

USO DE DIODOS DE *BYPASS* E DE BLOQUEIO NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Lúcio Almeida Hecktheuer

Arno Krenzinger

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: laheck@vortex.ufrgs.br

Resumo

Em sistemas fotovoltaicos constituídos por módulos associados em série e em paralelo, faz-se necessário introduzir dispositivos de proteção, geralmente diodos, a fim de evitar danos e perdas de potência do sistema devido a diferenças entre as características elétricas das células nos módulos e possíveis sombreamentos das mesmas. O presente trabalho tem por objetivo apresentar estes tipos de proteções e também uma análise do comportamento elétrico de dois módulos, disponíveis no mercado consumidor, contendo diodos *bypass* ligados em diferentes configurações. Verifica-se que os diodos *bypass* e de bloqueio, quando corretamente conectados no sistema, evitam que um módulo funcione como carga para outros, dissipando uma potência muito grande que possa causar danos ao sistema. Também atuam no sentido de evitar um decréscimo muito acentuado da potência efetiva da associação quando há sombreamento de módulos.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico, Energia solar, Proteção

1. INTRODUÇÃO

Quando se trabalha com sistemas fotovoltaicos de potências elevadas, faz-se necessário associar módulos em série e em paralelo a fim de se conseguir valores de tensão e corrente apropriados para a aplicação que se deseja. Segundo vários autores, entre eles (Zilles, 1993; Gupta e Milnes, 1981), as diferenças entre as características elétricas e possíveis sombreamentos de módulos podem ocasionar danos ao sistema devido ao sobreaquecimento de células. Para evitar os problemas advindos destas situações indesejadas, mas que ocorrem ao longo da vida útil do sistema, deve-se acrescentar dispositivos de proteção, geralmente diodos, que são colocados em pontos estratégicos do circuito do sistema com o objetivo de evitar o aparecimento de pontos quentes nos módulos e conseqüente perdas de potência. O funcionamento destes diodos foram previamente descritos em (Gonzalez e Weaver, 1980; Ilceto et al, 1998) entre outros. Outros métodos como o da manipulação da resistência paralela na fabricação das células e o uso de diodos *bypass* incorporado em cada uma das células dos módulos conforme citados por (Roche, Outhred e Kaye, 1995), ainda são pouco utilizados e merecem maiores estudos.

2. PROTEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM DIODOS

A proteção de módulos fotovoltaicos que compõem um sistema, faz-se, preferencialmente, com o uso de diodos de *bypass* e de bloqueio, evitando assim o aparecimento de pontos excessivamente quentes nos módulos, o que pode vir a prejudicar o funcionamento do sistema. A seguir, são apresentadas as formas de se proteger sistemas fotovoltaicos com o uso de diodos de *bypass* e de bloqueio.

2.1 Diodo de *bypass*

Em associações série de células fotovoltaicas (módulos), as mesmas estão sujeitas a funcionarem como carga para as demais células. Neste caso, corre-se o risco de se ter uma tensão negativa aplicada nos seus extremos que seja maior que a sua tensão de “*breakdown*”, ocasionando uma dissipação de potência exagerada sobre ela e, por conseqüência, provocando um aquecimento que pode causar danos à célula. Esta situação pode ocorrer devido a não identicidade ou por sombreamento de células. Nestas situações, ao conectar-se um diodo em anti-paralelo com os extremos das células (diodo *bypass*), o mesmo ficará diretamente polarizado e, portanto, permitirá que a corrente circule por ele. Assim sendo, a célula em questão não contribui na conversão da energia elétrica, mas, também não se comporta como carga para as demais células. Se a célula for idêntica às demais e não estiver sombreada, o diodo *bypass* ficará reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente. Este diodo *bypass* deve ser capaz de conduzir toda a corrente gerada pela associação série e sua tensão limiar de condução deve ser a menor possível.

Na prática, não se colocam diodos *bypass* em paralelo com cada uma das células associadas, mas sim com grupos delas. A Fig. 1 mostra como são ligados os diodos *bypass* em módulos fotovoltaicos (associações de N células em série) disponíveis no mercado.

