

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NA PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO DA CONEXÃO DE CENTRAIS DE MICRO E MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

José Aderaldo Lopes – jose.lopes@neoenergia.com

Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Energia
Companhia Energética de Pernambuco, Departamento Corporativo de Engenharia

José Bione de Melo Filho – jbionef@bol.com.br

Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Energia
Companhia Hidrelétrica do São Francisco, Departamentos de Eficiência Energética

Resumo. *A conexão de pequenos geradores para operação em paralelo com a rede da distribuidora apresenta alguns desafios, principalmente em relação à segurança e à proteção de pessoas e instalações. O desvio dos padrões estabelecidos por normas e procedimentos caracteriza uma condição anormal de operação, devendo a proteção ser capaz de identificar esse desvio e isolar os sistemas cessando o fornecimento de energia à rede. As conexões massivas de micro e minigeração distribuídas necessitam de um controle e um gerenciamento inteligente, que será possível com o uso das tecnologias de redes elétricas inteligentes (REI), tais como: infraestruturas de telecomunicação, informática, medição inteligente e de proteção e automação avançada.*

Diante do cenário, este trabalho apresenta uma avaliação dos impactos na proteção dos sistemas elétricos de distribuição de energia da conexão de microgeradores e minigeradores, considerando geração solar fotovoltaica e conceitos de redes elétricas inteligentes.

Palavras-chave: *Energia solar fotovoltaica, Conexão de micro e minigeração, Proteção de sistemas elétricos.*

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia, através de painéis fotovoltaicos, é uma tecnologia amplamente utilizada na Europa e nos Estados Unidos. A grande motivação para utilização dessa tecnologia é a redução dos impactos ambientais, bem como a atratividade do uso de sistemas de geração distribuída, em baixa tensão, conforme mostrado nas pesquisas realizadas por Angelopoulos (2004), sobre a integração de geração distribuída em circuitos de baixa tensão e seus impactos nos sistemas de potência, analisando a qualidade da energia e a viabilidade técnica-econômica da conexão.

Conforme resolução nº 482, já é possível a conexão de micro e minigeração distribuída de energia elétrica, a partir de fontes renováveis, com as redes elétricas de baixa tensão. A publicação desta resolução constitui um marco regulatório no Brasil. Essa resolução estabelece que cada cliente, seja residencial, comercial ou industrial, pode ter no telhado ou outro local de sua unidade consumidora uma central fotovoltaica produzindo energia para complementação do consumo próprio. A energia excedente é injetada na rede e através do sistema de compensação de energia utilizada, nos meses subsequentes, na unidade consumidora ou em outra de propriedade do consumidor. Portanto, com a regulamentação estabelecida, está em curso no Brasil o desenvolvimento de um mercado com a implantação de diversas centrais de micro e minigeração distribuídas em unidades consumidoras conectadas às redes elétricas das distribuidoras.

Segundo Toledo, et al. (2012), as conexões massivas de micro e minigeração distribuídas necessitam de um controle e um gerenciamento inteligente, que será possível com o uso das tecnologias de redes elétricas inteligentes, tais como: infraestruturas de telecomunicação, informática, medição inteligente e de proteção e automação avançada.

De acordo com Toyama, et al. (2010), a conexão e proteção de pequenos geradores para operação em paralelo com a rede da concessionária apresentam alguns desafios significativos, principalmente em relação à segurança e à proteção de pessoas e instalações. Há, portanto, uma série de preocupações técnicas em relação a pequenos sistemas de geração conectados, como riscos à segurança da rede e dos demais consumidores, qualidade da energia fornecida, ilhamento, variação de frequência, distorção harmônica, fator de potência e influência na ação dos sistemas de proteção da rede. O desvio dos padrões estabelecidos por normas e procedimentos caracteriza uma condição anormal de operação, devendo a proteção da conexão ser capaz de identificar esse desvio e isolar os sistemas cessando o fornecimento de energia à rede.

Diante do cenário descrito, este artigo apresenta uma avaliação dos impactos na proteção dos sistemas elétricos de distribuição da conexão de micro e minigeradores, considerando geração solar fotovoltaica e conceitos de redes elétricas inteligentes.

2. PANORAMA DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NO BRASIL

No Brasil, as iniciativas práticas para implantação das redes elétricas inteligentes (REI) ainda são tímidas, limitando-se a diversos projetos pilotos. A motivação de implantação das redes inteligentes no Brasil são: a melhoria da confiabilidade da rede, a melhoria da qualidade do fornecimento, a redução das perdas não técnicas de energia, a eficiência energética e a implantação de energias renováveis. Não obstante, o arcabouço regulatório vem sendo preparado para receber a nova tecnologia no sistema de distribuição. Diversos estudos foram e estão sendo realizados por órgãos do governo e pelo setor privado.

