

ESTUDO DE COMUTAÇÃO EM UM CONVERSOR CC-CC TRIFÁSICO ISOLADO BIDIRECIONAL ALIMENTADO EM CORRENTE

Antonio Daniel Miguel dos Santos¹, Gilmar Nunes dos Santos Costa², Herminio Miguel de Oliveira Filho³

Resumo: Com o aumento da participação das fontes renováveis na geração de energia elétrica, que possuem características intermitentes e a elevada demanda de estudos sobre *smart-grids* com sistemas de distribuição CC, torna-se interessante o uso de conversores dc-dc bidirecionais de alta densidade de potência. Para se atingir a característica supracitada, é necessário utilizar técnicas de comutação suave nos semicondutores ativos do conversor. Neste contexto, este trabalho propõe a análise e caracterização de comutação para um conversor CC-CC trifásico isolado bidirecional alimentado em corrente com comutação suave, *phase shift* (PS) e razão cíclica variável, que possui potencial aplicação em microrredes CC. A utilização do PS garante o fluxo bidirecional de potência, além de assegurar, naturalmente, que os interruptores operem em comutação suave em uma grande faixa de operação. Além disso, a razão cíclica variável assegura a comutação suave para alterações no ganho estático entre tensão de saída e entrada do conversor bidirecional. É apresentada, inicialmente, uma contextualização da comutação de semicondutores de potência e a necessidade da redução de perdas por comutação nesses dispositivos. Posteriormente, o princípio de funcionamento do conversor, em conjunto com uma metodologia para definir as regiões de comutação é discutido. Por fim é realizada a caracterização matemática das chaves, além de um exemplo de simulação do conversor em análise.

Palavras-chave: Análise de comutação. Comutação Suave. Conversor CC-CC Bidirecional. *Phase Shift*.

INTRODUÇÃO

Várias pesquisas sobre conversores estáticos cc-cc bidirecionais estão sendo feitas nos últimos anos devido ao crescente número de aplicações, tais como, sistemas de armazenamento de energia, energias renováveis, *smart-grids* e sistemas de distribuição CC (ZHAO, 2014), (TAN, 2014). Os conversores estáticos realizam a transferência de energia entre fonte de energia e carga utilizando, dentre outras coisas, a comutação de dispositivos semicondutores. A Figura 1 apresenta o funcionamento típico de uma chave semicondutora, na qual se pode observar que a mesma funciona de

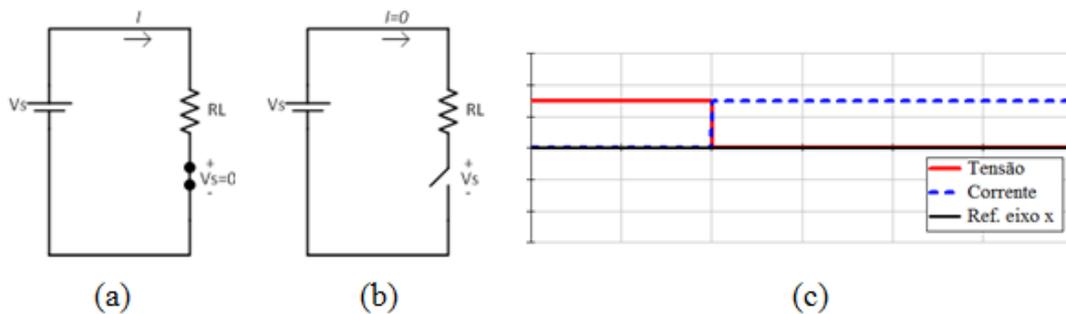
¹ Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, e-mail: danielmiguel715@hotmail.com

² Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, e-mail: gilmarnunes2010@yahoo.com.br

³ Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, e-mail: herminio@unilab.edu.br

modos: a) a chave se encontra inicialmente ligada durante um determinado período de tempo, fazendo com que ocorra condução de corrente e, conseqüentemente, transferência de energia da fonte para a carga; b) A chave é desligada, interrompendo a condução de corrente e cessando, conseqüentemente, a transferência de energia. A forma de onda típica desses modos de operação é mostrada na Figura 2c.

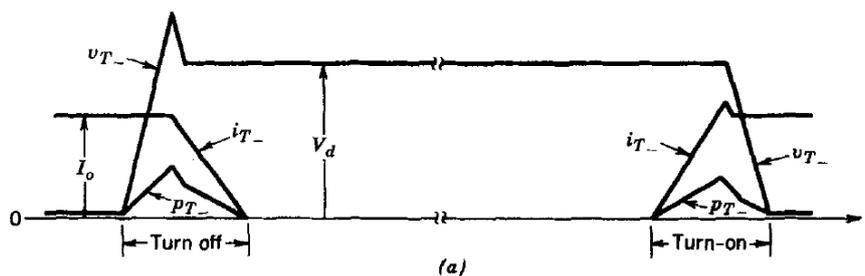
FIGURA 1 – Modelo de chave ideal e formas de onda.