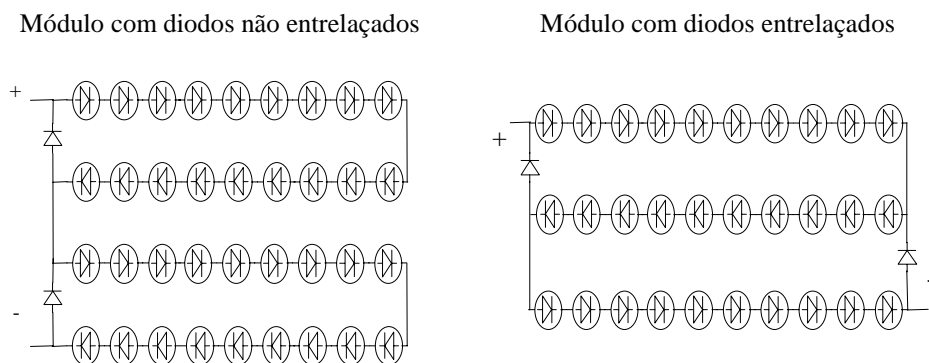


Fig. 1 Ligações de diodos *bypass* em módulos fotovoltaicos

Em módulos fotovoltaicos com diodos *bypass* ligados de forma entrelaçada, se tem disponível apenas um valor de tensão nominal para o módulo, por exemplo 12 V, e nos outros módulos dois valores de tensão (6 V e 12 V).

2.2 Diodo de bloqueio

Sistemas fotovoltaicos constituídos por vários ramos em paralelo, cada qual podendo ser constituídos por N módulos associados em série, podem ser protegidos contra correntes reversas dos outros ramos através de diodos de bloqueio conectados em série em cada um dos

ramos. Essa corrente reversa é causada pela diferença de tensão dos ramos devido a situações indesejadas já citadas anteriormente.

O ramo que apresenta uma menor tensão fica sujeito a funcionar como carga para os demais ramos. Desta forma, parte ou toda a corrente gerada pelos ramos que apresentam maior tensão fluirá pelo ramo de menor tensão, ocasionando um aquecimento neste último ramo e perda de potência do sistema. O uso de diodos de bloqueio ligados em série com os módulos de cada ramo, conforme é mostrado na Fig. 2, evitam o aparecimento de correntes reversas.

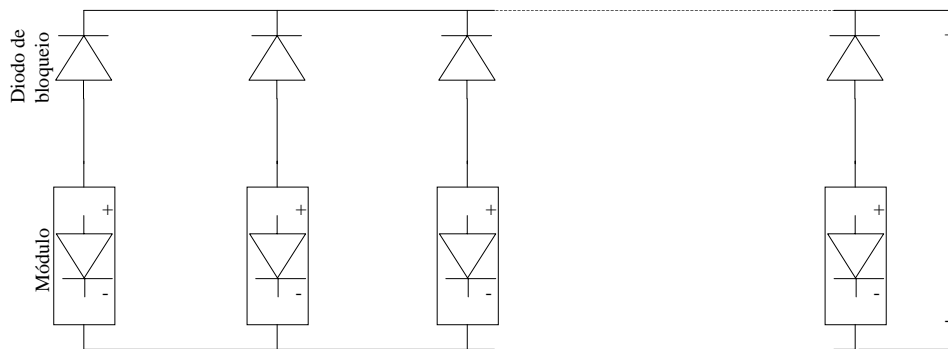


Fig. 2 Associação paralelo de módulos fotovoltaicos com diodos de bloqueio

Os diodos de bloqueio ocasionam uma queda de tensão de aproximadamente 1 V (valor este que depende do tipo de diodo utilizado), o que pode ser importante em sistemas de menor porte. Para reduzir significativamente esta queda tensão, pode-se substituir o diodo de bloqueio por fusíveis. Com o fusível, as células do módulo do ramo de menor tensão não correm o risco de serem danificadas mas não se evita a perda de potência do sistema visto que por este ramo circulará uma corrente reversa.

