

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE DIGITAL PARA ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA CC ATRAVÉS DE CHOPPER.

Wânderson de Oliveira Assis

Ângelo José Junqueira Rezek

Luiz Eduardo Borges da Silva

Instituto de Engenharia Elétrica - EFEI
Av. BPS, 1303 - Cx. Postal 50
37500-000 - Itajubá (MG)

Resumo - Um sistema de controle de velocidade em malha fechada de uma máquina CC utilizando o chopper transistorizado foi implementado em laboratório, com a vantagem de um fator de potência muito melhor do que o circuito utilizando ponte tiristorizada. O controle do ângulo de disparo do IGBT é comandado pelo método rampa através do circuito integrado TCA-780. A aquisição de dados e o controle digital foram efetuados pelo cartão PCL-711B da Advantech Co., com programação em C++, sendo os compensadores digitais PI introduzidos computacionalmente no sistema através de equações recursivas e utilizando integração trapezoidal.

Palavras chave - Chopper, Acionamentos Controlados, Controle Digital, Aquisição de Dados, Eletrônica de Potência.

Abstract - A transistorized controlled chopper DC drive system has been implemented in laboratory, with a power factor of the arrangement better than the power factor of the thyristorized bridge. The IGBT firing angle control is provided by the ramp method through the integrated circuit TCA-780. The data acquisition and digital control are achieved by the PCL-711B card Advantech Co., programming in software C++, and the digital PI regulators are introduced through the computer in the system by recursive equations using trapezoidal integration.

Keywords - Chopper, Drive Control Systems, Digital Control, Data Acquisition, Power Electronics.

1 - INTRODUÇÃO

O sistema de acionamento controlado para máquina de corrente contínua ainda é largamente empregado na indústria, podendo-se citar, por exemplo, nos processos de bobinamento da indústria de papel, e laminação das indústrias siderúrgicas e de alumínio, ou para acionamento de veículos de tração, tais como trens elétricos, carros de metrô, etc. Quando a fonte de alimentação é CA, pode-se usar um dos circuitos retificadores e também o chopper, bastando apenas que se retifique a tensão CA.

O chopper é um circuito largamente utilizado, com as vantagens de suavidade de controle da tensão, velocidade de resposta e com um fator de potência muito melhor do que o circuito utilizando ponte tiristorizada.

Seja uma ponte tiristorizada alimentada por um transformador, podemos calcular a corrente eficaz por fase no secundário do transformador como sendo:

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{md} \quad (1)$$

Sendo: I_{md} - Corrente média na carga

i_s - Corrente eficaz por fase no secundário do transformador

Para um ângulo de disparo variando de 0 a π , e considerando-se condução contínua, podemos calcular a tensão eficaz por fase no secundário do transformador:

$$u_s = \frac{P}{3\sqrt{6} \cos(\alpha)} U_{md} \quad (2)$$

Sendo: U_{md} - Tensão média na carga

u_s - Tensão eficaz por fase no secundário do transformador

O fator de potência da ponte tiristorizada pode ser calculado por:

$$FP = \frac{\text{Potência média}}{\text{Potência aparente}} \quad (3)$$

Desprezando-se o ângulo de comutação [6], podemos fazer a seguinte aproximação:

$$\begin{aligned} \text{Para } 0 \leq \alpha \leq \pi: \\ FP = 0.955 \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

Para o arranjo constituído de ponte a diodos e chopper, $\alpha = 0$, e o fator de potência é constante e vale:

$$FP = 0.955 \quad (5)$$

A análise feita resulta que, o retificador a tiristor, apesar de alimentar uma carga em CC, comporta-se para a rede como uma carga indutiva, absorvendo potência reativa (mesmo para cargas puramente resistivas). A utilização do chopper garante um melhor fator de potência, o que se traduz em qualidade de consumo e economia para a concessionária de energia elétrica.

