

Desenvolvimento de estratégia de controle e conversor CC/CC para máquina CC operando como motor

Control Strategy and DC/DC converter development for a DC motor

RESUMO

O trabalho apresentado possui como foco o desenvolvimento de um sistema controlado para a regulação de velocidade de um motor CC com excitação independente operando no primeiro quadrante, fornecendo apenas regulação no sentido direto, alimentado por um conversor CC/CC do tipo *forward* de duas chaves. O projeto de regulação é realizado com controladores PI com ação *Anti-Windup* via técnica *back-calculation* aplicados para a malha de corrente e velocidade do motor. No trabalho é retratado o conversor e suas características, a modelagem matemática adotada para o sistema, tanto quanto os resultados da simulação SPICE para o sistema projetado, nele também é verificado a respostas à distúrbios na tensão de alimentação e torque de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Conversores de corrente elétrica. Controle automático. Máquinas elétricas.

ABSTRACT

This work focused on the development of a controlled system for the speed regulation of independent excitation DC motor operating in the first quadrant, providing only regulation in the direct direction, powered by a two-switch forward DC/DC converter. The regulation design is carried out with PI controllers with Anti-Windup through the back-calculation technique applied to the current control and motor speed. The work describes the converter and its characteristics, the mathematical modeling adopted for the system and also the results of the SPICE simulation for the developed system, the response to disturbances in the feed voltage and load torque are also evaluated.

KEYWORDS: electrical current converters. Automatic control. Electrical machines.

Rafael Uezu
Rafael.2640@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil

Thales Eugenio Portes De Almeida
thalesalmeida@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

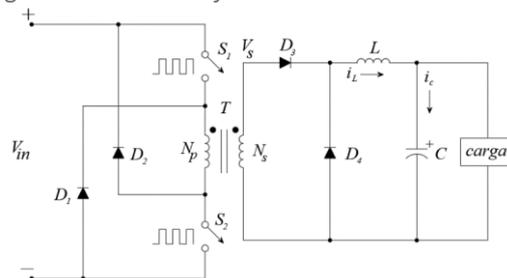
As máquinas de corrente contínua oferecem diversas vantagens, sendo a principal a sua simplicidade, proporcionando diversos benefícios como a confiabilidade, segurança e acionamento simples (UMANS, 2014). No entanto para que uma máquina CC funcione adequadamente como um motor, ela deve possuir uma fonte de alimentação adequada e estar associada a algum dispositivo de controle (CHAPMAN, 2013, p. 505). Com o avanço dos microcontroladores e técnicas de controle moderno, uma das maneiras mais viáveis economicamente e técnica de se implementar o controle é por meio digital (RASHID, 2014, p. 627).

Dado isso, o trabalho em questão visa no projeto de um conversor CC/CC para a alimentação de uma máquina CC e uma estratégia de controle digital para a regulação de velocidade. Com esse intuito é apresentado o conversor CC/CC que oferta o melhor enquadramento para a aplicação e o projeto do controlador para o mesmo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um dos conversores não isolados destacáveis para a aplicação no trabalho é o conversor *forward* de duas chaves, este é indicado em situações onde se necessita de potências medianas de 25 a 250W (HOROWITZ, 2017, p. 659), Figura 1. Além de trazer a vantagem de reinicialização do núcleo por meio do incremento e arranjo de chaves e diodos na topologia, por esse mesmo motivo também se consegue o benefício de grampear a tensão de entrada nas chaves, o que destaca a topologia para ser aplicada em situações em que a tensão de entrada é alta, o que ocorre neste projeto (RASHID, 2014, p. 608).

Figura 1 – Conversor *forward* de duas chaves.



Fonte: Autoria própria.

Quando as chaves S_1 e S_2 comutam no primário do transformador, pulsos de tensão V_{in} são transformados para o secundário na razão de número de espiras do transformador $(N_{sec} / N_{pri}) V_{in}$ e reificado pelos diodos D_3 e D_4 , sendo D_4 o diodo de captura e D_3 para impedir corrente reversa no secundário quando a chave estiver fechada, em seguida o indutor LC fica responsável pelo estágio de filtragem e armazenamento de energia.

