



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

Julio Bellan	Valmir Ziolkowski	Tiago R. Ricciardi
ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A	ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A	Unicamp - Universidade Estadual de Campinas
Julio.Bellan@elektro.com.br	Valmir.Ziolkowski@elektro.com.br	tiago@dsee.fee.unicamp.br

Ricardo Torquato	Walmir Freitas
Unicamp - Universidade Estadual de Campinas	Unicamp - Universidade Estadual de Campinas
torquato@dsee.fee.unicamp.br	walmir@dsee.fee.unicamp.br

Estabilidade de Geradores Distribuídos Conectados via Inversores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Palavras-chave

Controle
Estabilidade
Geração Distribuída
Inversores
Proteção Antiilhamento

Resumo

O uso de geradores distribuídos conectados via inversores em sistemas de distribuição de energia elétrica tem apresentado notável crescimento, especialmente com os recentes incentivos à exploração das redes secundárias de baixa tensão. A conexão desses geradores traz diversos impactos técnicos ao funcionamento da rede elétrica. Alguns desses impactos, como a injeção de sinais harmônicos e a elevação do perfil de tensão em regime permanente já são bem conhecidos e normalmente avaliados pelos engenheiros das concessionárias de distribuição nos estudos de conexão de novos acessantes. Um aspecto normalmente ignorado pelas concessionárias, contudo, de grande importância para a melhor avaliação dos impactos da conexão, refere-se aos limites de estabilidade de tais geradores. Neste trabalho técnico apresentaremos uma discussão baseada em simulações computacionais sobre as condições de estabilidade de inversores em sistemas de distribuição. Os resultados sugerem que a operação de tais equipamentos é sujeita a limites de estabilidade que podem restringir o nível de penetração desses geradores em determinados pontos da rede de

distribuição. O objetivo deste trabalho técnico é divulgar para a comunidade técnica das concessionárias de distribuição de energia elétrica este importante aspecto normalmente negligenciado nos estudos pré-conexão.

1. Introdução

O interesse pela conexão de geradores diretamente nas redes de distribuição de energia elétrica, fato conhecido como geração distribuída, tem aumentado consideravelmente nos últimos anos em razão de uma série de fatores como a reestruturação do setor elétrico; a necessidade de aproveitamento de diferentes fontes primárias de energia; os avanços tecnológicos em dispositivos e equipamentos de conversão de energia; os incentivos governamentais e a maior conscientização sobre conservação ambiental (CIRED, 1999, p. 2-7 e ANEEL, 1999, p. 1-2). Em alguns países, crises energéticas e blecautes também são alguns fatores que influenciaram o crescimento do número de geradores de pequeno e médio portes conectados diretamente nas redes de distribuição. Adicionalmente, em 2011 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) demonstrou sinais de interesse no aumento da conexão de tais geradores através de incentivos para a conexão de centrais geradoras de pequeno porte nas redes de distribuição secundárias, com destaque para a geração solar fotovoltaica residencial (ANEEL, 2011, p. 1-19).

Uma característica marcante da geração distribuída é a diversidade de tecnologias e fontes primárias disponíveis para aplicação. São encontradas aplicações que usam desde fontes de energia primária renováveis (e.g. turbinas eólicas, células fotovoltaicas, pequenas centrais hidrelétricas, biomassa) até fontes não renováveis baseadas em combustíveis fósseis (e.g. turbinas a gás natural, máquinas de combustão interna, células a combustível). A conexão de tais fontes de energia à rede elétrica, sejam elas renováveis ou não, ocorre através de um dos três dispositivos a saber: geradores síncronos (GS), geradores de indução (GI) ou geradores conectados via conversores estáticos de potência como os inversores. Enquanto os GS e os GI foram exaustivamente estudados, sendo os impactos de sua conexão às redes de distribuição bem conhecidos, os geradores distribuídos conectados via inversores (GDCI) ainda não se encontram em tal estágio. Com o cenário de crescimento da GD em redes de baixa tensão que se apresenta, é esperado um aumento também no uso de GDCIs, uma vez que esses dispositivos são utilizados na conexão de células fotovoltaicas, células a combustível ou até mesmo para aumentar a controlabilidade de GIs utilizados, por exemplo, para conexão de turbinas eólicas de pequeno e grande portes.

