

ESTUDO DE ARRANJOS DE CHAVES SEMICONDUTORAS ADEQUADOS A UM COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPS

Fabricio E. Cazakevicius

Acadêmico do Curso de Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – GEPOC
fabriciocazakevicius@gmail.com

Josemar O. Quevedo

Acadêmico do Curso de mestrado em Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – GEPOC
josemar.oliveira.quevedo@gmail.com

Rafael C. Beltrame, Luciano Schuch

Professor/Pesquisador do Curso de Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – GEPOC
{rafaelrcb, schuch.prof}@gmail.com

Resumo: Neste trabalho é apresentado o estudo do arranjo de chaves semicondutoras de potência adequado ao emprego em um comutador eletrônico de taps de um transformador de distribuição monofásico. A utilização de chaves semicondutoras traz como vantagem a possibilidade de rápida comutação entre os taps do transformador, eliminando a formação de arco elétrico durante este processo. Tais dispositivos necessitam de especial atenção em seu dimensionamento, uma vez que operam sob elevadas diferenças de potencial. É apresentada a metodologia de projeto e resultados experimentais comprovam a devida operação do sistema.

Palavras-chave: Chave semicondutora. Transformador de distribuição. Comutador eletrônico de taps.

1. INTRODUÇÃO

Transformadores de distribuição, responsáveis por condicionar a energia elétrica a um nível seguro e adequado ao consumidor, utiliza um dispositivo mecânico na comutação dos taps que altera sua relação de transformação, cujas principais vantagens são a robustez e custo reduzido. Entretanto, estes dispositivos devem ser operados *in loco*, com o equipamento desenergizado, e por uma equipe especializada, o que prejudica os índices de desempenho da empresa concessionária.

O desenvolvimento de dispositivos semicondutores para elevados níveis de tensão e corrente tem permitido vislumbrar-

se a substituição das chaves mecânicas por chaves eletrônicas em comutadores de taps. Esta é uma solução recente (EXPÓSITO e BERJILLOS 2007), e vários trabalhos têm focado nesta abordagem (BAUER e HAAN 1998, EXPÓSITO e BERJILLOS 2007, FAIZ, J. e SIAHKOLAH, 2003). Neste sentido, são de vital importância o correto dimensionamento e a especificação das chaves semicondutoras a serem empregadas, uma vez que o circuito eletrônico não deve comprometer a confiabilidade do transformador.

2. VISÃO GERAL DO SISTEMA

O diagrama do comutador eletrônico de taps desenvolvido é apresentado na Fig. 1, onde o transformador apresenta tensão eficaz (rms) de 7967/220 V. No circuito primário emprega-se um transformador de corrente (TC) com classe de isolamento de 15 kV, o qual é utilizado para realizar o sensoriamento da corrente, de modo a sincronizar a comutação das chaves semicondutoras com o cruzamento da corrente por zero. O emprego de um transformador de potencial (TP) no primário tem por objetivo alimentar o sistema de controle, que permite a operação mesmo sob uma falta no secundário. A medição isolada da tensão no secundário do transformador é utilizada para a tomada de decisão na comutação dos taps. Tal ação é controlada por um processador digital de sinais (DSP).

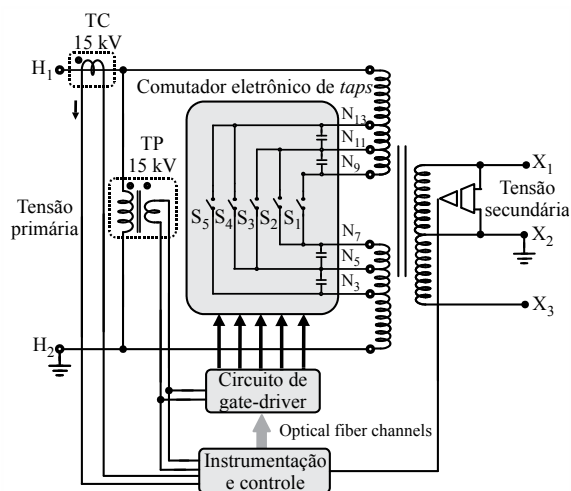


Fig. 1. Esquema geral do sistema.