2 - CHOPPER TRANSISTORIZADO

A configuração do arranjo de ponte a diodos e chopper implementado através de IGBT é mostrado na Figura 1:

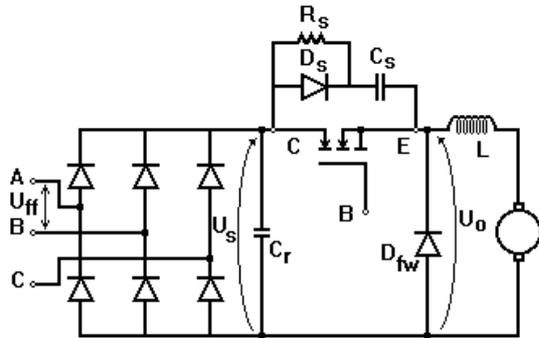


Figura 1 - Configuração do chopper

No chopper transistorizado, o IGBT funciona como uma chave, de modo que a tensão é aplicada à carga enquanto houver pulso na base do transistor. Abrindo a chave o diodo D_{fw} conduz, permitindo que a corrente de carga continue circulando, evitando a formação de um arco voltaico sobre a chave.

Um circuito snubber foi adicionado ao IGBT para controlar, ou limitar, a tensão e corrente no componente quando ele faz a transição entre estados.

A forma de onda da tensão na carga para o chopper transistorizado é mostrada na Figura 2:

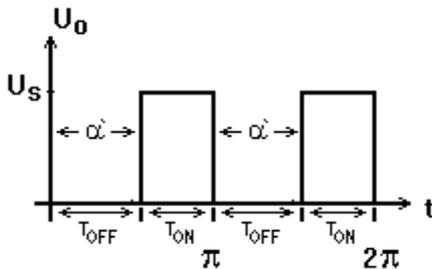


Figura 2 - Forma de onda do chopper transistorizado

Sendo:

- α - Ângulo de disparo do chopper
- T_{ON} - Tempo com chave fechada
- T_{OFF} - Tempo com chave aberta

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \text{ - Período}$$

Então, para o arranjo de ponte a diodos e chopper, temos:

$$U_o = U_s \left(\frac{T_{ON}}{T} \right) \quad (6)$$

$$U_o = U_s \left(\frac{\pi - \alpha'}{T} \right) \quad (7)$$

$$U_o = 1.35 U_{ff} \left(\frac{\pi - \alpha'}{T} \right) \quad (8)$$

Sendo:

U_o - Tensão de saída do chopper

U_s - Tensão de saída da ponte a diodos

U_{ff} - Tensão fase-fase de alimentação da ponte a diodos

Os pulsos de disparo para o transistor são gerados pelo circuito integrado TCA-780, pelo método rampa, como mostrado na Figura 3.

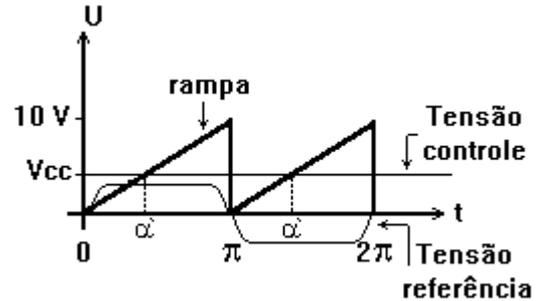


Figura 3 - Método rampa de disparo

Quando a tensão de referência (pino 5) é zero, uma rampa é gerada no pino 10. O sinal de rampa é comparado com um sinal de controle V_{cc} , gerando um pulso de disparo para o transistor. A condução do IGBT permanece enquanto houver pulso na base do transistor.

Além do circuito gerador de pulso, é necessário um circuito de amplificação de pulso interface e isolamento óptico (optoacoplador) utilizando o circuito integrado TIL 111 [7]. O diagrama completo do circuito gerador de pulso e interface é demonstrado na Figura 4.

3 - ACIONAMENTO CONTROLADO PARA MÁQUINA C.C.

O chopper transistorizado foi implementado em malha fechada para acionamento de uma máquina de corrente contínua. O sistema inclui uma malha de controle de velocidade e uma malha interna de limitação de corrente. O diagrama esquemático do acionamento é demonstrado na Figura 5:

