

Controlo de velocidade de um MCC com limitador de corrente integrado em comutador da tensão de alimentação

D. Foito^{1,2} M. Guerreiro¹

¹ ESTSetúbal, Instituto Politécnico de Setúbal,
Estefanilha 2914-508 Setúbal, Portugal,
phone: +351-265790000, fax: +351-265721869 email: dfoito@est.ips.pt, mgaspar@est.ips.pt

² Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1049-001 LISBOA, Portugal, phone: +351-218417671, fax: +351-218417167

Resumo

Apresenta-se um controlo directo de velocidade de um motor de corrente contínua (MCC) com um limitador de corrente integrado no controlador. A velocidade é obtida a partir de um gerador taquimétrico ou de um estimador de velocidade.

O controlo tem como técnica base o modo de deslizamento com uma função de comutação simples (de primeira ordem). O resultado da função de comutação não garante por si só a necessária limitação de corrente pelo que se propõe um bloco de lógica combinatória cujas variáveis de entrada dependem essencialmente da velocidade e da corrente da armadura.

A associação da função de comutação e de uma função lógica constituem o controlador cuja saída define um de dois níveis de tensão. Esta é a tensão de comando a aplicar à armadura do motor e tenderá a minimizar o erro de velocidade.

Palavras-chave

Controlo, modo de deslizamento, função de comutação, limitador de corrente, estimador.

1. Introdução

Uma estrutura largamente difundida para os accionamentos com motores de CC é o controlo em cascata usando controladores PI para o controlo de corrente numa cadeia interna e para o controlo de velocidade na cadeia externa. Por razões de segurança também é inserido na cascata um limitador de corrente.

Uma outra abordagem, aqui adoptada, consiste em proceder ao controlo de velocidade ignorando a evolução da corrente excepto nas situações em que esta atinja valores que possam pôr em risco a integridade do accionamento. A necessidade de limitar a corrente obriga a que esta grandeza tenha de ser, de forma directa ou indirecta, medida.

A actuação descontínua, comutação da acção de comando (neste caso, tensão da armadura) a aplicar num sistema

em modo de deslizamento é, em geral, determinada pelo sinal de uma função designada de função de comutação.

Contudo, a exigência de limitação de corrente conduz à implementação de um bloco, o comutador de tensão, que incorpora o resultado daquela função de comutação e também o efeito da limitação de corrente.

Por outro lado, o menor custo, o menor volume ocupado e a maior flexibilidade no uso de um accionamento com as extremidades do veio libertas são argumentos fortes, pelo que também está em estudo um controlador sem sensores de velocidade.

2. Esquema do accionamento

A Fig. 1 apresenta o diagrama blocos do accionamento do motor CC. No ramo principal representa-se o controlador velocidade, o conversor CC/CC de quatro quadrantes e o respectivo comando, e o motor CC.

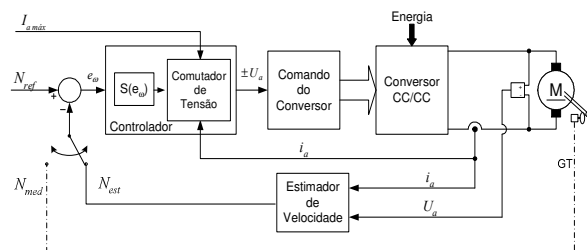


Fig. 1 – Diagrama de blocos do accionamento

A informação acerca da velocidade do rotor é importante para a formação do erro de velocidade $e_\omega = \omega_{ref} - \omega$ que é a entrada do controlador de velocidade. A retroacção de velocidade foi obtida a partir de um estimador de velocidade e, para efeitos de comparação de resultados, de um gerador taquimétrico (GT).

O estimador de velocidade baseado na equação (1) recorre ao uso de dois sensores, um de tensão e outro de corrente.

$$\omega_{est} = \frac{u_a - r_a i_a - L_a \dot{i}_a}{k_T \phi} \quad (1)$$

Os erros de medida dos parâmetros r_a resistência da armadura, L_a o coeficiente de auto-indução da armadura e $k_T \phi$ constante do binário afectam inevitavelmente o valor da velocidade estimada ω_{est} sendo o valor absoluto do seu erro $\tilde{\omega} = \omega - \omega_{est}$ expresso por (2):

$$\tilde{\omega} = \frac{1}{(\varepsilon_\phi - 1)} \left[\varepsilon_\phi \omega + \varepsilon_r \left(\frac{r_a}{k_T \phi} \right) i_a + \varepsilon_L \left(\frac{L_a}{k_T \phi} \right) \dot{i}_a \right] \quad (2)$$

onde ε_r , ε_L e ε_ϕ são, respectivamente, os erros relativos da resistência e do coeficiente de auto-indução da armadura e da constante do binário (ou do fluxo) do motor.