Seu ganho estático é dado por:

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{N_{sec}}{N_{pri}} \right) d \quad (1)$$

Onde d é a taxa de trabalho da chave.

do integrador para reduzir a magnitude de entrada do mesmo (Delfino, 2013). Assim podemos deduzir que

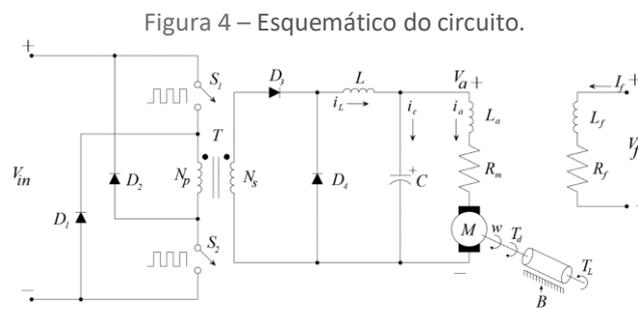
$$y = K_{bb} (v - w) \quad (4)$$

Sendo os limites de saturação $\pm sat$, então

$$y = \begin{cases} 0, & \text{se } |v| < sat \\ K_{bb}(v - sat), & \text{se } v \geq sat \\ K_{bb}(v + sat), & \text{se } v \leq -sat \end{cases} \quad (5)$$

Sendo assim, quando o sinal de controle ir para a zona saturada, haverá uma redução do sinal de erro a ser integrado e conseqüentemente reduzirá o feito de saturação nesse ramo.

Para a escolha da máquina elétrica, a mais indicada é a de excitação independente, em razão de ser o tipo de máquina mais aplicada com conversores nas indústrias (HONDA, 2006). A figura 4 demonstra o esquemático a ser implementado no projeto.



Fonte: Autoria própria.

A partir do circuito mostrado é possível obter as seguintes equações do sistema equivalendo do conversor. Sendo da malha à esquerda.

$$i_L(s) = \frac{V(s) - v_c(s)}{Ls} \quad (6)$$

Sendo do nó superior, V_a

$$v_c(s) = \frac{i_L(s) - i_a(s)}{Cs} \quad (7)$$

Do atuador

$$d(t) = \frac{v_{controle}(t)}{V_p} \quad (8)$$

Com isso encontra-se o ganho do atuador no conversor

$$\frac{V_S(t)}{V_{controle}(t)} = \frac{V_S(s)}{V_{controle}(s)} = \left(\frac{N_p}{N_S}\right) \frac{V_{in}}{V_p} \quad (9)$$

Da dinâmica do motor é possível obter as seguintes equações. Com referência à parte elétrica, nota-se que a tensão no terminal de armadura do motor é igual a tensão no capacitor de saída da fonte, logo

$$v_{Lm}(t) + v_{Rm}(t) + e_g(t) = v_c(t) \quad (10)$$

Com e_g a força contra-eletromotriz que pode ser substituída por $K_v I_f \omega$ desde que a corrente de campo I_f seja constante, K_v é chamada de constante de velocidade.

$$L_m \frac{di_a(t)}{dt} + R_m i_a(t) + K_v I_f \omega(t) = v_c(t) \quad (11)$$

Em relação à parte mecânica, sabe-se que o torque desenvolvido pela máquina deve ser igual ao torque de carga, ou seja:

$$T_d = K_t I_f i_a(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_L \quad (12)$$

Sendo J a inércia da carga e do motor, K_t a constante de torque e B a constante de atrito viscoso que representa as perdas por atrito

Sabendo que $K_t I_f = K_v I_f = K_b$. Como resultado obtém-se as seguintes funções transferências.

$$\omega(s) = \frac{K_b i_a(s) - T_L(s)}{sJ + B} \quad (13)$$

$$i_a(s) = \frac{v_c(s) - K_b \omega(s)}{sL_m + R_m} \quad (14)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os ensaios simulados foi adotado o modelo de motor CC 14206 com enrolamento de 24V da fabricante PITTMAN MOTOR, cujo parâmetros são apresentados na Tabela 1, assim como os parâmetros do conversor CC/CC são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Especificações do Motor.

