

CONVERSORES MULTICELULARES DE ALTA BANDA PASSANTE PARA INTEGRAÇÃO DE FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Maurício Lage Almeida Dias¹ (IC), Clodualdo Venicio De Sousa (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Conversores. Multicelulares. TMS320F28379D. Comissionamento. PWM with phase-shifting.

Introdução

A redução de custos das tecnologias de baterias e o alto nível de conexão da geração de energia fotovoltaica e eólica nos sistemas de energia elétrica contribuíram para o crescimento do sistema de armazenamento de energia por bateria em todo o mundo (REN21, 2020). Portanto, estudar os conversores de potência utilizados no processo de integração de sistema de geração de energia alternativa com a rede elétrica é medida que se faz necessária.

O estudo apresentado neste trabalho, no geral, visa contribuir com a produção científica acerca das técnicas de conversão eletrônica da energia em sistemas de armazenamento de energia, isto é, apresentar os estudos teóricos, resultados experimentais e etapas do comissionamento de um protótipo de Conversor Multicelular de Alta Banda Passante para Integração de Fontes de Geração de Energia.

Para a execução do projeto, na primeira etapa do programa de Iniciação Científica, foi projetado um protótipo de um conversor CC-CC multicelular do tipo Buck com 6 células e montado. Nesta segunda etapa do programa de Iniciação Científica, iniciou-se o processo de comissionamento do protótipo.

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. Projeto e montagem do protótipo.
- Comissionamento: Correção de falhas previamente existentes nos circuitos eletrônicos da bancada; parametrização do DSP TMS320F2837xD e implementação do código de comando de todos os

contatores presentes na bancada; parametrização do PWM with phase-shifting; 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 e, por fim a parametrização e testes dos sistemas de proteção gerais da bancada, que a propósito é o ponto atual que o projeto se encontra.

Apresentação do Protótipo de 10kVA

Na Figura 1 está parte do diagrama elétrico da bancada que foi base de estudos para o comissionamento, isto é, os circuitos eletrônicos de processamento, condicionamento, comando e medições. Já na Figura 2 observa-se componentes que formam o protótipo montado que tem por finalidade os experimentos ligados ao projeto. Em suma, para implementar o conversor multicelular foi utilizado um módulo de potência da Semikron (SEMISTACK – IGBT). Para a aquisição dos sinais elétricos estão instalados no protótipo os sensores de tensão e corrente da LEM. Para condicionamento de sinais elétrico são usadas as placas de circuito impresso Tupã System, isto é, placas de entradas digitais, placa de entradas analógicas, placa de saída para os relés, placa do PWM e a placa mãe onde é instalado o DSP. Por fim, os elementos de proteção, comando, sinalização, filtro, alimentação e ventilação. A bancada também possui um terminal para programação, placa externa para aquisição de sinais de tensão em pontos estratégicos dos circuitos e instrumentos para análise de resultados.

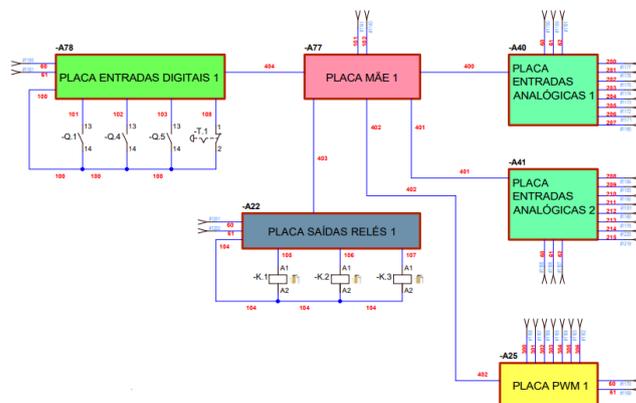


Figura 1 – Circuitos eletrônicos do projeto.