O crescimento no uso de GDCIs traz consigo a necessidade de constante avaliação dos impactos técnicos da conexão de tais equipamentos nos sistemas de distribuição em baixa tensão. Usualmente, a maior preocupação dos engenheiros responsáveis por tais estudos nas concessionárias de distribuição é o nível de injeção de sinais harmônicos na rede, que deterioram os índices de qualidade de energia elétrica, característica típica dos inversores. Outro aspecto que é frequentemente analisado é o aumento no nível de tensão da rede em regime permanente decorrente da injeção de potência por parte dos GDs. Alguns aspectos, todavia, recebem menos atenção, como é o caso da pouca importância dada ao impacto do funcionamento de tais dispositivos do ponto de vista de estabilidade. Neste artigo temos por objetivo mostrar que os GDCIs também podem apresentar problemas do ponto de vista de estabilidade.

Como os GDCIs não possuem massa girante e, conseqüentemente, constante de inércia, os estudos de estabilidade devem ser conduzidos por uma ótica diferente daquela utilizada nos estudos de estabilidade transitória desenvolvidos para geradores síncronos e de indução. Para os GDCIs, a estabilidade de operação é um aspecto relacionado à adequada sintonia de seus controles e a instabilidade se manifesta quando um inversor mal sintonizado é submetido a pequenas perturbações como as variações de carga naturais de um sistema de distribuição e seu sistema de controle perde a capacidade de seguir um sinal de referência, apresentando comportamento oscilatório de amplitudes crescentes que levam à atuação de dispositivos de proteção que o desconectam da rede. Destaca-se ainda que tais dispositivos apresentam tendência a permanecer em operação ilhada, o que é indesejável e proibido pelas concessionárias de distribuição por uma série de fatores (RICCIARDI, 2010, p. 2-3). Para estes dispositivos, malhas de controle suplementares

são sintonizadas com o objetivo de facilitar a detecção de ilhamentos desestabilizando a operação ilhada do inversor rapidamente através de realimentação positiva. Essa realimentação, contudo, surte efeito mesmo quando o GDCI opera em paralelo com a fonte principal do sistema de distribuição e é um dos controles que mais interfere nos limites de estabilidade de tais geradores.

Neste trabalho técnico discutiremos algumas situações em que os limites de estabilidade de um GDCI são atingidos, bem como o impacto de diferentes filosofias de controle e das malhas de realimentação para proteção antiilhamento em tais limites. Serão utilizadas simulações numéricas de modelos computacionais de GDCIs para ilustrar os limites de estabilidade de um inversor conectado em uma rede de distribuição de baixa tensão. Veremos como os controles impactam a estabilidade de tais geradores através de simulações de perturbações no domínio do tempo (WANG & FREITAS, 2009, p. 972-973). Através das discussões apresentadas neste trabalho técnico procura-se divulgar para a comunidade técnica das concessionárias de distribuição de energia elétrica este importante aspecto da conexão de geradores distribuídos em redes de baixa tensão que normalmente é negligenciado nos estudos de acesso.