Constantes	Valor
K_t	$0.071 \left[\frac{Nm}{A} \right]$
K_v	$0.071 \left[\frac{V}{rad/s} \right]$
K_f	$0.014 \left[\frac{N}{m} \right]$
B	$13E-6 \left[\frac{Nm}{rad/s} \right]$
R_a	$0.84 [\Omega]$
L_a	$1.36E-3 [H]$
J_{motor}	$37E-6 \left[\frac{Kg}{m^2} \right]$
J_{load}	$100E-6 \left[\frac{Kg}{m^2} \right]$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Especificações do conversor.

Constantes	Valor
L	$33E-6 [H]$
C	$5\mu F [F]$
V_{in}	$180 [V]$

Constantes	Valor
N_p/N_s	3.49
f_s	200[KHz]
v_{PWM}	3[V]

Fonte: Autoria própria.

O ganho do sensor de corrente e velocidade são de 0.2 e 0.02. Em relação ao ganho da etapa de pré-digitalização, foram adotados 0.8 e 0.541, esses valores foram determinados para não exceder o limite de tensão de entrada do microcontrolador.

Referente a digitalização, a frequência de aquisição no ramo de controle de corrente e velocidade são de 20KHz e 4Khz, ambos a 12bits. Na conversão do sinal digital para analógico, 10Bits com ganho de $-2.7V$.

Sobre os controladores de corrente e velocidade, os valores para os ganhos proporcionais e integrais se apresentam na Tabela 3.

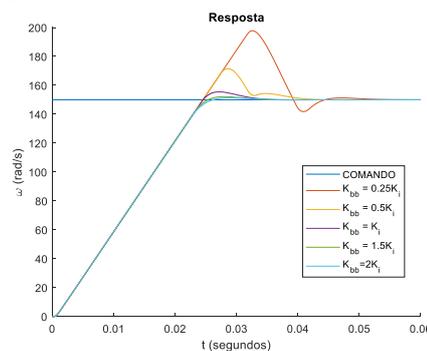
Tabela 3 – Especificações dos controladores PI para a malha de velocidade e corrente.

Constantes	Velocidade	Corrente
K_p	1.14097212278059	1.64158700831236
K_i	292.953223390709	1517.78532802837
sat	± 15	± 7

Fonte: Autoria própria.

Com relação ao ganho K_{bb} , foi verificado valores com base no ganho integral K_i , como ilustra a figura 5 (Yang, 2013).

Figura 5 – Curvas para diferentes valores de K_{bb} .

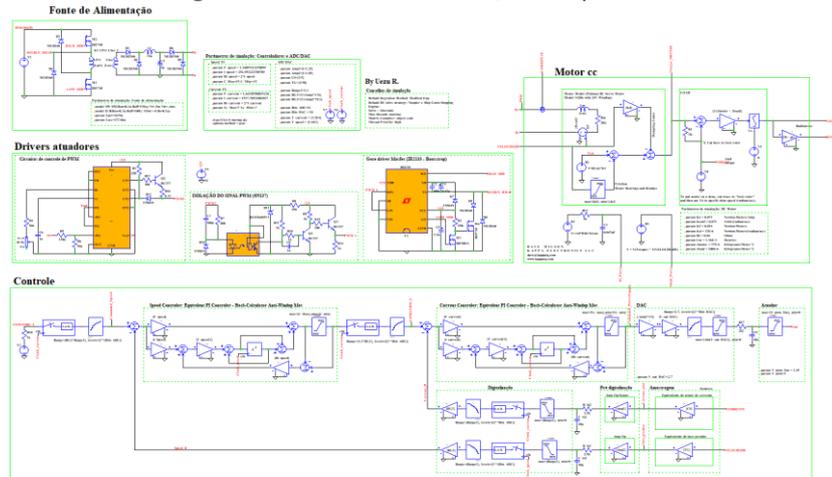


Fonte: Autoria própria.

Nota-se que com o aumento do valor K_{bb} a resposta transitória apresenta uma melhora significativa, até o ponto onde a diferença entre $K_{bb} = 1.5K_i$ e $K_{bb} = 2K_i$ é pequena, conseqüentemente não há necessidade testar novos valores, pois não teria progresso significativo na busca, por tanto foi adotado $K_{bb} = 2K_i$ para o projeto.