3. CHAVES SEMICONDUTORAS DE POTÊNCIA

Em (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003) são propostos três arranjos de tiristores e diodos semicondutores para a implementação de chaves bidirecionais em corrente e tensão, conforme representado na Fig. 2 (a)-(c). Já em (BAUER e SCHOEVAARS, 2003), é apresentado um estudo de aplicação de *Insulated-Gate Bipolar Transistors* (IGBTs) em configuração anti-série, ou coletor comum, como mostrado na Fig. 2 (d). Tais dispositivos apresentam como vantagem a rápida comutação, além da possibilidade de total controle da chave, diferentemente dos tiristores que são dispositivos semicontrolados.

3.1 Definição da configuração de chaves

Em função dos níveis de tensão e, principalmente, dos baixos níveis de corrente no lado de média tensão (primário) do transformador empregado – inferiores à

corrente de *latch* e *hold* dos tiristores – optou-se pelo emprego de IGBTs em configuração anti-série, similar ao apresentado na Fig. 2 (d). O rearranjo dessa configuração para emissor comum traz uma grande vantagem no circuito de acionamento (*gate-driver*): o referencial da chave fica em um mesmo ponto e, portanto, é possível utilizar um único *gate-driver* para o comando de todo o arranjo, uma vez que o circuito de acionamento é isolado e a tensão entre *gate* e *emissor* não ultrapassa o nível de 20 V. Essa característica é importante, já que as exigências de isolamento do *gate-driver* o tornam um circuito um pouco mais caro e volumoso.

3.2 Cálculo dos esforços sobre as chaves

Ao manter a carga nominal do secundário do transformador constante e alterar o *tap* do transformador, a corrente primária também se altera. Assim, a máxima corrente nominal do enrolamento primário é dada para a condição de menor relação de transformação, que ocorre quando a chave S_5 está fechada (cf. Fig. 1). Considerando a tensão secundária de 220 V como sendo V_{sec} , e a potência nominal do transformador de 5 kVA como sendo S , a máxima corrente nas chaves, $I_{s,max}$, é dada pela equação (1). Sendo K o número de enrolamentos de *tap* do transformador (4), N_{total} a relação de transformação do enrolamento primário (36,21), N_{tap} dos enrolamentos de *tap* (1,575) e N_s do enrolamento secundário (1,00), é possível encontrar o valor da corrente nominal máxima, que no caso de estudo é dado por 1,074 A (valor de pico).

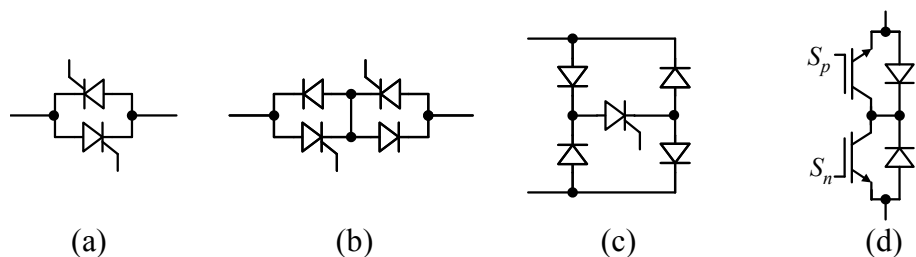


Fig. 2. Arranjos de chaves bidirecionais. Tiristores em (a) em anti-paralelo, (b) com catodo comum e (c) em ponte completa (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003); (d) IGBTs em anti-série (BAUER e SCHOEVAARS, 2003).

$$I_{s,max} = \frac{S}{V_{sec}} \cdot \frac{N_s}{(N_{total} - K \cdot N_{tap})} \sqrt{2} \quad (1)$$