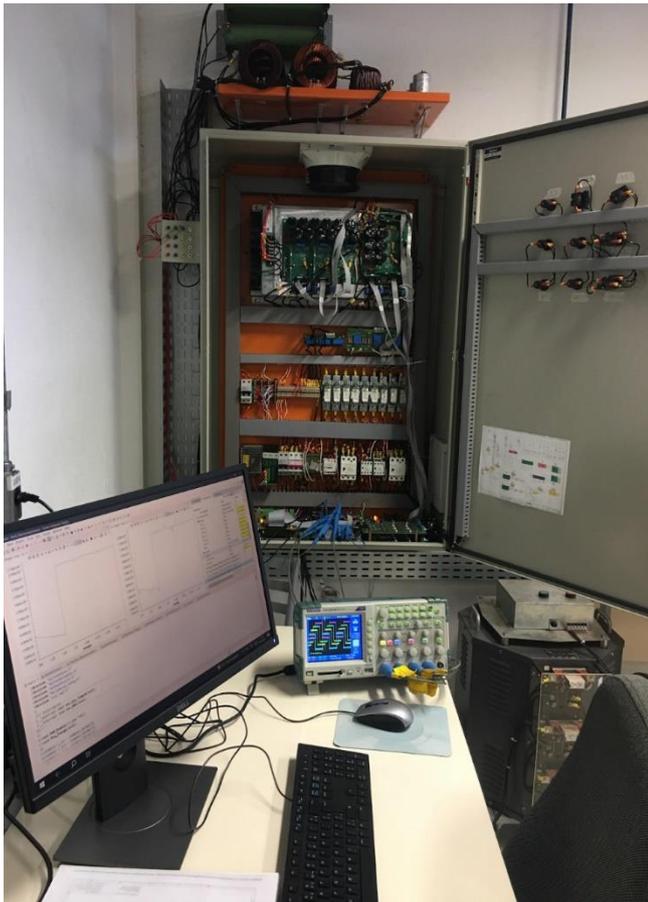


Figura 2 - Bancada desenvolvida para estudos de Conversores Multicelulares De Alta Banda Passante Para Integração De Fontes De Geração De Energia.

O esquemático mostrado na Figura 3 ilustra uma etapa primordial para o comissionamento, haja vista que é a partir desse mapeamento que toda parametrização ligada ao DSP foi elaborada. Uma vez realizada todas as parametrizações de comunicação do DSP/Placa Mãe com a bancada, já foi possível conseguir alguns resultados definitivos para o avanço do projeto. Os resultados mais importantes estão apresentados em sequência.

A Figura 4 e 5 correspondem a gravação da tela do osciloscópio enquanto estava sendo realizado a leitura do Testes do PWM *with phase-shifting*. PWM1 na cor laranja, PWM2 na cor azul, PWM3 na cor roxa e PWM4 na cor verde. Na Figura 9, temos repetidos os PWM3 e PWM4, e acrescentados os PWM5 na cor laranja e PWM6 na cor azul.

Resultados e Discussão

Na Figura 3, é apresentada pinagem do kit DSP TMS320F2837xD instalado na bancada.

Placa de PWM			Placa de entradas analógicas_placa1			Placa de saída para os relés		
Descrição	Pino F28377D	MCU pin	Descrição	Pino F28377D	MCU pin	Descrição	Pino F28377D	MCU pin
PWM A1	Pin 49	GPIO 00	iL0	Pin 18	ADC-B2	K1	Pin 110	GPIO 59
PWM B1	Pin 51	GPIO 01	iL1	Pin 20	ADC-B3	K2	Pin 108	GPIO 58
PWM A2	Pin 53	GPIO 02	iL2	Pin 26	ADC-B5	K3	Pin 106	GPIO 57
PWM B2	Pin 55	GPIO 03	iL3	Pin 17	ADC-A3			
PWM A3	Pin 57	GPIO 08	iL4	Pin 21	ADC-A4			
PWM B3	Pin 59	GPIO 09	iL5	Pin 23	ADC-A5			
RST CHOPPER	Pin 81	GPIO 27						
CHOPPER	Pin 87	GPIO 33						
ERRO MSC	Pin 89	GPIO 40						
ERRO GSC	Pin 91	GPIO 41						
ERRO CHOPPER	Pin 99	GPIO 48						
PWM A4	Pin 61	GPIO 10						
PWM B4	Pin 63	GPIO 11						
PWM A5	Pin 67	GPIO 16						
PWM B5	Pin 69	GPIO 17						
PWM A6	Pin 71	GPIO 18						
PWM B6	Pin 73	GPIO 19						

