

MICROINVERSOR COM SISTEMA DE ANTI-ILHAMENTO

Henrique Gabriel Cabral – eng.henriquecabral@gmail.com

Paulo Fernando Sá Ribeiro de Faria – br.paulo.faria@gmail.com

Igor Luiz Guisso – igor.guisso@acad.pucrs.br

Vanderlei Amaral Vieira Junior – vanderleiamaral.jr@gmail.com

Mauricio Saltz Santos – mauricio.saltz@acad.pucrs.br

Aline Cristiane Pan – aline.pan@pucrs.br

Fernando Soares dos Reis – f.dosreis@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia

Resumo. Este artigo apresenta o estudo e o desenvolvimento de um inversor módulo integrado, baseado no conversor *Ćuk* operando no modo de condução descontínua (MCD), voltado para a microgeração distribuída. O microinversor proposto é composto pela associação em cascata de um conversor estático c.c.-c.c. e de um inversor em ponte completa. O conversor *Ćuk* neste sistema, tem por missão a adaptação dos níveis de tensão/corrente e a síntese de uma forma de onda de corrente senoidal, em valor absoluto, a qual necessariamente deve estar em sincronismo com a rede elétrica comercial. Neste contexto, o inversor reverte a cada 180° um dos semiciclos da corrente. No Brasil, a operação ilhada de sistemas fotovoltaicos (do inglês, Photovoltaic - PV) não é permitida, pois, pode causar ameaças à segurança das equipes de manutenção e danos à equipamentos de terceiros conectados à rede elétrica. Os referidos danos elétricos são, em geral, fruto de degradações na qualidade da energia elétrica produzida pelo sistema, sendo estas resultantes da sobrecarga que representa a operação ilhada.

Palavras-chave: Microinversor, Anti-ilhamento, Microgeração

1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista econômico, a tecnologia de microgeração pode oferecer benefícios tanto para os consumidores, quanto para as empresas de distribuição ou de geração de energia elétrica, uma vez que no paradigma da microgeração distribuída, os consumidores também assumem o papel de produtores de eletricidade (Murphy, 2013). Isto é especialmente verdadeiro para sistemas PV, dado que zonas densamente povoadas podem gerar grandes quantidades de energia elétrica através da instalação de sistemas fotovoltaicos em telhados, por exemplo. Portanto, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver um microinversor, ou inversor módulo integrado, totalmente operacional, com sistema de detecção da operação ilhada ativo, a fim de injetar a energia produzida pelo sistema fotovoltaico na rede elétrica comercial, fornecendo, assim, uma solução simples, modular e de baixo custo para a realização da microgeração distribuída.

O microinversor proposto é dividido em duas etapas principais: a primeira baseia-se no conversor *Ćuk*, operando em alta frequência de comutação (20 kHz); a segunda etapa é composta por um inversor de corrente em ponte completa (do inglês, *Current Source Inverter* - CSI), operando em baixa frequência (frequência da rede, neste caso, 60 Hz). O conversor é responsável pela síntese de uma forma de onda de corrente senoidal retificada, em sincronismo com a rede elétrica, uma vez que o inversor em ponte completa irá inverter a cada 180° a onda de saída do conversor, resultando em uma forma de onda de corrente senoidal pura na saída do microinversor. Considerando a configuração do microinversor acima mencionada, é possível observar que as perdas de comutação são reduzidas, uma vez que somente o conversor *Ćuk* opera em alta frequência, e que o isolamento galvânico do microinversor, necessário em muitos países, é conseguido através do transformador de alta-frequência do conversor *Ćuk*.

A injeção da energia elétrica produzida pelos Sistemas de Geração Distribuída (SGDs), no sistema elétrico supõe uma série de cuidados. Neste sentido, um dos maiores desafios é a detecção da operação ilhada. Assim, os SGDs devem ser capazes de detectar, esta condição, a qual está associada ao desligamento da rede elétrica da concessionária. Não importando se o desligamento ocorreu por motivos de manutenção, por falha ou erro humano, por causas naturais, ou até por sabotagem. Assim, se diz que a operação ilhada se estabelece, quando a rede da concessionária é desativada, por qualquer das razões acima descritas, e, contudo, os SGD seguem alimentando o Ponto de Conexão Comum (PCC). Para evitar esta situação, sistemas de detecção da operação ilhada (também conhecidos como sistemas de proteção anti-ilhamento (do inglês, *Anti-Islanding protection systems* – AI) devem ser utilizados. Desta forma são protegidos os indivíduos e os equipamentos conectados ao sistema. Condições de teste rigorosas para detecção desse fenômeno são definidos nos termos da norma IEEE 929 (*Recommended Practice for Utility Interface of Residential and Intermediate Photovoltaic (PV) Systems*).

