

CONTROLE DE CONVERSORES DC-DC PARA APLICAÇÃO EM MÓDULO DE GERENCIAMENTO ENERGÉTICO

João Marcos S. Torres¹ (IC), Robson B. Gonzatti (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Carregamento de bateria. Controlador PI. Conversores buck e boost. Gestão de energia. Transição energética.

Introdução

A crescente preocupação com o aumento das emissões de carbono no cenário global tem incentivado a busca por fontes de energias renováveis e menos poluentes, como o hidrogênio verde. Contudo, essa tecnologia ainda enfrenta desafios significativos, principalmente no que se refere ao gerenciamento eficiente da energia gerada e consumida em seu processo.

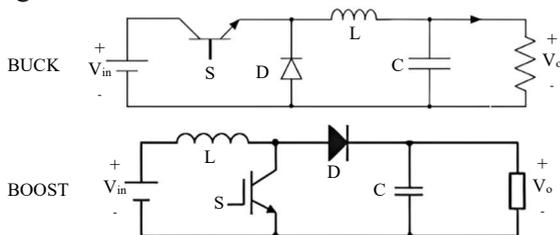
O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar o controle dos conversores DC-DC buck e boost utilizando um controlador proporcional-integral (PI), escolhido por sua eficiência em garantir erro nulo em regime permanente e sua simplicidade de implementação em relação a outras técnicas de controle mais complexas.

A pesquisa foi baseada no estudo dos modelos dos conversores buck e boost, explorando suas funções de transferência e técnicas de controle por resposta em frequência e implementação digital. O desenvolvimento utilizou microcontroladores, sensores, circuitos de condicionamento de sinais, componentes de eletrônica de potência, o ambiente CCS da Texas Instruments, o software Octave para cálculos e o PSIM para simulação dos circuitos elétricos.

Revisão Bibliográfica

Os circuitos dos conversores buck e boost são formados por um transistor, diodo, indutor e um capacitor, além de uma fonte de alimentação DC e uma carga. Onde o conversor buck tem a função de reduzir a tensão de entrada e o boost tem o papel de aumentar essa tensão. A figura 1 apresenta a estrutura desses conversores.

Figura 1 – Circuitos dos conversores buck e boost.

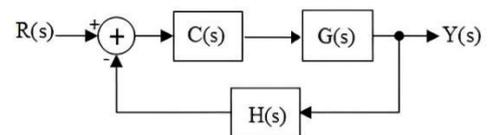


Fonte: Autoria própria

Para que seja possível controlar essas estruturas é necessário que se obtenha o modelo matemático de cada sistema. De acordo com (BERGER, 2018), a comutação em alta frequência dos semicondutores gera descontinuidades e não linearidades que dificultam a aplicação direta das ferramentas de análise de circuitos lineares para a realização da modelagem. Para contornar essa situação é obtido o modelo médio de grandes sinais e em seguida o modelo médio de pequenos sinais. Essa técnica utiliza o valor médio das grandezas durante um período de chaveamento e considera que o sistema se comporta de maneira linear em torno de um ponto de operação. A partir disso obtém-se a função de transferência que relaciona as variações no ciclo de trabalho do transistor com a variável de interesse, no caso, tensão e corrente.

A partir da função de transferência é possível aplicar a teoria de controle no sistema para que ele siga uma referência e rejeite perturbações. A malha de controle é apresentada na figura 2.

Figura 2 – Diagrama de blocos da malha fechada.



Fonte: Autoria própria

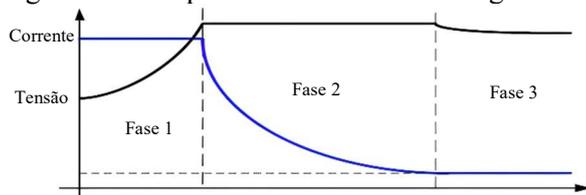
O sinal $R(s)$ corresponde a referência a ser seguida, o bloco $C(s)$ se refere ao controlador, $G(s)$ representa a função de transferência do conversor, $H(s)$ representa o ganho do sensor e $Y(s)$ é a variável de interesse a ser controlada.

Para o projeto do controlador, foi utilizado o método de resposta em frequência, no qual a função de transferência do sistema é analisada com base em dois parâmetros: módulo e fase. O controlador é então ajustado para modificar essas grandezas de acordo com os objetivos do projeto.

Segundo (Moraes, 2019), para que o sistema apresente um comportamento satisfatório, a margem de fase deve estar entre 45° e 90° , enquanto a margem de ganho precisa ser superior a 6 dB. Esses valores garantem que o

sistema opere com estabilidade e bom desempenho. O conversor buck foi submetido a um teste real de carregamento de bateria, dessa forma, se fez necessário conhecer o comportamento teórico de carga da bateria, o qual é apresentado na figura 3.

