



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



CONVERTOR CC/CC LC SÉRIE RESSONANTE ALIMENTANDO UM MÓDULO DE LEDS

Giancarlo Clerici Daros

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
giancd98@gmail.com

Maikel Fernando Menke

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFSM
maikelmanke@gmail.com

Álysson Raniere Seidel

Professor do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria – UFSM
seidel@ctism.ufsm.br

Samuel Noronha Ramos

Acadêmico do curso de Engenharia de Controle e Automação – UFSM
sam.ukasnr@gmail.com

João Paulo Duranti

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica – UFSM
duranti.jp@hotmail.com

Resumo. *Este artigo apresenta o projeto e controle do conversor LC série. Os elementos de potência do conversor são projetados, tendo como objetivo alimentar um módulo de LEDs com potência nominal de 100 W, operando em 1,15 A. Conhecida a dinâmica do conversor e analisadas as perturbações deste, o projeto do sistema de controle com ação proporcional-integral é desenvolvido e implementado de forma digital. Resultados são apresentados mostrando a redução da ondulação da corrente de saída devido a ação do sistema de controle.*

Palavras-chave: *Compensação Ativa da Ondulação de Corrente, Controle Digital, LC Série Ressonante*

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da demanda de energia elétrica nos últimos anos, pesquisas relacionadas à eficiência e confiabilidade de sistemas artificiais de iluminação têm cada vez mais relevância no cenário mundial. Nesse contexto destacam-se os diodos emissores de luz (LEDs), por possuírem

diversas vantagens quando comparados com outras fontes de iluminação, como elevada eficácia luminosa, longa vida útil e bom índice de reprodução de cores.

Para o correto acionamento dos LEDs são utilizados *drivers*, usualmente implementados através de circuitos eletrônicos (conversores), sendo utilizados para o controle da intensidade luminosa do sistema. No entanto, para desenvolver-se um sistema de controle estável empregando técnicas de controle é necessário conhecer-se a resposta dinâmica do conversor. Para isso, é necessário considerar a característica elétrica do LED, dada por uma relação não linear entre tensão e corrente *Chen* [1], visto que uma análise considerando o mesmo como uma carga puramente resistiva não reflete o real comportamento do conversor em *Wu* [2].

Dado a longa vida útil dos LEDs, trabalhos na literatura propõem diversas soluções para proporcionar aos *drivers* uma vida útil compatível com a do LED. Para tanto, uma prática comum é a utilização de capacitores de filme (F-Cap), que possuem elevada vida útil quando comparados aos capacitores eletrolíticos (E-Cap). No entanto,

empregando F-Cap, devido a sua reduzida densidade de carga, verifica-se maiores ondulações de tensão no *driver*, principalmente na tensão de barramento (ΔV_{bus}). Desta forma, para evitar que ΔV_{bus} se reflita em ondulação na corrente dos LEDs, é necessário que haja a compensação desta ondulação. Assim, este artigo propõe o projeto do sistema de controle do conversor LC série ressonante, o qual deve ser projetado para compensar ΔV_{bus} . Além disso, este controle deve manter a corrente média dos LEDs regulada em função do fluxo luminoso desejado (*dimming*).

2. DRIVER LC SÉRIE RESSONANTE

Conversores ressonantes vem sendo cada vez mais utilizados para *drivers*, uma vez que possuem boa eficiência e elevada densidade de potência Almeida [3]. Simultaneamente, conversores com boa eficiência apresentam uma confiabilidade maior, já que operam em temperaturas menores Wang [4].

A corrente de saída de um conversor pode ser controlada através da frequência de comutação do inversor, da razão cíclica do inversor, da variação de tensão de barramento (V_{bus}) ou pela variação da impedância do filtro. Neste projeto o controle da intensidade luminosa será dado pela variação da frequência de comutação do inversor, dada a sua simplicidade com relação aos outros métodos de controle.

2.1 Projeto do Conversor LC Série

O projeto do conversor consiste na definição da indutância série L_S , da capacitância série C_S e da frequência de comutação nominal do inversor f_{sw} , que são funções da potência de saída, tensão de barramento e frequência de ressonância do filtro.

Adota-se um valor comercial para C_S e determina-se o valor de L_S através de (1).

$$L_S = \frac{1}{\omega_r^2 C_S} \quad (1)$$

Onde ω_r é a frequência angular de ressonância desejada.

