

Modelagem Computacional de Protetores de Rede para a Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Topologia Reticulada

Adilson K. B. Kanehira*, Fábio M. Wagner*,
Samuel A. de Paula*, José Carlos M. Vieira, Jr.*

**Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP)*

Brasil (e-mails: adilson.kanehira@usp.br, fabio.wagner@usp.br, samuel.antonio.paula@usp.br, jcarlos@sc.usp.br).

Abstract: This paper aims to present two computational models of protection devices called network protectors. Network protectors are employed in spotted distribution networks and are responsible for detecting reverse power flow in distribution transformers. These network topologies are powered by at least two different primary feeders, which characterizes high reliability in the power supply. A reverse power flow through the transformers of this topology characterizes a short-circuit in the primary feeders. Reverse power flow comes from the contribution of the other primary feeders to the fault through the secondary network. The network protector is therefore intended to disconnect the transformers associated with the faulted feeder from their connections to the secondary network, so that, along with overcurrent protection of primary feeders, the network protector contributes to completely isolate the fault. The results show that the modeled network protectors perform their functions properly, but the expansion of distributed resources can cause improper trips of the network protectors. Thus, researches in the subject are important in order to solve the problem.

Resumo: Este artigo tem como objetivo apresentar dois modelos computacionalmente desenvolvidos de dispositivos de proteção denominados protetores de rede. Os protetores de rede são empregados em redes de distribuição de energia elétrica de topologia reticulada, e são responsáveis por detectar fluxo reverso de potência nos transformadores de distribuição. Estas topologias de rede são alimentadas por pelo menos dois alimentadores primários distintos, o que caracteriza alta confiabilidade no fornecimento de energia. O surgimento de um fluxo reverso de potência nos transformadores desta topologia caracterizam a ocorrência um curto-circuito nos alimentadores primários. O fluxo reverso vem da contribuição dos outros alimentadores primários para a falta por meio da rede secundária. O protetor de rede, portanto, tem o objetivo de desconectar os transformadores associados ao alimentador em falta de suas conexões com a rede secundária, de modo que, em conjunto com a proteção de sobrecorrente dos alimentadores primários, contribua para a isolação completa do curto-circuito. Os resultados demonstram que os protetores de rede modelados desempenham corretamente sua função, mas a expansão da geração distribuída pode ocasionar atuações indevidas dos protetores de rede, sendo necessários estudos e pesquisas na área para que o problema caracterizado seja solucionado.

Keywords: Computer Modelling; Distributed Resources; Electric Power Distribution Systems; Electric Power Networks; Network Protector; Power Flow; Power Systems Protection.

Palavras-chaves: Distribuição de Energia Elétrica; Fluxo de Potência; Geração Distribuída; Modelagem Computacional; Protetor de Rede; Proteção de Sistemas Elétricos de Potência; Redes Reticuladas.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica apresentam diversas topologias de rede. Dentre as topologias, há as chamadas redes reticuladas, que são caracterizadas pela alta confiabilidade e por serem subterrâneas (Kagan, Oliveira, Robba 2005). Essa topologia possui dois ou mais transformadores (de pelo menos dois diferentes alimentadores primários) operando simultaneamente para que, no caso da falha de um deles, não ocorra a interrupção do fornecimento de energia para o conjunto de cargas envolvido, diferentemente do que ocorre com as redes de topologia

radial, por exemplo. Dentre as redes reticuladas, existem as malhadas e as exclusivas. As primeiras se referem a redes que atendem um centro consumidor de diversas cargas com a rede secundária organizada em malhas, e as segundas à alimentação de um consumidor exclusivo. A principal justificativa para aplicação das redes reticuladas se refere à confiabilidade. As interrupções e falhas praticamente não ocorrem nas redes desta topologia (Settembrini, Fisher, Hudak 1991). Determinados centros consumidores demandam constância no suprimento da energia, como centros hospitalares, industriais, comerciais e de comunicação, por exemplo, nos quais interrupções podem

causar problemas graves. As redes de topologia reticulada podem ser uma opção nestes casos.