Placa de entradas digitais			Placa de entradas analógicas_placa2		
Descrição	Pino F28377D	MCU pin	Descrição	Pino F28377D	MCU pin
status Q1	Pin 154	GPIO 87	io CARGA	Pin 31	ADC-C2
status Q2	Pin 146	GPIO 79	i borne 73	Pin 34	ADC-D2
status Q5	Pin 150	GPIO 83	i disponivel	Pin 33	ADC-C3
status T1	Pin 148	GPIO 81	v disponivel	Pin 42	ADC-D5
			vo CARGA	Pin 36	ADC-D3
			LINK DC	Pin 40	ADC-D4

Figura 3 – Mapeamento da pinagem do DSP

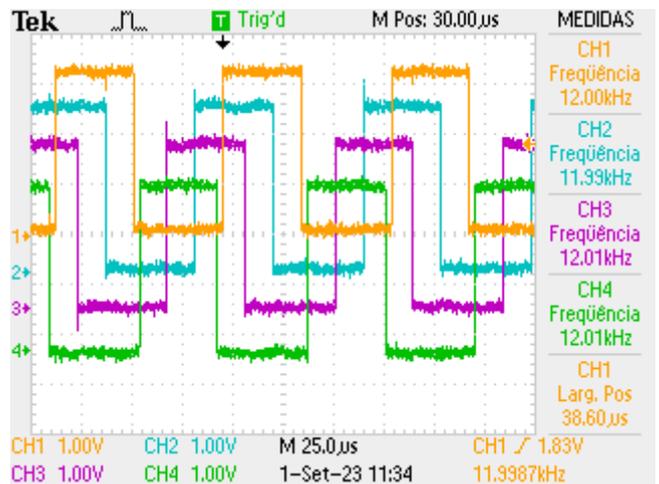


Figura 4 - PWM1, PWM2, PWM3 e PWM4.

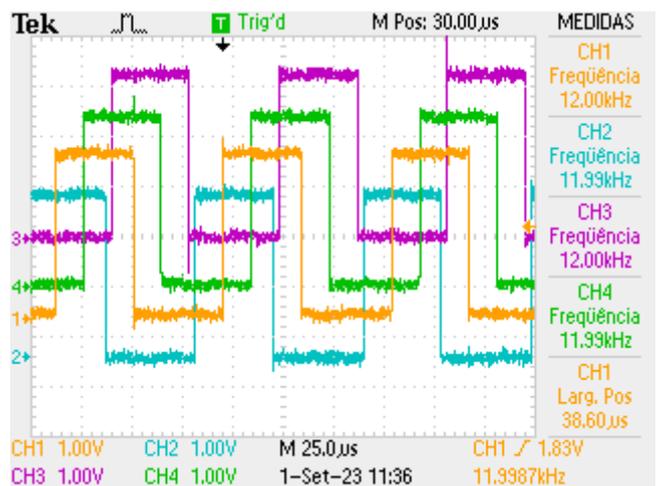


Figura 5 - PWM3, PWM4, PWM5 e PWM6.

Na Figura 6, observa-se o teste do Chopper sempre executado durante a rotina de pré-carga. Esse teste é fundamental para a operação da bancada, pois é

parte da função de proteção de sobretensão. O teste é realizado com as seguintes referências passadas no código para acionamento do Gate-Drive do Chopper:

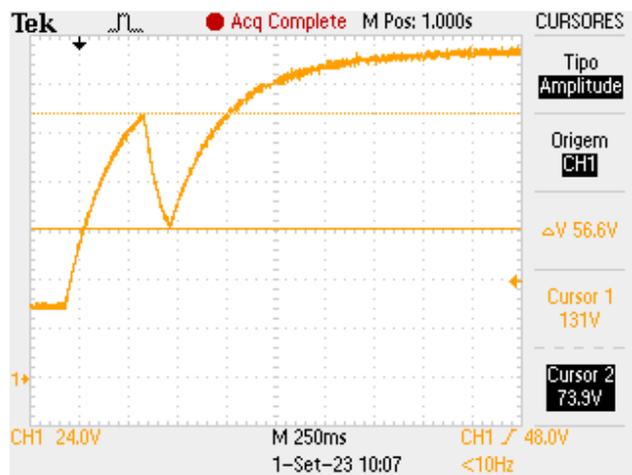


Figura 6 – Teste do chopper.