Com a determinação de L_S , C_S e os demais parâmetros do conversor, determina-se, através de (2), a frequência nominal de operação do conversor, a qual o leva a fornecer a corrente nominal aos LEDs.

$$f_{sw} = \frac{\sqrt{C_S (4\pi^4 L_S I_{LED}^2 - \pi^4 C_S I_{LED}^2 R_{ac}^2 + 16C_S V_{BUS}^2)}}{4\pi^3 C_S I_{LED} L_S} + \frac{C_S \sqrt{4V_{BUS} + \pi^2 I_{LED} R_{ac}} \sqrt{4V_{BUS} - \pi^2 I_{LED} R_{ac}}}{4\pi^3 C_S I_{LED} L_S} \quad (2)$$

Em que: $R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} R_{eq}$. Sendo R_{eq} a

resistência equivalente do módulo de LEDs em sua potência nominal.

2.2 Modelagem Dinâmica do Conversor LC Série

A modelagem dinâmica de conversores consiste na determinação da função de transferência (FT) que relaciona a variável a ser controlada com sua variável de controle. Uma vez que esse conversor tem característica fortemente oscilatória, emprega-se a modelagem baseada no método Função Descritiva Estendida (FDE) Yang [5], que tem apresentando resultados satisfatórios para topologias ressonantes Yang [6].

2.3 Controle Digital

A Fig. 1 mostra o conversor LC série junto ao sistema de controle, com o modulador digital de frequência do inversor mostrado em detalhes.

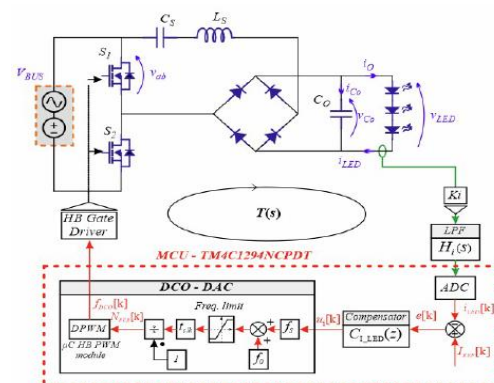


Figura 1 - Conversor LC série em malha fechada – Implementação digital

Conforme menção prévia, capacitâncias menores resultam em maiores ondulações de tensão no *driver*. Essas ondulações de tensão não devem resultar em variações na corrente dos LEDs. Neste trabalho, para compensar esta ondulação, adota-se como técnica a compensação pela ação de controle. A vantagem desta técnica é dada por não necessitar alteração da topologia do *driver*.

Assim, o sistema em malha fechada tem como objetivo manter o valor médio da corrente controlada, bem como rejeitar ondulações na tensão de barramento ΔV_{bus} . Para sistemas conectados à rede elétrica, essa ondulação na tensão de barramento é dada em 120 Hz, então, o dobro da frequência da rede.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção apresentam-se os resultados de simulação do conversor LC série ressonante alimentando um módulo de LEDs com controle da intensidade luminosa.

Com base nas especificações de projeto e parâmetros calculados, obtém-se os demais elementos do conversor, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de projeto	
Parâmetros do Conversor LC	
Tensão de Barramento (V_{BUS})	400 V
Tensão de Saída (V_{LED})	87,4 V
Corrente Média de Saída ($I_O = I_{LED}$)	1,15 A
Parâmetros Projetados	
Capacitor Série	6,8 nF
Indutância Série	550 uH
Capacitor de Saída (F-Cap)	10 uF
Frequência de Comutação (f_{sw})	102,7 kHz

A fim de avaliar a capacidade de controle de intensidade luminosa do sistema, a Fig. 2 mostra a variação da corrente da saída em função da frequência de comutação. Percebe-se que, para frequências acima de 170 kHz, a corrente de saída sofre menos variação para a mesma variação na frequência de comutação quando comparada à frequência nominal de operação. Reduzidos níveis de corrente demandam uma comutação acima de 200 kHz que, com elevadas perdas por comutação, podem conduzir o conversor a um baixo

rendimento. Assim, limita-se a faixa de controle da intensidade luminosa entre 100% e 35% da corrente nominal, correspondentes a, respectivamente, 1,15 A e 0,4 A.

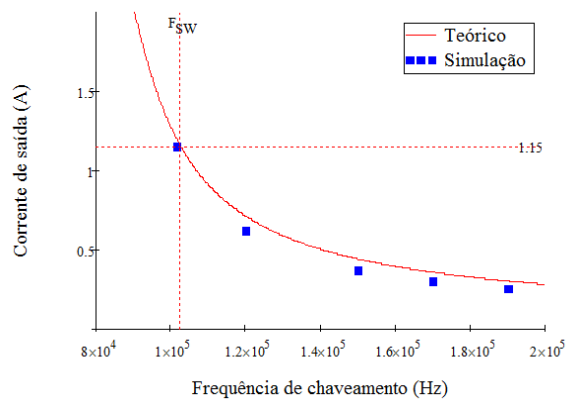


Figura 2 – Variação da corrente de saída em função da frequência de comutação.

