

Capítulo X

Energia solar fotovoltaica – sistemas conectados à rede elétrica

Por Jonas Rafael Gazoli, Marcelo Gradella Villalva e Juarez Guerra*

Os sistemas de geração distribuída de energia elétrica em baixa tensão vão disseminar-se no Brasil com a recente aprovação da Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), que estabelece as diretrizes para a implantação da micro e da minigeração de eletricidade no país.

A geração distribuída é caracterizada pelo uso de pequenos geradores descentralizados, como mostra a Figura 1, permitindo a produção de eletricidade próximo aos pontos de consumo. Além de ampliar a oferta de eletricidade no país, o estabelecimento da micro e da minigeração distribuídas traz inúmeros benefícios, como a pulverização de investimentos em geração de energia e a movimentação de economias locais. Além disso, ao gerar a eletricidade no mesmo local em que ela vai ser consumida, aumenta-se a eficiência energética e reduzem-se as perdas com transmissão e distribuição.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão são geradores distribuídos que têm módulos solares fotovoltaicos como fonte primária de energia. A resolução nº 482 da Aneel permite que pessoas físicas e jurídicas tenham geração própria com sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica até a potência instalada de 1 MW.

As orientações gerais para a inserção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede foram estabelecidas pela resolução nº 482, entretanto, as exigências e as características das conexões desses sistemas com a rede elétrica serão estabelecidas pelas empresas concessionárias a partir de normas técnicas nacionais e internacionais.

O prazo para as concessionárias fornecerem orientações técnicas e adaptarem seus sistemas comerciais para a aceitação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede encerra-se em dezembro de 2012.

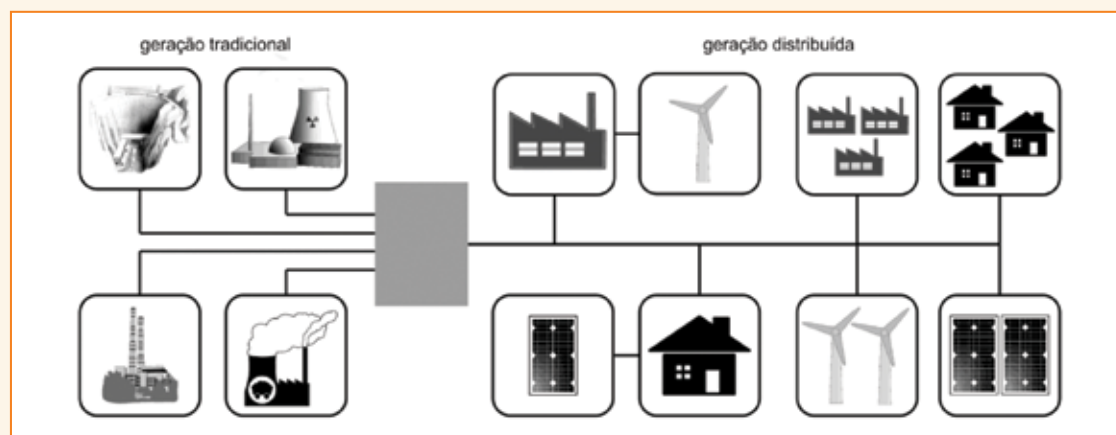


Figura 1 – A geração distribuída de energia elétrica consiste no uso de geradores descentralizados, instalados nas proximidades dos pontos de consumo, em oposição ao modelo tradicional de geração com grandes usinas.

Fonte: Energia solar fotovoltaica – conceitos e aplicações. São Paulo: Ed. Érica, 2012.

Organização dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

A organização básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é mostrada na Figura 2.

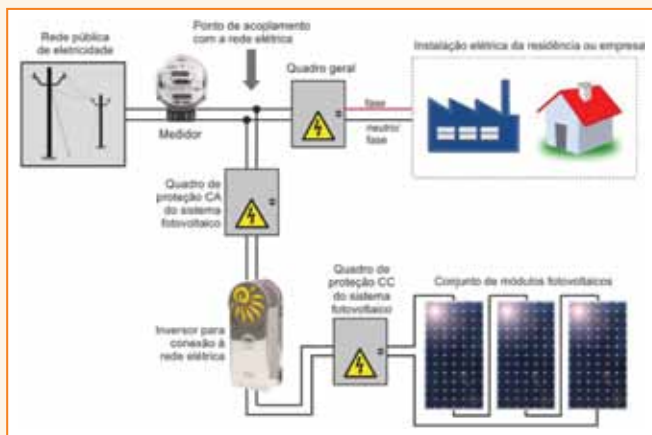


Figura 2 – Organização de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Fonte: Eudora Solar.

