



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

Jorge Luiz Teixeira	CEMIG Distribuição S.A.	jorgelt@cemig.com.br
Washington Pereira de Oliveira	CEMIG Distribuição S.A.	wpo@cemig.com.br
Carlos Alberto Monteiro Leitao	CEMIG Distribuição S.A.	caleitao@cemig.com.br
Adilson Olimpio Carlos	CEMIG Distribuição S.A.	aocarlos@cemig.com.br
Alecio de Melo Oliveira	CEMIG Distribuição S.A.	alecio@cemig.com.br
Alexandre Sales Braz	CEMIG Distribuição S.A.	asbraz@cemig.com.br
Ciceli Martins Luiz	CEMIG Distribuição S.A.	ciceli@cemig.com.br
Izonal Henriques Pereira Junior	CEMIG Distribuição S.A.	izonel@cemig.com.br

Critérios de conexão de acessantes geradores ao sistema de média tensão da Cemig D

Palavras-chave

Critérios Cemig de conexão em média tensão
Critérios e padrões técnicos para conexão
Norma de conexão de acessantes

Resumo

Nesse artigo se apresentam os critérios e padrões técnicos normalizados pela Cemig para a conexão de acessantes em média tensão, em 13,8, 23 e 34,5 kV.

Os Procedimentos de Distribuição da ANEEL (PRODIST) estabelecem uma série de critérios para as conexões. Entretanto, dadas as diversidades entre os sistemas das diversas concessionárias de distribuição, bem como a variedade de padrões técnicos, é necessária certa flexibilidade, de forma a compatibilizar a visão dos acessantes, das concessionárias e do regulador.

A Cemig Distribuição, ao elaborar uma norma para a conexão de acessantes geradores em média tensão, buscou estabelecer critérios consistentes sob o aspecto regulatório, mas apropriados ao seu sistema de distribuição. A norma permitiu maior rigor técnico nas análises, maior facilidade no atendimento e mais transparência no relacionamento entre Concessionária e acessantes.

1. Introdução

Com a disseminação da geração distribuída, tornaram-se necessários critérios de conexão, o que, em grande parte, foi obtido com o PRODIST [1]. Nesse campo já foram elaboradas normas por várias concessionárias

brasileiras [2],[3] e [4]. As soluções dadas variam em função das características de cada rede. Ao se elaborar uma norma para a conexão de acessantes geradores em média tensão [5], buscou-se a consistência regulatória dos critérios e sua adequação às características da rede da Cemig D. Tomou-se por base o PRODIST, os Procedimentos de Rede do ONS, as práticas e padrões técnicos consolidados dentro da Empresa e a experiência de outras concessionárias [6].

A conexão de acessantes ao sistema de distribuição envolve as questões:

- Formas e arranjos de conexão
- Ligação dos transformadores de acoplamento
- Proteção e manobra
- Medição
- Automação
- Telecomunicações
- Requisitos de geração
- Requisitos de qualidade

É relevante destacar os critérios para definição da forma da conexão, a possibilidade de se aproveitar transformadores de acoplamento existentes, a utilização das possibilidades dos modernos religadores e medidores de energia, e os cuidados na especificação dos reguladores de tensão e velocidade dos geradores.

2. Desenvolvimento

A seguir são apresentados os principais aspectos técnicos relativos à conexão de acessantes, contemplados na norma de distribuição desenvolvida pela Cemig D.

1.1. Formas de conexão em média tensão

Foram estabelecidos as possibilidades de conexão e os critérios para definição do ponto de conexão à rede.

1.1.1. Possibilidades de conexão em média tensão

A conexão poderá se dar de uma SE de Distribuição ou por derivação de um alimentador pré-existente.

a) Acessante conectado a uma subestação de distribuição

Nesse caso deverá ser instalada uma seção de média tensão, com religador ou disjuntor, conforme o padrão da SE. Os equipamentos da seção deverão ser transferidos sem ônus para a Cemig D, responsável pela sua manutenção e operação. A medição de faturamento deverá instalada na subestação, em média tensão. A figura a seguir mostra o caso de acessante conectado a uma SE.