Vários sistemas de proteção de AI foram desenvolvidos e são classificados em duas categorias principais: métodos passivos e métodos ativos (Bower e Ropp, 2002) (Kobayashi, *et al.*, 1991). Sistemas AI passivos se baseiam no

monitoramento dos principais parâmetros da rede elétrica, tais como: valor da frequência e valor eficaz da tensão, caso algum destes parâmetros esteja fora dos padrões estabelecidos em normas, tais como a IEEE 929, a desconexão do microinversor do PCC é realizada. Contudo, quando a carga é balanceada, isto é, quando ela consome exatamente toda a energia disponível, os métodos passivos falham. Assim, para superar esta limitação os métodos ativos foram desenvolvidos. Os métodos ativos provocam distúrbios na tensão/corrente de saída do inversor, na tentativa de alterar a magnitude, frequência ou fase no PCC (*Institute Of Electrical And Electronics Engineers, Inc.*, 2000). Caso o sistema identifique a ocorrência da perturbação que está sendo gerada pelo algoritmo, a condição de ilhamento é detectada, pois se a rede elétrica estivesse presente, os parâmetros elétricos no PCC seriam impostos por ela.

Nas seções seguintes, uma breve metodologia de concepção com base na abordagem quase-estática (Kocher e Steigerwald, 1983) será apresentada para o conversor de *Ćuk*, bem como os valores dos componentes utilizados para o protótipo real. Utilizando-se uma ferramenta de simulação e um protótipo experimental, o esquema de proteção anti-ilhamento ativo proposto foi validado, e os resultados obtidos são apresentados e discutidos na sequência deste trabalho.

Este estudo é dividido em: 2) Operação do Microinversor; 3) Critério de Projeto para um Conversor *Ćuk* Operando no MCD; 4) Método de Detecção da Operação Ilhada; 5) Implementação do Algoritmo de Detecção da Operação Ilhada; 6) Simulações e Resultados Experimentais; 7) Conclusões.

2. OPERAÇÃO DO MICROINVERSOR

Conversores estáticos de baixa potência operando no MCD são amplamente utilizados em implementações de microinversores dedicados a sistemas fotovoltaicos, sendo uma das melhores soluções para aplicações em baixa potência (Zhiliang, Xiao-Fei e Yan-Fei, 2013). Isto se deve a vários fatores, tais como: a) a sua simplicidade topológica, b) baixo custo de implantação, c) simplicidade do projeto da malha de controle, d) capacidade de sintetizar uma onda de corrente senoidal, através da variação do ciclo de trabalho de acordo com uma lei senoidal de modulação por largura de pulso (Modulação por Largura de Pulso Senoidal - MLPS), como mostrado na Eq. (1), quando o conversor está operando no MCD.

$$d(\omega t) = d_{\max} |\text{sen}(\omega t + \phi)| \quad (1)$$

onde, d_{\max} é determinado por meio de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking* – MPPT) e ϕ é o valor absoluto do deslocamento de fase introduzido pelo microinversor *Ćuk*.

A modulação senoidal garante que a corrente injetada na rede elétrica não seja afetada por variações na irradiância e na temperatura (Neshaastegaran e Karshenas, 2013), (Kyritsis, Tatakis e Papanikolaou, 2008). As vantagens destacadas apontam para o conversor *Ćuk* como uma solução satisfatória para a realização de um inversor módulo integrado.

O microinversor proposto neste trabalho pode ser subdividido em três estágios, como pode ser observado na Fig. 1. Sendo, o primeiro estágio composto pela associação em série de dois módulos PV, Siemens[®], modelo SR50, resultando em uma potência nominal de 100 W_p sob condições de ensaio padrão, (do inglês, *Standard Test Conditions* - STC). Este painel é conectado em paralelo com um capacitor de desacoplamento (C_{pv}).