Nos sistemas fotovoltaicos não são necessários os relés de sincronismo e proteção normalmente empregados em sistemas baseados em outras fontes de energia. Todos os recursos de proteção e sincronismo são realizados pelo inversor eletrônico, responsável pela injeção da energia elétrica produzida na rede elétrica.

Além do inversor e dos módulos fotovoltaicos, que são os componentes básicos do sistema, empregam-se acessórios para a

proteção das instalações elétricas e do próprio sistema fotovoltaico.

O sistema fotovoltaico é conectado diretamente à instalação elétrica interna da empresa ou residência e no ponto de acoplamento com a rede emprega-se um quadro de proteção CA, constituído de disjuntores e dispositivos de proteção de surto, itens comumente empregados nas instalações elétricas de baixa tensão, conforme a ABNT NBR 5410.

No lado de corrente contínua, os módulos fotovoltaicos, se forem em pequeno número, podem ser conectados diretamente ao inversor ou podem ser agrupados em caixas de strings (conjuntos de módulos ligados em série). Além de fusíveis de proteção e chaves de seccionamento, as caixas de strings podem incorporar um dispositivo de proteção de surto de corrente contínua.

O dimensionamento e os acessórios de proteção presentes nos sistemas fotovoltaicos serão abordados em detalhes no próximo artigo desta série. Neste artigo vamos voltar nossa atenção ao inversor eletrônico, analisando suas funções e seus recursos de proteção.

Inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

O inversor eletrônico usado em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica tem como função básica a conversão da energia elétrica de corrente contínua para alternada.

Quando conectado à rede, o inversor comporta-se como

uma fonte de corrente, injetando corrente elétrica senoidal pura (com baixa distorção harmônica) em sincronismo com a forma de onda da tensão.

Além de fazer a conversão da energia e a injeção de corrente na rede elétrica, o inversor incorpora diversas funções necessárias para o aproveitamento da energia fotovoltaica e a conexão segura com a rede, como ilustra a Figura 3.

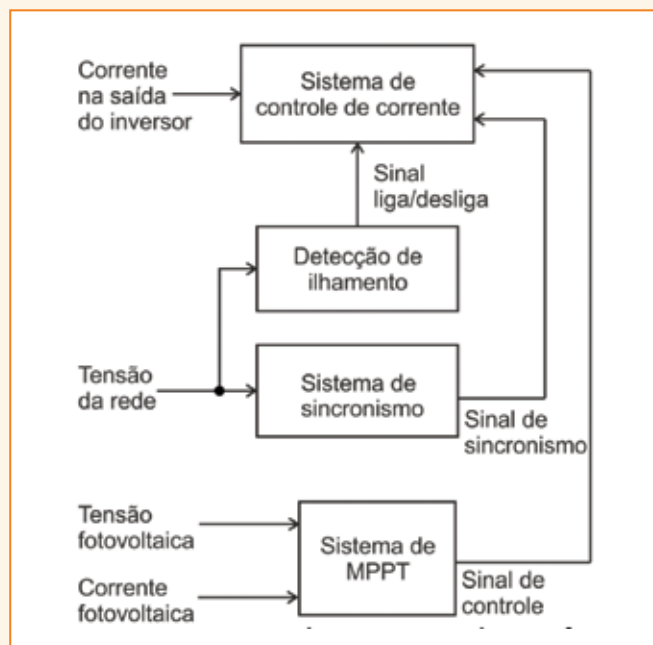


Figura 3 – Principais recursos presentes nos inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Sistema de controle de corrente

O sistema de controle de corrente do inversor eletrônico é responsável pela conversão CC-CA e pela formatação da corrente injetada na saída. Nos inversores disponíveis comercialmente, o controle de corrente, bem como as demais funções do inversor, é realizado por um sistema microprocessado.

