

CONVERSOR C.C.-C.C. ABAIXADOR MULTICELULAR PARALELO ENTRELAÇADO DE SEIS CÉLULAS

Maurício L. A. Dias¹ (IC), Clodualdo V. De Sousa (PQ)¹

¹Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá, Itabira 35903-087, Brasil;

Palavras-chave: Conversores de potência c.c-c.c.; Conversores multicelulares; Modulação por largura de pulso entrelaçada com phase-shifting.

Introdução

O conversor c.c. – c.c. abaixador (buck) multicelular paralelo entrelaçado é uma configuração que tem ganhado destaque devido à sua eficiência e capacidade de lidar com altas correntes, uma vez que a conexão em paralelo das células permite distribuir a potência entre elas, evitando sobrecarga em uma única célula. A Fig.1 apresenta a estrutura genérica básica desse conversor, que foi apresentado pela primeira vez na década de 70 [1].

A tecnologia de entrelaçamento, devido às suas vantagens intrínsecas, tem sido amplamente utilizada para aplicação de conversores c.c-c.c, como módulo regulador de tensão [2], [3], carregamento de bateria [4] e [5], sistema de armazenamento de energia [6] e inversor fotovoltaico, dentre outras.

No caso de sistemas fotovoltaicos, a técnica de operar conversores de forma intercalada melhora sua eficiência e confiabilidade. Eles são capazes de reduzir a ondulação da corrente e da tensão, o que resulta em uma saída de energia mais estável e confiável. Além disso, eles podem ajudar a mitigar o efeito do sombreamento parcial em arranjos fotovoltaicos e fornecer uma resposta transitória rápida.

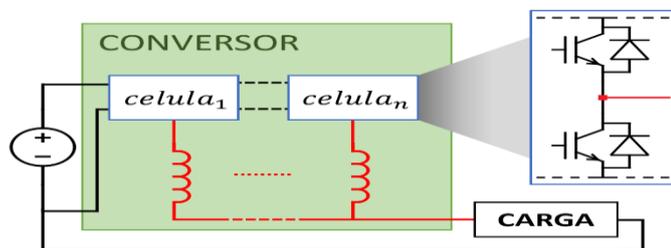


Fig. 1 Diagrama de um conversor buck genérico baseado em uma estrutura multicelular com n células em paralelo.

Já em sistemas de armazenamento de energia, como em baterias, os conversores entrelaçados desempenham um papel fundamental na conversão e

gerenciamento de energia entre a fonte de energia, por exemplo painéis solares, e a unidade de armazenamento. Eles garantem que a energia seja transferida de forma otimizada, minimizando perdas durante o processo.

Nesse contexto de conversores multicelulares para aplicação em campos diversos, pode-se citar algumas topologias de estruturas como a de capacitores flutuantes [7] e a de ponte-H em cascata [8]. Para esse trabalho, escolheu-se como objeto de estudo um conversor c.c- c.c abaixador multicelular entrelaçado de seis células em paralelo, sendo que o objetivo principal dele é analisar, comissionar e tornar operacional o sistema eletrônico.

Esse artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta o protótipo do conversor multicelular utilizado como bancada de testes. Na sequência, a Seção 3 mostra e discute os resultados experimentais obtidos com o sistema operando com controle de corrente em malha fechada. Por último, a Seção 4 traz as conclusões do trabalho realizado.

Metodologia

Durante o trabalho, com o objetivo de otimizar o tempo de execução, foram empregados os métodos:

- Pesquisa: Revisão teórica sobre eletrônica de potência aplicada ao projeto.
- Simulações: Estudo da topologia e das técnicas necessárias para sintetizar o funcionamento do Conversor c.c – c.c Interleaved, partido da topologia simplificada até o entrelaçamento final de 6 células.
- Protótipo: Revisão teórica sobre Instalações Elétricas Industriais e Comandos Elétricos, bem como projeto e montagem do protótipo.
- Comissionamento:
 - 1°-Correção de falhas previamente existentes nos circuitos eletrônicos da bancada;
 - 2°-Parametrização do DSP TMS320F2837xD e implementação do código de comando de todos os contadores presentes na bancada;
 - 3°-

Parametrização do PWM with phase-shifting; 4º- Parametrização, calibração e filtragem das medições importantes para a implementação do controle e operação do conversor multicelular c.c-c.c do tipo Buck entrelaçado - 6 célula em paralelo. 5º- Implementação e teste das interrupções, nas funções de proteção da operação do conversor; 6º Indenticação do Sistema para levantamento da Função de Transferência da planta e, a posteriori, o projeto do controlador PI pelo método da resposta em frequência.