Para a proteção destas redes, são utilizados dispositivos chamados protetores de rede (PR), os quais são localizados no lado secundário de cada transformador e têm como principal função detectar fluxo reverso de potência. Isso é necessário porque nesta topologia, o surgimento de fluxo reverso de potência nos transformadores significa um curto-circuito nos alimentadores primários. O fluxo reverso de potência vem da contribuição dos outros alimentadores para a falta por meio da rede secundária. Desta forma, quando o fluxo reverso de potência é detectado, ocorre a abertura do disjuntor associado ao transformador envolvido na falta, de modo a cessar a influência de corrente dos outros alimentadores não faltosos no mesmo (Barreto 2017; IEEE.C57.12.44 2014).

Com a expansão da geração distribuída (GD), o fluxo reverso nas redes reticuladas não se limita apenas aos casos de curto-circuito nos alimentadores primários, mas também para casos de excedente de potência causado pela GD, fato que também causa a atuação dos protetores de rede, que pode ser um problema para as redes reticuladas (Barreto 2017; Dias 2018).

Neste artigo serão expostas modelagens de dois tipos de protetores de rede, de modo a analisar seus comportamentos diante das situações de curto-circuito e excedente de potência da GD (que causam fluxo reverso de potência) e também condições de fluxo direto de potência. Todas as análises e modelagens apresentadas foram feitas utilizando o *software* Matlab, mais especificamente a ferramenta de simulação Simulink, fazendo uso da biblioteca SimPowerSystems, voltada para Sistemas Elétricos de Potência.

Por meio dos resultados obtidos, é possível observar que as modelagens implementadas funcionam adequadamente para as situações simuladas. Além disso, foram verificados problemas de atuação indevida dos protetores de rede associados ao excedente de GD nas redes secundárias. Os resultados deste artigo podem ser utilizados para realizar estudos, pesquisas e melhorias no sistema de proteção de modo que seja possível diferenciar o fluxo reverso vindo de curtos-circuitos do fluxo reverso vindo do excedente de GD.

2. MODELAGEM DE PROTETORES DE REDE

Nesta seção, será apresentado um esquema representativo de um protetor de rede e as funções de seus componentes conforme descrito em IEEE.1547.6 (2011). Em seguida, serão apresentados dois modelos de protetores de rede desenvolvidos computacionalmente. O primeiro protetor de rede foi baseado em IEEE.1547.6 (2011), e o segundo protetor de rede foi baseado em Eaton (2019). Foram escolhidos estes dois modelos por operarem com lógicas distintas, com o intuito de avaliar seus comportamentos mediante diferentes cenários e comparar os resultados.

A arquitetura básica de um protetor de rede pode ser observada na Fig. 1, em que é possível observar não somente

o protetor de rede, mas também a unidade de rede reticulada, e sua ligação entre os alimentadores primários de distribuição (média tensão) e a rede secundária (baixa tensão). A unidade de rede reticulada inclui o transformador e o protetor de rede. O protetor de rede é conectado aos terminais secundários do transformador.

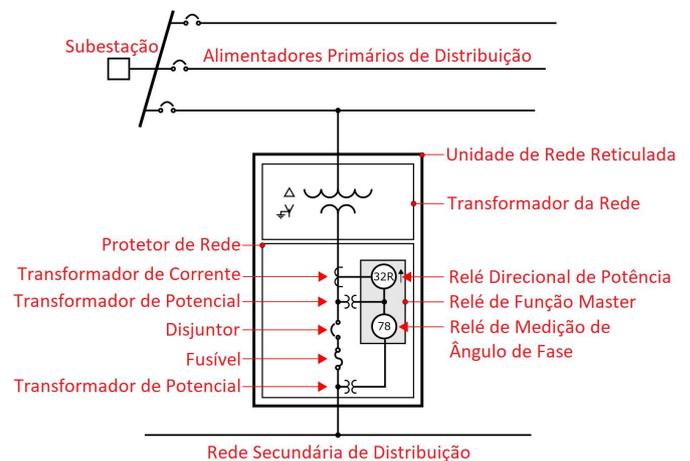


Fig. 1 Composição de uma unidade de rede reticulada, que inclui o transformador e o protetor de rede (IEEE.1547.6 2011).