O princípio de funcionamento do controle de corrente baseia-se na leitura do valor instantâneo da corrente na saída do inversor, obtido por meio de um sensor, e sua comparação com um sinal de referência. O sinal de referência, que tem forma de onda senoidal, é obtido a partir de informações geradas pelo sistema de sincronismo com a tensão da rede e pelo sistema de rastreamento da máxima potência fotovoltaica (MPPT), que será explicado a seguir.

O sistema de sincronismo empregado nos inversores pode ser uma simples leitura da tensão da rede por meio de detector de cruzamento por zero ou um sistema de PLL (phase-locked loop) que produz um sinal senoidal puro com a mesma frequência e a mesma fase do componente fundamental da tensão da rede elétrica.

Com base no resultado da comparação entre a corrente instantânea e o sinal de referência, o sistema eletrônico de controle de corrente comanda a abertura e o fechamento dos transistores eletrônicos do inversor, permitindo a síntese e a injeção de

corrente senoidal na rede elétrica, como mostra a Figura 4.

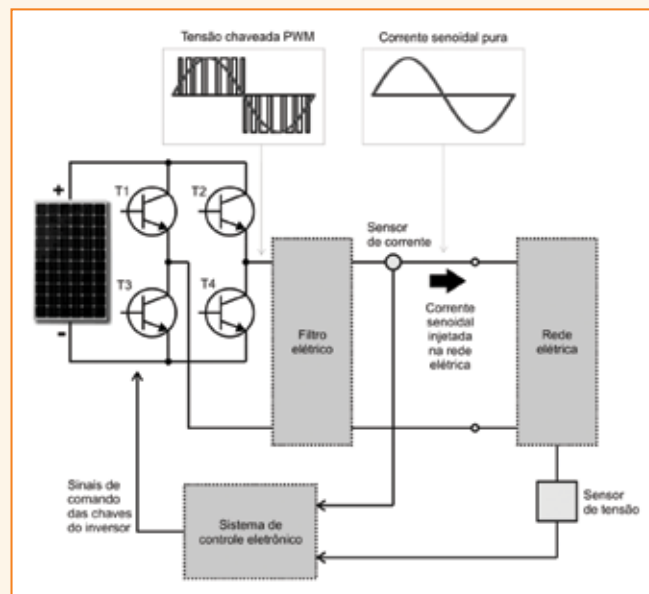


Figura 4 – Controle eletrônico de corrente do inversor CC-CA conectado à rede elétrica.

Fonte: Energia solar fotovoltaica – conceitos e aplicações. São Paulo: Ed. Érica, 2012.

Pelo fato de a corrente na saída do inversor ser produzida eletronicamente, por meio de um sistema que utiliza a informação da própria tensão da rede para a síntese da corrente, quaisquer outros dispositivos de sincronismo e proteção são dispensados nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Sistema de detecção de ilhamento

O recurso de detecção de ilhamento ou anti-ilhamento (anti-islanding) é exigido pelas normas que regem a conexão dos sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. É necessário para garantir a segurança de pessoas, equipamentos e instalações nas situações de ilhamento do sistema fotovoltaico, ou seja, interrupção do fornecimento de energia da rede elétrica pública.

O objetivo do recurso da detecção de ilhamento é desconectar o inversor da instalação elétrica, cessando o fornecimento de corrente, na ocorrência de falhas no fornecimento da rede elétrica ou em sua ausência (situação de ilhamento), mesmo que o sistema fotovoltaico seja capaz de suprir a demanda de energia local.