2. Desenvolvimento

Aspectos como a avaliação dos índices de qualidade de energia elétrica, a proteção contra correntes de curto-circuito e a elevação do perfil de tensão em regime permanente decorrentes da conexão de GDCIs nos sistemas de distribuição de energia elétrica já são, em geral, bem conhecidos pelas equipes técnicas das concessionárias de distribuição. Medidas de mitigação de efeitos adversos como a instalação de filtros harmônicos, a restrição da capacidade e da potência injetada em algumas barras, a escolha de equipamentos certificados e homologados que apresentem baixos níveis de distorção são algumas das já bem estabelecidas exigências das concessionárias de distribuição de energia elétrica para minimizar os impactos decorrentes do acesso de tais GDs à rede de distribuição. Um aspecto normalmente negligenciado nos estudos de acesso refere-se aos limites de estabilidade do inversor. De fato, a análise de estabilidade é um tema novo no contexto dos sistemas de distribuição e que deve entrar na rotina das concessionárias à medida que avança a penetração da GD. Discutiremos nesta seção, baseado em resultados de simulações computacionais, as condições de estabilidade de GDCIs conectados em redes de distribuição.

2.1 Sistema teste

Para a realização das simulações computacionais utilizaremos a rede simplificada apresentada na Figura 1. Trata-se de um sistema bastante simples, composto por uma unidade consumidora (UC) que possui um GDCI instalado em paralelo com a rede secundária. A carga da UC é de 10 kW. A barra que representa a UC, onde estão conectadas a carga local e o GDCI, é ligada à rede primária através de uma linha de distribuição com impedância de $0,2 + j0,3$ ohms. A tensão de fornecimento secundária deste sistema é de 120 Vrms fase-terra. A barra que conecta a rede secundária ao primário tem a magnitude de tensão fixa em 1,0 pu. Esse cenário, já bastante comum em alguns países, representa um consumidor que é atendido pela rede secundária local da concessionária e que possui, por exemplo, um teto solar fotovoltaico que supre parte da demanda da residência e, eventualmente, injeta na rede elétrica os excedentes que não são localmente consumidos. Com o crescimento dos incentivos governamentais e a redução nos custos de instalação e manutenção, tal cenário tornar-se-á comum também no Brasil.

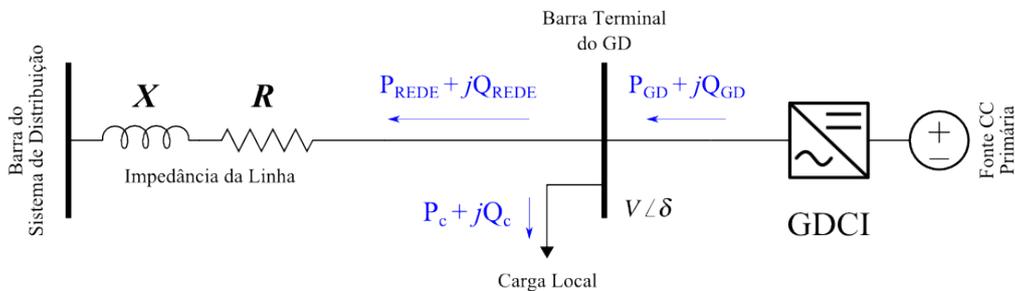


Figura 1 - Diagrama unifilar da rede utilizada nas simulações computacionais.

2.2 Máxima transferência de potência entre duas barras: limite de estabilidade estática para um GDCI

Nos estudos iniciais, o GDCI será considerado apenas como uma injeção de potência ativa. Tendo em vista que normalmente esses equipamentos não dispõem de capacidade de controle de tensão terminal, considera-se que o inversor do sistema apresentado na Figura 1 opera com fator de potência unitário, o que é desejável também do ponto de vista do proprietário, pois maximiza a produção de energia ativa. Inicialmente não serão modelados os sistemas de controle do inversor nem as malhas de proteção anti-ilhamento ativas.