Apresentação do protótipo

A configuração experimental é constituída por um conversor c.c- c.c abaixador multicelular entrelaçado de seis células em paralelo, sendo a bancada experimental apresentada na Fig. 2 Ressalta-se que a estrutura de chaves semicondutoras do sistema é a mesma apresentada na Fig. 1, com seis células.

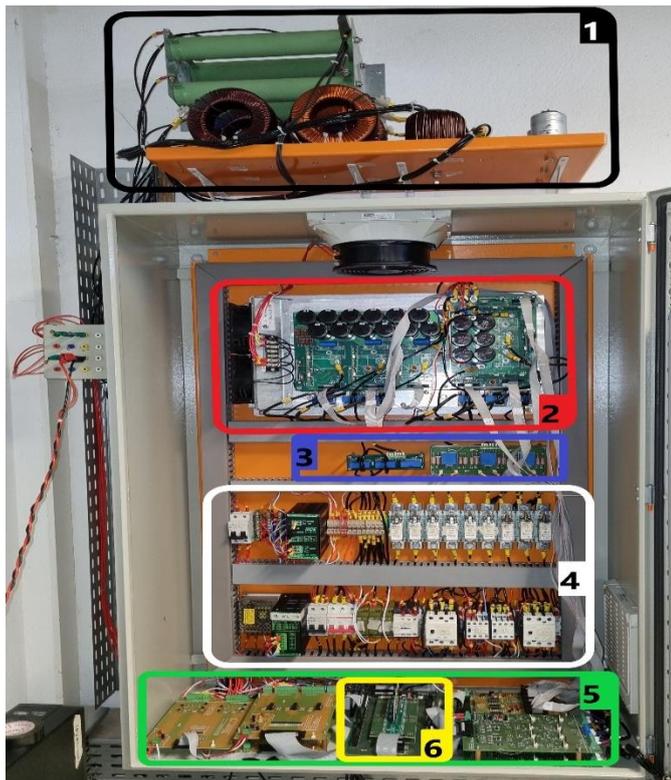


Fig.2 Foto do protótipo experimental do conversor buck.

Resultados e discussão

O primeiro teste realizado no protótipo descrito é a rotina de pré-carga do barramento c.c. implementada na bancada experimental. Na Fig. 3 é possível observar a dinâmica dessa rotina realizada durante a energização da

bancada. No instante inicial o sistema possui uma tensão residual no circuito dos gate drivers de 35V, como visto em '1'. Na sequência, em '2' é iniciada a rotina de carregamento com o retificador não controlado que alimenta o barramento c.c. sendo ligado à rede (no caso, um variavolt representando a rede ajustado de forma que a tensão retificada no barramento c.c. seja de 85V) através de resistores de pré-carga. Quando o barramento c.c alcança 70 V, o chopper é ligado e testado em '3'. Desde que esse teste de acionamento seja bem-sucedido, ele é desligado em '4' ao atingir a tensão de 50 V e a pré-carga continua. Quando o barramento atinge 70 V, a rede é conectada diretamente ao retificador, sendo os resistores de pré-carga contornados.

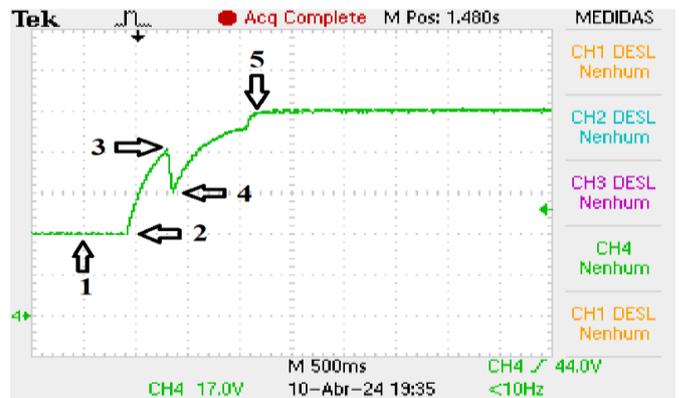


Fig. 3 Teste do chopper: pré-carga do barramento c.c.

