

OPERAÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM PARALELO COM A REDE ELÉTRICA

Maria J. F. Ramos¹ (IC), Clodualdo V. Sousa¹ (PQ), Vitor G. Neves² (PG)

¹Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira, ²Universidade Federal de Minas Gerais.

Palavras-chave: Baterias de chumbo-ácido. BESS. Conversor bidirecional. Conversor de dois estágios.

Introdução

Devido à alta dependência em uma única fonte de geração de energia, a matriz energética brasileira apresenta dificuldades de atender a demanda em momentos de escassez hídrica, visto que as hidrelétricas são responsáveis por cerca de 56,8% da energia total produzida no país (EPE, 2022). Dessa forma, para garantir o abastecimento energético e minimizar os problemas causados pelas gerações intermitentes, faz-se necessário a diversificação da produção de energia elétrica, de modo que sempre haja potência disponível na rede e qualidade de energia.

Porém, a alteração da geração energética impacta diretamente a estabilidade transitória da rede elétrica, já que sem a energia cinética armazenada nos geradores não há naturalmente potência para restaurar o equilíbrio do sistema elétrico frente a uma queda de frequência causada por um distúrbio (Sauaia, 2020).

Assim, para variar a produção de energia elétrica e evitar a dependência da geração hidráulica, estuda-se os sistemas de armazenamento de energia a fim de aumentar a confiabilidade do sistema elétrico a qualquer variação dos parâmetros nominais do sistema interligado nacional (da Silva, 2020). Nesse sentido, os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS, do inglês “battery energy storage systems”) vêm ganhando notoriedade em função da exigência de uma fonte de energia despachável e da redução de custos das tecnologias de baterias.

Dessa forma, o estudo propõe o projeto dos controladores e a implementação de um conversor para um BESS bidirecional capaz de operar como formador de rede ou supridor de rede. Para isso, elaborou-se a modelagem e controle dos conversores envolvidos no BESS a fim de gerenciar o processo de carga e descarga das baterias de chumbo-ácido e analisar a caracterização do comportamento em regime permanente de um protótipo de 10 kVA presente no Laboratório de Geração de Energia UNIFEI - Campus Itabira.

Metodologia

A implementação do sistema de armazenamento de energia dispõe de um conversor de dois estágios com chaves IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), estruturado conforme a Figura 1. Operando o conversor bidirecional, têm-se o intuito de realizar duas ações: carregar do banco de baterias a partir da energia da rede e injetar energia na rede oriunda do banco de baterias. Assim, em função da energia necessária na rede e da sua condição de carga, o conversor altera o seu modo de operação a fim de atender as demandas de potência e os serviços auxiliares (Xavier, 2020).

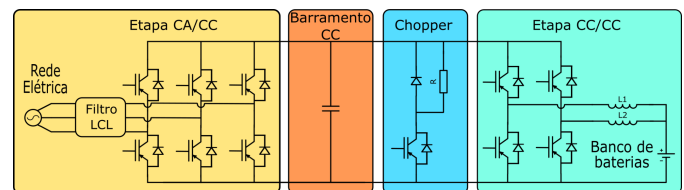


Figura 1 - Estrutura do conversor de dois estágios.

O estágio c.c/c.a é formado por três braços do conversor, ligados a um filtro passa-baixas que atenua as altas frequências da ação de chaveamento, com a função de realizar a conversão da corrente contínua do barramento c.c em corrente alternada da rede elétrica. Além disso, a operação como retificador PWM realiza, por meio da conversão c.a/c.c, a extração de potência da rede para o carregamento do banco de baterias. A operação como inversor, retira energia presente no barramento c.c e injeta na rede elétrica conforme as condições operacionais de tensão e frequência. Para compreender o funcionamento da parcela c.a/c.c e fazer sua modelagem matemática, simplificou-se a estrutura conforme a Figura 2, de modo que, dependendo do sentido de potência desejado, alterna-se simbolicamente a chave seletora.

O estágio c.c/c.c, por sua vez, é formado por dois braços do conversor conectados em paralelo que atuam como elevadores ou abaixadores de tensão. A utilização deste conversor multicelular tem a vantagem de atenuar os ripples presentes nas tensões e correntes de entrada e saída, melhorando a eficiência e a confiabilidade.

