Modelamento e Estudo dos Parâmetros do MIT em Espaço de Estados

Flávio Vitorino Queiroz[1], Hélcio Henrique Gonçalves da Silva[1], Matheus Rodrigues Marangon[2], José Henrique Galeti[1]

[1]Instituto Federal do Mato Grosso do Sul – Três Lagoas – MS

[2]China Three Gorges Corp – Ilha Solteira - SP

flavio.vitorino.queiroz@gmail.com, jose.galeti@ifms.edu.br

Resumo

O uso de controle em motores de indução trifásicos (MITs) através de inversores de frequência é de fundamental importância em diversas aplicações cuja variação de velocidade é necessária. Dependendo do seu objetivo, é possível controlar variáveis como torque, velocidade e eficiência de forma direta ou indireta. Esse trabalho tem como objetivo desenvolver o modelamento do controle em espaços de estados visando a otimização da eficiência energética operacional do MIT, considerando variações de carga e velocidade. Utiliza-se o conceito de Controladores Robustos H∞ e Inequações Matriciais Lineares (LMI's). Resultados para um modelo teórico são apresentados para validação futura com resultados práticos.

Palavras-chave: Controlador H∞; Inequações Matriciais Lineares; Motores de indução trifásica.

Introdução

O uso de motores de indução trifásica (MIT) é responsável pela maior parte dos gastos de energia da uma indústria. Por sua vez, o setor industrial consome cerca de metade da energia produzida em solo brasileiro. Desta forma, melhorar a eficiência operacional dos MITs é de fundamental importância para otimizar o consumo de energia nacional. O desenvolvimento recente de tecnologias nas áreas de microeletrônica, eletrônica de potencia e o aprimoramento de técnicas de controle, como controle escalar e vetorial, tem sido fundamentais para melhorar os processos e otimizar a utilização de MITs [1]-[4]

Esse trabalho visa aplicação em moendas de cana, sistemas de ar condicionado e esteiras de carga. Estes sistemas, em particular, não são necessariamente operados com velocidade e torque constantes e, portanto, podem ter seus parâmetros de alimentação otimizados através de um sistema de controle especializado afim de melhorar a eficiência do MIT.

O controle do MIT proporciona as seguintes vantagens [5]:

1. Diminuição no consumo de energia elétrica
2. Redução no custo de infraestrutura
3. Atuação em diversas áreas da indústria
4. Flexibilidade na operação

Atualmente, diversas metodologias de controle são disponibilizadas na literatura especializada, cada qual com suas características e aplicabilidade especifica. Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um controlador robusto do tipo H∞ para modelagem dinâmica do MIT em espaços de estado. Este modelo é desenvolvido para controle do inversor no ponto ótimo (i.e., de melhor eficiência) de operação do MIT, considerando cargas variáveis. Para tal, são obtidos os seguintes parâmetros do MIT: corrente, tensão, potência, velocidade e torque. Neste trabalho é proposto a utilização do método de inequações matriciais lineares (LMI's) desenvolvido por Lyapunov para trabalhar com sistemas instáveis e incertezas. As simulações dinâmicas teóricas que serão utilizadas para validação do modelo prático a ser desenvolvido são realizadas através da plataforma Matlab/Simulink.

Fundamentação teórica

Nessa seção é apresentada uma revisão de como é feita a elaboração de LMIs no controle do MIT, a partir de formulas e equações tiradas do modelamento parcial do motor [1], [4], [6].

$$x(t) = A(\alpha)x(t) + B_u(\alpha)u(t) + B_w(\alpha)T_l(t) \qquad (1)$$
$$y(t) = C(\alpha)x(t)$$

Em (1), temos as equações do motor em formas de variáveis de estados, a onde o $T_l(t)$ é o torque de carga, e pela representação em variáveis de estado utilizando o controle robusto, consideramos como uma perturbação no sistema.