Para um sistema simplificado de duas barras, como o apresentado na Figura 1, é possível obter analiticamente a relação entre a potência ativa injetada e a magnitude da tensão terminal do GD. Na Figura 2 essa relação é apresentada graficamente. O eixo das ordenadas indica o valor da magnitude de tensão na barra terminal do GD e o eixo das abscissas indica a potência ativa injetada pelo inversor na rede elétrica. Entre os pontos indicados por 'A' e 'B', a injeção de potência ativa do inversor não é suficiente para atender toda a demanda da UC. Parte do consumo é suprida pelo gerador local e parte pelo sistema de distribuição da concessionária. Os pontos à direita do ponto 'B' correspondem à situação em que a produção local é maior que a demanda e os excedentes são injetados na rede de distribuição através da linha de impedância $0,2 + j 0,3$ ohms. Para o ponto 'B', toda a demanda da UC é atendida exclusivamente pelo inversor e não há fluxo de potência na linha de distribuição.

O resultado apresentado na Figura 2 sugere que a máxima potência que pode ser injetada pelo inversor neste cenário é cerca de 145 kW. Não é possível fisicamente transferir mais potência entre as duas barras do sistema do que o valor correspondente a esta situação, representada pelo ponto 'E'. Este valor é conhecido como o limite de estabilidade estática do sistema.

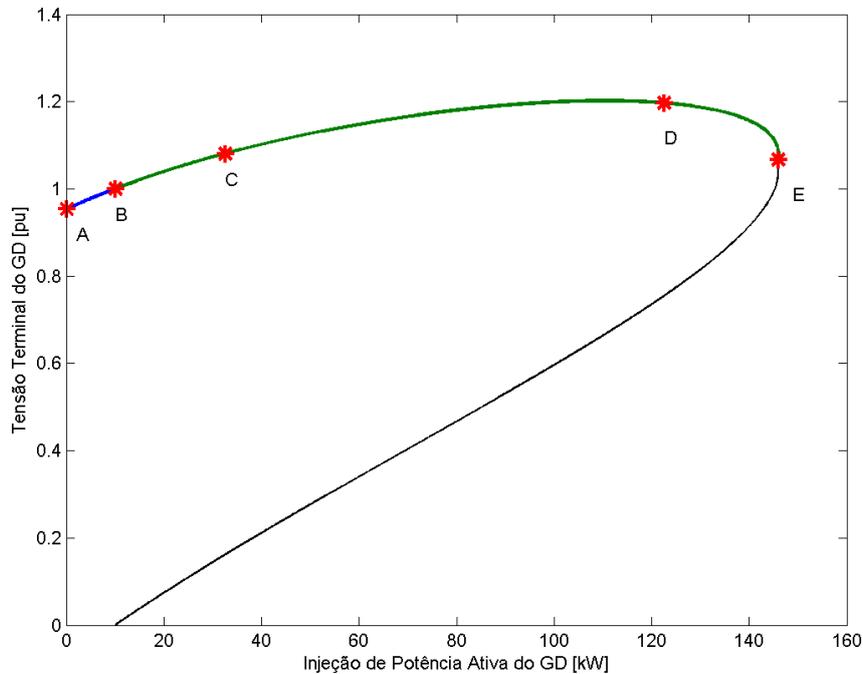


Figura 2 - Curva PV para um gerador distribuído conectado via inversor.

Na Figura 2 é possível observar também a elevação do perfil de tensão na rede de distribuição conforme aumenta a injeção de potência ativa do inversor.

2.3 Limite de estabilidade para um GDCI com controle do tipo injeção de potência constante

Para que a injeção de potência dos GDCIs seja constante, existe uma malha de reguladores do tipo proporcional-integrais (PI) que anulam o erro de regime permanente entre uma referência de entrada e a potência injetada pelo conversor na rede elétrica. Vamos considerar agora esta malha de controle PI no modelo dinâmico do inversor a fim de considerar seu impacto no máximo valor de potência que pode ser injetado pelo inversor na rede elétrica.