Os projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de redes elétricas inteligentes que estão sendo realizados pelas parcerias entre as concessionárias de energia elétrica, as universidades, os centros de pesquisas, os laboratórios e as empresas fabricantes têm sido importantes para a avaliação da capacidade e dos benefícios decorrentes da implantação das REI no Brasil. Entre eles cita-se o projeto estratégico e cooperado da chamada nº 011/2010, da ANEEL, “Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente” que foi proposto pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), tendo participação de outras trinta e seis empresas, além de seis entidades de pesquisa, sendo a coordenação da execução realizada pelo Instituto da Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (IABRADEE).

Segundo o relatório do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) (2014) e em conformidade com os dados divulgados pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) em parceria com o Instituto da Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações (iAptel), existem no Brasil mais de 200 projetos em andamento sobre o tema REI. Essas iniciativas envolvem cerca de 450 instituições, contemplando mais de 300 fornecedores, 126 centros de pesquisa e 60 concessionárias do setor elétrico, além de ministérios, agências reguladoras e universidades. Estima-se que o montante de investimentos desses tipos de projetos cheguem a R\$ 1,6 bilhões, considerando iniciativas nos segmentos de geração, transmissão e distribuição.

Aplicação de recursos de P&D em projetos demonstrativos ou pilotos, ou seja, em projetos que avaliam o conceito de REI no todo, tem se dado no segmento de distribuição, tendo em vista que é o segmento mais afetado pelas mudanças advindas da implementação das REI.

A Fig. 1 apresenta oito dos principais projetos demonstrativos ou pilotos de REI no Brasil. Esses projetos compõem um investimento realizado/previsto de mais de R\$ 200 milhões, conforme dados de 2013.



Figura 1 - Principais Projetos de REI no Brasil

Os primeiros projetos pilotos foram realizados pela Light e Cemig, sendo acompanhadas por outras empresas do setor. A Light, dentro do programa Inova Energia está desenvolvendo um projeto de REI com a instalação de cerca de um milhão de medidores inteligentes, cujo objetivo principal é a redução de perdas não técnicas. Assim, este é o primeiro passo para implantação no Brasil de projeto de grande escala em redes elétricas inteligentes.

3. MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Em abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução nº 482 (2012), que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica do Brasil.

Com o advento dessa resolução foi revisado o módulo 3(três) dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL) (2013), introduzindo a seção 3.7, diretrizes para acesso de micro e minigeração distribuída, onde são indicados os requisitos mínimos necessários para o ponto de conexão da central geradora. O sistema de proteção proposto deve ser avaliado e estudado, visando verificar se sua implantação garante os requisitos de sensibilidade, confiabilidade e seletividade da proteção do sistema de distribuição interligado, concessionárias e micro ou minigerador, bem como a segurança das instalações e do pessoal de operação e manutenção.

A resolução nº 482 define que microgeração distribuída (MicroGD) são centrais geradoras de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW, que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (UC). Já a minigeração distribuída (MiniGD) são as centrais geradoras com mesmas características, porém, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW.

No sentido de viabilizar a micro e minigeração, a resolução nº 482 também estabeleceu o sistema de compensação de energia (*net metering*), no qual a energia ativa excedente injetada na rede, gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída, compense o consumo de energia elétrica ativa.

A implantação de centrais de micro e minigeração solar fotovoltaica oferece as bases técnicas para o desenvolvimento do uso da energia solar, além de criar competências para avaliar os arranjos técnicos e comerciais da geração distribuída de pequeno porte, com sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Todavia, com a injeção de energia elétrica diretamente nos sistemas de distribuição, em virtude da existência de centrais de micro e minigeração distribuída, estes passam a ser sistemas ativos, podendo consumir e gerar energia, ao mesmo tempo.

Segundo Thong, et al. (2005), a conexão da geração distribuída (GD) em sistemas de distribuição pode impactar diversos parâmetros destes sistemas, como, por exemplo, o fluxo de potência (que agora passa a ser bidirecional), o perfil de tensão, a estabilidade da tensão, os desequilíbrios de corrente, os sistemas de proteção e, por fim, como consequência destas mudanças, a qualidade da energia elétrica.

A inserção de micro e/ou minigeração distribuída impacta em diversos processos de uma empresa distribuidora de energia elétrica, por exemplo: planejamento, operação, estudo de proteção, entre outros, apresentando assim grandes desafios e exigindo novas técnicas para otimizar e operar esses sistemas.