Figura 3 – Comportamento teórico de carga da bateria.



Fonte: (GONZATTI, 2015, p. 99)

Segundo (GONZATTI, 2015), a fase 1 caracteriza-se por apresentar corrente constante e aumento gradativo de tensão até atingir o limite máximo, nessa etapa a bateria atinge cerca de 70 a 80% da carga total. Já a fase 2 corresponde à fase de absorção, onde a bateria atinge sua carga completa. A tensão nessa fase se mantém constante em seu valor máximo permitido, enquanto a corrente diminui lentamente até atingir um nível mínimo constante, caracterizando a próxima fase. Na fase 3, a corrente se mantém mínima para garantir a tensão de flutuação, onde a tensão é reduzida para evitar aquecimento, essa fase é denominada de estágio de flutuação.

Metodologia

As primeiras etapas da pesquisa envolveram o estudo dos conversores buck e boost, com o objetivo de entender seu funcionamento e as relações entre entrada e saída. Após essa compreensão, foi realizado o estudo da modelagem matemática dos conversores para obter suas respectivas funções de transferência. Além disso, foram explorados conceitos sobre a resposta em frequência, teoria de controle aplicada a esses conversores e o estudo da transformação de Tustin.

Com o domínio dos modelos matemáticos, iniciaram-se os cálculos para determinar os parâmetros do controlador Proporcional-Integral (PI), tanto para a malha de controle de tensão quanto para a de corrente. Os parâmetros da resposta em frequência foram determinados de forma empírica utilizando o software Octave. Foram realizadas simulações no software PSIM para validar os parâmetros obtidos do controlador.

Para o caso do conversor buck, os resultados das simulações foram comparados com testes do sistema implementado em bancada. O conversor também foi testado em uma aplicação real de carregamento de bateria. É importante destacar que o indutor e o capacitor

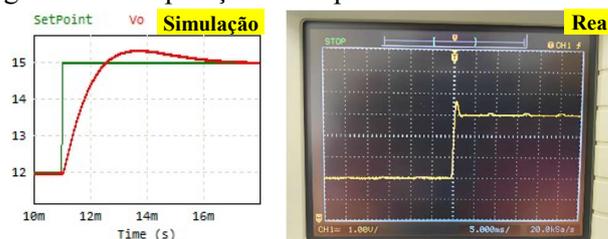
utilizados na aplicação são diferentes dos calculados, devido a disponibilidade do laboratório. Para o conversor boost, as simulações consideraram os mesmos componentes práticos utilizados para o conversor buck, que poderiam ser implementados em uma aplicação real, no entanto, foi testado apenas em ambiente de simulação. Cada etapa foi desenvolvida cuidadosamente, levando em consideração os possíveis riscos operacionais, visando garantir a segurança e confiabilidade dos resultados apresentados.

Resultados e discussão

• Conversor buck.

Após várias análises, os melhores parâmetros obtidos para a malha de tensão do conversor buck foram: frequência de cruzamento de 200 Hz e margem de fase de 70°. A resposta em frequência do sistema para esses parâmetros mostrou que a margem de ganho era infinita e a margem de fase era de 70°, valores que atendem aos critérios para uma resposta estável e satisfatória, como visto em teoria. Com base nesses parâmetros, o sistema montado em bancada foi testado utilizando um sinal do tipo degrau de 3 volts aplicado à referência. A resposta do sistema real se mostrou parcialmente semelhante a resposta obtida em simulação, conforme apresentado na figura 4.

Figura 4 – Comparação da resposta real com a simulada.

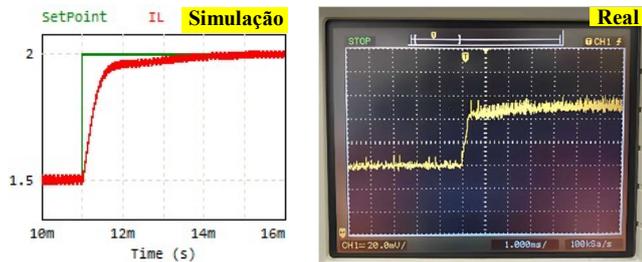


Fonte: Autoria própria

Essa diferença ocorre porque o modelo simulado não inclui todas as variáveis que afetam o sistema real, como ruídos e interferências externas. Apesar dessas diferenças, o sistema manteve a estabilidade. O controle de tensão foi ainda submetido a variações bruscas na tensão de entrada, e o sistema conseguiu manter a saída estável e alinhada com a referência, comprovando a eficiência do sistema de controle.