De início o sistema possui uma tensão residual de 30V proveniente do circuito das chaves do conversor. Ao habilitar o teste, o circuito de alimentação é fechado nos resistores de pré-carga onde a tensão sobe até o valor de 130V passado como referência na lógica do teste. A partir deste instante o Gate-Drive do Chopper recebe o comando para ligar e assim que a tensão cai a 70V, que também foi uma referência passada na lógica do teste, o mesmo recebe o comando para desligar e o transitório de pré-carga é retomado até atingir o regime estacionário em 160V. A razão para este teste é de que se este foi concluído com sucesso, sabemos que o mesmo está certamente disponível caso seja necessário acionar o Chopper dentro das sub-rotinas de proteção. Ainda na Figura 6 é possível observar que o nível de tensão medido está de acordo com os parâmetros escritos no código. Essa precisão só foi possível graças a filtragem de ruídos.

A filtragem do ruído da medição de tensão foi feita utilizando um filtro digital de primeira ordem do tipo Butterworth com uma frequência de corte de 150Hz. A implementação deste filtro foi uma solução eficaz na implementação das funções que dependiam da medição de tensão e que até então estavam atuando de forma equivocada por causa destes ruídos. A comparação entre a medição não filtrada e a filtrada, são observadas respectivamente nas Figuras 7 e 8. Os gráficos apresentados nas Figuras 7 e 8 foram retirados diretamente do ambiente de desenvolvimento Code Composer Studio, onde foi possível monitorar, neste caso, a tensão medida no eixo das ordenadas versus as amostras que vão sendo atualizadas continuamente no eixo das abscissas. Vale a pena destacar que, a tensão em regime estacionário em torno de 193V graficada nas

Figuras 7 e 8, não está em coerência com a medida no osciloscópio na Figura 6, devido ao fato de que nesta fase de testes utilizamos um Varivolt para alimentação da bancada ao invés de ligarmos diretamente na rede, e no dia em que foram capturados os gráficos da tela do Code Composer Studio, a tensão do Varivolt tinha sido reajustada.

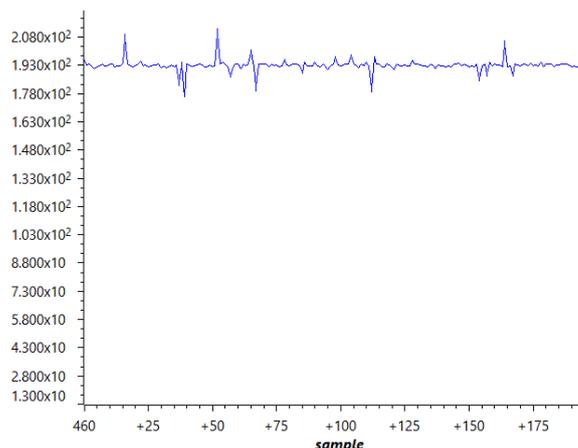


Figura 7 – Medição de tensão sem filtragem.

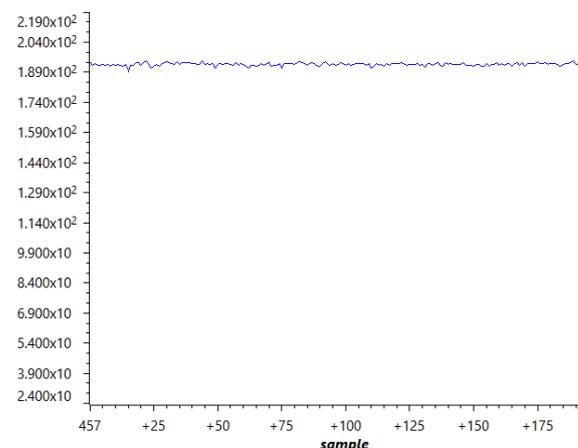


Figura 8 – Medição de tensão após filtragem.

Por fim, na Figura 9 observa-se o painel de medições instantâneas da corrente em cada uma das seis células (IL [1:6]) e na carga (Io), bem como as medições de tensão no barramento CC sem a filtragem (Vdc_raw), tensão no barramento CC após a filtragem (Vdc) e tensão na carga (V0).