De acordo com Cabello e Pompermayer (2013), no Brasil, a legislação só permite o acesso ao sistema elétrico das distribuidoras de centrais de micro e minigeração de fontes renováveis e não é permitido essas centrais operarem de forma isolada, apenas de forma integrada, razão pela qual deve haver obrigatoriamente dispositivos automáticos que impedem o “ilhamento” ou seja, quando o sistema automatizado da micro e minigeração detectar falta de energia proveniente da rede, automaticamente deve desconectar e interromper o fornecimento da fonte de geração proveniente da unidade consumidora para a rede de distribuição. A produção de energia elétrica a partir de sistemas solares fotovoltaicos é hoje, dentre as alternativas de geração, a mais viável técnico-economicamente, para as centrais de micro e minigeração, em decorrência direta da queda nos preços dos módulos fotovoltaicos, boa disponibilidade, rapidez e facilidade de instalação.

4. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NA PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO DA CONEXÃO DE CENTRAIS DE MICRO E MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste tópico avaliam-se os impactos na proteção dos sistemas elétricos de distribuição da conexão de centrais de micro e minigeração solar fotovoltaica, considerando os aspectos de segurança e operação das instalações, bem como do pessoal de operação e manutenção envolvidos e os conceitos de redes elétricas inteligentes.

4.1 Considerações iniciais

O aumento na penetração de centrais de micro e minigeração traz novos desafios para o planejamento, operação, manutenção, proteção e controle de sistemas elétricos de distribuição. Atualmente, a maioria dos sistemas elétricos de distribuição, no Brasil, opera com configuração radial, isto é, a energia flui em uma única direção. A implantação de centrais de micro e minigeração distribuídas altera a topologia do sistema, passando a energia a fluir em várias direções, impactando a proteção dos sistemas elétricos de distribuição. Os atuais sistemas de proteção da distribuição utilizam esquemas simples baseados em chaves e elos fusíveis, seccionadores, religadores de linha e de subestação, associados com relés de sobrecorrente e religamento automático. Esses esquemas simples podem necessitar de adequações e atualizações para suportar as conexões das centrais de micro e minigeração.

Segundo o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2004), esquemas de proteção avançados que podem se adaptar à mudança de configuração do sistema de distribuição podem ser essenciais para conexão de centrais de geração distribuída. Eles irão depender da obtenção dos dados em locais estratégicos e comunicação desses dados entre relés inteligentes para proteção do sistema de distribuição, passando a proteção a ser parte integral dos sistemas de automação da distribuição. Grandes números de centrais de micro e minigeração podem trazer problemas de estabilidade e controle de frequência; logo alguns problemas que são relevantes nos sistemas de geração e transmissão tornam-se relevantes, também, no sistema elétrico de distribuição. No entanto, os conceitos de REI com novas tecnologias de automação, proteção, controle, comunicação e sistemas de informação, aplicadas aos sistemas elétricos de distribuição trarão muitos benefícios para a operação, supervisão e monitoramento do sistema, melhorando a qualidade do fornecimento de energia aos clientes.

A seguir faz-se a avaliação dos impactos na proteção dos sistemas elétricos de distribuição da conexão de centrais de micro e minigeração solar fotovoltaica, que utilizam inversores para fazer a transformação da corrente contínua gerada nos módulos em corrente alternada. Faz-se a avaliação comparando o sistema de distribuição com e sem as centrais, considerando a topologia, atualmente adotada pelas distribuidoras brasileiras, especificamente a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), empresa distribuidora de energia elétrica do Estado de Pernambuco. Todas as avaliações são realizadas considerando o circuito de distribuição da Fig. 2, com os dados apresentados na Tab. 1.