O erro da estimação de velocidade devido a:

- ε_ϕ é maior nas situações de movimento rápido, pelo que o funcionamento em vazio é o mais penalizado.
- ε_r afecta principalmente as situações de corrente elevada que correspondem tipicamente a arranques ou binários de carga elevados
- ε_L é maior nas situações de variações rápidas de corrente que estão associadas a arranques ou mudanças bruscas do binário de carga.

Neste trabalho usou-se uma versão simplificada do estimador tendo sido ignorado o efeito de L_a .

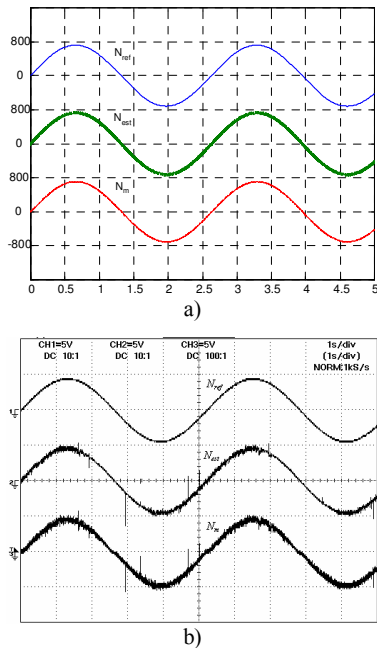


Fig. 2 – Comparação de velocidades de referência, do estimador e do gerador taquimétrico a) Simulação, b) Experimental

Na Fig. 2 apresentam-se resultados de simulação e experimentais da resposta do estimador comparada com a do gerador taquimétrico. Verifica-se que a evolução da velocidade estimada após filtragem de ruído acompanha a velocidade medida no veio do motor.

3. Modo de deslizamento

O erro de velocidade, $e_\omega = \omega_{ref} - \omega$, é a entrada de uma função de comutação S , diferencial de primeira ordem (3)

$$S = \dot{e}_\omega + k_e e_\omega \quad (3)$$

Anular esta função é um objectivo importante do controlador pois impor $S = 0$ é equivalente a conduzir o estado mecânico do rotor, através de uma recta de comutação, para um ponto de equilíbrio, ou eventualmente a um ciclo limite em seu redor, na origem do plano de fase $(e_\omega, \dot{e}_\omega)$. Por outras palavras, o estado mecânico do rotor é forçado a seguir uma trajectória segundo um movimento deslizante (modo de deslizamento) que, em termos de evolução no tempo, corresponde a anular exponencialmente o erro de velocidade com uma constante de tempo $\tau_e = k_e^{-1}$.

Para atingir o objectivo $S = 0$ aplica-se à armadura da máquina uma tensão descontínua $\pm U$ respeitando, numa primeira abordagem, uma lei de comutação (4):

$$U_a = \begin{cases} +U & \Leftarrow S > 0 \\ -U & \Leftarrow S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

A Fig. 3 mostra, no plano de fase $(e_\omega, \dot{e}_\omega)$, a influência do parâmetro k_e da função (3) integrada no esquema de controlo de velocidade do MCC. As quatro situações foram simuladas para uma velocidade de referência constante, com um binário de carga de 6 Nm e durante 0,2 s sem limitação de corrente e usando a lei (4).

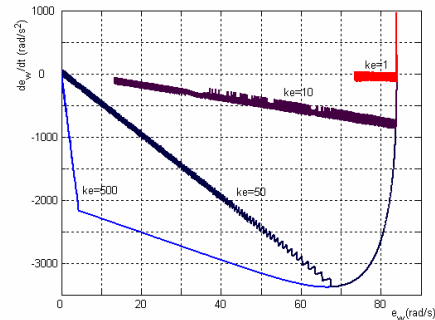


Fig. 3 - Influência de k_e vista no plano de fase

As trajectórias do estado iniciam-se no canto superior direito e encaminham-se para as rectas de comutação (5) que tendem a conduzir o estado para a origem do plano.

$$\dot{e}_\omega = -k_e e_\omega \quad (5)$$

Para elevados k_e (baixas constantes de tempo) o intervalo de tempo simulado foi suficiente para praticamente anular o erro, ao contrário do ocorrido com baixos k_e .