O protetor de rede é composto de um relé direcional de potência (ANSI 32R), um relé de medição de ângulo de fase (ANSI 78), transformadores de corrente e de potencial, fusível e disjuntor. O relé direcional de potência é o responsável por comandar a abertura do disjuntor quando detecta fluxo reverso de potência. O relé de medição de ângulo de fase habilita o fechamento do disjuntor depois que a falta tenha sido extinta, e caso as tensões nos seus terminais estejam dentro de uma faixa de valores toleráveis. O fusível provê proteção adicional quando ocorre a falha do protetor de rede (IEEE.1547.6 2011). As modelagens computacionais desenvolvidas têm enfoque no relé direcional de potência (ANSI 32R).

2.1 Primeiro Modelo de Protetor de Rede

O primeiro protetor de rede modelado foi baseado em IEEE.1547.6 (2011). A modelagem computacional desenvolvida pode ser observada na Fig. 2.

As correntes e tensões trifásicas são lidas por meio dos blocos V_{abc} e I_{abc} . Os blocos *RTP* e *RTC* são responsáveis por rebaixar os níveis de tensão e corrente para os níveis compatíveis com os do relé. Uma vez que o sinal está num nível adequado para o relé, ocorre um processo de filtragem do sinal por meio do bloco *Filtro Analógico*. Trata-se de um filtro passa-baixas de Butterworth de 2ª ordem com frequência de corte de 360 Hz, com o objetivo de atenuar ruídos de alta frequência.

Então, o sinal é discretizado por meio do bloco *Discretização*. A discretização realizada envolve um processo de *Sample & Hold* que coleta 16 amostras por ciclo de onda, ou seja, a

discretização ocorre numa frequência de 960 Hz, o que é condizente com a maioria dos relés de proteção para sistemas de distribuição (Salles 2007).

Em seguida, o sinal discretizado passa pelo bloco *Filtro Digital (Fourier)*, que consiste em um filtro digital baseado na Transformada de Fourier, e tem como saídas o módulo e o ângulo de fase da componente fundamental (1ª harmônica) do sinal.

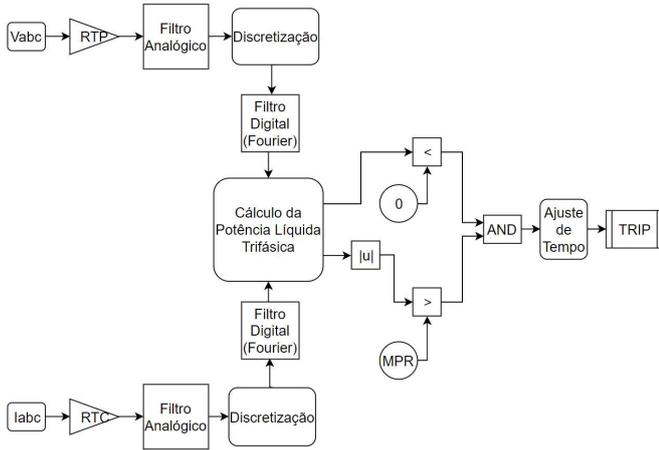


Fig. 2 Primeiro modelo de protetor de rede baseado em IEEE.1547.6 (2011).