Na simulação apresentada na Figura 3, inicialmente o GDCI do sistema descrito na Figura 1 opera injetando 115 kW na rede elétrica, novamente com fator de potência unitário. No instante de tempo $t = 1,5$ segundos, o valor da referência de injeção de potência ativa é incrementado para 120 kW. Verifica-se que, após um período transitório, a potência injetada pelo conversor amortece para o valor da nova referência. Em regime permanente, o erro entre o valor da referência e o valor medido é nulo, o que é garantido pela malha de controle PI. No instante de tempo $t = 2$ segundos, todavia, a referência do controlador do inversor é incrementada em 5 kW para que o GD passe a injetar 125 kW na rede elétrica. O que observa-se, contudo, é que o inversor não é mais capaz de seguir o sinal de entrada. Verifica-se no resultado da simulação que o inversor responde a esta pequena perturbação na entrada com oscilações sustentadas de amplitudes crescentes. Essas oscilações se mantêm até que o sistema de proteção do equipamento o desconecte da rede elétrica. Neste caso, portanto, não é possível atingir o limite de 145 kW previamente estabelecido na seção 2.2. Considerando-se as malhas de reguladores PI, o limite de injeção de potência ativa para que o gerador mantenha-se operando de forma estável é reduzido de 145 kW para cerca de 120 kW. O ponto correspondente ao novo limite de estabilidade é sinalizado pela letra 'D' na Figura 2.

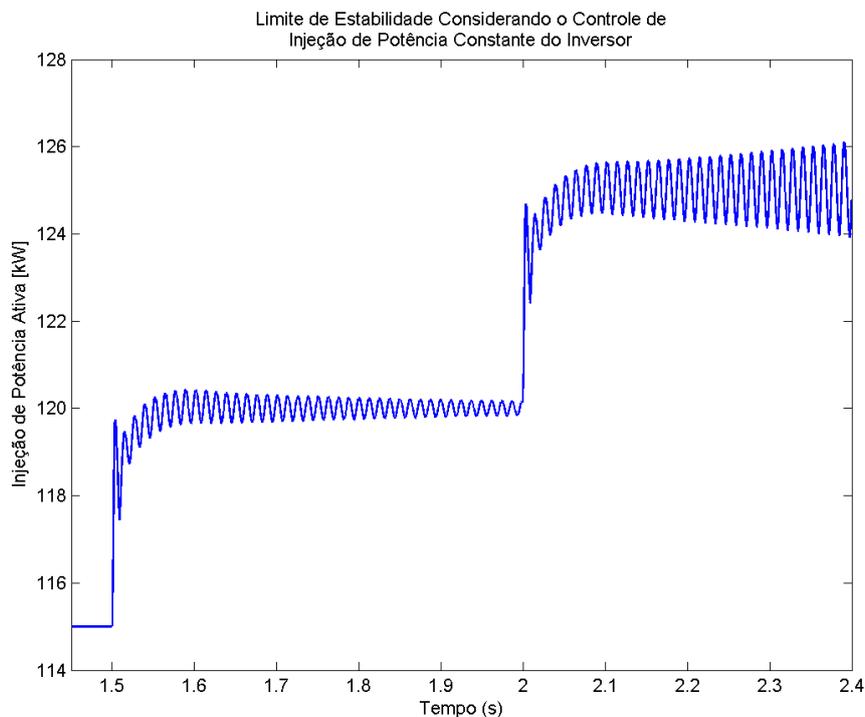


Figura 3 - Comportamento transitório de um inversor com controle do tipo injeção de potência constante no limite da estabilidade.

2.4 Limite de estabilidade para um GDCI com controle do tipo injeção de potência constante e malha de realimentação positiva da proteção antiilhamento ativa

Os GDCIs apresentam tendência a permanecerem em operação por ocasião do ilhamento de uma parte do sistema de distribuição, o que é indesejável e proibido pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica. Por este motivo, normalmente são equipados com uma malha de controle suplementar que tenta desestabilizar sua operação ilhada para que a condição de ilhamento seja prontamente detectada pelo sistema de proteção. A idéia básica desta filosofia de proteção antiilhamento consiste em injetar pequenos distúrbios na magnitude e/ou frequência da tensão do inversor e prover uma malha de realimentação positiva para este distúrbio no sistema de controle do equipamento. Idealmente, enquanto o gerador estiver conectado à rede de distribuição, esta realimentação não deve surtir efeito, porém, caso seja submetido à operação ilhada, a realimentação positiva fará com que a magnitude e/ou frequência da tensão se distancie rapidamente do valor nominal até que as proteções de sub/sobrefrequência e/ou sub/sobretensão do GD atuem.