Razões de natureza térmica impõem que a corrente da armadura não deva ultrapassar determinados limites pelo que o controlador deve incluir em algum lugar da sua estrutura um limitador de corrente.

A influência de um limitador de corrente pode ser vista na Fig. 4. Durante a limitação de corrente, comutações sucessivas da tensão da armadura mantêm a corrente em redor do valor máximo permitido, sendo o seu valor médio praticamente constante. O binário electromagnético desenvolvido e a aceleração também serão aproximadamente constantes pelo que, para uma velocidade de referência constante, o erro de aceleração também será constante o que se constata na figura. Obviamente se as correntes permitidas forem mais baixas o intervalo de tempo para anular o erro será superior.

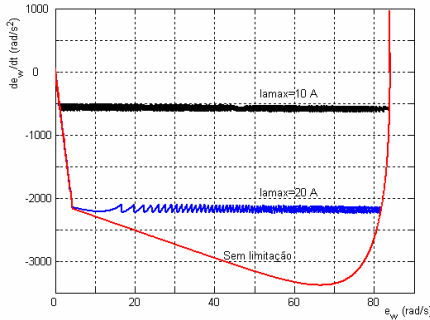


Fig. 4 - Influência do limitador de corrente

4. Comutador de tensão

A ideia base do presente controlador é atribuir a um só bloco, aqui designado por comutador de tensão, a tarefa de verificar o sinal da função da comutação e conferir se o valor da corrente da armadura está dentro de um intervalo seguro. Assim, a decisão de aplicar $\pm U$ à armadura já tem em conta a necessidade de limitação da corrente.

O comutador de tensão tem como entradas a corrente da armadura i_a , o seu valor máximo $I_{am\acute{a}x}$ de referência e a função S . A sua saída é sgn_U_a que representa o sinal da tensão a aplicar à armadura. A actuação do bloco pode ser descrita da forma seguinte (Fig. 5):

- Se o valor absoluto da corrente da armadura for menor que um valor máximo $I_{am\acute{a}x}$ preestabelecido, isto é, para uma corrente dentro do intervalo de segurança, o sinal de S determina, pela lei de comutação, o sinal de tensão a aplicar $\pm U$.
- Se a corrente estiver fora do intervalo permitido o sinal da tensão a aplicar será aquele que faz regressar a corrente àquele intervalo.

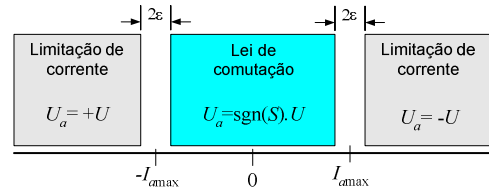


Fig. 5 - Saída do comutador de tensão

A decisão do comutador de tensão depende do sinal da função de comutação, sgn_S , mas inclui também uma acção limitadora da corrente que é determinada pela análise das combinações das variáveis lógicas (Tabela I) onde $\delta > 0$ e $\epsilon > 0$ são semi-larguras de bandas de histerese.

Os comparadores histeréticos usados para sgn_S e abs_i_a (Fig. 6) destinam-se a limitar, se necessário, a frequência de comutação dos semicondutores do conversor CC/CC que alimenta a armadura motor. A primeira banda de histerese actua durante o modo de deslizamento e a segunda durante a limitação de corrente.

TABELA I. – Obtenção do sinal de U_a

sgn_S	0 1 0 1 0 1 0 1	$sgn_S = 1 \Leftrightarrow S > \delta$
sgn_i_a	0 0 1 1 0 0 1 1	$sgn_i_a = 1 \Leftrightarrow i_a > 0$
abs_i_a	0 0 0 0 1 1 1 1	$abs_i_a = 1 \Leftrightarrow i_a - I_{am\acute{a}x} > \epsilon$
sgn_U_a	0 1 0 1 1 1 0 0	$sgn_U_a = 1 \Leftrightarrow U_a > 0$

Da Tabela I resulta a função lógica (6) que traduz a resposta do comutador de tensão.

$$sgn_U_a = (sgn_S \wedge \overline{abs_i_a}) \vee (abs_i_a \wedge \overline{sgn_i_a}) \quad (6)$$

Na Fig. 6 é apresentado o diagrama de blocos do comutador de tensão que traduz a implementação de (6) usando NANDs.

