

DESENVOLVIMENTO E PROJETO DE CONTROLADORES PARA UM CONVERSOR CC-CC BOOST VIA LMIS

Paulo Eduardo Menegheti Gonçalves¹, Edson Italo Mainardi Junior¹, Estelio da Silva Amorim, Luciano de Souza da Costa e Silva¹

¹Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Três Lagos - MS

paulo.goncalves@estudante.ifms.edu.br, edson.mainardi@ifms.edu.br, estelio.amorim@ifms.edu.br,
luciano.souza@ifms.edu.br

Resumo

Este artigo tem como objetivo apresentar o estudo de estabilidade e modelagem considerando parâmetros não-lineares de um conversor elevador de tensão do tipo CC-CC Boost. O circuito Boost proposto é destinado à alimentação de dispositivos eletrônicos que necessitam ser alimentados com uma tensão contínua e invariante no tempo. A técnica de controle adotada para atingir os valores desejados foi a de Lyapunov a qual utiliza como base sistemas não lineares e com a resolução utilizando o método de LMI's obtém-se a estratégia de chaveamento/controlado do sistema. A carga considerada na modelagem é um resistor e a fonte de alimentação de entrada é uma fonte qualquer que fornece tensão contínua.

Palavras-chave: Conversor CC-CC Boost, Modelagem não-linear, Lyapunov.

Introdução

Sabendo que atualmente tudo que utiliza eletrônica necessita do uso de conversores, surge a grande necessidade de estudo quanto a essas metodologias e suas estratégias de controle quanto ao alcance de uma determinada referência na carga. A grande motivação do uso e aperfeiçoamento das técnicas de controle para os conversores é devido ao grau de eficiência na taxa de conversão que pode-se obter. Como exemplo, podemos citar a técnica clássica de controle por PWM (do inglês – Pulse Width Modulation) a qual pode chegar, geralmente, a 85% de eficiência de conversão. No entanto, conversores CC-CC são modelos matemáticos não-lineares e o controle clássico por PWM é efetuado com base na técnica de linearização de sistemas. Assim, este método de controle linear não assegura estabilidade do sistema para grandes variações de sinais.

Desse modo, sabendo que a dinâmica dos conversores CC-CC pode ser descrita por sistemas chaveados afins que consideram em seu modelo todas as não linearidades do sistema, o objetivo principal deste trabalho consiste em estudar e implementar uma nova estratégia de controle. Logo, a técnica de controle deverá garantir a estabilidade do conversor com uma garantia de desempenho adequada (DECARLO et al., 2000; SUN; GE, 2005; LIBERZON; MORSE, 1999).

Baseado em funções quadráticas de Lyapunov, vários autores têm proposto controladores não lineares a fim de garantir a estabilidade de sistemas chaveados afins (DEAECTO et al., 2010; YOSHIMURA et al., 2011; YOSHIMURA et al., 2013).

Dessa forma, propõe-se nesse trabalho a modelagem, considerando a não linearidade do indutor, de um conversor CC-CC Boost, o qual irá realizar a correção do valor da tensão de entrada alimentando a carga com os parâmetros desejados. Mais especificamente, propõe-se o estudo de novas condições suficientes, baseadas em LMIs que, quando factíveis, asseguram a estabilidade do sistema, visando assim uma melhor performance dos conversores.

Metodologia

Considerando o estudo do conversor CC-CC Boost propõe-se sua modelagem e aplicação com estratégias para controlar a tensão e corrente de saída obedecendo a referência imposta pela carga.

Tendo a figura 1 como referência seguiu-se a configuração usual do conversor:

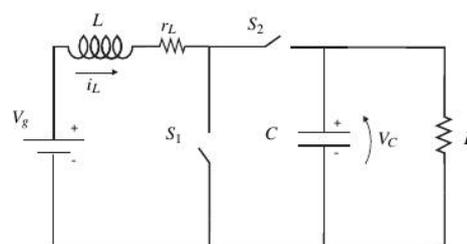


Figura 1. Conversor CC-CC Boost.

O conversor Boost é caracteristicamente classificado como um elevador de tensão contínua pois tem a entrada de corrente e saída em tensão.