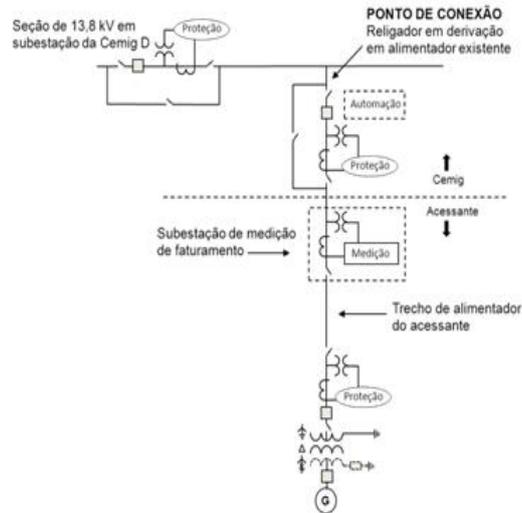


FIGURA 1 - Ponto de Conexão em Subestação

b) Acessante conectado em derivação a um alimentador existente

No ponto de conexão deverá ser instalado um religador, especificado conforme normas da Cemig D, a ser transferido sem ônus para a Concessionária, responsável por sua operação e manutenção. O trecho da planta do acessante à conexão, de propriedade do acessante, deverá ser construído por ele, conforme as normas da Cemig D. Cabe ao acessante a manutenção desse trecho. O conjunto de medição deverá ser instalado pelo acessante a uma distância inferior a 100 metros do ponto de conexão. Segue-se a configuração.

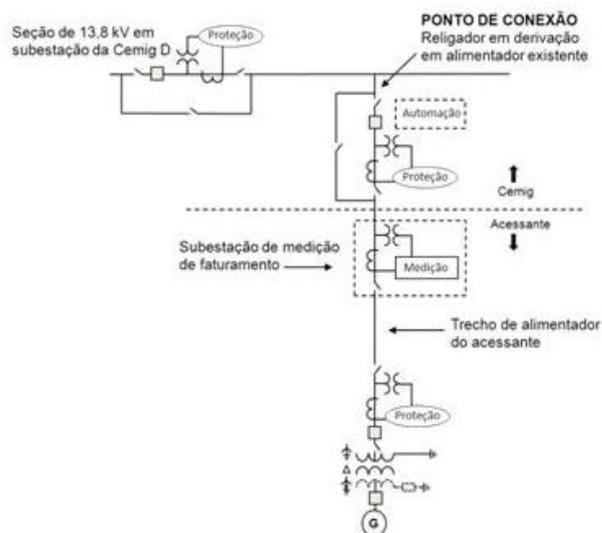


FIGURA 2 - Ponto de conexão em alimentador existente

c) Consumidor que se torna autoprodutor

Nesse caso um consumidor instala geradores e exporta os excedentes gerados. Deverão ser feitas adequações de proteção, medição e automação. O religador deverá ser instalado próximo às instalações do consumidor ou em outro ponto definido pela Cemig D. Este religador deverá ser transferido sem ônus para a Cemig D, responsável pela sua operação e manutenção. Segue-se o esquema da configuração.

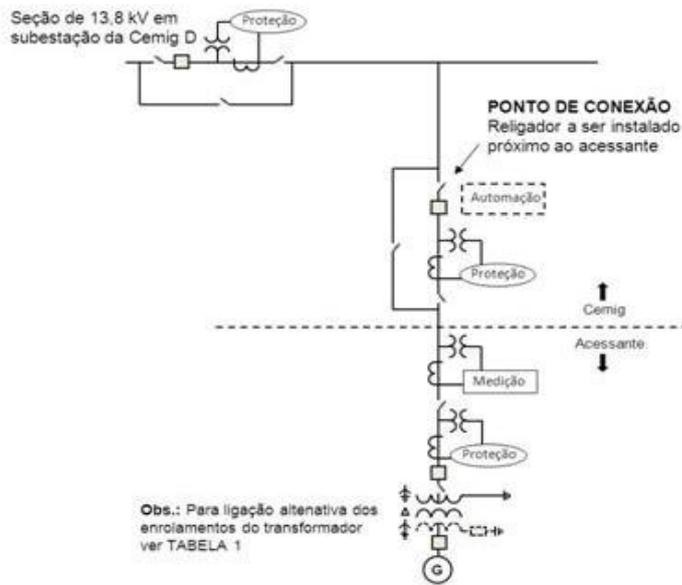


FIGURA 3 - Consumidor que pretende se tornar autoprodutor

1.1.2. Definição da forma de conexão em média tensão

A definição da solução de conexão ocorre na fase de planejamento, efetuada conforme os critérios de mínimo custo global, máxima potência injetada e tensão crítica no alimentador.