Com o barramento c.c carregado, o banco de carga resistiva composto por 6 resistores de 50 Ω na configuração paralelo, resultando em uma resistência equivalente de 8,33 Ω é ligada a saída do conversor multicelular. Dessa forma, o sistema pode ser chaveado em malha fechada controlando a corrente de referência passada para cada uma das 6 células.

O projeto do controlador foi realizado com base na metodologia sugerida em [9]. A partir da resposta em frequência da função de transferência de malha aberta (MA) do sistema $MA\{Gma(s)\}$.

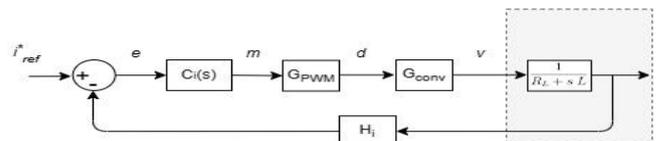


Fig. 4 Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle das correntes na célula.

$$MA\{Gma(s)\} = Ci(s) GPWM Gconv Gi(s) Hi \tag{1}$$

Onde:

$C_i(s)$ representa a função de transferência controlador PI e é dado por:

$$C_i(s) = \frac{0,281s + 2259}{s} \quad (2)$$

G_{pwm} = Função de transferência do PWM é dada por:

$$G_{pwm}(s) = \frac{1}{cpk} \quad (3)$$

$cpk = 1$; valor de pico a pico da portadora triangular. [9].

G_{conv} representa função de transferência do conversor, e é igual a tensão do barramento c.c.

$$H_i = 1; \quad (4)$$

$G_i(s)$ representa a função de transferência da planta:

$$G_i(s) = \frac{1}{0,00365s + 8,83} \quad (5)$$

É possível estabelecer critérios que assegurem sua estabilidade na operação em malha fechada. O objetivo é impor que a $MA\{G_{ma}(s)\}$ possua ganho unitário (0dB) e margem de fase projetada MF (60°), frequência de cruzamento $\omega_c = 2\pi f_s/10 = 7540$ rad/s. Com isso, pode-se garantir a estabilidade do sistema em malha fechada, uma vez que $MF > 0$, admitindo ainda sobressinais de até aproximadamente 10% nas correntes. Esta análise é válida porque a Função de transferência de malha fechada do sistema é de segunda ordem, com fator de amortecimento ζ menor do que 0,7 [10].

A Fig.5 apresenta o diagrama de Bode do sistema em malha aberta. Pode-se verificar que para o ganho de 0 dB o sistema apresenta 60° de margem de fase.

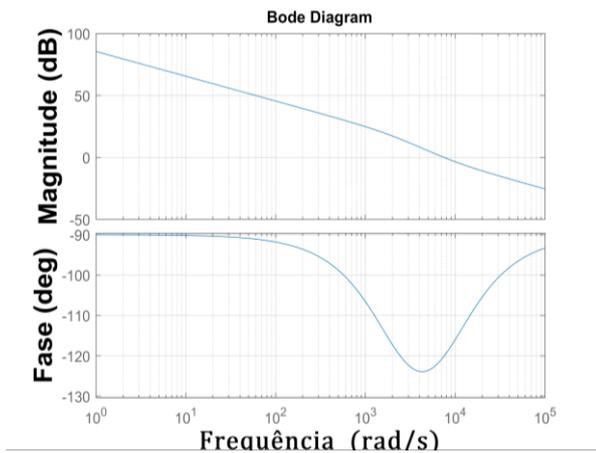


Fig. 5 Resposta em frequência – Malha aberta.

Na seqüência, observa-se o controlador PI atuando para controlar uma corrente de referência de 6 A em uma célula. O desempenho das demais células são semelhantes, uma vez que se trata do mesmo sistema (chaves semicondutoras e indutores do filtro de saída iguais) replicado em 6 células ligadas em paralelo. Baseado no projeto do controlador por margem de ganho e margem de fase, o ganho proporcional e integral foram

obtidos: $k_p = 0,2810$ e $k_i = 2259,2$. A partir desses ganhos a resposta ao degrau de 6 A por célula, foi obtida na Fig. 6. Analisando a o desempenho da resposta, observa-se um sobressinal de 7% e tempo de acomodação de aproximadamente 1,7ms.