Durante o processo de comutação faz-se necessário que duas chaves estejam fechadas ao mesmo tempo a fim de garantir que o transformador não fique em aberto, e toda a tensão primária seja aplicada sobre as chaves. Esse processo gera um curto-circuito no enrolamento de *tap*, cuja corrente é limitada apenas pela impedância do enrolamento. Esta corrente pode ser calculada pela equação 2, onde L_{tap} representa a indutância de dispersão do enrolamento de *tap* do transformador (8,7 mH), $\Delta t_{overlap}$ é o tempo de sobreposição (10 μ s). Assumindo a condição de pior caso, em que a tensão secundária e a tensão do enrolamento de *tap* estejam ambas em seu valor de pico no instante da comutação (90° em atraso com respeito à corrente para uma carga puramente indutiva), o valor da corrente devido ao tempo de sobreposição será de 0,5627 A. Salienta-se que o processo de comutação ocorre no cruzamento por zero da corrente primária.

$$I_{cc_pk} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{sec}}{L_{tap}} \cdot \left(\frac{N_{tap}}{N_s} \right) \cdot \Delta t_{overlap} \quad (2)$$

Outro importante parâmetro para o projeto de chaves semicondutoras é a suportabilidade de tensão no instante de bloqueio. Para essa análise, considera-se: *p* a referência da chave aberta a qual se deseja saber a tensão, *q* a referência da chave que está em condução, S_p é a chave aberta a qual se deseja saber a tensão, S_q é a chave que está conduzindo; V_{sp} é a tensão sobre a chave S_p ; e V_{in} é o valor rms da tensão primária. Com essas definições é possível afirmar que a tensão V_{sp} quando a chave S_q está fechada é dada pela equação (3). As chaves podem ser projetadas para a tensão sobre a chave S_1 quando a chave S_5 está fechada, pois esta é a que suporta a maior tensão de operação, que nesse caso é de 2373 V.

$$V_{S_p} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{in} \cdot |q - p| \cdot N_{tap}}{N_{total} - (q - 1) \cdot N_{tap}} \quad (3)$$

Com os valores obtidos nas equações (1) a (3), é possível definir uma chave semicondutora que satisfaça as condições de projeto estabelecidas. Um modelo de IGBT adequado aos limites de tensão e corrente para essa aplicação é o IXGH10N300 (IXYS, 2009), com capacidade de bloqueio de 3 kV e corrente nominal de 10 A.

3.3 Projeto do diodo anti-paralelo

Dispositivos semicondutores do tipo IGBT para tensões elevadas geralmente não incorporam o diodo em antiparalelo, como é o caso da chave IXGH10N300. A ausência do diodo em antiparalelo impede a configuração de chave bidirecional apresentada na Fig. 2 (d). Portanto, faz-se necessária a inclusão externa de um diodo com tensão de bloqueio igual ou superior a do IGBT.

Para se obter a mesma faixa de tensão da chave utilizada, optou-se pelo emprego de um conjunto de diodos em série, como mostrado na Fig. 3, de modo a garantir a mesma capacidade de bloqueio de tensão sobre os diodos e o IGBT. Entretanto, para garantir que no momento do bloqueio a tensão se distribua pelas capacitâncias parasitas dos diodos, uma rede resistiva é utilizada.

Então, diodos de alta tensão e baixa corrente são dispostos em paralelo à chave. O diodo escolhido foi o RHRP8120, que apresenta tensão de bloqueio de 1200 V e corrente nominal de 8 A. Para esse

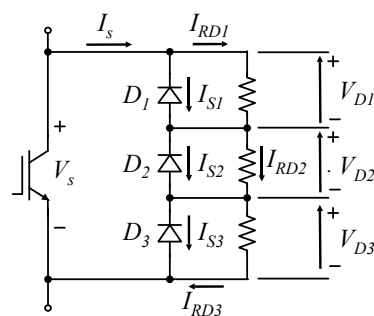


Fig. 3. Diodos em anti-paralelo e circuito de equilíbrio.