O critério de mínimo custo [1] considera os custos das obras de conexão, dos reforços no sistema de distribuição e as perdas totais de cada alternativa.

Os limites máximos de potência injetada por alimentador foram estabelecidos considerando-se a máxima capacidade de transporte dos cabos e os níveis de carregamento praticados pela Cemig D. Para cada nível de tensão, o somatório das potências injetadas pelas PC conectadas a um único alimentador se limitará a:

- 7 MW para os alimentadores de 13,8 kV
- 10 MW para os alimentadores de 23 kV
- 15 MW para os alimentadores de 34,5 kV

O critério de tensão crítica após o religamento busca reduzir a amplitude das variações de tensão de curta duração (VTCD) devidas a essas perturbações e limitar os impactos causados no perfil de tensão do alimentador. A conexão de geradores síncronos a alimentadores de grande extensão e R/X elevado dificulta o controle da tensão, devido aos impactos no perfil de tensão do alimentador, e às grandes variações da tensão no caso de súbito desligamento das máquinas ou ocorrência de desligamentos e religamentos dos alimentadores. Por este critério, após o desligamento súbito das GDs ligadas a um determinado alimentador, a tensão nesse alimentador deverá permanecer na faixa de 0,90 pu a 1,05 pu.

É aplicado nas simulações para os estudos de planejamento para a definição das condições de acesso. Nas simulações, os reguladores de tensão do alimentador e o LTC da subestação supridora deverão ser considerados com tapes bloqueados na posição do momento do desligamento. No religamento, supõem-se todos os geradores do alimentador desligados e a recuperação de 80% da carga pré-falta e considera-se que os autoprodutores estejam consumindo a demanda contratada. Caso não seja possível se definir uma alternativa de derivação de alimentador existente que atenda aos critérios, a conexão deverá se dar na barra de média tensão da SE ou na alta tensão. Esse critério favorece soluções mais robustas, reduz os problemas de controle de tensão e fluxo de potência reativa no alimentador e reduz o risco de variações de tensão prejudiciais a outros consumidores. Finalmente, permite identificar os acessantes cuja conexão represente risco para a operação adequada da rede.

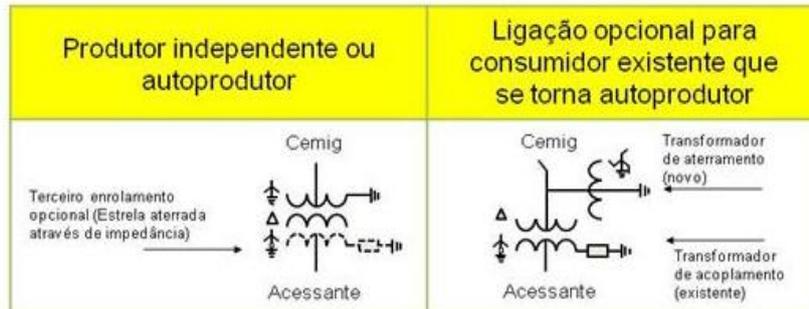
1.2. Transformadores de acoplamento

Centrais geradoras devem ser interligadas ao sistema da concessionária por um ou mais transformadores de acoplamento, cuja potência é definida em função dos requisitos do acessante. Esses transformadores têm como funções permitir a conexão entre os geradores e a rede elétrica quando com diferentes tensões nominais, atender a exigências distintas de aterramento da concessionária e do acessante e reduzir a propagação de harmônicas triplas entre a concessionária e do acessante. A referência [7] relaciona cinco configurações típicas de conexão dos enrolamentos do transformador de acoplamento:

- Delta em ambos os lados (D - D);
- Delta do lado da rede e estrela com neutro aterrado do lado do gerador (D - Ya);
- Estrela com neutro aterrado do lado da rede e delta do lado do gerador (Ya -?D);
- Estrela com neutro isolado do lado da rede e delta do lado do gerador (Y-?D);
- Estrela com neutro aterrado em ambos os lados (Ya-Ya).