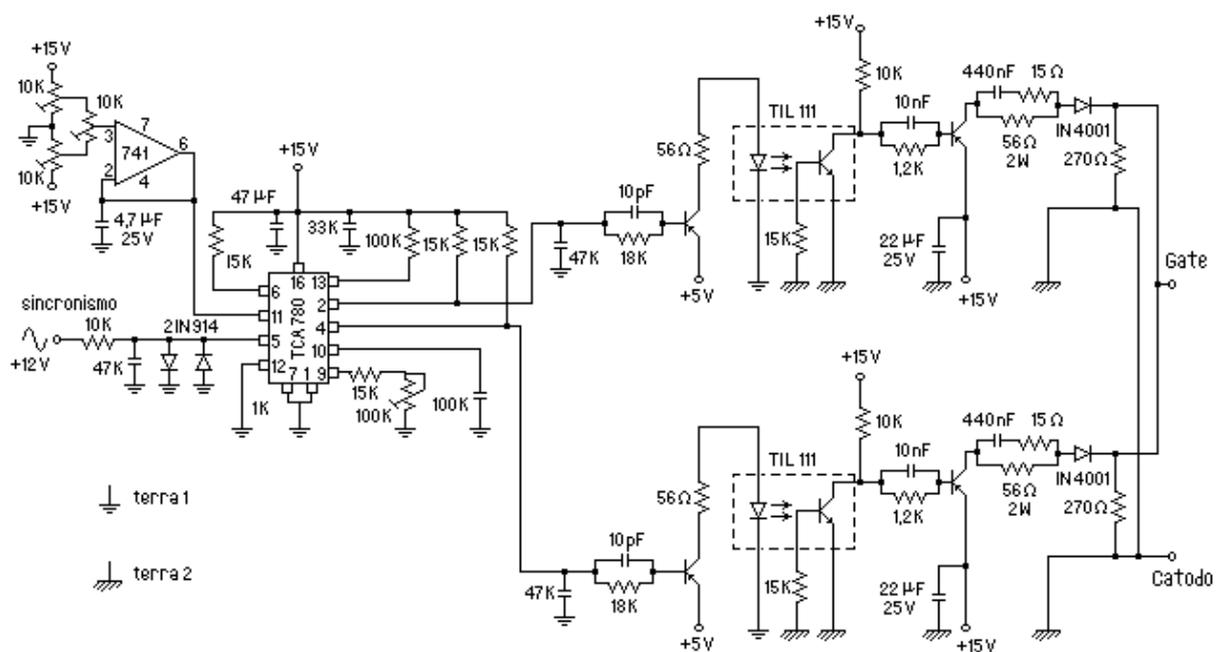


Figura 4 - Diagrama do circuito gerador de pulso e interface.