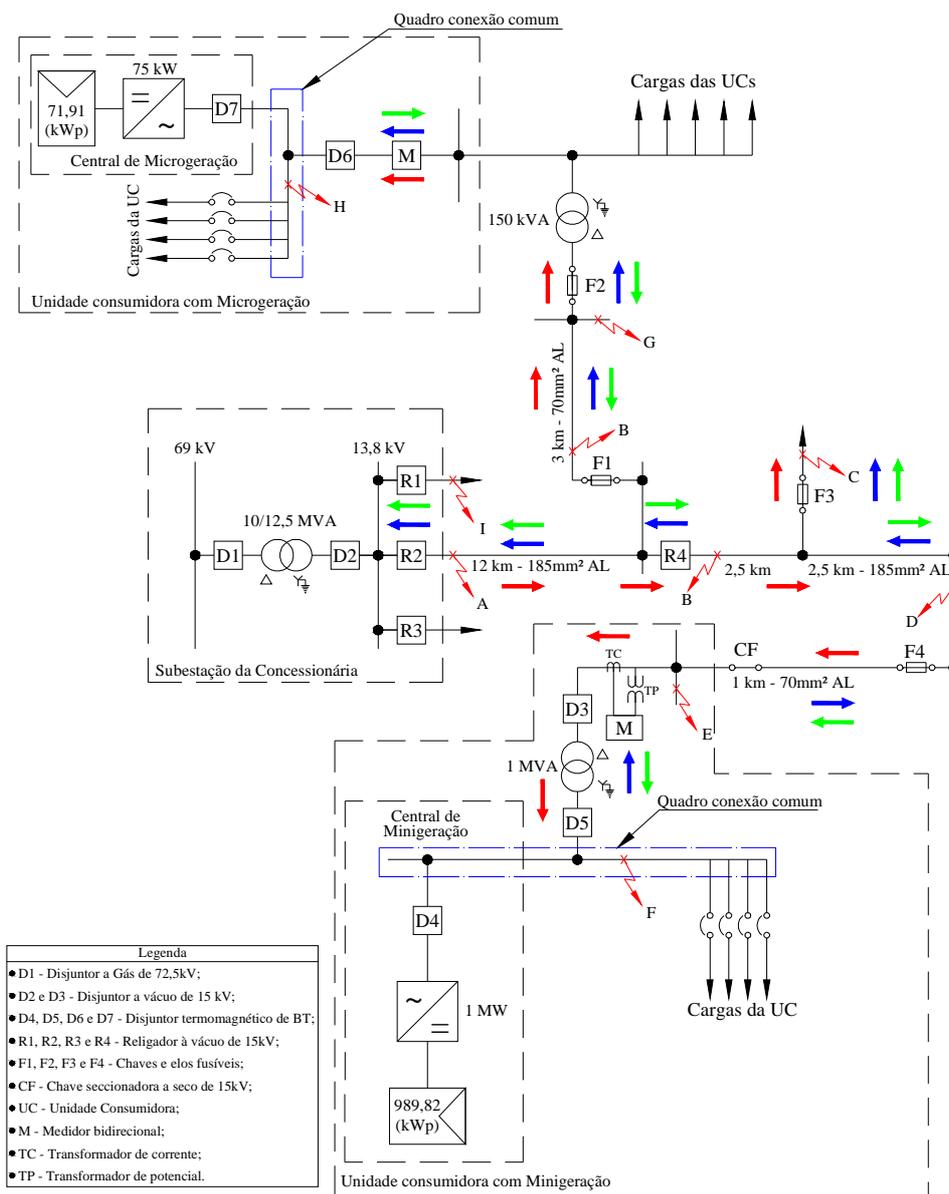


Figura 2 - Sistema de distribuição – caminhos das correntes de curto-circuito

Tabela 1 - Dados do sistema elétrico de distribuição

Componentes do Sistema de Distribuição	Impedâncias (pu na base de 100 MVA e tensão nominal do sistema)		
	Sequência positiva (Z_1)	Sequência negativa (Z_2)	Sequência zero (Z_0)
Sistema equivalente 69 kV – SE Rio Jordão	0,0331+j0,1222 pu	0,0331+j0,1222 pu	0,0610+j0,5221 pu
Transformador 69/13,8 kV - 10/12,5 MVA	j0,6716 pu	j0,6716 pu	j0,6716 pu
Transformador 13,8/0,38 kV - 1,0 MVA	j7,5 pu	j7,5 pu	j7,5 pu
Transformador 13,8/0,38 kV - 0,15 MVA	j23,33 pu	j23,33 pu	j23,33 pu
Cabo 185 mm ² -AL	0,1107+j0,1359(pu/km)	0,1107+j0,1359(pu/km)	0,2041+j1,3623(pu/km)
Cabo 70 mm ² -AL	0,2984+j0,1559(pu/km)	0,2984+j0,1559(pu/km)	0,3914+j1,4022(pu/km)

A Fig. 2 mostra a subestação Rio Jordão da Celpe 69/13,8 kV-10/12,5 MVA, três alimentadores, sendo simulada no alimentador 2, a conexão de uma central de microgeração de 71,91 kWp e uma central de minigeração de 989,82 kWp.

As centrais de micro e minigeração foram dimensionadas com base nos valores máximos adotados pela CELPE (2013 e

2014), para conexão de micro e minigeração, com base na resolução no 482. Os valores máximos foram escolhidos para simular as condições extremas da conexão de micro e minigeração distribuída.