Devido às exigências de diversas normas internacionais, o sistema de anti-ilhamento está presente em todos os inversores comerciais para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Os inversores empregados no Brasil devem satisfazer a norma ABNT NBR IEC 62116:2012, publicada no início do ano de 2012, que trata dos procedimentos de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Os métodos de detecção de ilhamento existentes são

divididos em três categorias, conforme o seu princípio de operação: remotos, passivos e ativos. Os métodos remotos são os mais recentes e passaram a ser idealizados com o avanço na tecnologia de comunicações e o surgimento dos sistemas de smart grids. Esses métodos podem ser mais eficazes do que os métodos passivos e ativos, entretanto ainda são os mais caros e não são muito empregados. Os métodos passivos consistem na detecção de anormalidades nas grandezas elétricas (valor RMS da tensão e frequência) no ponto de acoplamento com a rede para determinar a ocorrência de ilhamento. Os métodos ativos, por sua vez, são empregados para evitar as deficiências dos métodos passivos, quando estes não são capazes de detectar corretamente o ilhamento. Os métodos ativos inserem distúrbios na corrente elétrica fornecida pelo inversor e verificam a resposta da rede elétrica a essas perturbações.

O método ativo de detecção de ilhamento mais empregado nos inversores comerciais é o Desvio de Frequência Ativo (AFD – Active Frequency Drift). Neste método um componente de corrente de frequência ligeiramente superior à frequência da rede elétrica é injetado no sistema com o intuito de provocar uma possível alteração na frequência da tensão no ponto de acoplamento com a rede.

Enquanto a rede estiver em funcionamento normal, as distorções introduzidas na corrente de saída do inversor não são percebidas pela rede. Se houver ilhamento, esta corrente distorcida faz a tensão no ponto de acoplamento comum sofrer distorções e cruze o zero em um instante diferente do esperado, causando variações na frequência da rede. Essas modificações implicam aumentos ou diminuições da frequência que, ao serem percebidas pelo detector passivo do inversor, originam o sinal de desligamento do inversor, desconectando-o da instalação elétrica e desligando seu sistema de controle de corrente.

A Figura 5 mostra o aspecto da corrente elétrica intencionalmente distorcida produzida pelo inversor devido ao método AFD. A distorção, representada pela presença de um tempo morto TZ, é

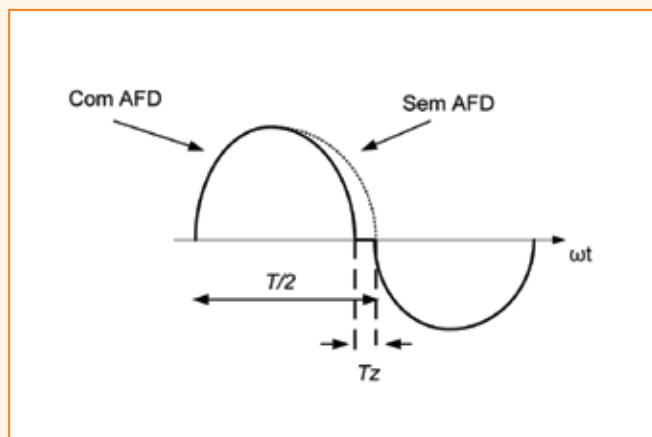


Figura 5 – Exemplo da forma de onda da corrente de saída do inversor com a técnica AFD. T = período da tensão elétrica da rede. TZ = tempo morto na corrente introduzido pelo método AFD.

imperceptível em situações normais e passa a ser notada apenas na ocorrência de ilhamento do sistema fotovoltaico.

Sistema de MPPT

O MPPT (maximum power point tracking), ou rastreamento do ponto de máxima potência, é um recurso presente em todos os inversores para a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. Tem o objetivo de garantir instantaneamente a operação do sistema em seu ponto de máxima potência, independentemente das condições de temperatura e irradiação solar.

Todos os inversores comerciais utilizam alguma variação do método de MPPT da perturbação e observação, ilustrado na Figura 6. O MPPT funciona por meio de um algoritmo muito simples, que consiste em perturbar a operação dos módulos, alterando intencionalmente a tensão nos seus terminais, e observar o que acontece com a potência fornecida.