Ainda sobre a Figura 9, acerca dos valores de medição exibidos, vale destacar que a captura de tela foi retirada com a bancada energizada, porém como o controle ainda não foi totalmente implementado, de fato, não podemos chavear e tampouco conectar a carga e, portanto, os valores de corrente nas seis células (IL [1:6]) e de corrente (Io) e tensão na carga (V0) são zero. Embora, que na figura ainda mostre valores muito pequenos ao

invés de zero, esses valores são ruídos de medição e são considerados como toleráveis. Além disso, é possível notar na medição a tensão residual no barramento CC em torno de 30V presente no circuito das chaves do conversor. Ou seja, a finalidade desta figura é apontar o monitoramento de todas as medições já corretamente calibradas.

measI	struct <unna...	il_1=-0.0664295033;il_2=-0.009523...
il_1	float	0.0476167239
il_2	float	-0.0761904791
il_3	float	0.0476167239
il_4	float	-0.0764322951
il_5	float	-0.0954752639
il_6	float	3.49904227e-42 (DEN)
Io	float	0.00476248469
measV	struct <unna...	Vo=-0.5859375;Vdc_raw=31.328332...
Vo	float	0.588235319
Vdc_raw	float	31.5133343
Vdc	float	32.4876595

Figura 9 – Painel de medições de correntes e tensões.

Conclusões

O projeto ainda se encontra na etapa de comissionamento restando ainda algumas parametrizações. No entanto, foi possível notar uma gama de soluções já implementadas, ou seja, soluções como as medições de corrente e tensão calibradas, monitoramento digital do status da bancada, teste do chopper, testes dos 6 PWM's prontos para chavear os Gate-drivers, filtragem de ruídos e comando completo dos contadores da bancada. Sobretudo, a implementação das funções de proteção, que agora são o alvo do trabalho, essa é uma fase muito delicada e deve ser realizada e testada uma por uma com atenção, pois são essas proteções que vão garantir a operação segura da bancada, evitar retrabalho e prejuízo financeiro.

Como proposta para a finalização do projeto, resta os seguintes objetivos:

- ❖ Finalizar a parametrização do sistema de proteção e parametrização do sistema de inicialização do conversor multicelular c.c - c.c. do tipo Buck entrelaçado – 6 células em paralelo.
- ❖ Implementação do sistema de controle do conversor multicelular c.c - c.c. do tipo Buck entrelaçado – com 2, 4, e 6 células em paralelo utilizando o kit de DSP TMS320F2837xD da Texas Instruments.
- ❖ Confecção de artigos para submissão em eventos nacionais.
- ❖ Confecção de relatórios, artigos e apresentação para eventos internos -UNIFEI.

Agradecimento

Agradeço o orientador, professor Clodualdo Venicio de Sousa, pela confiança e por ter oportunizando

a continuidade dos meus trabalhos no projeto por mais um ano.

Agradeço em especial ao professor Tiago de Sá Ferreira, pela disponibilidade praticamente diária em se reunir comigo no laboratório e por contribuir de forma crucial na programação do microcontrolador, bem como com a análise de problemas físicos que foram surgindo durante o comissionamento da bancada.

Além disso, agradeço também ao professor Waner Wodson Aparecido Goncalves Silva, pelos frequentes desembarços técnicos ligados ao DSP TMS320F2837xD e ao conversor.

Por fim, agradeço à UNIFEI pela qualidade dos recursos disponíveis e à FAPEMIG que concedeu apoio financeiro à minha pesquisa.

Referências

REN21. Renewables 2020 Global Status Report. Tese (Doutorado) — Paris: REN21 Secretariat, 2020

F28379D LaunchPad. Direção: Waner Wodson. Produção: Waner Wodson. Roteiro: Waner Wodson. Fotografia de Waner Wodson. Gravação de Waner Wodson. [S. l.]: YOUTUBE, 2022. Disponível em: <https://youtube.com/playlist?list=PLzihEyW-5V70NVsqZDdUhWH5Qojw0rLrZ>. Acesso em: 6 set. 2022.

Thierry Meynard, Tiago Sa Ferreira, Guilherme Monteiro Rezende, Lenin Martins Ferreira Morais, Victor Flores Mendes, et al.. Novel Multirate Modulator for High Bandwidth Multicell Converters. IEEE Transactions on Power Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, pp.1- 1. ff10.1109/TPEL.2020.3032118ff. fffhal-02999716f

XAVIER, L.S. A Comprehensive Analysis of Design and Performance of Power Converters for Battery Energy Storage Systems. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://ppgee.ufmg.br/defesas/1562D.PDF>. Acesso em: 6 set. 2022.

Yang, X.; Zong, S.; Fan, G. Analysis and validation of the output current ripple in interleaved buck converter. In: 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017.