Quando a energia elétrica do sistema fotovoltaico é armazenada em baterias, pode-se utilizar um diodo de bloqueio com o seu catodo ligado no terminal positivo do banco de baterias com o objetivo de não permitir a sua descarga em períodos de escuridão ou de muito baixa radiação solar (células fotovoltaicas comportando-se como diodos polarizados diretamente). O inconveniente desta solução é que se tem, nos períodos em que o sistema está gerando energia elétrica, uma perda de potência que é dissipada no próprio diodo de bloqueio.

Com o objetivo de minimizar estas perdas, pode-se utilizar diodos do tipo Schottky, os quais apresentam, segundo (Boylestad, 1986), uma queda de tensão da ordem de 0,2 V quando polarizados diretamente. Em sistemas que operam com tensões superiores a 24 V, torna-se necessário utilizar-se diodos de junção P-N que suportam tensões reversas maiores, embora provoquem uma perda de potência maior, pois a queda de tensão, quando em polarização direta, é na ordem de 0,7 V (diodos de silício).

Esta aplicação do diodo de bloqueio, atualmente é de muito pouco uso, visto que há modernos reguladores de carga de baterias que possuem dispositivos de chaveamento interno que desconectam os módulos da carga durante a noite. Mesmo sem a utilização destes reguladores, a aplicação do diodo é questionada, pois a queda de tensão que ele provoca durante o dia proporciona uma perda de energia que pode ser, em determinados casos, maior que a perda de energia durante a noite, sem a sua presença.

2.3 Ligação de diodos de proteção em sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos que utilizam um número maior de módulos a fim de obter-se valores de tensão e corrente apropriados para a aplicação desejada, em geral utilizam simultaneamente associações em série e em paralelo. Nestes casos, a proteção dos módulos é conseguida utilizando-se, também simultaneamente, os diodos de *bypass* e de bloqueio.

A Fig. 3 mostra como devem ser ligados os diodos de proteção em um sistema composto por módulos ligados em série paralelo.

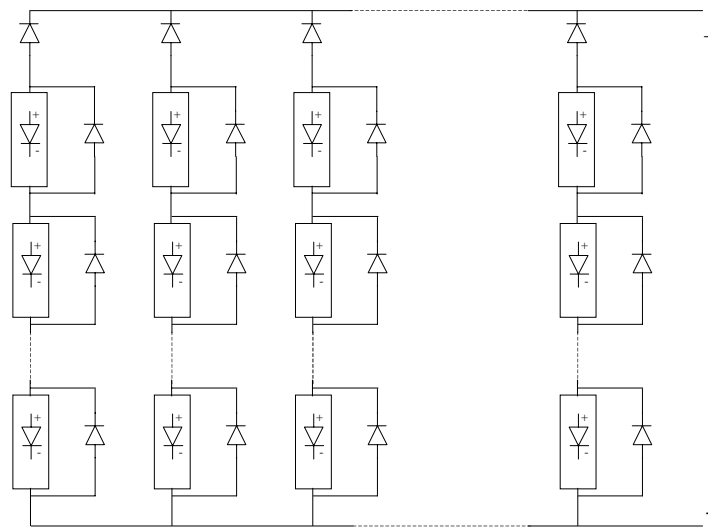


Fig. 3 Associação série paralelo de módulos fotovoltaicos com diodos de proteção

3. DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE LIGAÇÕES DE DIODOS *BYPASS*

Com o objetivo de analisar o comportamento dos módulos quando funcionando com tensões reversas, situação em que os diodos de bloqueio devem atuar, foram traçadas curvas dos módulos com algumas células sombreadas. Esta situação de polarização reversa em módulos fotovoltaicos acontece não só com a presença de sombras nos módulos mas também quando a associação está funcionando em curto-circuito ou circuito aberto.

Os dois módulos que foram testados possuem diferentes ligações dos diodos de *bypass*, (diodos entrelaçados ou não entrelaçados conforme Fig.1). Com diodos entrelaçados, a máxima tensão reversa é de aproximadamente 1,4 V mais 1/3 da tensão do módulo e com diodos não entrelaçados ao redor de 1,4 V.