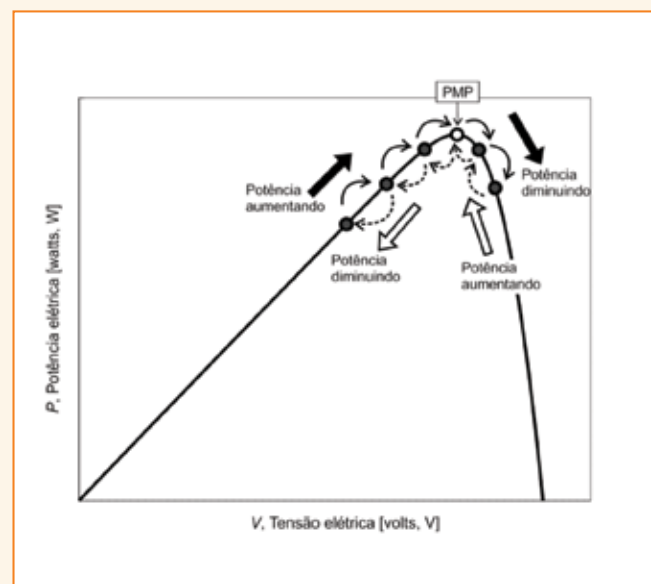


Figura 6 – Funcionamento do sistema de MPPT com o algoritmo de perturbação e observação. A tensão dos módulos fotovoltaicos é aumentada e diminuída constantemente em busca do ponto de máxima potência.

Fonte: Energia solar fotovoltaica – conceitos e aplicações. São Paulo: Ed. Érica, 2012.

O sistema de MPPT fornece ao sistema de controle de corrente a informação sobre a amplitude da corrente que deve ser produzida na saída do inversor, alterando instantaneamente o fluxo da potência injetada na rede elétrica. Indiretamente a tensão e a corrente dos módulos fotovoltaicos, na entrada do inversor, são reguladas pela modulação da corrente de saída do inversor.

A Figura 7 mostra o resultado da atuação de um sistema de MPPT sobre a tensão de entrada do inversor, que é a tensão dos módulos fotovoltaicos. Conforme as condições de irradiação solar variam, fato verificado pelas variações da corrente fotovoltaica ao longo do tempo, a tensão dos módulos é ajustada automaticamente pelo sistema de MPPT. A corrente resultante na saída do inversor é modulada de acordo com condição de irradiação solar e com a atuação do MPPT.

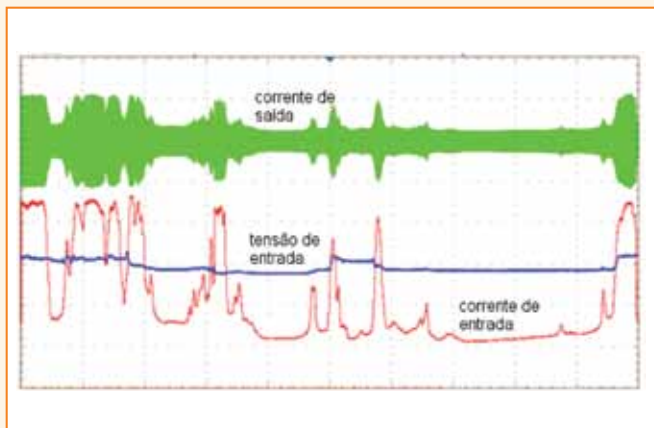


Figura 7 – Gráfico da operação do sistema de MPPT de um inversor conectado à rede, mostrando as variações de tensão na entrada do inversor.

Principais características dos inversores para conexão à rede

Potência nominal

Os inversores empregados em micro e minigeração são monofásicos, com potências tipicamente de até 5 kW. A constituição de sistemas trifásicos pode ser feita com a colocação de inversores monofásicos em conexão trifásica.

A Figura 8 ilustra inversores monofásicos para a conexão de módulos fotovoltaicos à rede elétrica das linhas Sunway M PLUS e Sunway M XS da Santerno.



Figura 8 – Inversores para a conexão de módulos fotovoltaicos à rede elétrica das linhas Sunway M PLUS (esquerda) e Sunway M XS (direita) da Santerno. Fonte: Santerno.

Faixa útil de tensão contínua na entrada

A faixa útil de tensão na entrada é o intervalo de valores de tensão de entrada no qual inversor consegue operar. É também a faixa de tensão na qual o sistema de MPPT do inversor consegue maximizar a produção de energia dos módulos fotovoltaicos. Geralmente, os inversores para a conexão à rede elétrica são construídos para receber conjuntos com vários módulos conectados em série, com tensão de saída de várias centenas de volts.