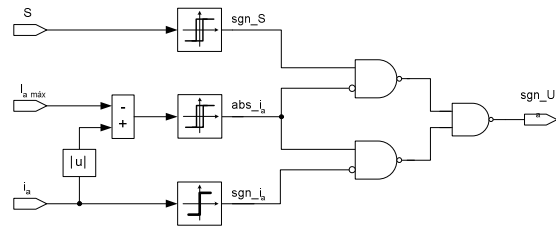


Fig. 6 – Diagrama de blocos do comutador de tensão

5. Resultados

A Fig. 7 apresenta a montagem experimental do accionamento usando um motor de corrente contínua de excitação independente alimentado por um conversor CC/CC de quatro quadrantes e o respectivo comando.

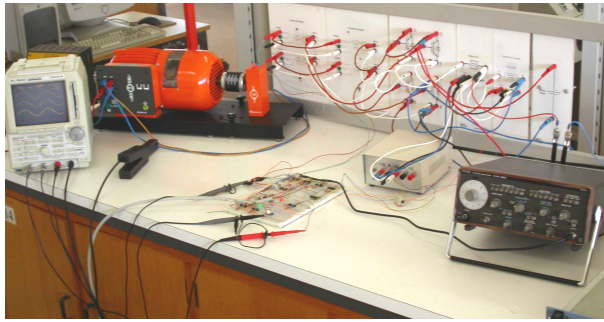


Fig. 7 – Accionamento experimental

Parâmetros da máquina:

$$U_{nom} = 220 \text{ V}; \quad I_{anom} = 7,5 \text{ A}; \quad 2150 \text{ rpm}; \quad R_a = 7,53 \ \Omega;$$

$$L_a = 0,015 \text{ H}; \quad R_f = 1061 \ \Omega; \quad L_f = 58,37 \text{ H};$$

$$J = 0,00603 \text{ kgm}^2; \quad k_C = 0,3047 \text{ Nm}; \quad k_D = 0,0006 \text{ Nms}$$

As Fig. 8 e 9 apresentam resultados de simulação e experimentais para a resposta do controle de velocidade a uma variação do tipo escalão na velocidade de referência de 800 rpm com motor em vazio, usando a velocidade estimada na retroação. Na fig. 8 registou-se a velocidade de referência, a evolução da velocidade obtida pelo estimador e pelo gerador taquimétrico.

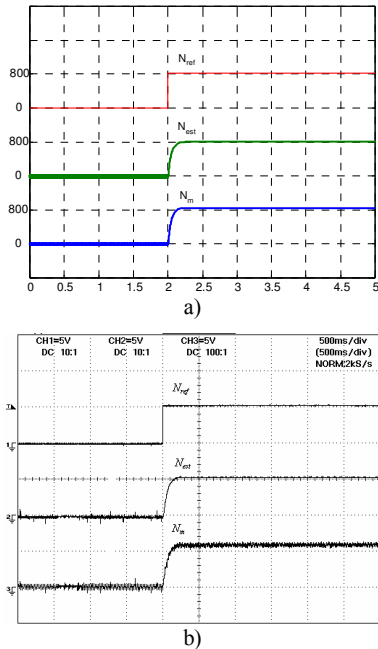


Fig. 8 – Resposta do controle de velocidade: a) Simulação, b) Experimental

Na Fig. 9 registou-se a velocidade de referência, a evolução da velocidade estimada e a corrente na armadura em condições idênticas às anteriores. Nota-se, em torno da velocidade nula, oscilações de corrente de amplitude significativa.