componente, optou-se por um arranjo de 3 diodos em série, a fim de garantir a capacidade de bloqueio da chave bidirecional, conforme a Fig. 3. No dimensionamento dos diodos é considerada a máxima tensão sobre as chaves, apresentada na equação 3. O valor rms dessa tensão, dividida entre os três diodos, resulta em menos de 560 V médios em cada componente. Os resistores de equilíbrio, representados na Fig. 3, são implementados por 4 resistores de precisão de $\frac{1}{4}$ W em série, por conta do nível de tensão. Para a perda Joule sobre os resistores esteja em conformidade com sua especificação, empregou-se resistores de 100 k Ω , onde os quatro em série resultam em 400 k Ω e dissipam 0,78 W no total.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para comprovar o equilíbrio de tensão entre os diodos associados em série, conduziu-se um ensaio em escala reduzida de forma a avaliar a resposta transitória do arranjo de diodos e chave durante o processo de comutação. Foi montada a estrutura apresentada na Fig. 3 em série com uma carga RL de 10 Ω e 10 mH, respectivamente, alimentada com uma tensão de 30 V. Inicialmente, colocou-se o IGBT em condução e foi realizado seu bloqueio, para verificar o comportamento da tensão sobre os diodos D_1 e D_2 . No instante em que o IGBT é bloqueado, a corrente que circula pelo indutor tende a manter-se constante, elevando o nível de tensão que aparece sobre a chave e os diodos. Como se pode perceber da Fig. 4, esse aumento de tensão se distribui uniformemente sobre os diodos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tensão sobre os diodos com o auxílio da rede resistiva se mostrou equilibrada, o que, se não observado, poderia ser um problema na aplicação desta configuração no transformador proposto. Sendo assim, a aplicação dos diodos nesta configuração mostra-se confiável e operacional, garantindo

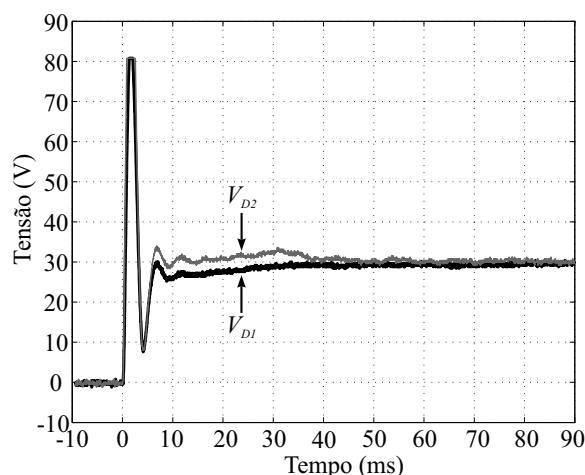


Fig. 4. Resultado experimental de tensão sobre diodos D_1 e D_2 .

a distribuição da tensão sob os dispositivos e uma classe de tensão superior a de ruptura do IGBT utilizado no projeto.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar sua gratidão à Centrais Elétricas de Carazinho S/A (ELETROCAR) pelo apoio financeiro (P&D Aneel).

6. REFERÊNCIAS

- EXPÓSITO, A. G. e BERJILLHOS, D. M., “Solid-state tap changers: New configurations and applications”, **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 22, no. 4, 2007.
- BAUER, P. e HANN, S.W.H., “Electronic tap changer for 500 kVA/10 kV distribution transformers: Design, experimental results and impact in distribution networks. In: **IEEE Industry Applications Conference**, vol. 2, pp. 1530-1537, 1998.
- FAIZ, J. e SIAHKOLAH, B. New solid-state on-load tap-changers topology for distribution transformers. **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 18, no. 1, Jan. 2003.
- BAUER, P. e SCHOEVAARS, R. Bidirectional Switch for a Solid State Tap Changer. In: **34th Power Electron. Specialist Conference**, vol. 1, pp. 466-471, Jun. 2003.
- IXIS. IXGH10N300: High Voltage IGBT. Folha de dados, 2009.