A escolha do tipo de conexão considera os padrões de aterramento de cada concessionária e os requisitos de proteção da geração. A Cemig optou pela filosofia de sistemas solidamente aterrados, que evita sobretensões nas redes de média tensão. No caso de ramais monofásicos, os quais existem em grande quantidade no sistema da Cemig, evita-se também sobretensões refletidas na rede de baixa tensão. Esse padrão requer que o acessante provenha uma referência de terra no lado da Concessionária, para evitar sobretensões nas fases não faltosas após abertura dos terminais da Concessionária, devido à ocorrência de curto-circuito fase-terra. Permitiu-se que fossem mantidos os transformadores já existentes com primário em delta, desde que instalado um transformador de aterramento. A tabela a seguir mostra os tipos admitidos de ligação do transformador de acoplamento.

TABELA 1 – Ligação de transformador de acoplamento



O transformador de acoplamento deverá possuir tapes fixos do lado da Cemig D, com faixa mínima de \pm (2 x 2,5%), para um melhor acoplamento entre a tensão nos terminais dos geradores e no sistema de distribuição.

A seguir descrevem-se os tipos de ligação aceitos pela Cemig D para novos produtores independentes ou autoprodutores e consumidores que se tornam autoprodutores.

1.2.1. Produtor independente ou autoprodutor que solicita a conexão

Essa situação se refere a um novo acessante gerador, seja ele produtor independente ou autoprodutor. As conexões serão estrela solidamente aterrada no lado da Cemig D e delta no lado do acessante. O transformador deverá possuir neutro acessível (4 buchas) no lado da Cemig D. Opcionalmente o transformador de acoplamento poderá possuir um enrolamento adicional no lado do acessante aterrado por impedância.

1.2.2. Consumidor existente que se torna autoprodutor

Nesse caso, os transformadores normalmente possuem ligação com enrolamento delta no lado da Cemig D e estrela aterrada por impedância no lado do consumidor. Caso se queira manter o transformador existente deverá se instalar um transformador de aterramento. Este deverá possuir o neutro acessível, sem equipamento de isolamento, e será conectado aos terminais do lado da Cemig D do transformador de acoplamento, permanecendo na zona de proteção deste. O resultado da divisão da reatância de sequência zero pela reatância de sequência positiva do transformador de aterramento (X_0/X_+) deverá ser menor que 3. No cálculo X_+ é a reatância positiva vista da barra de média tensão do acessante, considerando-se aberta a interligação com a Cemig D. No caso de um acessante com um gerador e um transformador de acoplamento, X_+ será dada pela soma da reatância de sequência positiva do transformador de acoplamento e da reatância subtransitória de eixo direto do gerador (X''_d).

1.3.Requisitos de Proteção

Seguem-se princípios gerais, requisitos mínimos, funções de proteção e recomendações técnicas para o esquema de proteção.

- O esquema de proteção instalado pelo acessante deverá garantir a eliminação da contribuição de sua planta para todos os tipos de faltas na rede de interligação com o Sistema da Cemig D, assim como a eliminação da contribuição do Sistema da Cemig D para faltas em sua planta.
- O Acessante deverá prever um esquema de proteção que desconecte o seu sistema de geração no caso de perda do sistema Cemig D, de modo a permitir o religamento automático deste último. O tempo de religamento é definido no acordo operativo.
- Todas as funções de proteção instaladas para a ligação do Acessante deverão ser aprovadas pela Cemig D.

A Figura 4 apresenta as funções mínimas de proteção no ponto de conexão e na subestação do acessante.

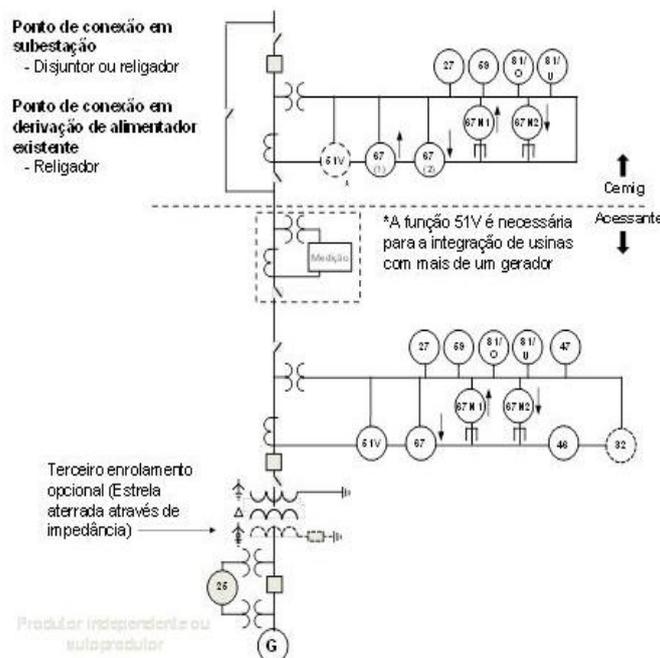


FIGURA 4 – Funções mínimas de proteção nas instalações do acessante e no ponto de conexão