A especificação de uma faixa de tensão de MPPT significa que o ponto de máxima potência do conjunto de módulos fotovoltaicos deve estar situado dentro desta faixa para que o inversor possa

maximizar a produção de energia dos módulos. Conjuntos de módulos com tensões de saída abaixo ou acima dos limites da faixa de MPPT do inversor não vão proporcionar bons resultados, resultando em perda de eficiência do sistema fotovoltaico.

Tensão contínua máxima na entrada

Este é o valor máximo absoluto da tensão admissível na entrada do inversor. Nos inversores Sunway M XS, por exemplo, a tensão máxima suportada é de 580 V.

A tensão máxima suportada pelo inversor está relacionada com a tensão de circuito aberto dos módulos fotovoltaicos. A tensão de circuito aberto está presente nos terminais dos módulos quando estes não fornecem corrente elétrica.

Mesmo quando não estão em funcionamento, quando o inversor está desconectado da rede elétrica, os módulos fotovoltaicos aplicam tensão ao inversor e o limite máximo deve ser respeitado, sob o risco de danificar os componentes eletrônicos internos do equipamento.

O valor da tensão máxima suportada pelo inversor limita o número de módulos que podem ser colocados em série. O projetista do sistema fotovoltaico deve consultar a folha de dados dos módulos empregados e determinar o número máximo de módulos com base na informação da tensão de circuito aberto fornecida pelo fabricante.

Tipo de isolamento

Os inversores para sistemas conectados à rede elétrica podem possuir ou não um transformador de isolamento. A presença do transformador torna o sistema fotovoltaico mais seguro, pois possibilita a isolamento completa entre o lado CC (módulos fotovoltaicos) e o lado CA (rede elétrica).

Um aspecto importante nos inversores com transformador é a localização deste dispositivo: no estágio de pré-conversão CC (transformador de alta frequência) ou na saída do estágio CA (transformador na frequência da rede elétrica ou de baixa frequência).

Os inversores com transformador de baixa frequência são os mais comuns no mercado. Em geral são mais eficientes do que os inversores com transformador de alta frequência, porém são mais pesados e volumosos devido à presença de um transformador toroidal. Em alguns catálogos de fabricantes esse tipo de inversor é designado pela sigla LF (low frequency), indicando que se trata de um inversor com transformador de baixa frequência.

Os inversores com transformadores de alta frequência, geralmente identificados com a sigla HF (high frequency) nos catálogos dos fabricantes, tendem a ser mais compactos e leves, com uma ligeira perda de eficiência.

Os inversores sem transformador, identificados com sigla TL (transformerless) nos catálogos, são os mais leves, compactos e eficientes. Esta tecnologia de inversores foi última a ser desenvolvida e autorizada para a utilização nos países que iniciaram o uso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Atualmente,

os inversores sem transformador são certificados pelas normas internacionais e oferecem os mesmos recursos e a mesma segurança oferecidos pelos seus semelhantes com transformador.

A Figura 9 mostra dois exemplos de inversores comerciais com e sem transformador e seus respectivos circuitos internos encontrados no catálogo do fabricante.

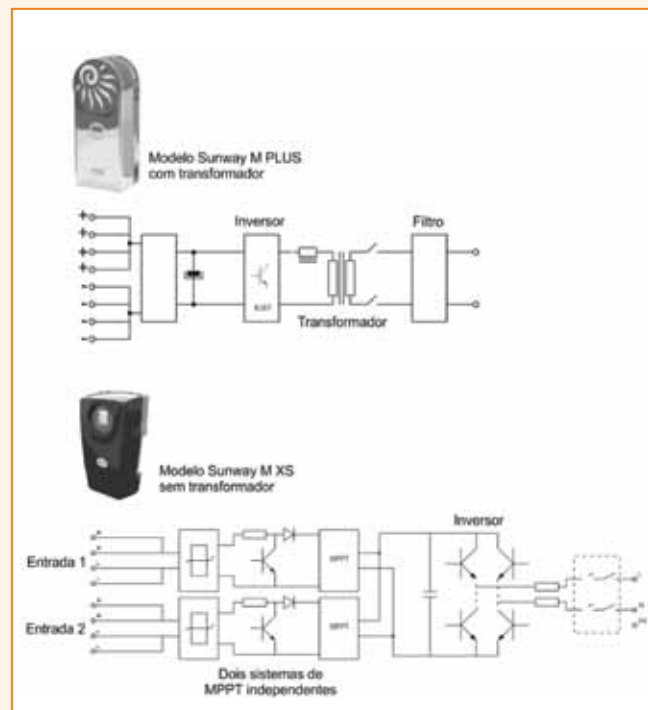


Figura 9 – Inversores com e sem transformador e os desenhos dos circuitos internos fornecidos no catálogo do fabricante.