Para simulações considerou-se a central de microgeração de 71,91 kWp formada por 18 (dezoito) séries fotovoltaicas em paralelo, cada série com 17 (dezesete) módulos da Bosch Solar. A conexão com a rede é realizada por um inversor central trifásico com potência de 75 kW. Para simulações considerou-se a central de minigeração de 989,82 kWp formada por 234 (duzentos e trinta e quatro) séries fotovoltaicas em paralelo, cada série com 18 (dezoito) módulos da Bosch Solar. A conexão com a rede é realizada por um inversor central trifásico com potência de 1000 kW.

4.2 Avaliação dos níveis de curto-circuito do sistema elétrico de distribuição com a conexão de micro e minigeradores

Quando se tem centrais de micro e/ou minigeradores conectados à rede de distribuição, os seus níveis de curto-circuito têm alteração devido à redistribuição de possíveis fontes de corrente de defeito no alimentador. Essa alteração pode causar efeitos indesejáveis na operação e na coordenação da proteção do sistema elétrico de distribuição, tendo em vista que a coordenação adequada dos relés, religadores, fusíveis, seccionadores é baseada na contribuição para corrente de falta das fontes disponíveis que alimentam o defeito. É desejável manter uma boa coordenação de relés, religadores e fusíveis no sistema da concessionária com e sem as centrais de micro e minigeração conectadas à rede.

Segundo Sidhu e Bejmert (2012), a central de micro e/ou minigeração pode ser representada por um circuito equivalente de Norton, onde se tem uma fonte de corrente ideal, um diodo e um resistor conectado em paralelo com a fonte de corrente e um resistor em série.

Para o cálculo da corrente de curto-circuito no ponto de defeito, considerando a central de micro e/ou minigeração, representa-se o sistema da distribuidora pelo circuito equivalente de Thévenin no ponto e as fontes de micro e/ou minigeração pelo circuito equivalente de Norton e através do teorema da superposição obtendo-se a corrente total de defeito. Para o circuito da Fig. 2 foram calculadas as correntes de curto-circuito nos pontos indicados, utilizando o programa: análise de faltas simultâneas (ANAFAS).

Segundo Katiraei, et al. (2012), a contribuição da central de micro e/ou minigeração para falta depende do projeto do inversor, e na grande maioria dos modelos pode chegar a até 120% da corrente nominal do inversor. Para as simulações apresentadas considerou-se para contribuição das centrais de micro e minigeração este valor máximo, isto é 120% da corrente nominal dos inversores de 75 kW e 1000 kW.

Nas Tab. 2 e 3 apresentam-se os resultados da simulação dos curtos-circuitos, trifásicos, bifásicos, monofásico franco e monofásico com resistência de contato de 40Ω , mostrando as contribuições do sistema da Celpe, da central de microgeração e da central de minigeração. Ressalta-se que as contribuições da microGD e miniGD foram calculadas considerando que no momento do curto-circuito elas estão injetando toda potência na rede.

Os resultados apresentados nas Tab. 2 e 3 mostram que as contribuições das centrais de microGD e miniGD, para as correntes de curtos-circuitos total, nos diversos pontos de defeitos simulados, quando eles acontecem na média tensão (13,8 kV) é muito pequena e até nula se o defeito for fase-terra, em função da ligação delta no lado de alta do transformador da Celpe e do lado de alta do transformador da unidade consumidora de miniGD, tendo em vista, que em função da ligação do transformador, não existe componente de sequência zero. Os resultados também mostram que as contribuições da fonte do sistema Celpe são significativas, principalmente, quando o curto-circuito é trifásico ou bifásico e acontece na baixa tensão no lado AC. Ressalta-se que na média tensão as contribuições das centrais de micro e/ou de minigeração para correntes de curtos-circuitos trifásicos e bifásicos são pequenas em função das mesmas estarem ligadas no lado de baixa tensão.

Tabela 2 - Resultados das correntes de curto-circuito, trifásico e bifásico

Local do Curto-Circuito	Corrente de Curto-Circuito (A)							
	Trifásico				Bifásico			
	Celpe	MicroGD	MiniGD	Total	Celpe	MicroGD	MiniGD	Total
A	5.270	3,77	50,21	5.324	4.568	3,77	50,21	4.622
B	1.500	3,77	50,21	1.554	1.300	3,77	50,21	1.354
C	1.300	3,77	50,21	1.354	1.127	3,77	50,21	1.181
D	1.150	3,77	50,21	1.204	997	3,77	50,21	1.051
E	1.060	3,77	50,21	1.114	919	3,77	50,21	973
F	13.830	137	1.823	15.790	11.986	137	1.823	13.946
G	1.140	3,77	50,21	1.194	988	3,77	50,21	1.042
H	5.770	137	1.823	7730	5.001	137	1.823	6961
I	5.270	3,77	50,21	5.324	4.568	3,77	50,21	4.622