Para o controle de corrente, os melhores parâmetros obtidos foram: frequência de cruzamento de 50 Hz e margem de fase de 80°, resultando em uma margem de ganho infinita e a margem de fase de 80°, o que atende aos critérios para uma resposta estável e satisfatória. O sistema foi submetido a um sinal degrau de 0,5A de amplitude na referência, conforme apresentado a figura 5.

Figura 5 – Comparação da resposta real com a simulada.



Fonte: Autoria própria

Podemos observar uma resposta muito satisfatória, com um comportamento prático muito similar ao teórico simulado. O sistema também foi testado para grandes variações de carga, e assim como no caso anterior, o controlador atuou de forma rápida e precisa, garantindo que o sinal de saída permanecesse igual à referência, demonstrando a eficácia do controle de corrente para diferentes condições operacionais.

- **Carregamento da bateria.**

Com a eficácia do controle das malhas de tensão e corrente, o controlador foi submetido a um teste real de carregamento de bateria, conforme mostrado na figura 6:

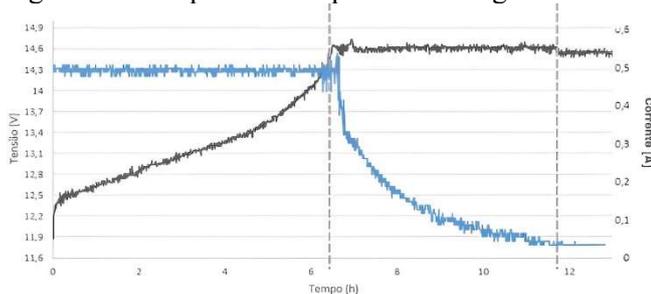
Figura 6 – Conversor buck em carregamento de bateria.



Fonte: Autoria própria

O processo de carregamento ocorreu ao longo de 13 horas ininterruptas, com a coleta de dados realizada a cada 24 segundos, aproximadamente, resultando em 1756 conjuntos de informações. Esses dados foram plotados no gráfico, conforme mostrado na figura 7, onde a curva azul representa a corrente e a curva preta representa a tensão.

Figura 7 – Comportamento prático de carga da bateria.



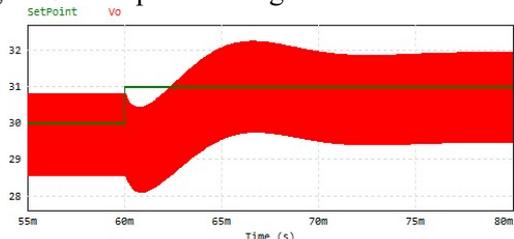
Fonte: Autoria própria

O processo de carga da bateria mostrou que tanto o controle de corrente quanto o de tensão atuaram de maneira eficaz durante a operação. Comparando a figura 7 com a figura 3, observamos uma forte semelhança, o que comprova que os controladores são capazes de operar por longos períodos sem que as saídas ultrapassem o valor máximo permitido. O algoritmo de controle também demonstrou boa performance, garantindo que o sistema mantivesse estabilidade. No entanto, foi notada uma variação maior nos sinais de tensão e corrente durante a transição da fase 1 para a fase 2, causada pela mudança do controle de corrente para o controle de tensão. Essa variação, embora perceptível, não comprometeu o funcionamento do sistema, ocorrendo apenas durante a troca entre os controladores. Como visto em teoria, a fase 1 costuma durar entre 70 e 80% do tempo total de carga, no experimento, essa fase ocupou apenas 50%. A hipótese para essa diferença é que a bateria não estava completamente descarregada, o que encurtou o tempo da fase inicial. De modo geral, o teste foi bem-sucedido, demonstrando a eficácia dos controladores e do algoritmo de controle na gestão do processo de carga da bateria.

- **Conversor boost.**

Assim como no caso do conversor buck, o controle de tensão do conversor boost foi submetido a diversos testes, e a melhor resposta obtida foi com uma frequência de cruzamento de 55 Hz e uma margem de fase de 45°. O sistema foi submetido a um degrau de 3 volts e outro de 1 volt, observou-se uma resposta mais grosseira no caso do degrau de 3 volts, o que já era esperado, pois o modelo utilizado para o conversor foi baseado no modelo médio de pequenos sinais, o que significa que quanto menor a variação em torno do ponto de operação, melhor será a resposta do sistema. Analisando a resposta em frequência da malha de controle, foi obtida uma margem de ganho de 6,58 dB e uma margem de fase de 45. Embora os valores obtidos estejam próximos aos limites, o sistema ainda se enquadra dentro da faixa aceitável e, portanto, seu comportamento pode ser considerado satisfatório. A figura 8 apresenta o resultado da simulação para o degrau unitário.