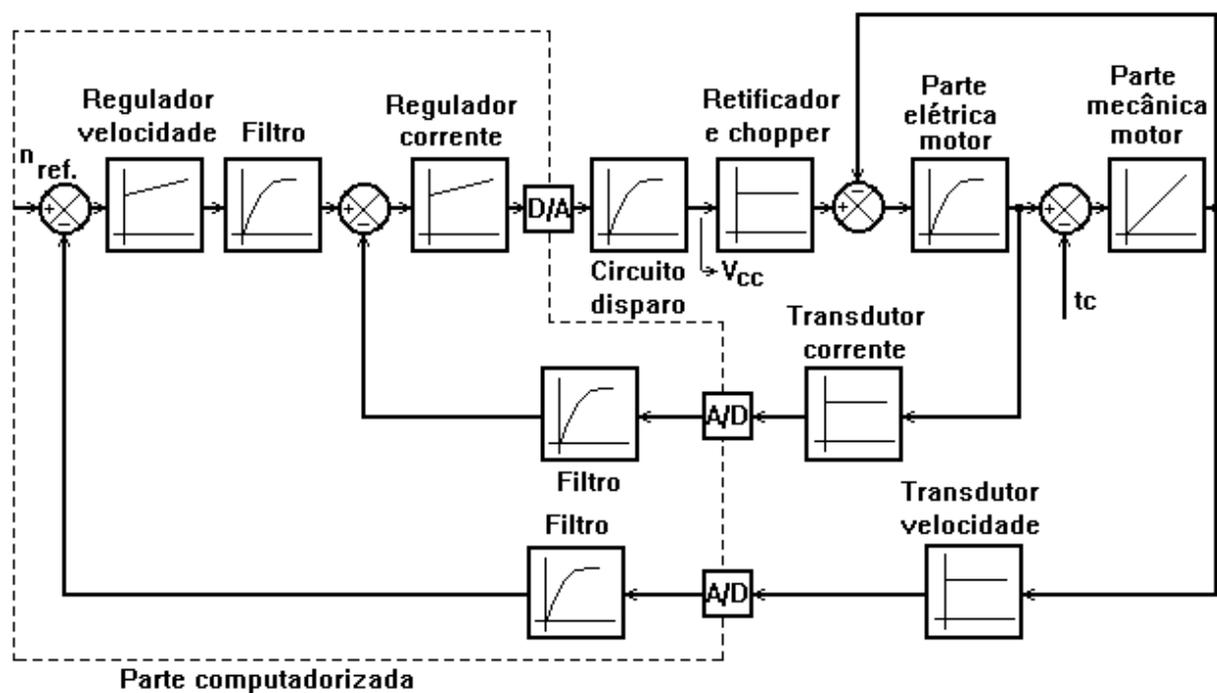


Figura 5 - Diagrama esquemático da controle de velocidade em malha fechada de uma máquina CC através de chopper.

Os reguladores PI foram dimensionados pelo método de otimização em função da simetria e têm a seguinte forma:

$$G_C(s) = V_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (9)$$

Sendo:

G_C - Função de transferência do regulador
 V_R - Ganho proporcional do regulador
 T_I - Constante de tempo de integração

O filtro de alisamento de sinal é dado por:

$$G_F(s) = \frac{1}{1 + T_F s} \quad (10)$$

Sendo: G_F - Função de transferência do filtro
 T_F - Constante de tempo do filtro

Os compensadores e filtros digitais são introduzidos computacionalmente no sistema através de equações recursivas aplicando o método de aproximação por integração trapezoidal, conforme demonstrado na Figura 6:

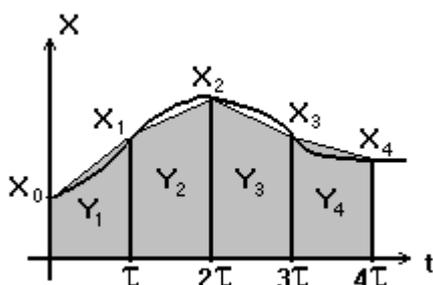


Figura 6 - Método de aproximação por integração trapezoidal.

Pelo método da integração trapezoidal, temos:

$$\begin{aligned} Y_1 &= Y_0 + \frac{\tau(X_0 + X_1)}{2} \\ Y_2 &= Y_1 + \frac{\tau(X_1 + X_2)}{2} \\ Y_n &= Y_{n-1} + \frac{\tau(X_{n-1} + X_n)}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

Sendo:

τ - Tempo de amostragem

Aplicando transformada Z, chegamos a:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)} \quad (12)$$

Podemos então fazer a seguinte aproximação:

$$\mathfrak{S} \left[\frac{1}{s} \right] = \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)} \quad (13)$$

Então, os reguladores PI podem ter a seguinte representação discreta no tempo:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{V_R}{2T_I} \left[\frac{(\tau + 2T_I)z + (\tau - 2T_I)}{(z-1)} \right] \quad (14)$$

E, na forma de equação recursiva:

$$\begin{aligned} Y(k) &= Y(k-1) + \left(\frac{V_R \tau}{2T_I} + V_R \right) X(k) + \\ &+ \left(\frac{V_R \tau}{2T_I} - V_R \right) X(k-1) \end{aligned} \quad (15)$$

Para os filtros digitais:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\tau(z+1)}{(\tau + 2T_F)z + (\tau - 2T_F)} \quad (16)$$

E, na forma de equação recursiva:

$$\begin{aligned} Y(k) &= \frac{\tau}{(2T_F + \tau)} [X(k) + X(k-1)] + \\ &+ \frac{(2T_F - \tau)}{(\tau + 2T_F)} Y(k-1) \end{aligned} \quad (17)$$

A implementação prática dos reguladores PI e filtros digitais foi efetuada com eficiência, com regulação de velocidade e limitação de corrente, independente da carga do motor..

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema foi projetado para o acionamento de um motor CC de 1.7 KW, 1500 RPM, 220 V e corrente nominal $I_a = 7.72$ A.

O transdutor de corrente é um sensor hall, e o transdutor de velocidade é um tacômetro acoplado ao eixo do motor de corrente contínua. Foram também introduzidos filtros para eliminação de ruídos e ondulação da tensão de saída dos transdutores.

A Figura 8 demonstra a resposta de velocidade e corrente para partida à vazio. A Figura 9 demonstra a resposta para partida com carga nominal. A Figura 10 demonstra a resposta para um degrau positivo de carga.