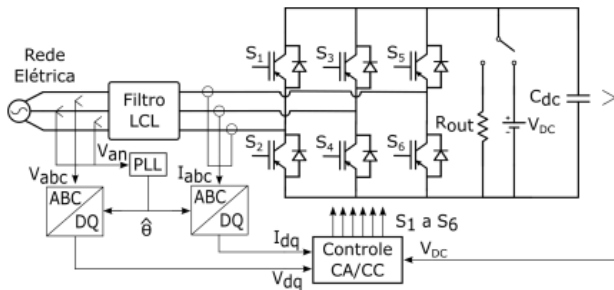


Figura 2 - Estrutura do conversor c.a./c.c.

Dessa forma, os braços do conversor operam de dois modos. A operação como *boost* realiza a conversão c.c/c.c elevadora de tensão, removendo a energia presente nas baterias. A operação como *buck* realiza a conversão c.c/c.c abaixadora de tensão, injetando a potência proveniente da rede nas baterias e atendendo aos devidos critérios de carregamento das mesmas. Assim, para analisar o comportamento do conversor, simplificou-se a estrutura em apenas a parcela que tem contato direto com o banco de baterias, vista na Figura 3, sendo que para contemplar as configurações *boost* e *buck* utilizou-se simbolicamente uma chave para comutar entre a operação para o carregamento das baterias e para a injeção de potência na rede.

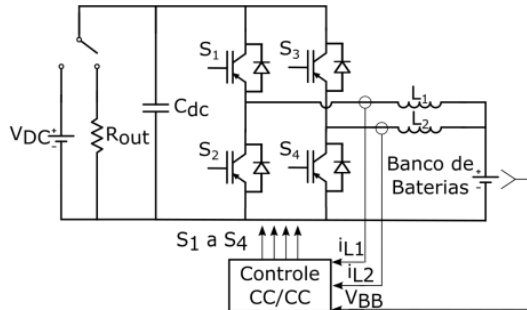


Figura 3 - Estrutura do conversor c.c/c.c.c.

Nesse sentido, para a realização dos estudos, projetou-se o protótipo de 10 kVA no laboratório de Geração de Energia Elétrica da Unifei-Campus de Itabira, apresentado na Figura 4. O sistema de controle é composto pela FPGA sbRIO-9606 e o processamento do controle sbRIO 9606 da National Instruments. Além disso, são utilizadas 12 baterias estacionárias Freedom DF4100 em que cada bateria possui capacidade de fornecimento de 240 Ah e tensão de operação de 12 V, de modo que ligadas em série totalizam uma tensão de 144 V no banco de baterias. Os parâmetros de cada estágio do conversor bidirecional estão presentes na Tabela 1.

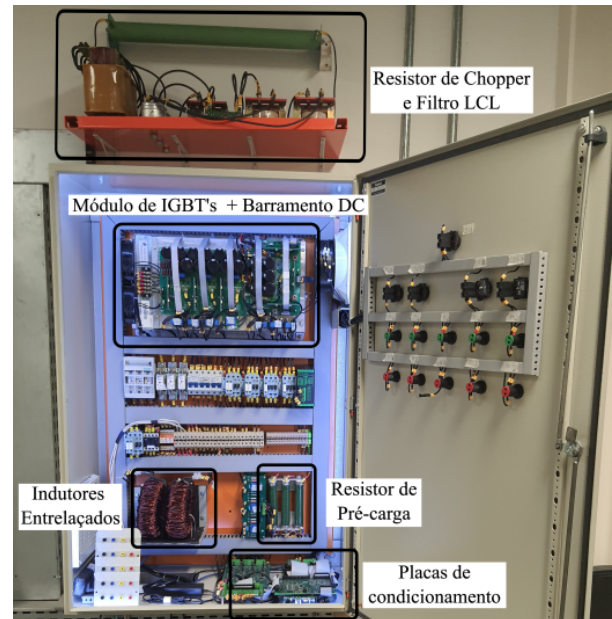


Figura 4 - Montagem experimental do BESS.