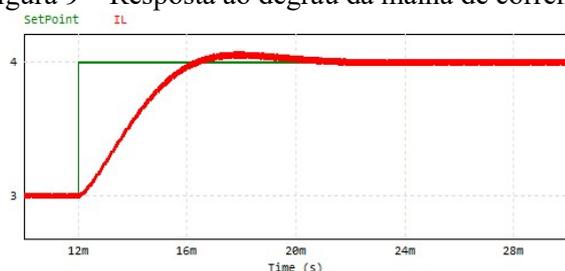
Figura 8 – Resposta ao degrau da malha de tensão.



Fonte: Autoria própria

Assim como no caso anterior, o controle de corrente foi submetido a diversos testes até que se obtivesse a melhor resposta para o sistema. Os resultados mais satisfatórios foram alcançados com uma frequência de cruzamento de 100 Hz e uma margem de fase de 60° . O sistema também foi submetido a um degrau unitário positivo e outro negativo, em ambos os casos, o sistema permaneceu estável. A margem de ganho obtida para esse caso foi infinita, já a margem de fase foi de 60° , confirmando que o sistema é estável e que os parâmetros escolhidos garantem uma resposta eficiente. A figura 9 apresenta o resultado da simulação para o degrau unitário positivo.

Figura 9 – Resposta ao degrau da malha de corrente.



Fonte: Autoria própria

Foram realizadas outras simulações com diferentes amplitudes de degrau, e o sistema demonstrou ser capaz de suportar grandes variações de corrente sem perder a estabilidade.

Conclusões

Em resumo, esta pesquisa investigou com sucesso o desenvolvimento de um sistema de controle para o conversor buck e encontrou os principais parâmetros para o controlador do conversor boost, para serem implementados em um módulo de gerenciamento energético. Os resultados obtidos em testes simulados e práticos demonstraram que os sistemas são capazes de manter a tensão e a corrente dentro dos limites estabelecidos, com baixo overshoot e tempo de acomodação, além de preservar a estabilidade.

O teste de carregamento da bateria comprovou que o conversor buck, controlado por um controlador proporcional integral, pode ser aplicado de forma eficiente e confiável em questões de gerenciamento de energético. E, embora as análises do conversor boost tenham sido realizadas apenas por simulação, os insights adquiridos com o controle do conversor buck reforçam a viabilidade de uma aplicação prática desse sistema.

Para futuras melhorias, destaca-se a possibilidade de implementar um controlador múltiplas malhas, no qual o controle de tensão e corrente seja integrado em um único controlador, eliminando as variações durante a troca de

controle no algoritmo. Outra melhoria seria o uso de um sistema de comunicação mais eficiente entre as placas para o armazenamento dos dados, reduzindo ruídos e aumentando a autonomia do sistema. Além disso, a correta seleção de capacitores e indutores garantiria uma melhoria nos ripples de tensão e corrente.

De forma geral, esta pesquisa desempenhou um papel crucial na aprendizagem, proporcionando a oportunidade de aplicar conhecimentos teóricos em um contexto prático e inovador, promovendo uma compreensão mais profunda do controlador proporcional integral aplicado aos conversores buck e boost.

Como resultado, este estudo validou a capacidade e a viabilidade dos conversores DC-DC para serem implementados em módulos de gerenciamento energético, gerando respostas satisfatórias que contribuem para o avanço das tecnologias ligadas à transição energética global. Além disso, os insights obtidos fornecem uma base sólida para futuras pesquisas em uma área em constante evolução, contribuindo para um futuro mais sustentável e eficiente no setor de energia.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá pelo laboratório e pelos materiais utilizados durante a realização desta pesquisa. Ao meu orientador, Robson Bauwelz Gonzatti, agradeço pelas orientações, confiança e companheirismo ao longo do trabalho. Também sou grato ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica, essencial para a execução deste projeto.

Referências

BERGER, Felipe. METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE CONVERSORES UTILIZANDO O CIRCUITO EQUIVALENTE DE THÉVENIN. *Eletrônica de Potência*, Joinville, junho 2018. 151-160.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. *Sistemas de Controle Moderno*. 8ª. ed.

GONZATTI, Robson B. *Filtro Ativo Híbrido na Transformação de Microrredes com Alta Impedância em Barramento Quasi-infinito*. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2015.

MORAES, Caio. *Modelagem dinâmica do conversor buck*. *Eletrônica de Potência*, setembro 2018. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/modelagem-dinamica-do-conversor-buck/>>.

MORAES, Caio. *Teoria de controle aplicada a conversores estáticos*. *Eletrônica de Potência*, janeiro 2019. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/teoria-de-controle/>>. Acesso em: outubro 2023.