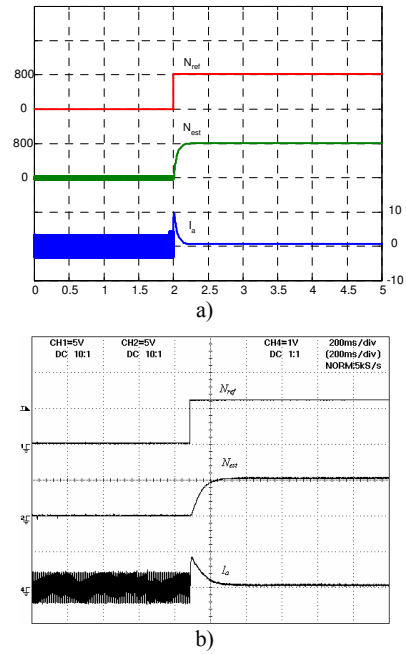


Fig. 9 – Resposta do controle a escalão de velocidade: a) Simulação, b) Experimental

Na fig. 10 apresentam-se resultados de simulação e experimentais da resposta do controle de velocidade a uma variação tipo onda quadrada com inversão do sentido de marcha com 0,8 Hz, e amplitude 1400 rpm pico a pico, na referência, quando a máquina se encontra em vazio. Observou-se a velocidade de referência, a evolução da velocidade estimada e a corrente na armadura.

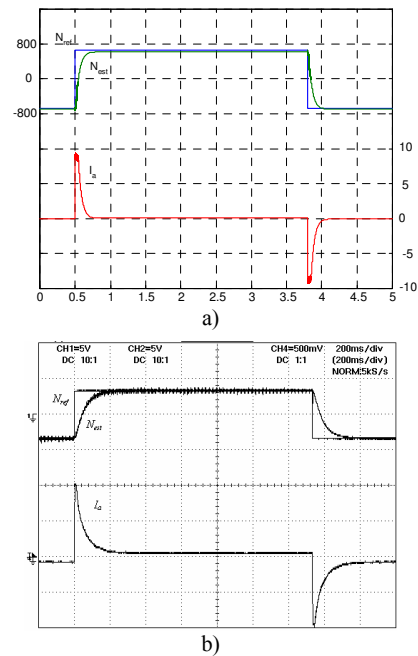


Fig. 10 – Resposta do controle a onda quadrada: a) Simulação, b) Experimental

Na Fig. 11 permite a comparação dos resultados experimentais do controle de velocidade usando o estimador de velocidade (Fig. 11a) e o gerador

taquimétrico (Fig. 11b) na retroação no sinal da velocidade.

Durante a aceleração e a desaceleração do rotor verifica-se que a corrente da armadura está limitada.

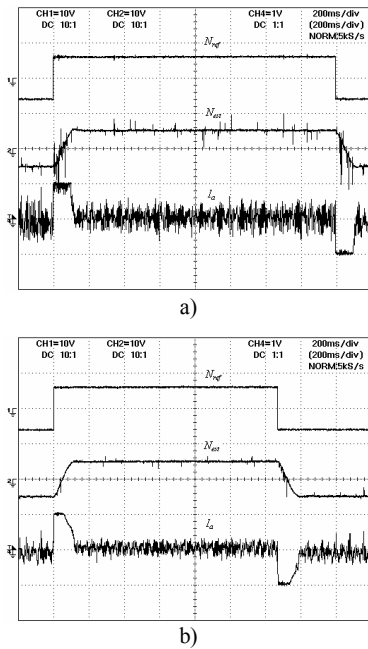


Fig. 11 – Acção do limitador de corrente (experimentais)
a) Estimador, b) Gerador taquimétrico

6. Conclusões

O controlador de velocidade inclui uma função de comutação e um limitador de corrente, a sua implementação é simples e, na ausência de controladores PI, a afinação requerida é elementar.

Os resultados obtidos mostram que as diferenças obtidas entre a velocidade estimada e a real são insignificantes mostrando que o estimador pode ser usado em substituição do gerador taquimétrico.

O desempenho global do controlador parece ser adequado a uma grande número de aplicações práticas.

Referências

- [1] Kazmierkowski, M.P.; Tunia, H., "Automatic Control of Converter-Fed Drives" PWN – Polish Scientific Publishers, Elsevier, 1994.
- [2] Guerreiro, M., "Controlo de Posição de um Motor CC por Modo de Deslizamento – Realização Mínima" – Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Novembro, 1992.
- [3] Utkin, V.I., "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 40, N°1, pp. 23-36, Fevereiro, 1993.