Em tese essa realimentação deveria surtir efeito apenas quando o inversor passasse à condição de ilhamento, porém observa-se que tal realimentação no controle reduz ainda mais a margem de estabilidade do GDCI. Considerando-se agora tal esquema de proteção antiilhamento no inversor do sistema apresentado na Figura 1, foram simulados incrementos na referência de potência do inversor até que seu limite de estabilidade fosse atingido. Na Figura 4 são apresentados os resultados destas simulações. Inicialmente o GDCI do sistema descrito na Figura 1 opera injetando 25 kW na rede elétrica, novamente com fator de potência unitário. No instante de tempo $t = 1,5$ segundos, o valor da referência de injeção de potência ativa é incrementado para 30 kW. Novamente, verifica-se que amortecidos os transitórios, a potência injetada pelo conversor segue o valor da nova referência. No instante de tempo $t = 2$ segundos, todavia, a referência do controlador do inversor é incrementada novamente em 5 kW, para que o GD passe a injetar 35 kW na rede elétrica. O que observa-se, contudo, é que agora o inversor não é mais capaz de seguir o sinal de entrada. A simulação computacional aponta que o inversor responde a esta pequena perturbação na entrada com oscilações

sustentadas de amplitudes crescentes, que se mantém até que o sistema de proteção do equipamento o desconecte da rede elétrica. Considerando-se agora o controle antiilhamento ativo, o limite de estabilidade do inversor é reduzido para cerca de 30 kW. O ponto correspondente a este novo limite é sinalizado pela letra 'C' na Figura 2.

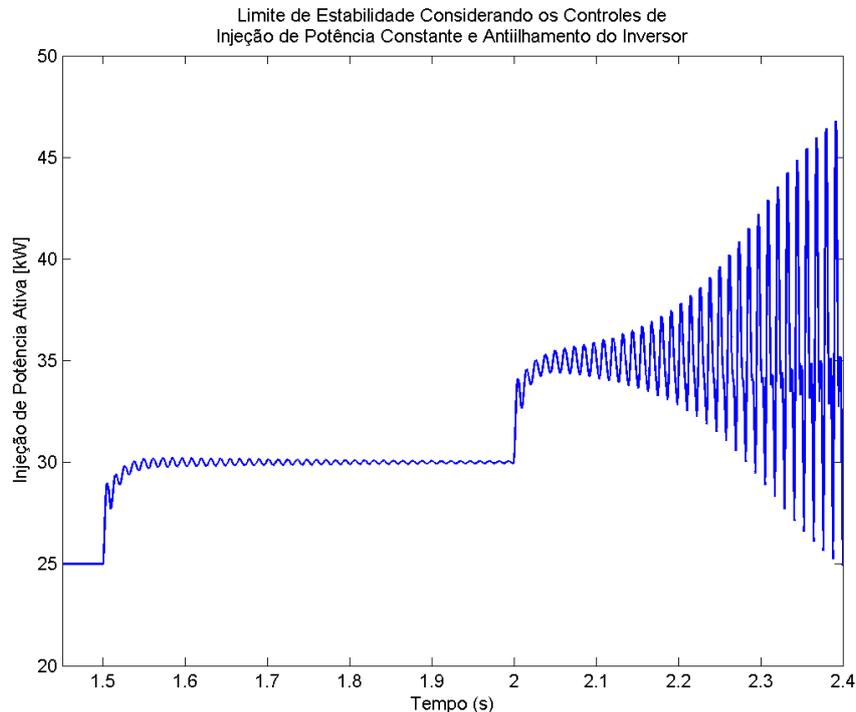


Figura 4 - Comportamento transitório de um inversor com controles do tipo injeção de potência constante e antiilhamento por realimentação positiva no limite da estabilidade.