FONTE: Autores

Contudo, a comutação de chaves semicondutoras não obedecem, na prática, o formato idealizado apresentado previamente. Devido às características construtivas das chaves, a mesmas possuem não idealidades fazendo com que sua transição seja suave, conforme exposto na figura 2. Logo, durante a comutação das chaves surgirão perdas devido ao produto $v \times i$.

FIGURA 2 – Formas de onda para o acionamento da chave real.



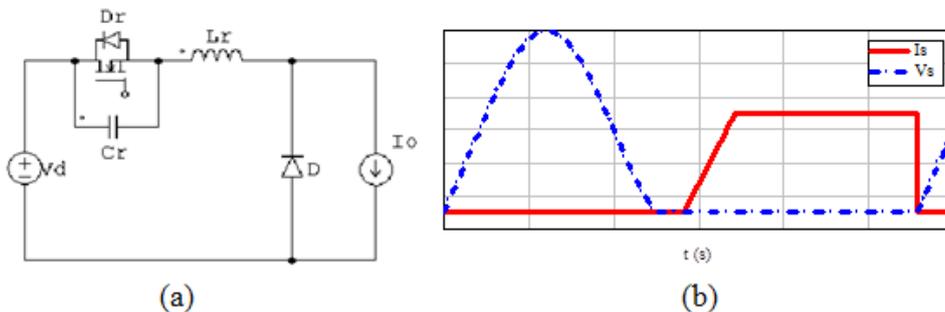
FONTE: (MOHAN, 2003, Cap 9)

Uma alternativa para solucionar esta perda de rendimento consiste em utilizar a técnica de comutação suave, mais precisamente aquela convencionada por comutação sobre tensão nula (*zero voltage swtiching* - ZVS). Nesta técnica, existe um capacitor ressonante, em paralelo com a chave, que produz uma tensão nula sobre a chave no instante em que é ligada ou desligada (MOHAN, 2003, Cap 9).



Um exemplo de conversor é o buck ZVS, mostrado na Figura 3a. Um diodo é conectado em antiparalelo com a chave, além de um indutor série ressonante, para garantir a comutação ZVS. Detalhes da comutação suave na chave podem ser observadas na Figura 3b. Logo, este tipo de técnica de comutação pode ser aplicada nas mais variadas topologias de conversores.

FIGURA 3 – Conversor Buck ZVS.



FONTE: Autores

Diante do exposto, este trabalho propõe analisar a comutação do conversor cc-cc trifásico isolado bidirecional alimentado em corrente apresentado na Figura 5. A estrutura em questão concilia o incremento de potência alcançado pelo paralelismo de fases como em (FILHO, 2015), assim como o controle da tensão no barramento representado pelo capacitor de grampeamento proposto por (WANG e LI, 2012). O conversor possui indutores de entrada que dão à topologia característica de fonte de corrente. O lado primário possui três pontes H e as chaves de um mesmo braço operam de forma complementar e com razão cíclica variável. No secundário há uma topologia semelhante à de um retificador PWM trifásico, onde os braços estão desfasados em 120° e razão cíclica fixa em 50%. A ponte de entrada é defasada de um ângulo de *phase-shift* em relação à ponte de saída, garantindo o controle do fluxo de potência.

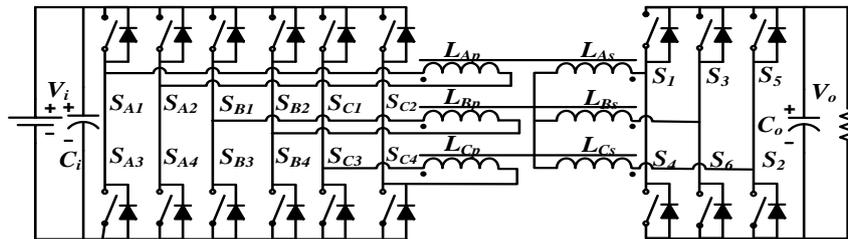
METODOLOGIA

De acordo com o lado, o conversor pode ser analisado em duas partes: lado primário, baseado em fonte de corrente, e lado secundário, baseado em fonte de tensão. As características de comutação para o lado secundário são similares ao apresentado em (FILHO, 2015). Portanto, as condições que garantem a comutação ZVS no lado secundário é que a corrente através do transformador seja $i_L(\varphi)=0$.