Após o estágio de tratamento (pré-processamento) do sinal, que se encerra no bloco *Filtro Digital (Fourier)*, passa-se à etapa da lógica de decisão do relé. Para tanto, é necessário o cálculo da potência líquida trifásica que passa pelo protetor de rede. O cálculo é realizado no bloco *Cálculo da potência Líquida Trifásica*, e segue, para cada uma das três fases do sistema, o cálculo descrito em (1), em que P é a potência ativa relativa a uma fase do sistema, V_{ef} é a tensão de fase eficaz, I_{ef} é a corrente de fase eficaz, θ_v é o ângulo de fase da tensão de fase eficaz e θ_i é o ângulo de fase da corrente de fase eficaz. Feitos os cálculos, as três potências calculadas são somadas e obtém-se a potência líquida trifásica.

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (1)$$

Caso a potência líquida trifásica seja negativa e seu módulo seja maior que MPR , que representa a Máxima Potência Reversa permitida (ajuste de tolerância), ocorre a contagem de um tempo ajustado no bloco *Ajuste de Tempo*. Se a potência continuar negativa e com módulo maior que a tolerância durante todo o período de tempo ajustado, ocorre então o *TRIP* no disjuntor trifásico associado. Caso não continue, a contagem é reiniciada e então espera-se por um novo sinal de início. Tal implementação evita atuações indevidas para fenômenos transitórios rápidos em que a atuação é desnecessária.

2.2 Segundo Modelo de Protetor de Rede

O segundo protetor de rede modelado foi baseado em Eaton (2019).

A modelagem computacional desenvolvida pode ser observada na Fig. 3.

O processo de tratamento (pré-processamento) do sinal é idêntico ao do primeiro modelo. Ou seja, as correntes e tensões trifásicas são lidas por meio dos blocos V_{abc} e I_{abc} , os blocos *RTP* e *RTC* rebaixam os níveis dos sinais, e estes passam por um filtro passa-baixas para atenuar ruídos de alta frequência. Então, ocorre a discretização do sinal e uma filtragem digital por meio da Transformada de Fourier.

Então, o relé começa a se diferenciar do primeiro modelo. Ocorre o cálculo das componentes simétricas de tensão e corrente por meio dos blocos *Comp. Simétricas*, de acordo com o Teorema das Componentes Simétricas de Fortescue. As saídas do bloco são $THETA V1$, II e $THETA I1$, que são, respectivamente, o ângulo de fase da tensão de sequência positiva, o módulo da corrente de sequência positiva, e o ângulo de fase da corrente de sequência positiva.

Com os valores de saída, é possível passar para o bloco *CÁLCULO*, em que é realizado o cálculo descrito em (2). A variável I_{a1} refere-se ao módulo da corrente de sequência positiva, $\theta_{V_{a1}}$ refere-se ao ângulo de fase da tensão de sequência positiva, e $\theta_{I_{a1}}$ refere-se ao ângulo de fase da corrente de sequência positiva.

$$Cálculo = I_{a1} \cos(\theta_{V_{a1}} - \theta_{I_{a1}}) \quad (2)$$

Caso *Cálculo* seja negativo e seu módulo seja maior que um ajuste de tolerância presente no bloco *Ajuste Percentual*, que, de acordo com Eaton (2019), pode variar de 0,05% a 5% do valor da corrente nominal do transformador associado, ocorre a contagem de um tempo ajustado no bloco *Ajuste de Tempo*. Se *Cálculo* continuar negativo e com módulo maior que o ajuste de tolerância durante todo o período de tempo ajustado, ocorre então o *TRIP* no disjuntor trifásico associado. Se não continuar, a contagem é reiniciada e espera-se um novo sinal de início.