O segundo estágio é constituído por um conversor *Ćuk*, sendo responsável pelo isolamento galvânico, pela síntese de uma forma de onda de corrente senoidal retificada em sua saída, e pelo casamento de impedâncias entre o módulo PV e a rede elétrica. Portanto, o conversor *Ćuk* permite rastrear a máxima potência disponível (do inglês, *Maximum Power Point* - MPP) em diferentes condições climáticas (irradiação solar e temperatura do módulo PV). Além disso, dado que o conversor *Ćuk* opera em alta frequência de comutação (f_s), somente suas chaves possuem perdas de comutação significativas.

O terceiro e último estágio consiste de um inversor de corrente em ponte completa. Este dispositivo permite a obtenção de uma forma de onda de corrente senoidal, obtida a partir da forma de onda de corrente senoidal retificada sintetizada pelo conversor *Ćuk*, em sincronismo com a tensão da rede elétrica da concessionária. Assim, o inversor em ponte completa opera na frequência da rede, ou seja, 50 Hz ou 60 Hz, portanto, suas perdas de comutação são negligenciáveis, apresentando apenas perdas de condução.

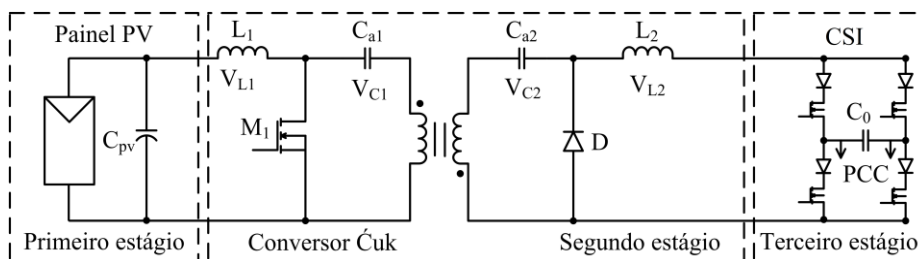


Figura 1 - Diagrama esquemático do microinversor.

3. CRITÉRIO DE PROJETO PARA UM CONVERSOR $\acute{C}uk$ OPERANDO NO MCD

O conversor $\acute{C}uk$ operando no MCD apresenta três etapas de funcionamento. Na primeira etapa, o interruptor principal está ativo (t_{on}), e nas demais etapas permanece desativado (t_{off}). O diodo conduz apenas na segunda etapa, quando está polarizado diretamente. O tempo de condução do diodo (t_{Don}) é função do tempo de condução do interruptor principal (t_{on}) e o ganho estático de tensão (relação entre a tensão de saída e a de entrada) do conversor $\acute{C}uk$. O diagrama esquemático do conversor $\acute{C}uk$ refletido ao primário do transformador é apresentado na Fig. 2, considerando uma relação de transformação unitária. Tendo em vista, que as variações, nas grandezas que são função da frequência da rede, são muito lentas em relação a frequência de comutação (f_s) do conversor, estas, para todos os efeitos, são consideradas constantes, ao longo de um período de comutação de alta frequência (T_s), conforme estabelece a abordagem quase-estática (Kocher e Steigerwald, 1983). Assim, as correntes nos indutores L_1 , L_2 , a tensão no capacitor de acoplamento C_a , e a tensão de saída do microinversor são consideradas constantes ao longo de um período de alta frequência (T_s).

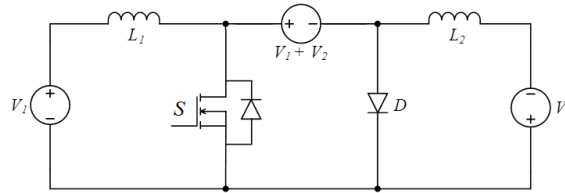


Figura 2 - Conversor $\acute{C}uk$ refletido ao primário.

3.1 Primeira Etapa de Operação ($0 < t < t_{on}$)

O circuito equivalente para a primeira etapa de operação do conversor $\acute{C}uk$ é mostrado na Fig. 3, onde o interruptor S está ativo e o diodo D desativado.

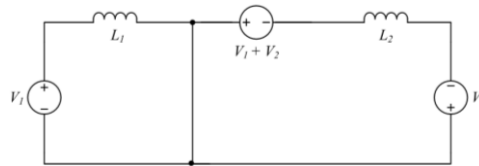


Figura 3 - Circuito equivalente da primeira etapa de operação do conversor $\acute{C}uk$, enquanto o interruptor está ativo.