$$A(\alpha) = \begin{bmatrix} a^{11} & a^{12} & a^{13} & a^{14} \\ a^{21} & a^{22} & a^{23} & a^{24} \\ a^{31} & a^{32} & a^{33} & a^{34} \\ a^{41} & a^{42} & a^{43} & a^{44} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = -\left[\frac{R_s}{\sigma \cdot l_s} + \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma \cdot l_s}\right];\ a_{12} = w_s;\ a_{13} = \frac{l_m \cdot R_r}{\sigma \cdot l_s \cdot l_r{}^2};$$

$$a_{21} = -w_s;\ a_{22} = -\frac{R_s}{\sigma \cdot l_s};\ a_{23} = \frac{w_s \cdot l_m}{\sigma \cdot l_s \cdot l_r}$$

$$a_{31} = \frac{l_m \cdot R_r}{l_r};\ a_{33} = -\frac{R_r}{l_r};\ a_{42} = \frac{Kt}{J};\ a_{44} = -\frac{B}{J};$$

$$a_{14} = a_{24} = a_{32} = a_{34} = a_{41} = a_{43} = 0 \qquad (2)$$

Em (2), possuímos variáveis como R_s e $R_{r,}$ que são as resistências do estator e rotor, também temos l_s, l_r e l_m, que representam as indutâncias do estator, rotor e mutua, B, J, σ, onde respectivamente o primeiro e o coeficiente de atrito viscoso, momento de inercia e coeficiente de dispersão do MIT, w_s é referencia síncrona girante e K é a constante de torque, estabilidade.

$$Bu(\alpha) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix}$$

$$b_{11} = b_{22} = \frac{1}{\sigma \cdot Ls}$$

$$b_{12} = b_{21} = b_{31} = 0$$

$$b_{32} = b_{41} = b_{42} = 0 \qquad (3)$$

$$Bw(\alpha) = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = a_{12} = a_{13} = 0; \qquad (4)$$

$$a_{14} = \frac{1}{J}$$

$$C(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = i_{ds}^{e}$$
$$a_{12} = i_{qs}^{e} \qquad (6)$$
$$a_{13} = \emptyset_{dr}^{e}$$
$$a_{14} = w_r$$

Em (6), i_{ds}^{e} e i_{qs}^{e} são as componentes do eixo direto e em quadratura da corrente do estator, $\emptyset_{dr}^{e}$ é o componente do eixo direto e em quadratura do fluxo do rotor e w_r é a velocidade do rotor.

$$u(t) = \begin{bmatrix} v_{ds}^{e} \\ v_{qs}^{e} \end{bmatrix} \qquad (7)$$

Em (7), temos as componentes do eixo direto e em quadratura da tensão do estator e rotor.

Simulações e Resultados

A partir do modelo eletromagnético do MIT foi desenvolvido um modelo escalar e usou-se o software Simulink-Matlab, para, de forma simulada, se obter as velocidades em função das cargas envolvidas, sejam elas cargas mecânicas aplicadas ao eixo do motor sejam as advindas do momento de inercia em um processo de aceleração do motor. O modelo utilizado pode ser observado na figura 1.

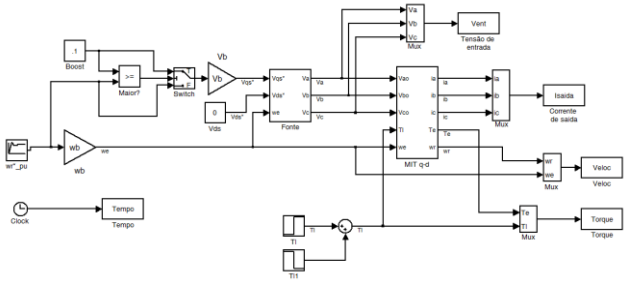

Figura 1. Modelo no Simulink usado na simulação.