Tabela 3 - Resultados das correntes de curto-circuito, monofásico franco e com resistência de contato (40 Ω)

Local do Curto-Circuito	Corrente de Curto-Circuito (A)							
	Monofásico franco (Ro = 0 Ω)				Monofásico com Contato (Ro = 40 Ω)			
	Celpe	MicroGD	MiniGD	Total	Celpe	MicroGD	MiniGD	Total
A	5.550	0,00	0,00	5.550	199	0,00	0,00	199
B	560	0,00	0,00	560	175	0,00	0,00	175
C	470	0,00	0,00	470	170	0,00	0,00	170
D	410	0,00	0,00	410	164	0,00	0,00	164
E	380	0,00	0,00	380	161	0,00	0,00	161
F	15.530	137	1.823	1.7490	5	137	1.823	1.965
G	440	0,00	0,00	440	165	0,00	0,00	165
H	6.000	137	1.823	7.960	5	137	1.823	1.965
I	5.550	0,00	0,00	5.550	199	0,00	0,00	199

Para curto-circuito na baixa tensão no lado CC da central solar fotovoltaica, não se tem contribuição da fonte Celpe, tendo em vista que o inversor não funciona como um retificador.

De acordo com Sidhu e Bejmert (2012), quando a central fotovoltaica está bem protegida (proteções de sobrecorrente, sobretensão, antiilhamento) sua contribuição para corrente de falta também está limitada no tempo. Por esta razão não existe problema com a coordenação da proteção quando uma central fotovoltaica de alta potência é conectada à rede da distribuidora.

4.3 Avaliação da conexão de micro e minigeradores em relação à coordenação e seletividade da proteção

A avaliação da conexão de centrais de micro e minigeração, em relação à coordenação e seletividade da proteção dos sistemas elétricos de distribuição, é realizada com base no circuito da Fig. 2. Considera-se que, sem as centrais, a proteção está ajustada, atendendo aos critérios estabelecidos pelas concessionárias, conforme os ajustes da Tab. 4.

Na Fig. 2 as setas na cor vermelha representam a contribuição da subestação da Celpe para os curtos-circuitos e as setas nas cores azul e verde representam a contribuição das centrais de minigeração e microgeração, respectivamente. Com a conexão de micro e/ou minigeração distribuída nos alimentadores, os valores das correntes de curtos-circuitos considerados para operação do fusível e religador serão alterados.

Tabela 4 - Ajustes dos dispositivos de proteção

Subestação ou Rede/ Equipamento	Tensão (kV)	RTC (A)	Proteção de Fase		Proteção de Neutro	
			Fabricante e tipo	Ajustes	Fabricante e tipo	Ajustes
SE Rio Jordão Religador 21J1	13,8	800-5	ZIV 8IRV	Tap: 480 A	ZIV 8IRV	Tap: 48 A
				Eq: 480 A		Eq: 48 A
				Cur: I0,14		Cur: M0,4
				Inst: 3200A		Inst: 1600 A
SE Rio Jordão Religador 21J2	13,8	800-5	ZIV 8IRV	Tap: 480 A	ZIV 8IRV	Tap: 48 A
				Eq: 480 A		Eq: 48 A
				Cur: I0,14		Cur: M0,4
				Inst: 3200A		Inst: 1600 A
SE Rio Jordão Religador 21J3	13,8	800-5	ZIV 8IRV	Tap: 480 A	ZIV 8IRV	Tap: 48 A
				Eq: 480 A		Eq: 48 A
				Cur: I0,14		Cur: M0,4
				Inst: 3200A		Inst: 1600 A
REDE Religador R ₄	13,8	600-1	Arteche Smart RC P500	Tap: 240 A	Arteche Smart RC P500	Tap: 30 A
				Eq: 240 A		Eq: 30 A
				Curva: 0,10		Curva: 0,2
				Inst: 1440A		Inst: 480 A

Os relés de religamento(79) e os elos fusíveis estão ajustados conforme a seguir:

- ✓ três abertura, dois religamentos, 7 s para os intervalos de religamentos e 120 s de tempo de reset;
- ✓ elos fusíveis do tipo k: F₁ = 40 A; F₂ = 8 A; F₃ = 50 A e F₄ = 80 A.

A seguir, para o circuito da Fig. 2 analisa-se a coordenação e seletividade das proteções da rede durante curto-

circuito nos diversos pontos indicados na figura.