Segue-se a relação das funções mínimas de proteções a serem instaladas no ponto de conexão e nas instalações do acessante.

- 27 - Subtensão
- 51V - Sobrecorrente com restrição de tensão - Função necessária quando a função 67 não se mostrar adequada para faltas bifásicas e trifásicas, visto que em alguns casos não é possível compatibilizar as condições de geração máxima e contribuição mínima de curto-circuito, como normalmente acontece nos casos de usinas com mais de 2 geradores. Função opcional à função 21/21N, sendo que uma delas deverá ser implementada.
- 59 - Sobretensão
- 67 (1 e 2) - Sobrecorrente direcional de fase
- 67N (1 e 2) - Sobrecorrente direcional de neutro - Opcional à função 21/21N, sendo que uma delas deverá ser implementada.
- 81 (O/U) - Frequência
- Oscilografia - Registro das formas de onda de corrente e tensão antes, durante e logo depois da ocorrência de uma falta, por um período total de no mínimo 2 segundos.
- Religamento - O religamento do disjuntor ou religador instalado no ponto de conexão deverá sempre ser realizado com esquema de supervisão de linha morta, podendo ser automático ou manual, a critério do acessante.

Somente na Subestação do acessante

- 21/21N - Distância de fase - função 21/21N é opcional à função 51V. Deverá ser implementada pelo menos uma delas.
- 25 - Verificação de sincronismo - Poderá ser instalada em disjuntor na baixa tensão do acessante. Os disjuntores sem supervisão do relé de check de sincronismo deverão possuir intertravamento que impeça o fechamento do paralelismo por esses disjuntores
- 32 - Direcional de potência - A instalação depende da análise da Cemig D
- 46 - Reversão ou balanceamento de corrente de fase
- 47 - Sequência de fase de tensão
- 59N - Desequilíbrio de tensão - Apenas para o caso de transformador em delta do lado Cemig e transformador de aterramento.

1.4.Requisitos de medição

No tocante à medição de faturamento, consideram-se as situações do produtor independente, detentor de concessão ou autorização para atuar como agente gerador, e a do autoprodutor. Em ambos os casos a cabine de medição deverá seguir o padrão estabelecido em norma pela Cemig [8]. O acessante solicitará à CCEE a emissão do Parecer de Localização da Medição. A Cemig D deverá fornecer informações específicas sobre suas instalações para o desenvolvimento e a pré-operação do projeto do SMF. Após pré-aprovado, o projeto de Medição deverá ser enviado pela Cemig D ao ONS para aprovação definitiva. No caso de novos produtores independentes ou novos autoprodutores, deverão ser atendidos os critérios do ONS [9], complementadas pelos requisitos adicionais do padrão Cemig. D. No caso de consumidores que se tornem autoprodutores, aplicam-se os critérios da Cemig D para consumidores livres.

1.5.Telecomunicações e Automação

A interligação entre o Centro de Operações da Distribuição da Concessionária (COD) e o ponto de conexão deverá ser definida pelo acessante, atendidos os requisitos mínimos de desempenho estabelecidos pela Concessionária. Deve ser disponibilizado um canal de comunicação de voz entre a instalação ou o centro de operação do acessante e o COD.

Os recursos necessários para a comunicação, incluindo infraestrutura, meios de comunicação, equipamentos, materiais e serviços de instalação são de responsabilidade do acessante, incluindo os equipamentos e conexões para comunicação de dados entre o ponto de conexão e o COD. Com a inserção das funções de proteção e automação nos religadores, a supervisão e controle dos acessantes deverá se dar na conexão, reduzindo-se a interferência da concessionária nas instalações do acessante.