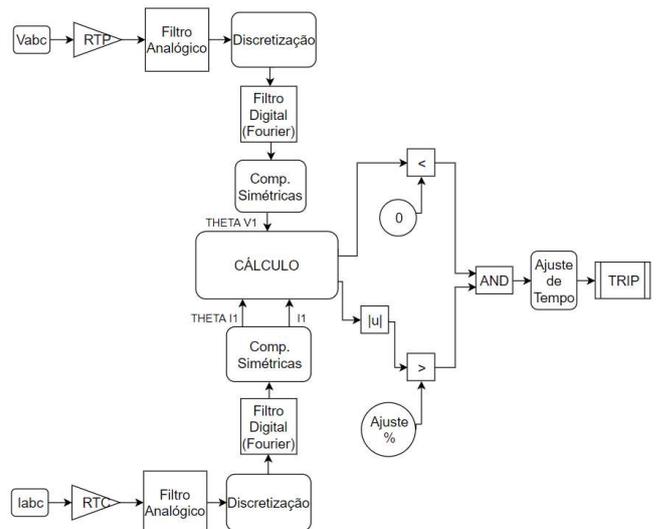


Fig. 3 Segundo modelo de protetor de rede baseado em Eaton (2019).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste na verificação da atuação (ou não) de cada um dos protetores de rede modelados para situações de fluxo direto e reverso de potência, mediante os ajustes feitos.

Para a caracterização das condições de fluxo direto e reverso de potência, foi utilizada uma rede de testes de topologia reticulada malhada com 20 barras e quatro transformadores (cada qual com seu respectivo protetor de rede). Trata-se de um trecho de uma rede real de distribuição reticulada do centro de Curitiba-PR, descrita em Azevedo (2010). Os modelos utilizados de subestação, linhas, transformadores e cargas fazem parte da biblioteca do SimPowerSystems. Um diagrama unifilar do secundário (baixa tensão) da rede de testes pode ser observado na Fig. 4.

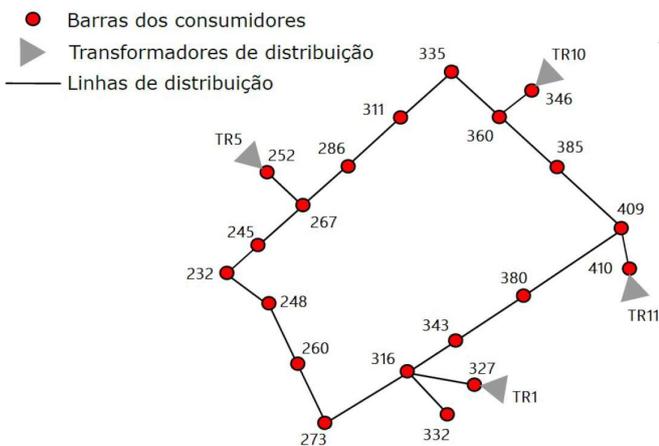


Fig. 4 Diagrama unifilar do secundário (baixa tensão) da rede de testes (Azevedo 2010).

Um diagrama unifilar relativo ao primário (média tensão) da rede de testes pode ser observado na Fig. 5. A rede consiste de 3 alimentadores primários de 13,8 kV (001-041, 001-053, e 001-126). O alimentador primário 001-041 alimenta o transformador TR1, que possui um protetor de rede PR1 associado. O alimentador primário 001-053 alimenta o transformador TR5, que possui um protetor de rede PR5 associado. Por fim, o alimentador primário 001-126 alimenta os transformadores TR10 e TR11, que possuem, respectivamente, os protetores de rede PR10 e PR11 associados. Os protetores de rede PR1, PR5, PR10 e PR11 se conectam à rede secundária de baixa tensão de 220V por meio das barras 327, 252, 346 e 410, respectivamente. Os transformadores são do tipo delta-estrela aterrado (13,8 kV / 220 V). Trata-se de uma rede de 60 Hz. Foi implementada uma proteção de sobrecorrente (ANSI 50/51) no início de cada um dos três alimentadores primários (saindo da subestação), e também no alimentador principal da subestação, a montante da Barra 001, de modo que as faltas que ocorram nos alimentadores primários possam ser completamente isoladas. As proteções ANSI 50/51 foram implementadas conforme Kanehira, Wagner e Vieira Jr. (2019) e Salles (2007).