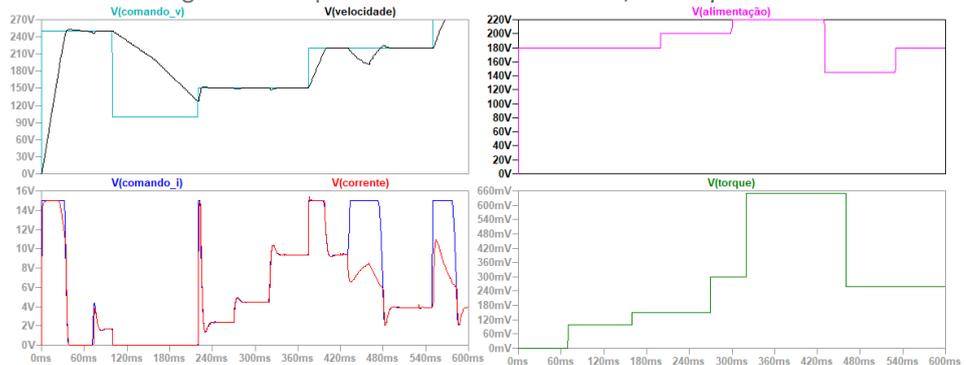
Para a simulação SPICE foram utilizados modelos de drivers TL494 da fabricante *Texas Instruments*, para a modulação por largura de pulso e IR2110 como driver auxiliar de “bootstrap” para o acionamento das chaves da fabricante *International Rectifier*. A Figuras 6 ilustra o esquemático simulado e a Figura 7 o resultado da simulação.

Figura 6 – Sistema controlado, via LTSpiceXVII.



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 – Resposta do sistema controlado, via LTSpiceXVII.



Fonte: Autoria própria.

Conforme a figura 7, nota-se que para cada comando de velocidade, a sua resposta é atingida com êxito, com exceção de casos onde se requer desaceleração, nesses casos cria-se uma dependência do torque de carga.

Ademais para cada distúrbio de tensão de alimentação e torque de carga, a recuperação do sistema é praticamente imediata, incluindo casos onde a demanda de tensão máxima nos terminais do motor é atingida, por consequência da ação *Anti-Windup*.

CONCLUSÃO

Considerando a simulação SPICE, o projeto do sistema funcionou dentro das condições esperadas, em relação ao conversor e motor também se observa resultados satisfatórios. O fato de o sistema projetado operar apenas no primeiro quadrante e utilizar diretamente a saída do conversor para o controle de tensão nos terminais do motor, em conjunto com o controle de velocidade, traz a vantagem de custo benefício e precisão na velocidade requerida.

Entretanto, devido a pandemia do ano de 2020 provocada pelo vírus COVID-19, não foi possível desenvolver o projeto físico, visto a dificuldade de portfólio material, acadêmico e técnico.

REFERÊNCIAS

RASHID, Muhammad H. **Electrónica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. Pearson Educacional 4. ed, 2014.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. AMGH Editora, 5 ed. 2013.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. AMGH Editora, 2014.

HONDA, Flavio. **Motores de corrente contínua: Guia rápido para uma especificação precisa**. Pub. Técn. Siemens, ed, v. 1, 2006.

HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield. **A arte da eletrônica: Circuitos eletrônicos e microeletrônica**. Cambridge Univ. Press, 3. Ed. Bookman, 2017.

Daniel W. Hart. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**: Edição única. AMGH, 2012.

Simone Buso. **Digital control of switching mode power supplies**. University of Padova-ITALY: Dept. of Information Engineering – DEI. UNICAMP, 2011.

Delfino P. Varela. Um Estudo de Técnicas de Anti-Reset Windup. Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação UFRJ, 2013.

YANG, Ming; NIU, Li; XU, DIAN-GUO. **Antiwindup design for the speed loop PI controller of a PMSM servo system**. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, v. 21, n. 5, p. 1318-1327, 2013.

PITTMAN PRODUCTS: Brush commutated DC Servo Motors. Acessado em 01 de agosto, 2020. Disponível em: <https://www.motionsolutions.com/store/pc/catalog/documents/pittman/14201%20DC%20Motor.pdf>.

Texas Instruments. Datasheet: TL494, Pulse-Width-Modulation Control Circuits. SLVS074H – 2017. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/gpn/TL494>.

International Rectifier: Application IR2110 – Note. HV Floating MOS-Gate Driver Ics. Disponível em: http://web.mit.edu/6.131/www/document/float_drive.pdf.