Fonte: Santerno.

Isolação com transformador para módulos de filmes finos

A presença do transformador de isolamento no inversor facilita o aterramento dos módulos fotovoltaicos e é muito importante nos sistemas baseados em módulos de filmes finos, que necessitam, conforme a tecnologia empregada, ter os terminais positivo ou negativo do conjunto de módulos aterrado para evitar a degradação das células fotovoltaicas.

Nestes casos é recomendável o emprego de um inversor com isolamento por transformador ou um inversor sem transformador que tenha sido projetado especificamente para aplicação com módulos de filmes finos. O fabricante do inversor deve ser consultado sobre a adequação do produto à tecnologia de filmes finos e sobre os requisitos necessários para a instalação de sistemas deste tipo.

Alguns fabricantes oferecem acessórios (kits de aterramento), que devem ser adquiridos separadamente e instalados nos inversores para realizar o aterramento correto dos módulos de filmes finos.

Referências

- VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. *Energia solar fotovoltaica – conceitos e aplicações – sistemas isolados e*

conectados à rede. São Paulo: Ed. Érica, 2012

- BOWER, W.; ROPP, M. Evaluation of islanding detection methods for utility-interactive inverters in photovoltaic systems. Sandia National Laboratories, 2002.
- CORREA, D. S. Metodologias para análise do risco de ocorrência de ilhamentos não intencionais de geradores síncronos distribuídos. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- FUNABASHI, T.; KOYANAGI, K.; YOKOYAMA, R. A review of islanding detection methods for distributed resources. Bologna Tech Conference. Bologna, 2003.
- GALOTTO JUNIOR, L. Inversores integrados monofásicos aplicados em sistemas fotovoltaicos com conexão à rede de distribuição de energia. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista. Dissertação de Mestrado, 2011.
- GAZOLI, J. R. Microinversor monofásico para sistema solar fotovoltaico conectado à rede. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de Mestrado, 2011.
- PIRES, S. Pimentel. Sistema monofásico de geração distribuída baseado em inversor multinível. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Tese de Doutorado, 2011.
- VILLALVA, M. G. Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Tese de Doutorado, 2010.

**JONAS RAFAL GAZOLI é engenheiro eletricista, mestre e doutorando em Engenharia Elétrica pela Unicamp. Especialista em inversores fotovoltaicos na Universidade de Padova, Itália. Autor de trabalhos sobre energia solar fotovoltaica publicados em revistas e congressos no Brasil e no exterior. É membro da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência e do IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers e autor do livro Energia solar fotovoltaica – conceitos e aplicações, publicado pela Editora Érica em 2012. Atualmente é diretor da Eudora Solar.*

MARCELO GRADELLA VILLALVA é engenheiro eletricista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Unicamp. É especialista em inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Professor e palestrante nas áreas de sistemas fotovoltaicos, energias renováveis, eletrônica de potência e máquinas elétricas. Autor de trabalhos científicos e artigos publicados no Brasil e no exterior. É membro da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência e do IEEE. É autor do livro Energia solar fotovoltaica – conceitos e aplicações, publicado pela Editora Érica em 2012. Atualmente é professor e pesquisador da Universidade Estadual Paulista (Unesp).

JUAREZ GUERRA é engenheiro eletricista. É membro ativo do Condec do Conselho de Desenvolvimento Econômico de São Caetano do Sul e diretor adjunto da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp). Realiza trabalhos como consultor palestrante em congressos, fóruns e palestras em instituições de ensino. Atualmente é diretor comercial da Finder do Brasil.

Continua na próxima edição
Confira todos os artigos deste fascículo em
www.osestoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados
para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br