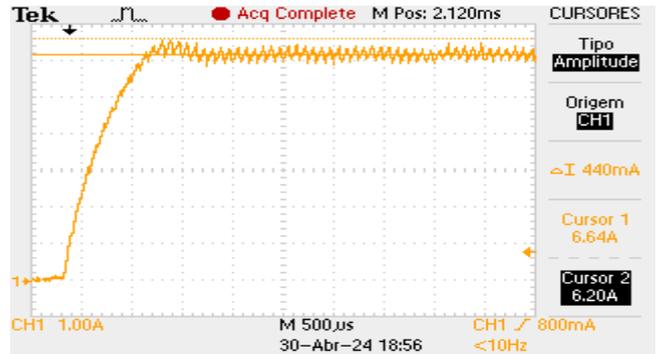


Fig. 6 Corrente fornecida por uma das células do conversor.

Na Fig. 7 , observa-se o comportamento da corrente e tensão no instante em que é conectado a carga em degral. No (CH1, amarelo) do osciloscópio a medição da corrente total na carga, no (CH2, azul) a tensão na carga, e no (CH3, roxo) a tensão no barramento. Observa-se também um afundamento de tensão do barramento no instante em que é conectado a carga em degral , de 85 V para 75 V, explicado pelo fato de que o retificador usado no protótipo é um retificador trifásico não controlado.

Ao confrontar o ripple de corrente nas células presente na Fig. 6 com o ripple de corrente na saída presente Fig. 7 nota-se uma visível redução. Ou seja, enquanto o ripple de corrente nas células é de aproximadamente 400 mA (40%), o ripple de corrente na carga é de 280 mA (4,66%).

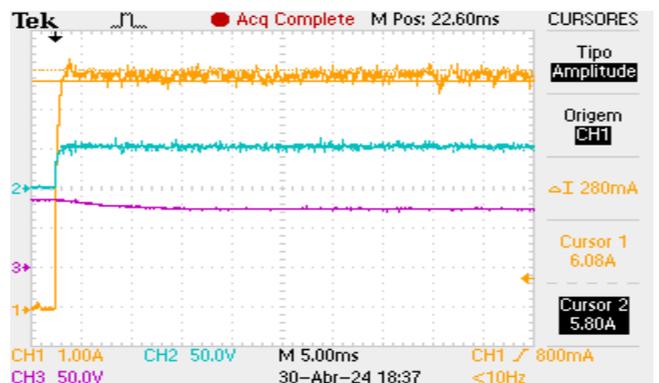


Fig. 7 Resposta dinâmica para carga em degrau.

Portanto, corrobora uma das principais vantagens

dos sistema multicelulas que é dividir a corrente entre as células, permitindo trabalhar com potências mais elevadas, e reduzir o ripple da corrente circulando pela carga e, portanto, os elementos do filtro podem operar com elementos passivos menos volumosos e mais leves.

Ademais, com a marcação do cursor de tempo na Fig. 8, é possível, certificar a defasagem entre a corrente nas células. Ou seja, como o período de chaveamento é de $83,33\mu\text{s}$ em um ciclo completo de 360° , temos que $13,88\mu\text{s}$ equivale a 60° de defasagem entre as cada uma das correntes. Na medição observa-se $14\mu\text{s}$ de defasagem entre IL1 no CH1, azul, e IL2 no CH3, roxo.

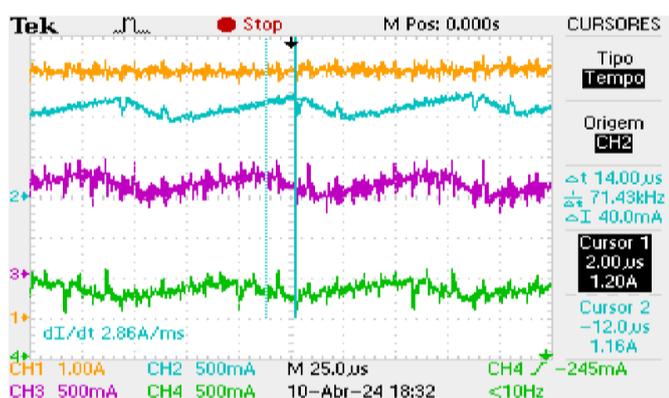


Fig. 8 Ripple de corrente I_{total} na carga (CH1, amarelo), IL1(CH2, azul), IL2(CH3, roxo) e IL3(CH4, verde).