A metodologia consistiu em caracterizar 3 situações diferentes na rede de testes e observar a atuação (ou não) dos protetores de rede para: (i) fluxo direto nos quatro transformadores com o sistema sem GD em carregamento médio (50% da potência da carga instalada), (ii) fluxo reverso no transformador PR1, devido a um curto-circuito no meio do alimentador primário 001-041, com o sistema sem GD em carregamento médio (50% da potência da carga instalada), e (iii) fluxo reverso no transformador PR11, devido ao excedente de GD na rede secundária, em condições de carregamento médio (aproximadamente 50% da potência da carga instalada). É importante destacar que para cada um dos três cenários, foram feitas duas simulações, ou seja, uma para cada modelo de protetor de rede, avaliados individualmente.

No caso (iii), a modelagem, condições de irradiação, temperatura, carregamento e alocação dos geradores foram adotados de acordo com Wagner, Kanehira e Vieira Jr. (2019). São 10 geradores distribuídos aleatoriamente na rede (barras 232, 252, 286, 335, 360, 409, 380, 316, 373 e 248) e as condições de carregamento, irradiação e temperatura consideram um perfil tipicamente residencial às 16h (49% da carga máxima, 900 W/m² e 40 °C respectivamente). Sob tais condições, os geradores produzem 78,7% da carga máxima das barras nas quais estão conectados e fluxo reverso ocorre em um dos quatro alimentadores da rede (TR11).

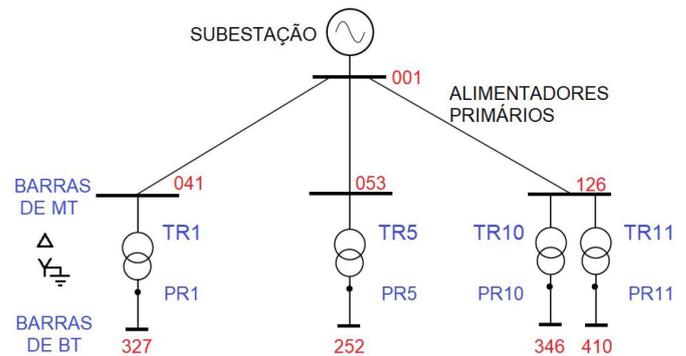


Fig. 5 Diagrama unifilar do primário (média tensão) da rede de testes (Azevedo 2010).

Em todos os casos de simulação, o ajuste de tolerância de potência reversa MPR do primeiro protetor de rede foi de 100 W, e o ajuste de tolerância percentual do segundo protetor de rede foi de 0,05 %. O ajuste de tempo para os dois protetores foi de 33,3 ms, ou seja, dois ciclos de onda.

4. RESULTADOS

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados das metodologias de testes descritas na Seção 3.

4.1 Condição de Operação de Fluxo Direto

A Tabela 1 refere-se aos resultados da simulação da condição (i) fluxo direto nos quatro transformadores com o sistema sem GD em carregamento médio (50% da potência da carga instalada). Como pode-se observar, os protetores de rede (e, conseqüentemente, também seus respectivos

transformadores) identificam potências ativas P (kW) positivas fluindo pelos seus terminais, o que significa que o sentido do fluxo de potência é direto. Desta forma, os protetores de rede não atuam (*Status On* para todos os 4 protetores de rede), cumprindo corretamente suas funções.

Tabela 1. Comportamento dos dois modelos de PRs em relação a condições de fluxo direto de potência em condições normais, sem GD

		PR1	PR5	PR10	PR11
	P (kW)	37,5	47,6	23,2	30,3
Modelo 1	Status	On	On	On	On
Modelo 2	Status	On	On	On	On

4.2 Fluxo Reverso devido a um Curto-Circuito em um dos Alimentadores Primários

A Tabela 2 refere-se aos resultados da simulação da condição (ii) fluxo reverso no transformador PR1, devido a um curto-circuito no meio do alimentador primário 001-041, com o sistema sem GD em carregamento médio (50% da potência da carga instalada), considerando os dois modelos de protetores de rede. A falta aplicada foi trifásica, com resistência de falta de 10 Ω . Verifica-se que a falta ocasiona fluxo reverso (potência negativa) no PR1, que acaba atuando (*Status OFF*), estabelecendo uma nova condição de regime permanente com apenas 3 transformadores em operação. Os protetores de rede cumpriram corretamente suas funções.