Geralmente, módulos com 30 ou 33 células (apenas três colunas de células interligadas em série), apresentam diodos *bypass* ligados entrelaçados e módulos com 36 células (quatro colunas de células interligadas em série) apresentam diodos *bypass* não entrelaçados, nos quais tem-se disponível as tensões nominais, conforme ligação, de 12 V ou 6 V. Nos módulos com diodos *bypass* entrelaçados, tem-se disponível apenas uma tensão, geralmente 12 V.

Nas Fig. 4 e 5, são mostradas as curvas de dois módulos (um com diodos não entrelaçados e outro com diodos entrelaçados), nas situações de sombreamento e não sombreamento de células.

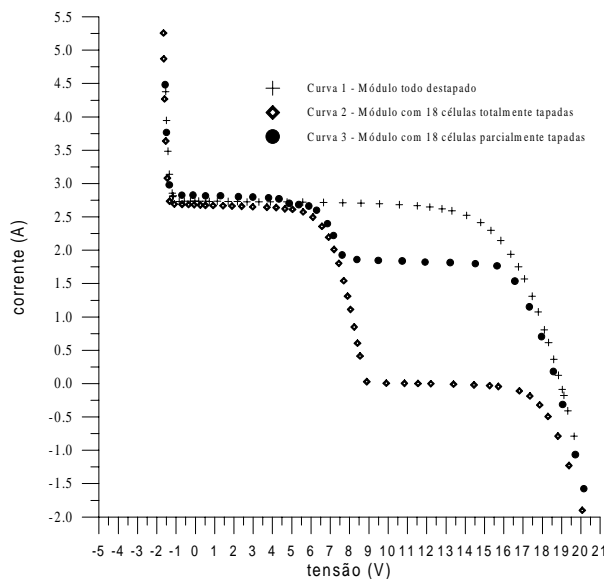


Fig. 4 Curva de módulo fotovoltaico com diodos *bypass* não entrelaçados

A ligação dos diodos *bypass* de forma convencional (não entrelaçados), onde cada diodo está ligado em paralelo com apenas um grupo de células, limita a tensão reversa de funcionamento do módulo, não deixando que as células, individualmente, dissipem uma quantidade muito grande de potência.

Quando tem-se um sombreamento total ou parcial de uma célula, por ela circulará apenas parte da corrente que pode circular pelas células não sombreadas. A outra fração de corrente circulará pelo diodo *bypass* de modo que, pelo grupo de células que não estão sombreadas, circula a soma das duas correntes mencionadas. No caso de sombreamento total de uma célula, toda a corrente que circula pelas células não sombreadas circulará também pelo diodo *bypass* que provoca uma queda de tensão de aproximadamente 0,7 V.

Na ligação de diodos entrelaçados, onde cada diodo está conectado em paralelo com dois grupos de células ligadas em série, tem-se duas situações distintas de comportamento dos diodos quando houver sombreamento de células. Estas situações são diferenciadas com relação a coluna onde está a célula sombreada.

Quando se tem uma célula da fileira central totalmente sombreada, o módulo comporta-se como se tivesse dois grupos de células e diodo *bypass* ligados em paralelo. Nesta situação, a corrente de curto-circuito tem seu valor duplicado com uma conseqüente redução da tensão de circuito aberto. Isso já não ocorre se a célula sombreada estiver colocada numa das fileiras laterais. É interessante chamar a atenção sobre os efeitos que o sombreamento parcial da fileira central de módulos com diodos de *bypass* entrelaçados podem produzir sobre o resultado em avaliações descuidadas de sistemas em operação. Muitas vezes o técnico faz uma leitura de corrente de curto-circuito e tensão, sem perceber que a poeira no módulo pode estar causando um falso aumento na corrente do mesmo.

