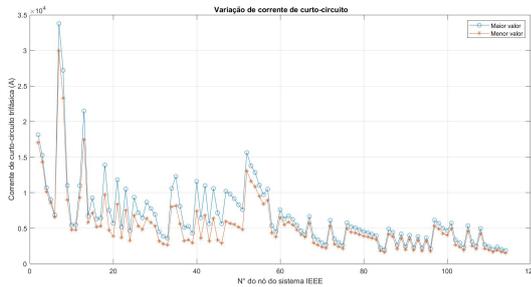


Figura 10. Variação de I_{CC} trifásicas após inserções

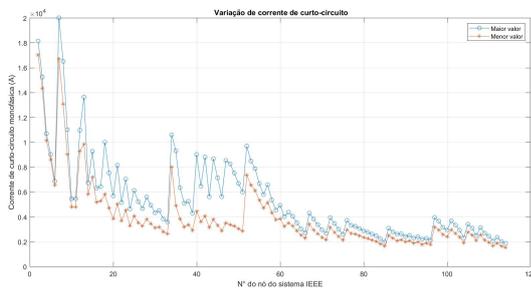


Figura 11. Variação de I_{CC} trifásicas após inserções

5. ANÁLISES

Com as iterações realizadas em diferentes cenários, podemos verificar um aumento significativo nas correntes de curto-circuito. Em alguns casos aumento de cento e quarenta e cinco por cento no valor da I_{CC} , comparando com a menor corrente, verificou-se também que sempre há um aumento na corrente de I_{CC} quando se insere um GFV no sistema, visto que as menores I_{CC} foram calculadas quando não havia GFV habilitada no circuito.

Nota-se também, que as variações de I_{CC} monofásicas e trifásicas, nos três métodos de inserção utilizados para simulações, possuem aproximadamente os mesmos valores, mostrando que independente do método, quanto maior a penetração de GFV maior será I_{CC} .

Nos gráficos nota-se que, a partir de uma potência de GFV conectada no sistema, o aumento da I_{CC} tende a estabilizar em valores próximos a sessenta e setenta por cento nas $I_{CC}^{3\phi}$ e a cento e quanta por cento na $I_{CC}^{1\phi}$. Este fenômeno pode ser objeto de um estudo futuro, podendo ser relacionado ao número de GFV conectada, a potência total de GFV inserida ser próxima a potência equivalente vista pelo nó.

As simulações nos permitiram calcular e comprovar as contribuições dos GFV nas I_{CC} , tanto os GFV conectados no nós que ocorrem a falta, quanto os que estão em nós que não “participam” da falta. O sistema IEEE de 123 nós possui uma topologia radial, podendo ser verificadas nas tabelas e gráficos demonstrados neste artigo.

6. CONCLUSÃO

Verificou-se que há um aumento significativo nas I_{CC} , monofásicas e trifásicas, causado pela inserção massiva de GFV. Este fenômeno será cada vez mais comum no cenário brasileiro, consequência do desenvolvimento das tecnologias agregadas, indicando uma tendência de crescimento forte e rápido. Este trabalho ressalta a importância da realização de estudos das I_{CC} , visando analisar as características e fenômenos envolvidos no aumento das I_{CC} e os impactos provocados por esta elevação no sistema elétrico.

As maiores variações das I_{CC} , 70% na I_{CC} trifásica e 140% na I_{CC} monofásica, ocorre com a inserção de GFV em torno de 90% e 100% da potência nominal do sistema estudado, demonstrando assim a importância de adequações e investimentos nos sistemas elétricos de potência existentes, uma vez que poucos sistemas elétricos estão preparados para estes efeitos causados pelo aumento da I_{CC} .

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Universidade Federal do Espírito Santo, ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFES e todos os docentes e ao Prof. Dr. Oureste Elias Batista.

REFERÊNCIAS

- Alves, P., de Azevedo, R., Canha, L., and Paixão, J. (2018). Minimization of the impacts caused by distributed generation to the electric system by exploring the reactive control range of solar inverters. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 1–6. IEEE.
- Beuning, J.A. and Salehfar, H. (2019). Pv penetration optimization with wam smart inverters through reduction of power system distribution losses. In *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, 1–6. IEEE.
- Bhise, D.R., Kankale, R.S., and Jadhao, S. (2017). Impact of distributed generation on protection of power system. In *2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, 399–405. doi:10.1109/ICIMIA.2017.7975644.
- Coffe, F., Booth, C., and Dyško, A. (2014). An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), 561–568.
- Costa, F.B., Monti, A., and Paiva, S.C. (2015). Overcurrent protection in distribution systems with distributed generation based on the real-time boundary wavelet transform. *IEEE Transactions on Power delivery*, 32(1), 462–473.
- Fracalossi, L.G., Vargas, M.C., and Batista, O.E. (2020). Trip solidário em alimentadores de distribuição com geração distribuída. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2.
- Mendes, M.A., Vargas, M.C., Batista, O.E., Yang, Y., and Blaabjerg, F. (2019). Simplified single-phase pv generator model for distribution feeders with high penetration of power electronics-based systems. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 1–7. IEEE.
- Moretti, R., Antunes, R., de Carvalho, T., de Oliveira, R., Spressola, F., Fabris, G., Salengue, R., and Vaniel,

- J. (2013). Análise de superação de tc quanto ao desempenho em correntes assimétricas de curto-circuito— panorama atual e refinamento de especificações técnicas. *XV ERIAC (Encontro Regional Íbero Americano do CI-GRÈ)*.
- Nemet, G.F. (2006). Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. *Energy Policy*, 34(17), 3218–3232.
- Nie, S., Fu, X.P., Li, P., Gao, F., Ding, C.D., Yu, H., and Wang, C.S. (2012). Analysis of the impact of dg on distribution network reconfiguration using openss. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 1–5. IEEE.
- Pinho, J.T., Galdino, M.A., et al. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, 1, 47–499.
- Queiroz, L.G.O., Mendes, M.A., Vargas, M.C., Tonini, L.G.R., Rocha, A.S.F., Araujo, M.R.S., and Batista, O.E. (2020). Variação de tensão em rede de distribuição de energia elétrica com alta penetração de geração distribuída fotovoltaica. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2.
- Radatz, P., Kagan, N., Rocha, C., Smith, J., and Dugan, R.C. (2016). Assessing maximum dg penetration levels in a real distribution feeder by using openss. In *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 71–76. IEEE.
- Resende, F.B. (2016). Proteção elétrica em subestações: uma abordagem sobre a energia incidente.
- Vargas, M.C., Mendes, M.A., and Batista, O.E. (2018a). Impacts of high pv penetration on voltage profile of distribution feeders under brazilian electricity regulation. In *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 38–44. IEEE.
- Vargas, M.C., Mendes, M.A., Batista, O.E., and Simonetti, D.S.L. (2018b). A review on the protection elements required for distributed generation in brazil. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 1–6. IEEE.
- Vargas, M.C., Mendes, M.A., Tonini, L.G., and Batista, O.E. (2019). Grid support of small-scale pv generators with reactive power injection in distribution systems. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, 1–6. IEEE.