Tabela 2. Comportamento dos modelos de PRs em relação a condição de fluxo reverso de potência ocasionado por falta trifásica de 10 Ω no alimentador primário 001-041

		PR1	PR5	PR10	PR11
Pré-Falta	P (kW)	37,5	47,6	23,2	30,3
	Modelo 1	On	On	On	On
	Modelo 2	On	On	On	On
Durante a Falta	P (kW)	-90,5	120,0	42,0	134,0
	Modelo 1	OFF	On	On	On
	Modelo 2	OFF	On	On	On
Após Isolação da Falta	P (kW)	0	59,9	27,3	47,3
	Modelo 1	OFF	On	On	On
	Modelo 2	OFF	On	On	On

De acordo com Kanehira, Wagner e Vieira Jr. (2019), em que foi considerado apenas o primeiro modelo de PR, os protetores de rede atuam corretamente não só para faltas trifásicas de 10 Ω , mas também para outras condições de falta que causam fluxo reverso de potência, como faltas fase-terra, bifásicas e bifásicas-terra, com diferentes valores de resistência de falta. Vale ressaltar que tal fato ocorre dentro de uma determinada faixa de valores de resistência de falta de acordo com o nível de carregamento do sistema e a natureza da falta, pois a partir de resistência de falta mais elevadas, não há mais a ocorrência de fluxo reverso de potência, o que faz com que o PR não atue nessas circunstâncias.

4.3 Fluxo Reverso devido ao excedente de GD na rede secundária

O resultado obtido para o fluxo reverso causado por excesso de geração distribuída evidenciou problemas para a rede. Uma vez detectado o fluxo reverso em TR11, o protetor de rede associado ao transformador atuou. Isso fez com que não só a rede perdesse um transformador desnecessariamente, como também causou fluxo reverso em TR10, o que consequentemente levou à abertura do PR associado, fazendo com que a rede perdesse o alimentador primário 001-126. Finalmente o sistema se estabilizou com 2 transformadores e os 10 geradores distribuídos alimentando a rede. Isto mostra que a atuação indevida da proteção pode levar a um efeito cascata, podendo, sob determinadas circunstâncias, ocasionar o blecaute total da rede (Wagner, Kanehira e Vieira Jr. 2019). Os resultados descritos foram obtidos igualmente para ambos os modelos de PR, evidenciados, na Tabela 3.

Tabela 3. Comportamento do 1º modelo de PRs em relação a condição de fluxo reverso de potência no TR11 ocasionado por excedente de geração distribuída

		PR1	PR5	PR10	PR11
Fluxo Reverso no TR11	P (kW)	1,9	3,4	0,3	-0,6
	Modelo 1	On	On	On	OFF
	Modelo 2	On	On	On	OFF
Fluxo Reverso no TR10	P (kW)	1,3	4,3	-0,8	0,0
	Modelo 1	On	On	OFF	OFF
	Modelo 2	On	On	OFF	OFF
Sistema em Estabilidade	P (kW)	0,5	3,6	0,0	0,0
	Modelo 1	On	On	OFF	OFF
	Modelo 2	On	On	OFF	OFF

O carregamento do TR1 diminuiu em 73,7% e o carregamento do TR5 aumentou em 5,9% em relação aos carregamentos antes das desconexões do TR10 e TR11.

Portanto, os protetores de rede modelados atuam corretamente, e de maneira semelhante. Foi verificado também o problema da atuação indevida (apesar de correta) dos protetores de rede devido ao excesso de GD na rede secundária.