Tratando-se de acessantes interligados a subestações da Cemig, havendo disponibilidade de recursos de telecomunicação na subestação, o acessante deverá utilizá-los, provendo todas as ações pertinentes à infraestrutura, equipamentos, materiais e serviços de instalação. O acessante deverá garantir a integração do religador ou disjuntor a ser instalado no ponto de conexão ao sistema de automação existente. Caso não haja disponibilidade de recursos de telecomunicação na subestação, deverá ser disponibilizado pelo acessante um canal de comunicação interligando o Ponto de Conexão ao COD.

1.6.Requisitos de Geração

Devido à grande extensão dos alimentadores e R/X elevados dos cabos, poderão ocorrer efeitos indesejados na qualidade, perfil e estabilidade da tensão. Por isso estabeleceram-se requisitos para geradores de corrente alternada conectados ao sistema de distribuição.

1.6.1.Geradores síncronos

A interligação de máquinas síncronas requer cuidados no tocante à sincronização, ao controle e perfil de tensão da rede, à proteção e à estabilidade.

A proteção e sincronização das máquinas é responsabilidade do acessante. O sincronismo poderá se dar automaticamente, nos casos em que a planta não for operada localmente. Deverá ser instalado relé de cheque de sincronismo. Recomendam-se como condições mínimas para a sincronização:

- Diferença de frequência: 0,3 Hz
- Diferença de Tensão: 10%
- Diferença do ângulo de fase:10°

Conforme recomendado no PRODIST, toda central geradora com potência nominal superior a 300 kW deverá possuir controle de tensão. Para facilitar o controle de tensão no alimentador deverá ser admitido o controle por tensão constante e por fator de potência constante. Em condição normal o fator de potência na conexão poderá variar na faixa de 0,90 (sobrecitado) e 0,95 (subexcitado) [10]. O controle de tensão das máquinas deverá ser especificado para operar na faixa de 95% a 105% da nominal em condição normal, e até um valor máximo de 110% da nominal.

Oscilações na potência injetada pelos geradores acarretam oscilações de tensão nos alimentadores. Por isso, os controles das máquinas deverão ser dotados de amortecimento adequado. Conforme recomendado no PRODIST, toda central geradora com potência nominal superior a 300 kW deverá possuir controle de velocidade. Exigiu-se PSS nas máquinas de potência superior a 500 kW.

Em certas emergências ou em interrupções programadas a operação ilhada pode ser desejável. Nos demais casos as máquinas devem ser desligadas. Para operar de forma isolada, as centrais hidrelétricas com potência nominal a partir de 1 MW deverão possuir dispositivos para partida independentemente da rede de distribuição (Black Start). O controle de velocidade deverá permitir reversão automática entre os modos de

controle por potência constante e frequência constante. Não se exige que as máquinas térmicas possam operar ilhadas.

1.6.2.Geradores assíncronos

Geradores assíncronos necessitam de potência reativa da rede e podem impor variações excessivas de tensão durante a partida [11]. Por isso a potência máxima dos geradores assíncronos a serem interligados foi limitada a 500 kW. A variação máxima de tensão admitida na conexão é de 5%. A interligação só poderá ocorrer após o rotor alcançar 95% da velocidade síncrona. O acessante deverá instalar o montante necessário de bancos de capacitores para manter um fator de potência indutivo mínimo de 0,95. Os bancos só poderão ser ligados 1 minuto após a entrada em funcionamento do gerador, sendo automaticamente desligados na falta de tensão na rede da Cemig D. A armadura dos geradores deverá ser ligada em estrela aterrada, idêntico ao da rede de média tensão da Cemig D. Para se evitar a motorização deverá ser instalado o relé de potência inversa, com ajuste validado pela Cemig D. Os geradores conectados diretamente à rede deverão suportar até 105% da tensão nominal sem saturação.

1.7.Requisitos de Qualidade

Conforme o PRODIST [12], a qualidade é avaliada pelos indicadores de qualidade do produto e qualidade do fornecimento.