Seu funcionamento pode ser definido em duas etapas, sendo uma quando a chave S_1 está fechada oferecendo passagem de corrente na chave S_2 (esta segunda chave na verdade é substituída atualmente por um diodo) e a outra etapa quando a chave S_1 se encontra aberta oferecendo a condição para que o diodo S_2 polarize inversamente não permitindo a passagem de corrente.

Para tanto foi feita a modelagem matemática que descreve o conversor, levando em consideração o parâmetro não-linear da resistência parasita do indutor (R_L).

Aplicando Lei de Kirchof das tensões e das correntes obtém-se as seguintes equações:

$$\dot{i}_{L(t)} = \frac{-R_L}{L} i_{L(t)} - \frac{(1-\mu_1)}{L} V_{C(t)} + \frac{V_g}{L} \quad \text{Eq. 1}$$

$$V_{C(t)} = \frac{(1-\mu_1)}{C} i_{L(t)} - \frac{1}{RC} V_{C(t)} \quad \text{Eq. 2}$$

Aplicando o modelo de espaço de estados, obtemos a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L(t)} \\ \dot{V}_{C(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & -\frac{(1-\mu_1)}{L} \\ \frac{(1-\mu_1)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L(t)} \\ V_{C(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_g}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 3}$$

Sabe-se que a variável μ_1 representa o funcionamento da chave para tanto iremos considerar $\mu_1 = [0 \ 1]$, substituindo esse valor na Eq. 3:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1/L \\ -1/C & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} V_g/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad e \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Tendo as variáveis do sistema reescritas podemos definir o sistema com base no funcionamento da chave sendo μ o funcionamento da chave ($\mu = 1$ chave fechada e $\mu = 0$ chave aberta):

Para tanto considera-se as seguintes equações da dinâmica do conversor:

$$\dot{x} = (A_0 + A_1\mu)x + B_0 \quad \text{Eq. 4}$$

$$0 = (A_0 + A_1\mu_r)x_r + B_0 \quad \text{Eq. 5}$$

Subtraindo a Eq. 5 pela Eq. 6 e manipulando-as:

$$\Delta \dot{x} = A_0x - A_0x_r + A_1\mu x - A_1\mu_r x_r + B_0 - B_0$$

$$\rightarrow \Delta \dot{x} = A_0(x - x_r) + A_1\mu x - A_1\mu_r x_r + A_1\mu x_r + A_1\mu_r x_r$$

$$\rightarrow \Delta \dot{x} = A_0(x - x_r) + A_1\mu(x - x_r) + A_1x_r(\mu - \mu_r)$$

$$\rightarrow \Delta \dot{x} = (A_0 + A_1\mu)(x - x_r) + A_1x_r(\mu - \mu_r)$$

Sabe-se que as expressões $(x - x_r)$, pode ser definida como Δx e $(\mu - \mu_r)$ como $\Delta \mu$ e substituindo na equação acima, obtém-se:

$$\Delta \dot{x} = (A_0 + A_1\mu)\Delta x + A_1x_r\Delta \mu \quad \text{Eq. 6}$$

sendo Δx a diferença entre o estado atual (x) e a referência (x_r) e $\Delta \mu$ a diferença da entrada atual (μ) e a referência (μ_r).

Problema 1. Suponha que o vetor de estado $x(t) \in \mathbb{R}^n$ está disponível para realimentação. Determine as entradas de controle $\mu(t) \in [0,1]$, para todo $t \geq 0$, que tornam um ponto de equilíbrio conhecido $x = x_r$ globalmente assintoticamente estável.

Uma solução para o **Problema 1** é proposta no **Teorema 1**.

Teorema 1. Considere o sistema chaveado afim com entrada de controle $\mu \in [0,1]$, e seja o ponto de equilíbrio $\mu_r \in \mathbb{R}^m$ dados. Se existirem matrizes simétricas e uma matriz simétrica positiva definida $P \in \mathbb{R}^{n \times m}$ tais que:

$$(A_0 + A_1\mu)^T P + P(A_0 + A_1\mu) < 0 \quad \text{Eq. 7}$$

então a estratégia de chaveamento:

$$\mu(t) = \frac{1 - \text{sgn}(2\Delta x^T P A_1 x_r)}{2} \quad \text{Eq. 8}$$

torna o ponto de equilíbrio $x_r \in \mathbb{R}^n$ globalmente assintoticamente estável.