Como tal, as correntes de entrada e saída na primeira etapa são definidas pela Eq. (2) e pela Eq. (3).

$$i_{L1}(t) = \frac{V_1}{L_1}t + I_{min} \quad (2)$$

$$i_{L2}(t) = \frac{V_1}{L_2}t - I_{min} \quad (3)$$

Quando $t = t_{on}$, a primeira etapa se encerra, iniciando-se a segunda etapa de operação.

3.2 Segunda Etapa de Operação ($t_{on} < t < t_{on} + t_{Don}$)

A segunda etapa de funcionamento do conversor $\acute{C}uk$ tem início com a abertura do interruptor S , e a consequente polarização do diodo D , que entra em condução neste instante. O circuito equivalente mostrado na Fig. 4 representa esta etapa de operação.

No instante $t = t_{on}$, as correntes i_{L1} e i_{L2} atingem seus valores máximos, os quais podem ser determinados por meio da Eq. (4) e da Eq. (5). Destarte, seus valores instantâneos podem ser definidos conforme se apresenta na Eq. (6) e na Eq. (7), respectivamente.

$$I_{L1max} = \frac{V_1}{L_1}t_{on} + I_{min} \quad (4)$$

$$I_{L2max} = \frac{V_1}{L_2}t_{on} - I_{min} \quad (5)$$

$$i_{L1}(t) = I_{L1max} - \frac{V_2}{L_1}t \quad (6)$$

$$i_{L2}(t) = I_{L2max} - \frac{V_2}{L_2} t \quad (7)$$

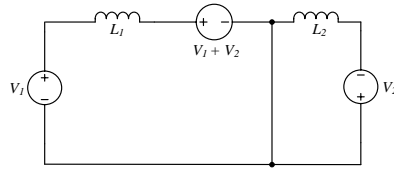


Figura 4 - Circuito equivalente da segunda etapa de operação do conversor $\acute{C}uk$.

Esta etapa é finalizada com o desligamento do diodo D ($t = t_{Don}$). Isto ocorre quando as correntes i_{L1} e i_{L2} se igualam em valor absoluto, ao atingir seus valores mínimos (I_{min} para i_{L1} e $-I_{min}$ para i_{L2}). Assim, resultando em,

$$t_{Don} = \frac{V_1 t_{on}}{V_2} \quad \square \quad (8)$$

3.3 Terceira Etapa de Operação ($t_{on} + t_{Don} < t < T_s$)

A terceira etapa de funcionamento do conversor, inicia-se quando as correntes i_{L1} e i_{L2} atingem seus valores mínimos. Nesse momento, ambas as correntes começam a circular em roda livre, resultando no bloqueio do diodo D , conforme se ilustra na Fig. 5.

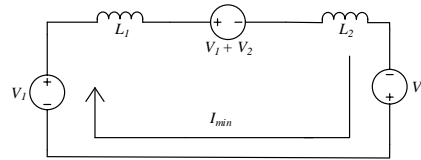


Figura 5 - Terceira etapa de operação do conversor $\acute{C}uk$, quando o interruptor S e o diodo D encontram-se bloqueados.

As correntes de entrada e saída permanecem em seus valores mínimos ($i_{L1} = I_{min}$ e $i_{L2} = -I_{min}$), enquanto o conversor permanece nesta etapa, isto é, até que o interruptor S seja acionado novamente.

O valor mínimo das correntes nos indutores (I_{min}) pode ser determinado através do uso do princípio do balanço de energia, considerando o conversor livre de perdas. Consequentemente, a potência de entrada deve ser igual à potência de saída, tal como a Eq. (9) descreve. Assim, o valor mínimo das correntes nos indutores, pode ser determinado a partir da Eq. (10).