Curto-circuito no ponto A ou na rede AB

Os curtos-circuitos no ponto A ou na rede AB devem ser eliminados pelo religador R_2 , cujas condições de atuação não mudam com a conexão de centrais de micro e minigeração. Contudo, tem-se contribuição para o curto-circuito das centrais de micro e minigeração, até que o religador R_2 abra e as centrais sejam desconectadas por falta de tensão. Assim, deve-se avaliar se os elos fusíveis das chaves F_1 e F_2 suportam a corrente de curto-circuito proveniente da central de microgeração e se os ajustes do religador R_4 e o elo fusível da chave F_4 suportam a corrente de curto-circuito proveniente da central de minigeração, evitando assim a abertura indevida destes dispositivos de proteção. Avaliando os valores de curtos-circuitos apresentados nas Tab. 2 e 3 e os ajustes do religador R_4 e os valores nominais dos elos, pode-se afirmar, para o exemplo dado, que não se teria nenhum problema, porém para uma quantidade maior de centrais pode ser necessário fazer alguns ajustes nestes dispositivos de proteção.

Curto-circuito no ponto B e na rede BDE

Os curtos-circuitos no ponto B, após o religador R_4 ou na rede BDE devem ser eliminados pelo religador R_4 , cujas condições de atuação não mudam com a conexão de centrais de micro e minigeração, podendo até melhorar, pois a corrente de curto que passa no religador R_4 é a soma da contribuição da Celpe com a da central de microgeração. Contudo, tem-se contribuição para o curto-circuito da central de minigeração, até que o religador R_4 abra e a central seja desconectada por falta de tensão. Assim, deve-se avaliar se o elo fusível da chave F_4 suporta a corrente de curto-circuito proveniente da central de minigeração, evitando assim a abertura indevida destes dispositivos de proteção. Avaliando os valores de curtos-circuitos apresentados nas Tab. 2 e 3 e o valor nominal do elo, pode-se afirmar, para o nosso exemplo, que não haveria nenhum problema.

Curto-circuito no ponto C

Os curtos-circuitos no ponto C devem ser eliminados pelo elo fusível da chave F_3 , que deve ter seletividade com o religador R_4 , para testar se os defeitos são temporários ou permanentes. Com a conexão das centrais de micro e minigeração tem-se contribuições das centrais para os curtos-circuitos, porém, enquanto a contribuição da central de microgeração passa pelo religador R_4 contribuindo para melhorar a sensibilidade da proteção, a contribuição da central de minigeração não passa no religador R_4 , podendo fazer com que a seletividade entre a chave fusível F_3 e o religador R_4 seja perdida. Com a conexão das centrais, as concessionárias devem avaliar bem a seletividade entre as proteções dos ramais com elo fusível e os religadores. Em função da pequena contribuição da central de minigeração para o curto, conforme Tab. 2 e 3, pode-se afirmar, para o exemplo dado, que não se teria nenhum problema, porém para uma quantidade maior de centrais e para um sistema com baixas correntes de curtos-circuitos, alimentadores rurais podem ser necessários para alterar ajustes dos religadores ou substituir as chaves fusíveis de ramal por seccionizador ou religador.

Curto-circuito no ponto I

Os curtos-circuitos no ponto I devem ser eliminados pelo religador R_1 , cujas condições de atuação não mudam com a conexão de centrais de micro e minigeração. Contudo, tem-se contribuição para o curto-circuito das centrais de micro e minigeração, até que o religador R_1 abra. Nesta situação, as centrais permanecem conectadas, pois o curto-circuito acontece em um alimentador adjacente. Entretanto, tem-se corrente de curto-circuito passando no sentido inverso nos religadores R_2 e R_4 . Assim, deve-se avaliar se as correntes que passam, em sentido contrário ao fluxo normal de carga, por R_2 e R_4 são suficientes para fazer a proteção atuar, desligando toda ou parte da carga do alimentador 2, o que caracteriza falta de seletividade da proteção. Para resolver este problema deve-se usar relés de sobrecorrentes direcionais na proteção dos religadores das subestações que possuam uma quantidade elevada de centrais de micro e minigeração. Ressalta-se que a abertura de R_2 ou R_4 , além de interromper o atendimento de consumidores ou ocasionar ilhamentos indesejáveis, dificulta a localização da falta, aumentando o tempo da interrupção e o custo de manutenções.

Curto-circuito no ponto F e H

Os curtos-circuitos nos pontos F e H são defeitos que acontecem nas unidades consumidoras, onde as centrais estão instaladas, e devem ser eliminados pelos Disjuntores D_6 e D_7 para a central de microgeração e D_5 e D_4 para a central de minigeração. Para esses curtos, a contribuição da Celpe para o curto é somada à contribuição da central; logo, deve-se avaliar se para a nova situação as capacidades de interrupção dos disjuntores continuam adequadas.