Demonstração:

Considerando a função energia quadrática de Lyapunov:

$$V_x = x^T P x \quad \text{Eq. 9}$$

na qual $V_x > 0$ e $P = P^T$ e $P > 0$, pode-se então concluir que caso a derivada da Eq. 9 for negativa definida o sistema será estável. Aplicando a técnica de Lyapunov temos que:

$$V = \Delta x^T P \Delta x > 0 \quad \text{Eq. 10}$$

Derivando a função energia demonstrada na Eq. 10, obteve-se:

$$\dot{V} = \Delta \dot{x}^T P \Delta x + \Delta x^T P \dot{\Delta x} \quad \text{Eq. 11}$$

Após manipular a Eq. 11, e substituindo o valor da variável ($\Delta \dot{x}$):

$$\dot{V} = \Delta x^T [(A_0 + A_1\mu)^T P + P(A_0 + A_1\mu)] \Delta x + 2\Delta x^T P A_1 x_r \Delta \mu < 0 \quad \text{Eq. 10}$$

A partir da Eq. 7 pode-se validar que caso a chave estiver fechada então $\mu = 1$ então:

$$(A_0 + A_1)^T P + P(A_0 + A_1) < 0$$

porém caso $\mu = 0$ então:

$$A_0^T P + P A_0 < 0$$

Agora, a partir da Eq. 10 e da estratégia de controle identifica-se a estratégia de controle Eq. 8 podemos identificar que caso:

$$2\Delta x^T P A_1 x_r < 0 \rightarrow \mu(t) = 0$$

$$2\Delta x^T P A_1 x_r > 0 \rightarrow \mu(t) = 1$$

Logo, $\dot{V} < 0$, $\Delta x \neq 0$. para a demonstração está concluída.

Foi utilizado a ferramenta de solução matemática e simulação MatLab, para determinar a estratégia de chaveamento com base na condição de LMI's determinadas nas equações acima.

Resultados e Discussão

Através das equações anteriormente definidas, propõe-se o seguinte projeto de implementação exposta na tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros do projeto.

Parâmetros	Valores
V_{in}	100 V
V_0	150 V
R_0	50 Ω
L	500 μ H
C	470 μ F
R_L	2 Ω
f	60k Hz

Fonte: Autor.

Descrevendo todas as equações no script e utilizando a função de resolução de LMI, obtém-se a matriz P a qual indica se o sistema pode ser controlado:

$$P = 1 \cdot 10^{-13} \begin{bmatrix} 480,5 & 558 \\ 558 & 173,1 \end{bmatrix}$$

Após determinar a matriz P, simulou-se o sistema utilizando a ferramenta Simulink como ilustrado na figura abaixo:

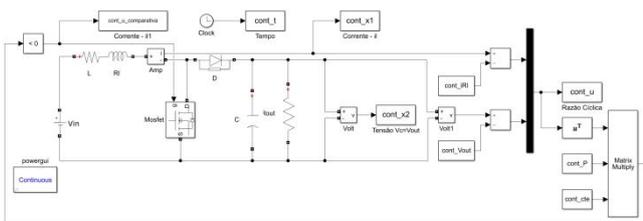


Figura 2. Modelo de simulação.

A figura 3 ilustra o resultado do sinal de tensão na carga.

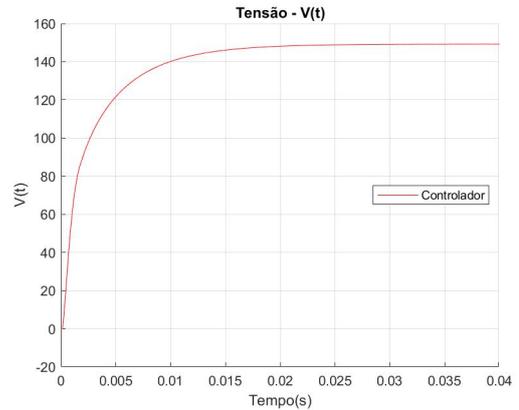


Figura 3. Sinal de tensão na carga.

E na figura 4 tem-se o sinal da corrente na carga.