$$V_1 \overline{I_{L1}} = V_2 \overline{I_{L2}} \quad (9)$$

$$I_{min} = \frac{d^2}{f_s} \left[\frac{V_1^2 L_2 - V_1 V_2 L_1}{2 L_1 L_2 V_2} \right] \quad (10)$$

onde, ($\overline{I_{L1}}$) e ($\overline{I_{L2}}$) são os valores médios das correntes nos indutores (L_1 e L_2), ao longo de um período de comutação (T_s), f_s é a frequência de comutação, d é o ciclo de trabalho, sendo:

$$d = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (11)$$

Por outro lado, a tensão de saída do conversor pode ser obtida a partir do produto do valor médio da corrente em i_{L2} ($\overline{I_{L2}}$) pela resistência de carga (R), representada na Eq. (12). A validade da Eq. (1) é justificada pela Eq. (12). No entanto, a partir da Eq. (12), é fácil concluir que se caso K for uma constante, a forma de onda da tensão de saída do conversor só dependerá do padrão de variação do ciclo de trabalho (d).

$$V_2 = V_1 \frac{d}{\sqrt{K}} \quad (12)$$

onde,

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}; \quad K = \frac{2 L_{eq}}{T_s R}.$$

3.4 Método de Projeto

A fim de garantir a operação do conversor $\acute{C}uk$ no MCD para qualquer valor do ciclo de trabalho (d), a operação no modo de condução crítica deve ser garantida para o pior caso. No modo de condução crítica, as equações do ganho estático são as mesmas para o modo de condução descontínuo e o modo de condução contínuo (MCC). O ganho estático do conversor no MCC pode ser obtido através do balanço de energia nos indutores, resultando na Eq. (13). Assim sendo, a indutância equivalente deve ser tal como descrita pela Eq. 14 para que o conversor opere em MCD.

$$\sqrt{2}V_2 = V_1 \frac{d_{max}}{1 - d_{max}} \quad (13)$$

$$L_{eq} < \frac{V_1^2 V_2^2}{2P f_s (V_1 + \sqrt{2}V_2)^2} \quad (14)$$

onde, d_{max} é o valor máximo do ciclo de trabalho, necessário para que a tensão de saída do microinversor seja igual ao pico da tensão da rede elétrica, V_2 é a tensão *rms* da rede, V_1 é a tensão do ponto de máxima potência (MPP) do PV, e P é a potência de saída. Portanto, a partir da Eq. (14), se pode determinar, o valor da indutância equivalente (L_{eq}) que garante a operação do conversor no MCD.

O microinversor é alimentado por dois módulos PV, conectados em série, cujas, especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1. A partir desta tabela, se obtêm, os valores da tensão de entrada do conversor ($V_1 = 34$ V), e da máxima potência disponível nos terminais do painel, que é de 100 Wp. A conexão à rede elétrica é realizada em uma rede monofásica, cujo valor eficaz é $V_2 = 127$ V_{rms}. Utilizando o critério de projeto proposto, neste trabalho, e adotando-se uma frequência de comutação $f_s = 20$ kHz, os valores dos indutores são obtidos, resultando em $L_1 = L_2 = 360$ μ H, para um ciclo de trabalho máximo $d_{max} = 0,78$.

Tabela 1 – Especificações do Módulo PV Siemens® Modelo SR50 em STC

Parâmetros Elétricos do Módulo PV	Valor
Máxima potência P_{max}	50,00 [W _p]
Corrente de máxima potência I_{MPP}	2,95 [A]
Tensão de máxima potência V_{MPP}	17,00 [V]
Corrente de curto-circuito I_{SC}	3,20 [A]
Tensão de circuito aberto V_{OC}	21,60 [V]

4. MÉTODO DE DETECÇÃO DA OPERAÇÃO ILHADA

Os métodos de detecção da operação ilhada podem ser classificados em duas categorias principais: métodos ativos e passivos. Métodos passivos monitoram continuamente os parâmetros da rede elétrica no PCC, tais como: magnitude, frequência ou fase. Se os parâmetros acima divergirem dos valores estabelecidos pela norma IEEE 929, o SGD deverá se desconectar da rede (Blackstone, Baghzouz e Premrudeepreechacharn, 2012).

Métodos ativos tentam perturbar os parâmetros elétricos no PCC, e podem ser classificados em três subcategorias: métodos residentes no inversor, não residentes no inversor, e os métodos baseados na utilização de comunicação entre o operador do sistema e o sistema de detecção de ilhamento (De Mango, Liserre, *et al.*, 2006).