Tabela 1 - Parâmetros do sistema.

Conversor	Parâmetros	Valor
c.a./c.c.	Potência máxima	10kVA
	Tensão nominal c.a. (V_N)	220V
	Frequência fundamental (f_{rede})	60Hz
	Frequência de chaveamento (f_{sw})	5100Hz
	Tensão c.c. nominal (V_{DC})	400V
	Indutância do filtro (L_1 e L_2)	2mH
	Resistência do indutor (R_1 e R_2)	0,015Ω
	Capacitância do filtro (C_f)	20μF
	Resistência de amortecimento (R_f)	1,8Ω
c.c./c.c.	Frequência de chaveamento	5100Hz
	Indutância c.c./c.c. (L_1)	3,761mH
	Indutância c.c./c.c. (L_2)	3,938mH
	Tensão nominal das baterias (V_{BB})	144V

Assim, para o controle das etapas c.c/c.a e c.c/c.c., utilizou-se os parâmetros da Tabela 2. Para os conversores *buck* e *boost*, os ganhos dos controladores de corrente foram modelados pela técnica de lugar das raízes e, para a tensão, adotou-se a resposta em frequência. No lado c.a, por sua vez, utilizou-se as funções de transferência da corrente de eixo direto e quadratura e, alocando o zero do controlador de forma a anular o polo da planta, obteve-se os ganhos dos controladores. Para o controle da tensão do barramento, utilizou-se a função de transferência, por meio do qual se compara o denominador com a equação característica de um sistema de segunda ordem.

Com o intuito de analisar o comportamento do sistema em regime permanente, realizou-se um conjunto de testes variando os principais atributos do sistema a fim de avaliar impactos no funcionamento do sistema e os principais atributos da operação.

Tabela 2 - Parâmetros dos controladores.

Modo	Operação	Parâmetros	Valor
Buck	Corrente	$K_{pc_{buck}}$	$0,0456 \text{ A}^{-1}$
		$K_{ic_{buck}}$	$88,3536 \text{ s/A}$
	Tensão	$K_{pv_{buck}}$	$0,6674 \text{ A/V}$
		$K_{iv_{buck}}$	$264,9444 \text{ As/V}$
Boost	Corrente	$K_{pc_{boost}}$	$0,08 \text{ A}^{-1}$
		$K_{ic_{boost}}$	$234,5009 \text{ s/A}$
	Potência	$K_{pP_{boost}}$	$1,7782 \text{ } \mu\text{A/W}$
		$K_{iP_{boost}}$	$1,6779 \text{ As/W}$
c.c./c.a.	Corrente	$K_{pc_{AC}}$	$2,9751 \text{ V/A}$
		$K_{ic_{AC}}$	$214,8849 \text{ Vs/A}$
	Tensão do barramento	$K_{pvdc_{AC}}$	$0,0606 \text{ A/V}$
		$K_{ivdc_{AC}}$	$0,4038 \text{ As/V}$
	Potência	$K_{pQ_{AC}}$	$0,20621 \text{ } \mu\text{A/V}_{Ar}$
		$K_{iQ_{AC}}$	$0,0194 \text{ As/V}_{Ar}$

Resultados e discussão

O primeiro experimento a ser analisado é a operação do sistema sem carga, tal que ocorre de 0,004 a 0,165 minutos. Nessa condição o barramento é mantido em 400 V e toda potência que flui pelo conversor c.c./c.a. tem como finalidade suprir as perdas e manter a tensão do barramento, conforme as Figuras 5.

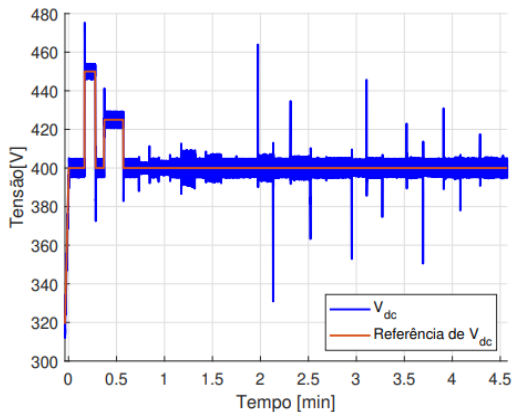


Figura 5 - Tensão do barramento c.c.