1.7.1.Requisitos de qualidade do produto

O PRODIST considera indicadores para a tensão em regime permanente, o fator de potência, as distorções harmônicas, os desequilíbrios de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração (VTCD) e variações de frequência. Cada acessante deve observar limites individuais de emissão, contribuindo assim para a preservação dos limites do PRODIST. Os limites por acessante foram estabelecidos com base nos Procedimentos de Rede do ONS [10]. Para as distorções harmônicas adotou-se a norma 519 do IEEE [13]. A medição dos indicadores de tensão em regime permanente, VTCD e fator de potência pelos medidores de faturamento de energia, que deverão ser especificados para permitir a avaliação desses parâmetros, o que poderá ser feito sem grandes custos adicionais. Os valores poderão ser obtidos localmente. Se necessário serão realizadas campanhas de medição para os demais itens.

1.7.2.Requisitos de qualidade de serviço

A qualidade de serviço será avaliada pelos indicadores individuais DIC, FIC e DMIC, conforme definidos no PRODIST. São estabelecidos em função dos valores de referência de DEF e FEC estabelecidos em resolução específica da ANEEL para cada distribuidora.

3. Conclusões

A utilização da norma possibilitou maior rigor técnico nas análises, maior facilidade no atendimento e mais transparência no relacionamento entre Concessionária e acessantes. A seguir são destacados seus aspectos mais representativos.

Alimentadores longos e com R/X elevado podem ser afetadas pela interligação de geradores, que em certos casos pode dificultar o controle de tensão. **O critério de tensão crítica após o religamento** permite identificar os acessantes cuja conexão ameaça a operação adequada da rede e melhorar a solução de conexão.

Consumidores que se tornam autoprodutores podem manter os transformadores de acoplamento existentes, normalmente conectados em delta do lado da Concessionária. Para isso basta a instalação de transformadores de aterramento, os quais são equipamentos mais baratos, atendendo aos requisitos da Concessionária e reduzindo os investimentos dos acessantes.

Com a internalização das funções de proteção e automação nos religadores, as funções de supervisão e controle se concentraram na conexão, reduzindo-se a interveniência da Concessionária nas instalações dos acessantes. Os medidores de faturamento serão adicionalmente utilizados para a monitoração dos indicadores de tensão em regime, VTCD e fator de potência.

As máquinas síncronas deverão poder operar nos modos de tensão constante e fator de potência constante, com flexibilidade para absorver e gerar potência reativa. Para reduzir as oscilações de tensão é importante a especificação e ajuste adequados dos sistemas de controle de tensão e velocidade das pequenas centrais interligadas. Para que as PCH possam operar ilhadas, recomenda-se a instalação de Black Start e reguladores de velocidade com reversão automática entre os modos de potência e frequência.

4. Referências bibliográficas

1. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PODIST - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição – ANEEL - Revisão 3 - 12/04/2011.
2. Ligação de Autoprodutores em Paralelo com o Sistema de Distribuição da CPFL – Norma Técnica - CPFL energia, Campinas 2007.
3. Manual de Acesso ao Sistema de Transmissão da Copel, Relatório Técnico PLSE 003/2005– COPEL, Florianópolis- janeiro de 2005.
4. Acesso, Conexão e Uso de Sistema de distribuição por Acessantes geradores de energia elétrica – Norma Coelba – PCI.00.03 - 1ª edição – Coelba, Salvador, dezembro de 2001.
5. Requisitos para a conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição Cemig – Conexão em Média Tensão, Manual de Distribuição, ND 5.31, Belo Horizonte, julho de 2011
6. Interconnection requirements for Power generators, 35 kV and Below , BCHydro, Canadá , 2010
7. Projeto P&D 302 – Desenvolvimento de metodologias e Procedimentos Para Análise Sistêmica da Instalação de Geração Ultra Dispersa na Rede Secundária da Cemig D - Convênio de Pesquisa e Desenvolvimento Cemig, UNICAMP, Belo Horizonte – 2011
8. Cemig D, “Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão – Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea”, Norma Técnica ND 5.3, dezembro de 2009
9. Procedimento de Rede do ONS - Submódulo 12.2 - Instalação do sistema de medição para faturamento - ONS, Rio de Janeiro, Setembro – 2010
10. Procedimento de Rede do ONS - Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica - - ONS, Rio de Janeiro, Setembro –2009
11. Paulino, Álvaro César, “Otimização de Alocação de fontes de Geração Distribuída em Redes de Distribuição de Média Tensão”, Dissertação de Mestrado – PUC-MG – Belo Horizonte – Outubro 2009.
12. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica – ANEEL, Brasília - 01/02/2012
13. 519 – IEEE IEEE SM 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (Revision of IEEE SM 519-1981)