4.1 Métodos Passivos

Métodos de detecção da operação ilhada passivos habituais consistem na observação de sobre ou sub tensões anormais, bem como sobre ou sub frequências de operação. O padrão IEEE 929 define os parâmetros para a desconexão do PCC, como mostra a Tab. 2 com os limites de tensão expressas em percentual da tensão nominal do PCC (Cataliotti, Cosentino, *et al.*, 2013).

Dada a ocorrência de alguma falha na rede elétrica, três situações podem suceder quando observa-se apenas a tensão no PCC:

- A energia elétrica produzida pelo SGD excede a energia consumida pela carga e um aumento na tensão no PCC ocorre. O sistema é, em seguida, desconectado.
- A energia produzida pelo SGD é insuficiente para suprir a demanda da carga e uma redução na tensão no PCC é observada. O sistema é, em seguida, desconectado.
- A energia produzida pelo SGD está em equilíbrio com a demanda da carga, logo, não ocorre variação na tensão no PCC. O sistema falha ao se desconectar.

De forma análoga, um comportamento muito semelhante pode ser notado na detecção de sub ou sobre frequência: um aumento ou diminuição da frequência no PCC ocorre quando a rede elétrica é desconectada. Se a variação na frequência for pequena ou suficiente, ela pode não ser detectada, e o sistema de proteção contra a operação ilhada pode

falhar. O padrão IEEE 929 define o tempo máximo de desconexão de 0,1 s sempre que a frequência no PCC não estiver dentro dos limites de 59,3 e 60,5 Hz (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, 2000).

Tabela 2 – Padrão IEEE 929 – Resposta à Tensões Anormais

Tensão no PCC	Tempo Máximo de Desconexão
$V < 50 \%$	0,1 s
$50 \% \leq V < 88 \%$	2,0 s
$88 \% \leq V \leq 110 \%$	Operação Normal
$110 \% < V < 137 \%$	2,0 s
$137 \% \leq V$	0,03 s

4.2 Métodos Ativos

Os métodos ativos de detecção da operação ilhada, que não utilizam sistemas de comunicação com o operador do sistema, tentam, essencialmente, perturbar grandezas elétricas no PCC, através da injeção de perturbações na tensão, frequência, conteúdo harmônico e deslocamento de fase na saída do inversor. Tendo em vista que a rede elétrica rejeita eficazmente as perturbações geradas pelo inversor, assim, se o impacto das perturbações geradas pelo sistema de detecção da operação ilhada é imperceptível no PCC, isso significa que a rede elétrica está ativa. Da mesma forma, se o impacto da perturbação nas grandezas elétricas no PCC for significativa, o sistema de detecção de operação ilhada, assume que existe uma falha na rede elétrica comercial e o SGD é desconectado. Estas perturbações, ainda que pequenas, podem causar significativa redução na produção de energia elétrica, pois o conversor deixa de operar no MPP (Blackstone, Baghzouz e Premrudeepreechacharn, 2012).

5. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DA OPERAÇÃO ILHADA

Neste trabalho, um método ativo de detecção da operação ilhada foi implementado ao conversor *Cuk*, dado que os métodos passivos não possuem grande eficácia de detecção caso a carga conectada ao inversor esteja equilibrada. O método consiste na aplicação de uma perturbação periódica na tensão de saída do microinversor, através de uma alteração no ciclo de trabalho do conversor *Cuk*. Deste modo, a cada sessenta ciclos da rede elétrica, a tensão de saída do inversor deve ser perturbada, e a tensão no PCC medida. Se uma falha da tensão no PCC for observada, ou o seu valor estiver fora dos limites especificados na Tab. 2, o SGD deve ser desligado.

A fim de gerar uma redução na tensão de saída do inversor, mantendo-o livre de distorções harmônicas, o ciclo de trabalho máximo (d_{max}) do conversor *Cuk* é a variável perturbada a cada segundo. Assim, reduções em d_{max} , provocam decréscimo na produção de energia elétrica. O intervalo de um segundo entre cada perturbação foi adotado com o fim de satisfazer a norma IEEE 929, e também visando maximizar a produção de energia.