Como descrito em (WANG e LI, 2012), as condições que garantem comutação ZVS dependem não somente da corrente transformador, mas também da potência (e corrente i_{Ldc}) processada pelos indutores cc. Portanto, as condições que garantem a comutação ZVS nas chaves superior e inferior primárias são, respectivamente, $i_L(0) - i_{Ldc}(0) < 0$ e $i_{Ldc}(2\pi D) - i_L(2\pi D) < 0$.

FIGURA 4 – Conversor CC-CC trifásico isolado bidirecional alimentado em corrente.



FONTE: Autores

As condições apresentadas previamente foram aplicadas para obtenção dos ganhos estáticos que delimitam as regiões limites entre comutação suave e não dissipativa. A seguir é mostrado gráfico e simulação da metodologia supracitada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5a apresenta o comportamento das chaves de acordo com os valores de razão cíclica D e ganho estático d . É possível observar que o intervalo de operação ZVS para todas as chaves aumenta quando D é reduzido. Também, para um mesmo D a redução de d aumenta o intervalo da operação sobre ZVS.

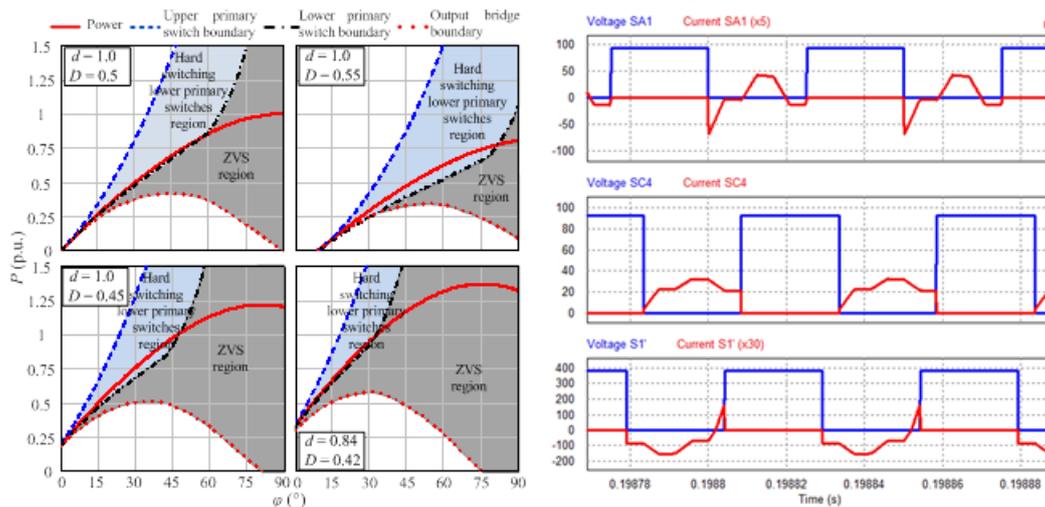
Já na Figura 5b é mostrado o resultado de simulação com o propósito de se observar a característica de comutação do conversor em análise. Foram adotados os seguintes valores para o conversor: tensão de entrada de 48V, tensão de grampeamento de 96V, tensão de saída de 380V e potência nominal de 3,5kW. Para obter estes valores foram adotados $\varphi = 30^\circ$, $D = 0,5$ e $d = 1,0$. Todas as chaves apresentam comutação suave exceto a primária inferior, que está no limite da transição entre comutação dissipativa e suave. Este resultado está de acordo com o observado da Figura 5a.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise de comutação suave para um conversor cc-cc trifásico isolado bidirecional alimentado em corrente com comutação suave. As

características de comutação apresentadas mostram que o comportamento da ponte de entrada é influenciada pelas condições instantâneas da corrente através do indutor cc, tornando sua análise mais complexa.

FIGURA 5 – Curvas de borda e resultado de simulação para a comutação das chaves.



FONTE: (Proprio autor)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNILAB e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

ZHAO, B., SONG, Q., LIU, W. e SUN, Y. **Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 8, pp. 4091-4106, Agosto 2014.

TAN, N. M. L., ABE, T. e AKAGI, H. **Design and Performance of a Bidirectional Isolated DC-DC Converter for a Battery Energy Storage System**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 3, pp. 1237-1248, Março 2012.

MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3th ed. John Wiley & Sons, Cap. 9. 2003.

FILHO, H. M. D. O. **Conversor CC-CC trifásico Isolado Bidirecional com comutação suave utilizando dual phase-shift e razão cíclica variável**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2015.

WANG, Z.; LI, H. A Soft Switching Three-phase Current-fed bidirectional DC-DC Converter With High efficiency Over a Wide Input Voltage Range. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 2012.