Observou-se que a potência que flui pelo sistema é pequena e puramente ativa, cerca de 24,71 W. Constatou-se também uma diferença de tensão entre o ponto de acoplamento comum (PAC) e a sintetizada pelo conversor c.c./c.a. para promover esse fluxo e alimentar o filtro LCL, como pode ser observado na Figura 6, apresentando $\Delta V_d = -2,7 \text{ V}$ e $\Delta V_q = -9,44 \text{ V}$, resultando assim em $I_d = 0,096 \text{ A}$. Ressalta-se que, devido a presença de um transformador de acoplamento entre o filtro e a rede, a tensão no PAC não é constante, sendo impactada pelo maior fluxo de potência, conforme a Figura 6.

O segundo experimento é o fornecimento de potência reativa indutiva pelo conversor c.c./c.a, tal que ocorre de 0,738 a 1,057 minutos.

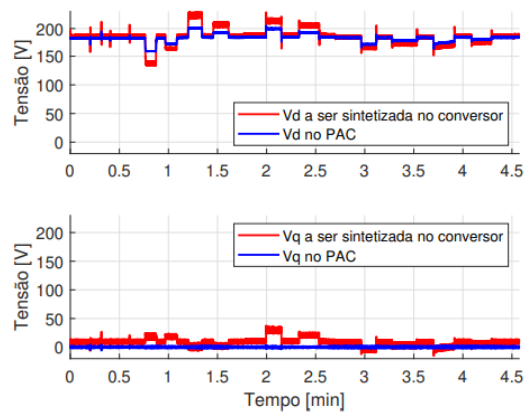


Figura 6 - Tensões da parcela c.a. transformadas para o eixo dq.

A potência ativa vinda da rede fornece energia ao barramento c.c. e, por meio do inversor, essa energia é injetada na rede na forma de potência reativa, resultando em $P_{AC} = -136,2 \text{ W}$ para $Q_{AC} = 4000 \text{ VAR}$. Outro atributo analisado é a THD, vista na Figura 7, onde constatou-se que a IHD do 5º harmônico é a mais representativa, 2,17% e se mantém menor que os 4% permitidos pelas definições normativas.

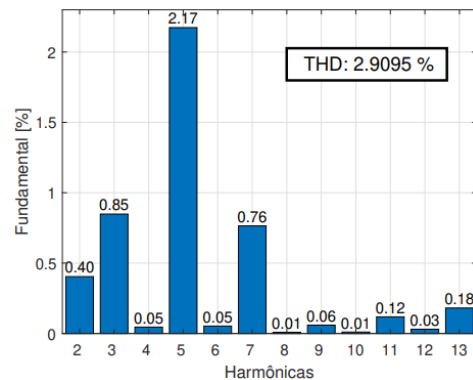


Figura 7 - THD da corrente I_a para $Q = +4000 \text{ VAR}$.

O terceiro experimento é o fornecimento de potência reativa capacitiva pelo conversor c.c./c.a. que ocorre de 1,176 a 1,588 minutos. Os resultados em regime permanente são semelhantes aos obtidos para potência reativa indutiva, embora que altere o sentido do defasamento presente entre a tensão e corrente, ocasionando um fluxo de potência da forma $P_{AC} = -52,39 \text{ W}$ para $Q_{AC} = -4000 \text{ VAR}$, além de que há uma ampliação da THD observada para 3,59%.

O quarto experimento analisado é o fornecimento de potência ativa por meio dos *boosts* que ocorre de 1,994 a 2,537 minutos. Constatou-se que ao longo do tempo a corrente aumenta em função da queda da tensão do banco de baterias devido ao processo de descarga. Além disso, observou-se que a tensão V_d a ser sintetizada pelo conversor se eleva para promover a ejeção da potência adicional presente no barramento, impactando

diretamente na corrente I_d que flui pelo conversor c.c./c.a..