6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A norma IEEE 929 descreve a forma como a carga de testes padrão deve ser dimensionada para o ensaio de detecção da operação ilhada, sendo a carga constituída por um circuito *RLC* em paralelo, como mostrado na Fig. 6. Neste arranjo, o indutor (*L*) e o capacitor (*C*) formam um filtro sintonizado na frequência da rede, proporcionando uma forma de onda de tensão de alta qualidade em seus terminais. Assim, mesmo que a rede elétrica seja desligada, a tensão nos terminais de saída do microinversor permanecerá inalterada, considerando as condições de ensaio, estabelecidas pela norma IEEE 929. O microinversor e a carga *RLC* estão conectados à rede elétrica através de um interruptor, que será aberto para simular o efeito da operação ilhada.

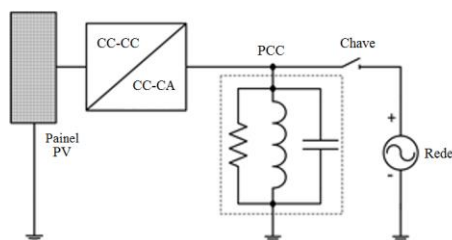


Figura 6 - Ensaio para determinação da operação ilhada segundo a norma IEEE 929.

Um protótipo do microinversor baseado no conversor $\hat{C}uk$, operando no MCD, foi dimensionado e construído utilizando a metodologia de projeto apresentada, e os principais resultados encontram-se na (Tab. 3). A tensão de saída do microinversor pode ser observada na Fig. 7. A distorção na passagem por zero observada é característica de microinversores em geral, dado que o capacitor de saída do conversor não é capaz de ser completamente descarregado a cada ciclo.

Tabela 3 – Parâmetros do microinversor

Parâmetro	Valor
Potência máxima P_{max}	100 [W]
Tensão nominal de entrada	34 [V]
Tensão de saída	127 [V]
Frequência de Comutação	20 [kHz]
Frequência de saída	60 [Hz]

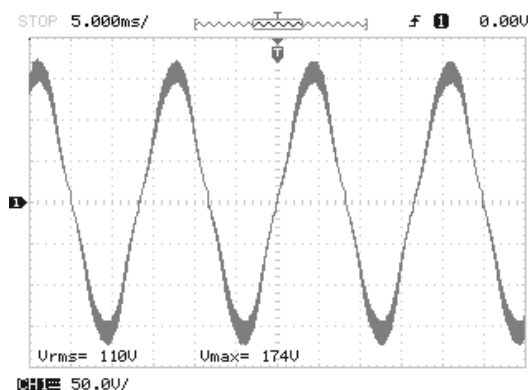


Figura 7 - Tensão de saída do microinversor.

Na Fig. 8, a tensão de saída do microinversor, sob uma condição de operação ilhada, é apresentada. A partir da análise desta figura, é possível perceber o momento em que o sistema de detecção da operação ilhada é ativado, desligando o microinversor ao verificar que a tensão em seus terminais foi reduzida, em consequência da redução no valor do ciclo de trabalho máximo (d_{max}) do conversor $\hat{C}uk$.

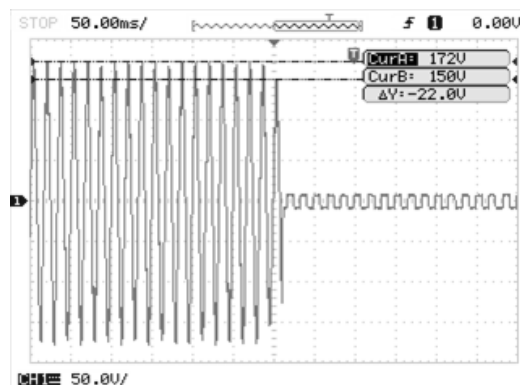


Figura 8 - Tensão de saída do microinversor sob uma condição de operação ilhada.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado um estudo sobre um microinversor, baseado no conversor $\hat{C}uk$ operando no MCD, produzindo em sua saída uma forma de onda de corrente senoidal, alimentado a partir de dois módulos PV.