Os resultados obtidos na Tabela 2 e na Tabela 3 evidenciam as operações idênticas para ambas as modelagens de protetores de rede no que diz respeito ao acontecimento dos *trips*, sendo possível averiguar a atuação correta dos dois modelos desenvolvidos. É importante destacar que houve diferenças no tempo de atuação entre os dois modelos, mas que não foram consideradas relevantes, uma vez que os tempos de atuação foram muito semelhantes.

5. CONCLUSÕES

De modo geral, é possível notar que os protetores de rede modelados obtiveram o desempenho esperado quanto à atuação diante de situações fluxo reverso causado por curto-circuito e por excedente de GD. Foi verificado que a expansão da GD pode ocasionar sérios problemas na operação de redes reticuladas devido à atuação indevida dos PRs. Portanto, pesquisas e estudos sobre o tema abordado são importantes de serem realizadas para que a característica de confiabilidade desse tipo de topologia de rede de distribuição possa ser melhorado com a constante injeção de geração distribuída nos centros consumidores. Desta forma, conclui-se o artigo reafirmando que melhorias no sistema de proteção devem ser estudadas para que o problema seja solucionado. Os estudos de modelagem demonstrados podem ser utilizados como base para os futuros estudos na área.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FAPESP, processos 2018/17967-5 e 2018/21394-0. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste artigo são de responsabilidade dos autores. Os autores agradecem à FAPESP e também ao CNPq pelos apoios prestados.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, F. A. (2010). *Otimização de rede de distribuição de energia elétrica subterrânea reticulada através de algoritmos genéticos*. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, BR.
- Barreto, G. A. (2014). *Metodologia de aplicação de geração distribuída fotovoltaica em baixa tensão nos reticulados subterrâneos das distribuidoras de energia elétrica*. 175 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, BR.
- Dias, L. R. (2018). *Análise da Influência de Elevados Níveis de Geração Fotovoltaica na Operação das Redes Reticuladas de Distribuição de Energia Elétrica*. 165 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, BR.
- Eaton (2019). CM52 Advanced Deadfront Network Protector. Disponível em: <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/utility-and-grid-solutions/cm52-advanced-deadfrontnetwork-protector.html>. Acesso em set. 2019.
- IEEE.1547.6 (2011). *IEEE recommended practice for interconnecting distributed resources with electric power systems distribution secondary networks*. IEEE Std 1547.6-2011, pp. 1–38.
- IEEE.C57.12.44 (2014). *IEEE standard requirements for secondary network protectors*. IEEE Std C57.12.44-2014 (Revision of IEEE Std C57.12.44-2005), pp. 1–65.
- Kagan, N.; Oliveira, C. C. B. DE; Robba, E. J. (2005). *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*, 328 p. Edgard Blücher, São Paulo, BR.
- Kanehira, A. K. B.; Wagner, F. M.; Vieira Jr., J. C. M. (2019). *Avaliação da Influência das Proteções contra Curtos-Circuitos na Qualidade da Energia Elétrica em Redes de Distribuição Reticuladas*. In: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE 2019), São Caetano do Sul, BR, pp. 1-6.
- Salles, N. J. (2007). *Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos*. 203 p. Dissertação (Mestrado) – UNICAMP. Campinas, BR.
- Settembrini, R. C.; Fisher, J. R.; Hudak, N. E. (1991). *Reliability and quality comparisons of electric power distribution systems*. In: Transmission and Distribution Conference, Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society. Dallas, EUA, pp. 704-712.
- Wagner, F. M.; Kanehira, A. K. B.; Vieira Jr., J. C. M. (2019). *Avaliação dos Impactos Causados por Geração Solar Fotovoltaica na Qualidade da Energia Elétrica em Redes de Distribuição Reticuladas*. In: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE 2019), São Caetano do Sul, BR, pp. 1-6.