Para a compensação de ΔV_{bus} emprega-se um compensador PI. Após o projeto deste compensador no domínio contínuo w , o mesmo é discretizado com amostragem de 40 kHz, obtendo-se (3).

$$C_{PI}(z) = \frac{-0.1044z + 0.06994}{z^2 - z} \quad (3)$$

A Fig. 3 mostra a Função de Transferência em Malha Aberta (FTMA) compensada e não compensada para o domínio w . Em 1 kHz, verifica-se uma margem de ganho de 12,7 dB e margem de fase de 68,5°. Embora não tenha sido empregado um compensador ressonante, verifica-se, em 120 Hz, um ganho de 20 dB, suficiente para rejeitar as perturbações na tensão de barramento nesta frequência.

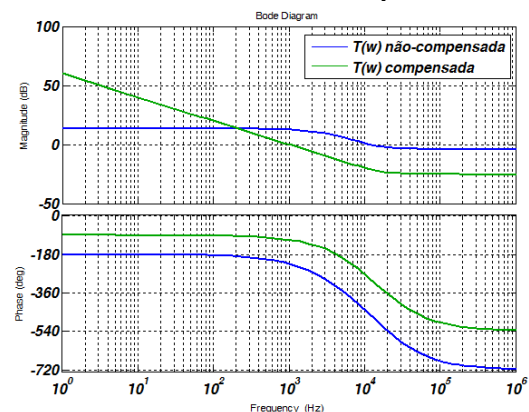


Figura 3 – Diagrama de Bode da FTMA compensada e não compensada

A tensão de barramento é dada por um valor CC de 400 V somado a uma ondulação de 40 V pico a pico em 120 Hz. Para o sistema em malha aberta, a ondulação de corrente é de 170 mA pico a pico, o que representa uma ondulação percentual de 14,8% em relação ao valor nominal de corrente.

Empregando o compensador projetado, verificou-se que o sistema digital consegue rastrear a referência de corrente. Além disso, percebe-se uma considerável redução na ondulação pico a pico de corrente, verificada em 40 mA, representando uma ondulação percentual de 3,5%. A Fig. 4 apresenta os resultados de simulação da corrente de saída do conversor operando em malha fechada.

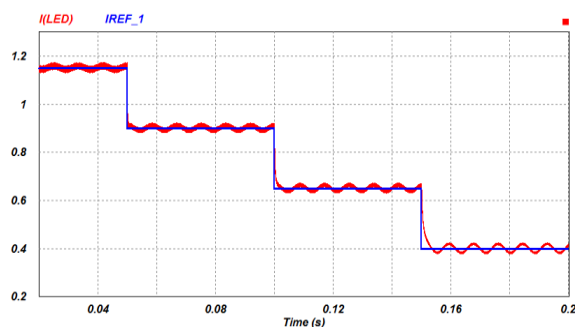


Figura 4 – Conversor LC série em malha fechada frente a degraus de referência

4. CONCLUSÃO

Foi apresentado neste artigo o projeto de um conversor LC série ressonante alimentando uma carga baseada em LEDs, assim como o projeto do sistema controle implementado de forma digital. Através dos resultados de simulação, verificou-se que o sistema em malha fechada é capaz de rastrear a referência de corrente, mantendo o valor médio da corrente de saída controlada, realizando-se assim o controle da intensidade luminosa. Além disso, obteve-se uma diminuição na ondulação da corrente nos LEDs, onde o sistema em malha fechada apresentou uma redução de 76,5% na ondulação da corrente de saída quando comparada ao sistema em malha aberta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, e ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro dessa pesquisa, CNPq – Brasil Proc. 311911/2015-3 e Proc. 409632/2016-3.

5. REFERÊNCIAS

- [1] R. L. Lin and Y. F. Chen, “Equivalent circuit model of light-emitting-diode for system analyses of lighting drivers,” *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, pp. 1–5, 2009.
- [2] H. Wu, “Multi-Channel Constant Current LED Driver for Indoor LED Luminaries,” Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, 2011.
- [3] P. S. Almeida, H. A. C. Braga, M. A. D. Costa, and J. M. Alonso, “Offline Soft-Switched LED Driver Based on an Integrated Bridgeless Boost – Asymmetrical Half-Bridge Converter,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 761–769, 2015.
- [4] H. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “Toward reliable power electronics: Challenges, design tools, and opportunities,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 17–26, 2013.
- [5] E. X.-Q. Yang, “Extended Describing Function Method for Small-signal Modelling of Resonant and Multi-resonant Converters,” Instituto Politécnico da Virginia, 1994.
- [6] E. X. Yang, F. C. Lee, and M. M. Jovanovic, “Small-signal modeling of series and parallel resonant converters,” *Appl. Power Electron. Conf. Expo. 1992. APEC '92. Conf. Proc. 1992., Seventh Annu.*, pp. 785–792, 1992.