Conclusões

Este trabalho apresentou o comissionamento de um protótipo de um conversor c.c.-c.c. entrelaçado de seis células. Pode-se concluir que o objetivo principal de analisar, comissionar e tornar o sistema operacional foi alcançado. Os sistemas auxiliares de pré-carga e o chopper de proteção atuam de acordo com o projeto realizado. O sistema de controle do buck foi projetado e o controlador implementado apresentou resposta dinâmica compatível com os critérios de projeto e erro de estado estacionário negligenciável.

Agradecimentos

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) que concedeu apoio financeiro à minha pesquisa. E, agradeço à UNIFEI pela qualidade dos recursos disponíveis no laboratório de Geração de Energia, no campus Itabira/MG.

Ao orientador, professor Clodualdo Venicio de Sousa, gostaria de expressar minha profunda gratidão pela oportunidade. E, aos meus orientadores de TCC,

Tiago de Sá e Guilherme Rezende pela ajuda e paciência.

Referências

- [1] Garth, D. R.; Muldoon, W. J.; Benson, G. C.; Costague, E. N. Multi-phase, 2-kilowatt, high-voltage, regulated power supply. In: IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1971, Pasadena. Anais [...] Pasadena: IEEE, 1971. p. 110–116. DOI: 10.1109/PESC.1971.7069141.
- [2] Agrawal, J.; Kastha, D.; Patra, A.; Culpepper, B. An improved control scheme for multiphase buck converter circuits used in voltage regulator modules. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND DRIVES SYSTEMS, 2005, Kuala Lumpur. Anais [...] Kuala Lumpur: IEEE, 2005. p. 418–423. DOI: 10.1109/PEDS.2005.1619723.
- [3] Xu, P.; Wei, J.; Lee, F. C. Multiphase coupled-buck converter: a novel high efficient 12 V voltage regulator module. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 18, n. 1, p. 74–82, jan. 2003. DOI: 10.1109/TPEL.2002.807082.
- [4] Kelkar, S.; Henze, C. P. High performance three-phase unity power factor rectifier using interleaved buck-derived topology for high power battery charging applications. In: ANNUAL POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 32., 2001, Vancouver. Anais [...] Vancouver: IEEE, 2001. p. 1013–1018. DOI: 10.1109/PESC.2001.954252.
- [5] Sah, A.; Chaudhary, K.; Ratnam, V. V. Non-isolated multiphase buck-boost converter design for electric vehicle applications. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING RESEARCH AREAS: MAGNETICS, MACHINES AND DRIVES, 2014, Kottayam. Anais [...] Kottayam: IEEE, 2014. p. 1–6. DOI: 10.1109/AICERA.2014.6908181.
- [6] Kloetzl, J.; Gerling, D. An interleaved buck-boost-converter combined with a supercapacitor-storage for the stabilization of automotive power nets. In: IEEE VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE, 2011, Chicago. Anais [...] Chicago: IEEE, 2011. p. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6042982.
- [7] Meynard, T. A.; Foch, H. Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters. In: ANNUAL POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 23., 1992, Toledo. Anais [...] Toledo: IEEE, 1992. p. 397–403. DOI: 10.1109/PESC.1992.254717.
- [8] Peng, F. Z.; Lai, J. S.; McKeever, J. W.; VanCoevering, J. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static VAR generation. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 32, n. 5, p. 1130–1138, out. 1996. DOI: 10.1109/28.536875
- [9] Buso, S.; Mattavelli, P. Digital control in power electronics. 2. ed. San Rafael, Calif.: Morgan & Claypool Publishers, 2015. (Synthesis lectures on power electronics, n. 7).
- [10] NISE, N. S. Engenharia de Sistemas de Controle. [S.l.]: LTC, 2017.