Simulou-se um ciclo contendo uma aceleração, seguindo de uma desaceleração, e, na sequencia uma variação de carga e a correção da velocidade para manter a velocidade no eixo constante após a aplicação de uma carga, como pode ser observado na figura 2

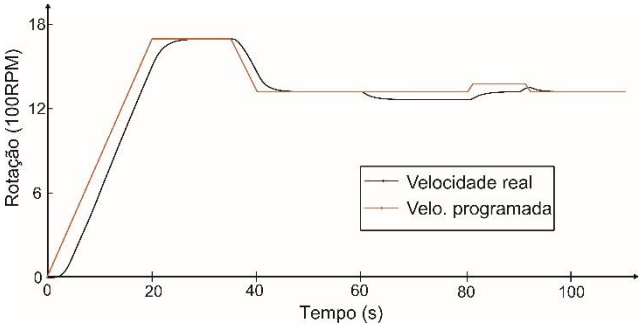

Figura 2. Velocidade programada no inversor e velocidade real no eixo.

Durante os instantes de 0 à 20 s houve uma aceleração, nos instantes de 35 s à 40 s uma desaceleração, nos instantes entre 60 e 90 s foi aplicada uma carga mecânica ao eixo do MIT, e, nos instantes entre 80 e 90 s o inversor aumentou a velocidade do motor para compensar a queda de velocidade no eixo devido a aplicação da carga mecânica. Observa-se na figura 3 os instantes em que se da a aplicação da carga mecânica ao eixo do MIT e o comportamento simulado do torque no eixo do MIT ao longo de todo o ciclo proposto.

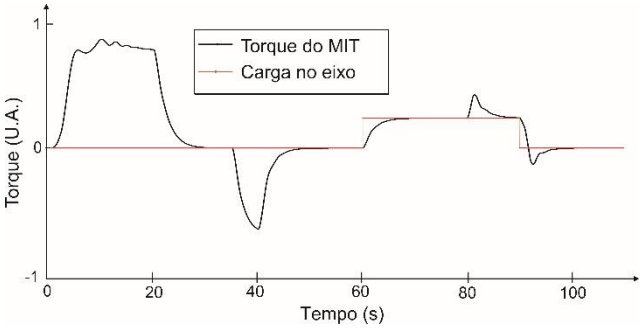

Figura 3. Torque no eixo do MIT durante o ciclo de aceleração desaceleração e carregamento, e, instante em que foi aplicado a carga ao eixo.

Em decorrência da aplicação da carga ocorre uma diminuição da cotação do eixo, caso seja necessário a correção da velocidade, esta se da à um determinado custo energético, i.e. o motor dera de dispender uma energia adicional para a correção da velocidade, como pode ser observado nos gráficos das figuras 4 e 5.

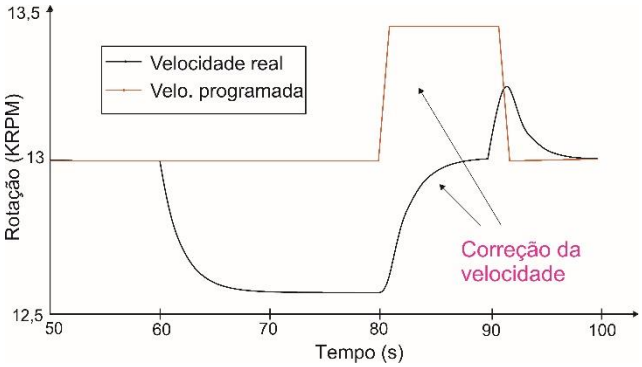

Figura 4. Detalhe da figura 2, com o instante em que o inversor corrige a velocidade do motor após a aplicação da carga.