Os valores de limite de estabilidade obtidos nas simulações apresentadas nesta seção dependem de uma série de parâmetros, entre eles o nível de curto-circuito no ponto de acoplamento do GDCI, o tipo de carga da UC, a sintonia do controle do inversor, etc. As simulações mostram, ao menos qualitativamente, que a operação de inversores em redes de distribuição de energia elétrica, está sujeita a limites de estabilidade associados a seus controles. Deve haver, por parte das concessionárias, uma avaliação das condições de operação da rede e de sintonia dos controles do gerador para que os limites sejam corretamente avaliados e restrições e procedimentos operativos que garantam a operação harmoniosa destes geradores na rede de distribuição possam ser estabelecidos.

3. Conclusões

O aproveitamento de fontes energéticas alternativas como a energia solar fotovoltaica é benéfico do ponto de vista ambiental e de desenvolvimento sócio-econômico do país. Os recentes movimentos no setor elétrico que incentivam e facilitam o acesso de produtores locais às redes de distribuição deve transformar significativamente os procedimentos técnicos das concessionárias distribuidoras de energia elétrica.

A conexão de geradores distribuídos via inversores traz diversos impactos técnicos ao funcionamento dos

sistemas de distribuição de energia elétrica. Embora atualmente as maiores preocupações das concessionárias quanto à inserção de GDCIs sejam relativas aos impactos na distorção das formas de onda de tensões e na elevação do perfil de tensão em regime permanente, esse artigo mostrou através de simulações computacionais que aspectos de estabilidade também podem limitar a conexão desses geradores nas redes de distribuição.

Os resultados das simulações apontam que a representação adequada dos controles do inversor nos modelos computacionais é de grande importância para a investigação das condições de estabilidade de inversores conectados em redes de distribuição. Os limites de estabilidade são distintos para diferentes estratégias de controle, diferentes esquemas de proteção anti-ilhamento ativa, diferentes tipos de inversores, etc (WANG, FREITAS, XU & DINAVAH, 2007, p. 1-4). Embora somente alguns casos tenham sido apresentados neste trabalho técnico, mostraram que a operação de GDCIs é sujeita a limites de estabilidade. Espera-se que com isso tais aspectos passem a ser investigados pelos engenheiros envolvidos nos estudos de conexão de novos GDs acessantes.

Os autores agradecem à ELEKTRO pela parceria nas pesquisas sobre geração distribuída desenvolvidas pelo Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) no âmbito do programa de P&D da ANEEL.

4. Referências bibliográficas

1. CIRED Working Group 4. **Dispersed Generation**. CIRED, Relatório Técnico, p. 1-7, 1999.
2. ANEEL. **Resolução Normativa nº 112**. p. 1-8, Maio de 1999.
3. ANEEL. **Nota Técnica 0004/2011**. p. 1-19, Fevereiro de 2011.
4. RICCIARDI, T. R. **Análise do Impacto da Proteção Antiilhamento na Estabilidade de Geradores Conectados Via Inversores**. 2010. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas.
5. WANG, X.; FREITAS, W. **Influence of Voltage Positive Feedback Anti-Islanding Scheme on Inverter-Based Distributed Generator Stability**. *IEEE Trans. Power Delivery*, New York, v. 24, n. 2, p. 972-973, 2009.
6. WANG, X.; FREITAS, W.; XU, W.; DINAVAH, V. **Impact of Interface Controls on the Steady-State Stability of Inverter-Based Distributed Generators**. *Proc. IEEE PES General Meeting*, Tampa, p. 1-4, 2007.