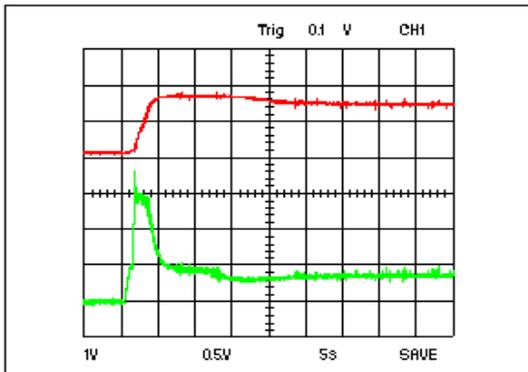


Figura 8 - Partida a vazio
Velocidade e corrente de armadura

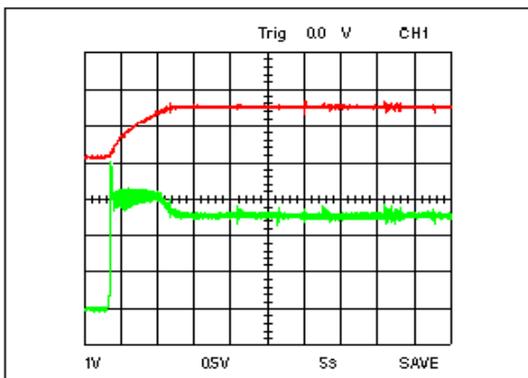


Figura 9 - Partida com carga
Velocidade e corrente de armadura

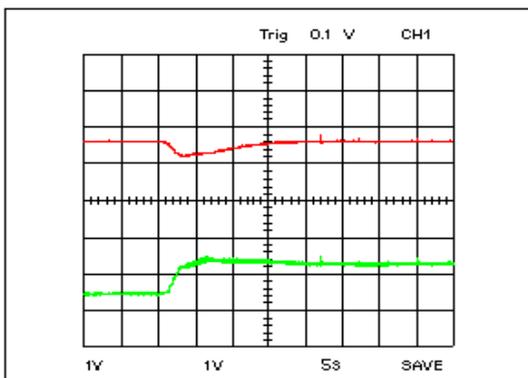


Figura 10 - Resposta a degrau positivo de carga
Velocidade e corrente de armadura

5 - CONCLUSÕES

O controle de velocidade em malha fechada de uma máquina CC com limitação de corrente e utilizando o chopper transistorizado foi implementado em laboratório através da placa PCL-711B da Advantech Co., com uma boa precisão e dinâmica. O fator de potência do sistema é melhor do que o circuito utilizando ponte tiristorizada, porque o ângulo de disparo sempre corresponde a $\alpha=0$ para a ponte a diodos.

O sistema com controle digital utilizando aproximação por integração trapezoidal foi implementado com eficiência na prática, apresentando regulação de velocidade e limitação de corrente, independente da carga do motor.

6 - REFERÊNCIAS

- [1] Rezek, A. J. J., Silva, V. F., Sinzato, F. T. D., Teodor Jr., M. and Assis, W. O., "A Simple Firing Scheme for Thyristorized Chopper Circuit Based on a TCA 780 Dedicated Integrated Circuit", II CONTROLO 96, Porto, Portugal, 1996.
- [2] ROSA, P. C., "Implementação de Reguladores PID - Digitais em Sistemas com Microprocessadores", Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá/MG, Brasil, 1989.
- [3] Advantech Co. Ltd., "PCL - 711B - PC-Multilab Card - User's Manual.", Taiwan, 1993.
- [4] Bose, B. K., "Modern Power Electronics - Evolution, Technology, and Applications", IEEE Industrial Electronics Society, New York, USA, 1992.
- [5] Fr hr, F., Ortttenburger, F., "Introducción al Control Electrónico", Marcombo S. A., Siemens Aktiengesellschaft, Barcelona, 1986.
- [6] Silva, V. F., "Aspectos operacionais de conversores de potência", Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá/MG, Brasil, 1980.
- [7] Guimarães, C. A. M., "Um sistema de chaveamento point on wave baseado em microcomputador", Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, 1986.

Agradecimentos:

Os autores agradecem ao CNPQ processo 352885/96-3 e à FAPEMIG processo TEC 657/92 pelo suporte financeiro ao desenvolvimento deste projeto.