O quinto experimento realizado é o carregamento das baterias utilizando o controle de corrente que ocorre de 2,964 a 3,532 minutos. Observou-se que, com o fornecimento de corrente para as baterias, a tensão do banco de baterias aumenta em função do processo de carga, apresentando valores de 151,4 V até 153 V e, assim, a potência fornecida para o conjunto também é elevada, inicialmente com uma potência de -2294 W e finalizando em -2323 W. Devido a isso, verificou-se que a potência e a corrente extraídas da rede pelo conversor c.a./c.c. são ampliadas para suprir a maior necessidade de energia.

O sexto experimento tem o objetivo de corroborar o funcionamento do processo de carregamento de baterias verificando-se o comportamento do sistema frente às três etapas principais: carga rápida, equalização e flutuação (SILVA, 2013). O resultado é apresentado pela Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de carga das baterias.

Procedimento	Tempo [min]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]
Carga rápida	0 a 118,7	25,0	157,9 a 186,0	4045 a 4651
Equalização	118,7 a 367,9	25,0 a 4,0	186,0	4651 a 736,8
Flutuação	367,9 a 412,4	0,1367	162,0	22,13

No procedimento de carga rápida, verificou-se que a corrente é mantida em 25 A, valor máximo desejado para os conversores c.c./c.c., além de que a potência fornecida aumenta devido à elevação da tensão das baterias. Ao atingir a tensão de equalização do banco de baterias, 186 V, inicia-se o processo de equalização, onde se passa a utilizar o controle de tensão das baterias, observando-se que a potência fornecida reduz ao longo do tempo. Por fim, quando a corrente do conjunto atinge o valor de 4 A, inicia-se o processo de flutuação, onde o nível de tensão é reduzido para a tensão de flutuação de 162 V, de modo manter a bateria carregada e suprir as perdas de auto descarga, fato esse corroborado pela baixa potência fornecida ao conjunto nesse período.

Conclusões

Neste trabalho, foi apresentado um estudo sobre o funcionamento de um BESS. Para isso, desenvolveu-se a modelagem matemática dos conversores utilizados, bem como a lógica de controle do protótipo de 10 kVA presente no laboratório da Unifei-Campus Itabira. Foram obtidos dados acerca do funcionamento dos dois

fluxos de potência possíveis para o BESS: carregamento de baterias e a injeção de potência na rede. Por meio dos experimentos, constatou-se que os controladores implementados garantem o funcionamento do conversor para o sistema de armazenamento de energia operando em paralelo com a rede, permitindo a execução das funcionalidades típicas do BESS. Assim, o protótipo garante erro nulo em regime permanente e taxas de distorção harmônicas adequadas aos padrões normalizados.

Desse modo, tem-se caracterizado e comprovado o funcionamento de um conversor capaz de realizar a carga e descarga de um banco de baterias. Por meio desse conversor, torna-se possível que, frente uma ampliação da geração distribuída com fontes de energia não despachável, sempre haja potência disponível na rede e não se perca a qualidade de energia. Além disso, esse sistema possibilita o fornecimento de serviços ancilares que garantam a robustez e segurança do sistema interligado nacional.

Assim, verifica-se a importância da presente pesquisa tanto para o aprendizado de técnicas e métodos científicos de pesquisa para problemas da engenharia quanto para trabalhos na área de sistemas BESS.

Agradecimento

Os autores agradecem o órgão CNPq pelo suporte financeiro.

Referências

EPE. Balanço Energético Nacional 2022. 2022. (Acessado em 20/09/2022).

Sauaia, R. (2020). Grandes usinas solares apoiando a estabilidade da rede elétrica. http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/33_suaia_2020_08_11.pdf. (Acessado em 20/09/2022).

XAVIER, Lucas Santana. A Comprehensive Analysis of Design and Performance of Power Converters for Battery Energy Storage Systems. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

SILVA, Renata Cristina da. Estudo e Desenvolvimento de um Conversor Formador de Rede Multiterminal. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

SILVA, Waner Wodson Aparecido Gonçalves. Estudo e implementação de um conversor bidirecional como interface na regulação de tensão em barramento c.c. e carregamento de baterias em um Sistema Nanorrede'. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.