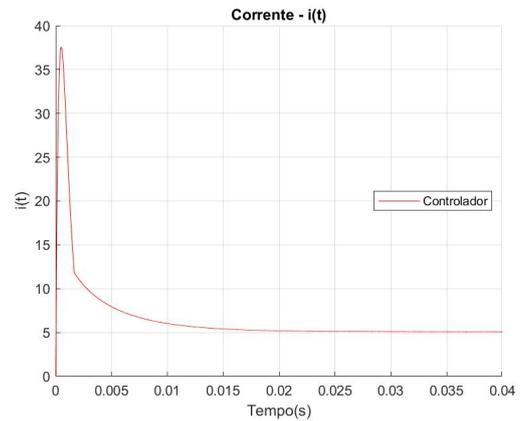


Figura 4. Sinal de corrente na carga.

Além disso verifica-se o sinal de chaveamento da chave por meio da Figura 5:

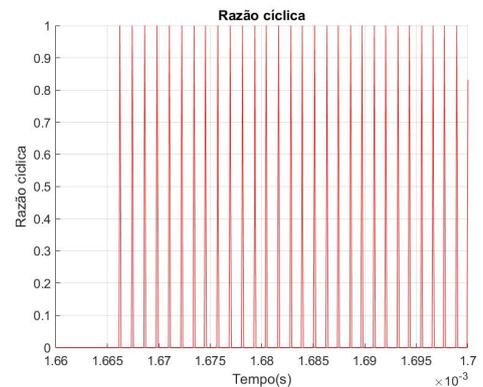


Figura 5. Sinal de chaveamento da chave.

Considerações Finais

O projeto apresentado ilustra a formulação e proposta de um circuito controlador para um sistema elevador de tensão do tipo Boost. Através dos resultados apresentados pode-se observar que os valores alcançados com a técnica de Lyapunov foram satisfatórios já que a referência foi atingida.

Agradecimentos

Agradecemos ao IFMS pelo apoio e incentivo financeiro de acordo com o Edital 030/2021 - PROPI/IFMS - Iniciação Científica e Tecnológica.

Referências

- DEAECTO, G. S.; GEROMEL, J. C.; GARCIA, F. S.; POMILIO, J. A. Switched affine systems control design with application to DC-DC converters. IET Control Theory & Applications, United Kingdom, v. 4, n. 7, p. 1201–1210, July 2010.
- DECARLO, R. A.; BRANICKY, M. S.; PETTERSSON, S.; LENNARTSON, B. Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems. Proceedings of IEEE, New York, v. 88, n.7, p. 1069–1082, July 2000.
- LIBERZON, D.; MORSE, A. S. Basic problems in stability and design of switched systems. IEEE Control Systems, New York, v. 19, n. 5, p. 59–70, October 1999.
- SUN, Z.; GE, S. S. Analysis and synthesis of switched linear control systems. Automatica, Amsterdam, v. 41, n. 2, p. 181–195, February 2005.
- YOSHIMURA, V. L.; ASSUNÇÃO, E.; DA SILVA, E. R. P.; TEIXEIRA, M. C. M.; MAINARDI JÚNIOR, E. I. Observer-Based Control Design for Switched Affine Systems and Applications to DC - DC Converters. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Campinas, v. 24, n. 4, p. 535–543, May 2013.
- YOSHIMURA, V. L.; ASSUNÇÃO, E.; TEIXEIRA, M. C. M.; MAINARDI JÚNIOR, E. I. A comparison of performance indexes in DC-DC converters under different stabilizing state dependent switching laws. In: XI BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 2011, Natal. Proceedings... Natal: IEEE, 2011. p. 1069–1075.

DEVELOPMENT AND DESIGN OF CONTROLLERS FOR A BOOST CC-CC CONVERTER VIA LMIS

Abstract: *This article aims to present the study of stability and modeling considering non-linear parameters of a voltage step-up converter of the CC-DC Boost type. The proposed Boost circuit is intended for powering electronic devices that need to be supplied with a continuous and time-invariant voltage. The control technique adopted to achieve the desired values was Lyapunov's which uses nonlinear systems as a basis and with the resolution using the LMI's method, the system switching/control strategy is obtained. The load considered in the modeling is a resistor and the input power supply is any source that supplies direct voltage.*

Keywords: *CC-CC Boost Converter, Nonlinear Modeling, Lyapunov.*