Com os diodos entrelaçados, quando tem-se um sombreamento total de uma célula, a tensão de circuito aberto é reduzida a menos de 1/3 da tensão de circuito aberto sem sombreamento (tensão equivalente de um grupo de células em série menos a queda de tensão sobre um diodo *bypass*). Já com o uso de diodos não entrelaçados, esta tensão fica reduzida a pouco menos da metade da original, sem sombreamento.

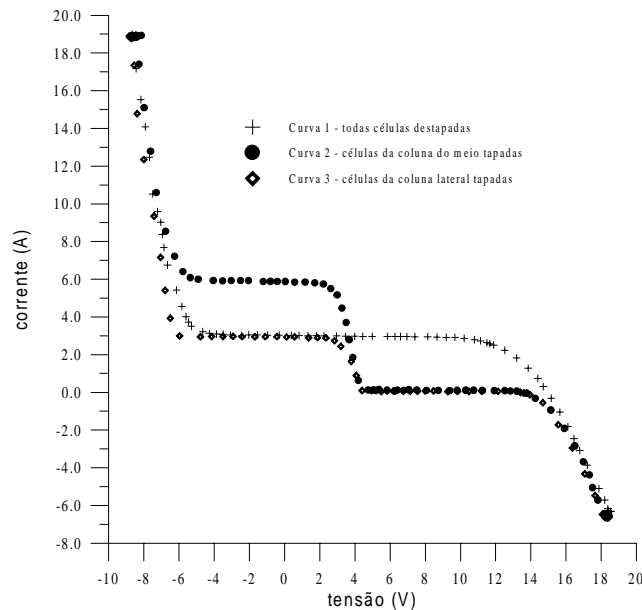


Fig. 5 Curva de módulo fotovoltaico com diodos *bypass* entrelaçados para uma irradiância de 930 W/m^2 e temperatura constante de $67.4 \text{ }^\circ\text{C}$

4. CONCLUSÕES

A proteção de sistemas fotovoltaicos mais difundida e usada é através da utilização de diodos. Quando se tem módulos associados em série, a proteção é feita colocando-se em anti-paralelo com cada módulo um diodo de *bypass*. Para módulos associados em paralelo, liga-se em série com cada módulo um diodo de bloqueio. Associações fotovoltaicas série-paralelo são protegidas utilizando-se, simultaneamente, diodos de *bypass* e de bloqueio.

Dois tipos de ligações de diodos *bypass* (entrelaçados ou não entrelaçados) são bastante utilizadas e aplicadas em módulos comerciais. Os módulos que apresentam diodos *bypass* entrelaçados limitam a tensão reversa aplicada em aproximadamente $1,4 \text{ V}$ mais $1/3$ da tensão do módulo enquanto que os com diodos *bypass* não entrelaçados limitam ao redor de $1,4 \text{ V}$. Ambas as configurações de ligação dos diodos *bypass* limitam a tensão reversa a ser aplicada nos módulos e, em situações não desejadas de funcionamento do sistema (sombreamento ou defeito de um módulo), minimizam a redução do fator de forma da curva característica I-V da associação e perdas de potência.

5. REFERÊNCIAS

Boylestad, R., Nashelsky, L., 1986, “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, Prentice-Hall do Brasil, 3.ed., Rio de Janeiro, Brasil, 700p.

Gonzalez, C. C., Weaver, R., 1980, “Circuit Design Considerations for Photovoltaic Modules and Systems”, Proceeding of the 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, pp. 528-535.

Gupta, A., Milnes, A. G., 1981, “Effects of Shading and Defects in Solar Cell Arrays”, Proceeding of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Orlando, FL, pp. 1111-1116.

Iliceto, A. et al, 1998, "Assessment of Blocking and Bypass Diodes Application in PV Power Plants", Anais do 2th World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, pp. 2108-2111, Vienna, Austria.

Roche, D, Outhred, H., Kaye, R. J., 1995, "Analysis and Control of Mismatch Power Loss in Photovoltaic Arrays", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 3, pp. 115-127.

Zilles, R., 1993, "Modelado de Generadores Fotovoltaicos Efectos de la Dispersion de Parametros", Tese de Doutorado, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, España, 146p.