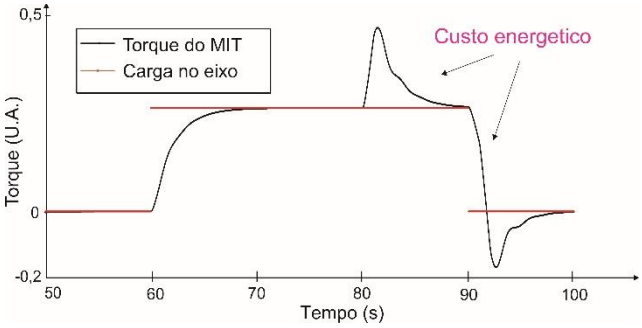

Figura 5. Torque necessário (adicional) ao eixo do motor para a compensação da variação da velocidade.

No entanto alguns processos podem ser mais sensíveis ao custo energético do que a um controle rigoroso de velocidade, assim como um condutor de um veiculo pode optar por reduzir a velocidade durante o período de subida em uma estrada para obter uma economia de energia, um processo de controle do MIT poderia através de um relaxamento do valor da velocidade buscar o ponto de maior eficiência energética do motor.

A literatura [2] descreve pontos de ótima operação se considerarmos as perdas no MIT.

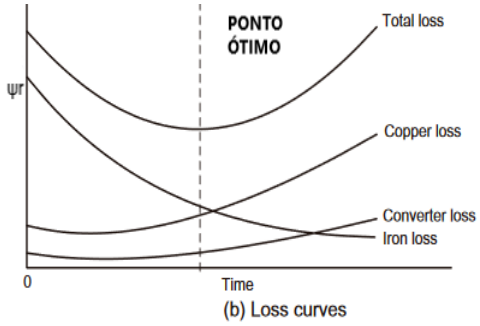

Figura 6. Gráfico de tempo pelo fluxo do rotor, ele mostra a reta de eficiencia do motor [2].

Na figura 1, podemos ver que tem um ponto de otimização previsto na parte teórica, esse ponto que procuramos obter na pratica, nesta imagem temos um torque e velocidade constante, e a partir da diminuição do fluxo, obtemos uma queda na perda do ferro e um aumento na perda do cobre, e a diminuição na perda total, até chegar ao ponto ótimo, depois de um tempo temos um aumento significante na perda do cobre e do conversor, assim aumento a perda do sistema.

Resultados e Considerações Finais

Em decorrência das orientações de afastamento pela pandemia ficamos impossibilitados de obter resultados práticos e compará-los com os teóricas, portanto a ideia central seria dar continuidade em um próximo projeto validando o modelo proposto.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq pelo apoio financeiro à este projeto de pesquisa.

Referências

[1] NATURESA, J. S.; Levantamento dos Programas de Eficiência Energética para Sistemas Motrizes na Indústria e os Principais Resultados do PROCEL info. VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – CBPE, 2008, Salvador.

[2] BOSE, B. K. Modern Power electronics and ac drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

[3] I. J. Smith and J. Salmon, "High Efficiency Operation of an Open-Ended Winding Induction Motor using Constant Power Factor Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, no prelo, 2018

[4] 3. J. Wang, F. Wang, G. Wang, S. Li and L. Yu, "Generalized Proportional Integral Observer-Based Robust Finite Control Set Predictive Current Control for Induction

Motor Systems with Time-Varying Disturbances," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, no prelo, 2018

[5] LUGLI, A. B.; ARAÚJO, F. M.; FLORIANO, G. H. F.; SILVA, J. P.; HENRIQUES, J. P.; VOLPATO, R. M.; MASSELLI, Y. M. C. Controle vetorial e escalar para motores de indução trifásicos. In: SAISEE, 2015, Santa Rita do Sapucaí. Proceedings… Santa Rita do Sapucaí: INATEL, 2015.

[6] ORTUNHO, T. V.; RIBEIRO, J. M. S.; TEIXEIRA, M. C. M.; GARCIA, J. P. F. Projeto de controladores robustos H∞ usando LMIs para controle de um motor de indução trifásico com incertezas. In: DINCON, 2015, Natal. Proceedings… Natal: SBMAC, 2015.