5. CONCLUSÕES

Nas avaliações realizadas observa-se que a conexão de centrais de micro e/ou minigeração em sistema de distribuição projetado para alimentar a carga de forma radial pode trazer um certo número de problemas com a coordenação dos dispositivos de proteção, pois o sistema real de distribuição possui várias derivações de carga ao longo dos circuitos, podendo ter mais de um dispositivo de proteção na linha entre a subestação e a conexão das centrais.

O exemplo mostrou que para conexão de pequena quantidade de centrais de micro e/ou minigeração a influência nos sistemas de proteção não é significativa, porém para conexão em massa, o sistema de proteção dos alimentadores de

distribuição e dos transformadores deve ser bem avaliado através de estudos de coordenação da proteção. As conexões de micro e/ou minigeração distribuídas devem levar as concessionárias de energia a fazer ajustes nos sistemas de proteção da distribuição, para que o desempenho do sistema não seja reduzido, o que provavelmente levará à aplicação de tecnologias de redes elétricas inteligentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Energética de Pernambuco e à Agência Nacional de Energia Elétrica, pelo suporte financeiro ao trabalho, através do programa de P&D CELPE/ANEEL, projeto de Redes Elétricas Inteligentes de Fernando de Noronha. Agradecem também a Universidade de Pernambuco pela oportunidade de realização do mestrado em tecnologia da Energia.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução normativa no 482. Brasília-DF, abril, 2012.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)- módulo 3. abril de 2012.
- Angelopoulos, K. Integration of distributed generation in low voltage networks: power quality and economics. Master Thesis, University of Strathclyde in Glasgow, Glasgow, 2004.
- Cabello, A. F. e Pompermayer, F. M. Energia Fotovoltaica Ligada à Rede Elétrica: Atratividade para o Consumidor Final e Possíveis Impactos no Sistema Elétrico. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, fevereiro, 2013.
- Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). Conexão de Microgeradores e Minigeradores ao Sistema de Distribuição de Média Tensão - VM02.00-00.005. Recife, novembro, 2013.
- Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). Norma de Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição de Baixa Tensão - VM02.00-00.004. Recife, agosto, 2014.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Impact of Distributed Resources on Distribution Relay Protection. Report to the Line Protection Subcommittee of the Power System Relay Committee, prepared by working group D3, agosto, 2004.
- Katiraei, F., et al. Investigation of Solar PV Inverters Current Contributions during Faults on Distribution and Transmission Systems Interruption Capacity. Western Protective Relay Conference, Quanta Technology, outubro, 2012.
- Ministerio da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Joint Research Centre (JRC). Redes Elétricas Inteligentes - Diálogo Setorial Brasil-União Europeia (2014). Brasília, novembro de 2014.
- Sidhu, T. S. e Bejmert, D. Short-circuit Current Contribution from Large Scale PV Power Plant in the Context of Distribution Power System Protection Performance. University of Western Ontario, Canada, maio, 2012.
- Thong, V.V., et al. Power quality and voltage stability of distribution system with distributed energy resources. International Journal of Distributed Energy Resources. ISSN 1614-7138, Volume 1 Number 3. Editora: Technology & Science Publishers, 2005.
- Toledo, F.O., et al. Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes. São Paulo-SP: 1a Ed. Brasport, 2012.
- Toyama, J. et al. Conexão e Proteção de Geração Distribuída no Sistema de Distribuição. IEEE/PES 2010 T&D Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin América, São Paulo, 2010.

ASSESSMENT OF IMPACTS ON THE PROTECTION OF ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION SYSTEMS WHEN MICRO AND MINI GENERATORS ARE CONNECTED TO THE GRID, CONSIDERING SOLAR PHOTOVOLTAIC AND SMART GRID CONCEPTS

Abstract. *The small generators connection for parallel operation with the distribution network presents some challenges, especially in relation to security and protection of persons and installations. The departure from the standards set by rules and procedures characterizes an abnormal condition of operation, and protection be able to identify this gap and isolate the systems cease supplying power to the grid. Massive connections of distributed micro and mini generation demands a centralized control and an intelligent management system that only will be possible with use of smart grid technologies, including telecommunications infrastructure, computing facilities, smart metering and advanced protection/automation. Against the backdrop, this paper presents an assessment of impacts on the protection in electrical power distribution systems when micro and mini generators are connected on grid, considering solar photovoltaic and smart grid concepts*

Key words: *Photovoltaic solar energy, Micro and mini generation connection, Electric power system protection.*