O método ativo de detecção da operação ilhada, proposto neste estudo, é extremamente simples, mas eficaz, e consiste na redução do ciclo de trabalho máximo (d_{max}) do conversor $\hat{C}uk$, por um breve intervalo de tempo (apenas dois ciclos da rede elétrica), e observar a tensão na saída do microinversor. Esta perturbação, ocorre a cada segundo, visando maximizar a produção de energia elétrica do sistema, uma vez que, quando o ciclo de trabalho é reduzido, o microinversor deixa de operar no MPP. Apesar disso, o intervalo de tempo de um segundo entre as perturbações ainda encontra-se dentro dos limites recomendados pela norma IEEE 929. Portanto, se a rede de distribuição de energia elétrica não está recebendo energia da concessionária, a tensão no PCC, decresce, quando a perturbação no ciclo de

trabalho é realizada. Assim, a operação ilhada, é facilmente detectada. A redução na tensão de saída do microinversor, causada pelo sistema de detecção da operação ilhada proposto, é suficiente para que níveis anormais de tensão no PCC, sejam atingidos, segundo estabelece a norma IEEE 929. Assim, o sincronismo entre perturbação e observação não é necessário.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio da PUCRS (Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul), FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Hewlett-Packard Brasil Ltda que tornou possível esta investigação. Este trabalho foi realizado em cooperação com a Hewlett-Packard Brasil Ltda usando incentivos da Lei de Informática Brasileira (Lei nº 8.248 de 1991).

REFERÊNCIAS

- Blackstone, B.; Baghzouz, Y.; Premrudeepreechacharn, S. Determining MPPT and anti-islanding techniques in a grid-tie PV inverter. 2012 IEEE 15th International Conference Harmonics and Quality of Power (ICHQP). [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 409-413.
- Cataliotti, A. et al. Hybrid passive and communications-based methods for islanding detection in medium and low voltage smart grids. 2013 Fourth International Conference Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). [S.l.]: [s.n.]. 2013. p. 1563-1567.
- De Mango, F. et al. Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods. 12th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2006. [S.l.]: [s.n.]. 2006. p. 1878-1883.
- Institute Of Electrical And Electronics Engineers, Inc. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. New York, NY. 2000. (IEEE Std 929-2000).
- Kocher, Mark J.; Steigerwald, R.L., "An AC-to-DC Converter with High Quality Input Waveforms," in Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.IA-19, no.4, pp.586-599, July 1983
- Kyritsis, A. C.; Tatakis, E. C.; Papanikolaou, N. P. Optimum Design of the Current-Source Flyback Inverter for Decentralized Grid-Connected Photovoltaic Systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 23, p. 281-293, 2008.
- Kobayashi, H.; Takigawa, K.; Hashimoto, E.; Kitamura, A.; Matsuda, H. "Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV systems," Photovoltaic Specialists Conference, 1991., Conference Record of the Twenty Second IEEE , vol., no., pp.695,700 vol.1, 7-11 Oct 1991.
- Murphy, L.; Grid-tie arrangements for micro-generation under EN50438; An Irish evaluation. 2013 48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). [S.l.]: [s.n.]. 2013. p. 1-6.
- Neshaastegaran, P.; Karshenas, H. R. Investigation of single-stage flyback inverter under different operating modes. 2013 4th Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC) in Power Electronics. [S.l.]: [s.n.]. 2013. p. 288-293.
- Bower, W.; Ropp, M. Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility interactive power systems, Report IEA-PVPS T5-09:2002.
- Zhiliang, Z.; Xiao-Fei, H.; Yan-Fei, L. An Optimal Control Method for Photovoltaic Grid-Tied-Interleaved Flyback Microinverters to Achieve High Efficiency in Wide Load Range. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, p. 5074-5087, 2013.

MICROINVERTER WITH AN ANTI-ISLANDING SYSTEM

Abstract. *This paper presents the study and development, of a module-integrated inverter based on the Ćuk converter operating in Discontinuous Conduction Mode (DCM), dedicated to PV rooftop applications in a distributed micro generation scenario. The proposed micro inverter is composed by the cascaded association of a DC-DC power converter and a full-bridge inverter. In this system, the Ćuk converter plays two important roles, the matching between the Photovoltaic (PV) array voltage and the mains voltage, and the synthesis of a sinusoidal current waveform, in absolute value, which must be, necessarily, in synchronism with the commercial power grid. In this context, the inverter reverses every 180° the current in its output. In Brazil, the islanded operation of PV systems is not allowed. Since, it can cause security threats to maintenance crew and damages to third-party equipment connected to the mains. These electrical damages are, generally, fruit of the power quality loss, at the Point of Common Coupling (PCC), once the microinverter tries to supply the power mains.*

Key words: *Microinverter, Anti-Islanding, Microgeneration*