

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

Comparação de Métodos de Sintonia dos Controladores PI para o Controle Vetorial por Orientação de Campo de Rotor do MI

Arthur H. Ribeiro¹ e Rogério V. Jacomini²

¹Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, Câmpus Hortolândia, ribeiro.arthur@aluno.ifsp.edu.br.

² Professor do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFSP, jacomini@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.05-3 Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência.

RESUMO: Este artigo apresenta uma comparação de quatro métodos mais comuns de sintonias de controladores Proporcional-Integral (PI) utilizados no controle vetorial por orientação de campo de rotor (FOC) de máquinas de indução (MI). O objetivo principal é identificar o método mais adequado para garantir a melhor resposta transitória e de regime permanente para o controle da corrente/torque e de velocidade. Simulações computacionais, utilizando o Matlab/Simulink, foram realizadas utilizando os quatro métodos de sintonia propostos: método por tentativa e erro (MTE), Ziegler-Nichols (MZN), método baseado em modelos (MBM) e método de otimização (MO).

PALAVRAS-CHAVE: Motor de Indução; Controle Vetorial; Orientação de Campo de Rotor; Controlador PI; Ziegler-Nichols.

Comparison of PI Controller Tuning Methods for Rotor Field Orientation Vector Control of MI

ABSTRACT: This paper presents a comparison of four common tuning methods for Proportional-Integral (PI) controllers used in rotor field orientation vector control (FOC) of induction machines (IM). The main objective is to identify the most appropriate method to ensure the best transient and steady-state response for current/torque and speed control. Computer simulations, using Matlab/Simulink, were performed using the four proposed tuning methods: trial-and-error method (TEM), Ziegler-Nichols (ZNM), model-based method (MBM) and optimization method (MO).

KEYWORDS: Induction Motor; Vector Control; Rotor Field Orientation; PI Controller; Ziegler-Nichols.

INTRODUÇÃO

Em aplicações industriais o motor mais utilizado é o de indução ou assíncrono, por apresentar alta robustez, baixa necessidade de manutenção e de seu baixo custo. Para o controle de velocidade do motor de indução, o controle V/f constante e o controle vetorial são as técnicas mais aplicadas. Sendo

o controle vetorial que apresenta melhor desempenho dinâmico, pois permite controlar independentemente o torque e o fluxo do motor, proporcionando um desempenho similar ao de motores de corrente contínua. Existem dois tipos principais de controle vetorial: controle direto de torque (direct torque control - DTC) e o controle vetorial por orientação de campo (field oriented control - FOC) [Bim, 2018].

O controle vetorial por orientação de campo é a técnica de controle vetorial mais utilizado e aplicado, pois apresenta uma grande vantagem, como: menor ruído eletromagnético e frequência de chaveamento constante [dos Santos et al., 2022]. Na estrutura do controle vetorial estão os controladores PI, que são responsáveis por ajustar a diferença entre as variáveis que se desejam controlar (torque, fluxo e velocidade) [Bim, 2018]. A sintonia do controlado é a escolha adequada dos seus parâmetros (ganhos proporcionais e integrais), é fundamental para garantir um desempenho satisfatório do sistema de controle [Rebouças, 2017, Júnior, 2010]. Uma sintonia inadequada pode levar a problemas como oscilações, tempo de resposta desadequado, erro estacionário e instabilidade [Ogata, 2015, 2008]

Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma comparação detalhada dos métodos de sintonia de controladores PI propostos para o controle vetorial de MI. A comparação será realizada por meio de simulações computacionais. Através dessa análise, busca-se identificar o método de sintonia mais adequado para garantir um desempenho satisfatório, considerando para este trabalho: um tempo de acomodação de (T_s), sobremodulação (M_p) e erro estacionário (EE).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para comparação e avaliação dos quatro métodos de sintonia foi realizada uma simulação computacional utilizando o Matlab/Simulink. O modelo matemático da planta de controle (modelo matemático do motor de indução sob orientação de campo do rotor) é apresentada na sequência, posteriormente, o diagrama de controle, e, por fim, uma breve descrição dos métodos de sintonia dos controladores PIs.

Modelo e Controle do Motor de Indução sob Orientação do fluxo de Rotor

Se o sistema de coordenada dq é escolhido de maneira que o eixo direto coincide com o vetor fluxo de rotor: a componente de eixo em quadratura é zero ($\psi_{rq} = 0$) e; a componente de eixo direto é a magnitude do fluxo de rotor, ($\psi_{rd} = |\psi_r|$). Assim, segundo Bim [2018], temos o seguinte sistema de equações escrito na forma matricial:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & \omega_1 & a_2 \\ -\omega_1 & -a_1 & -a_3\omega_r \\ b_1 & 0 & -b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde: i_{sd} e i_{sq} são as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente de estator (A); ψ_r magnitude do fluxo de rotor (Wb); v_{sd} e v_{sq} são as componentes de eixo direto e em quadratura da tensão de estator (V); R_1 e R_2 são as resistências de estator e rotor, respectivamente, (Ohm); L_1 e L_2 são as indutâncias próprias de estator e rotor, respectivamente, (H); L_m é a indutância mútua (H); $a_1 = \frac{R_1 + k_r^2 R_2}{L_1'}$; $a_2 = \frac{k_r R_2}{L_2 L_1'}$; $a_3 = \frac{k_r}{L_1'}$; $b_1 = \frac{k_r}{R_2}$; $b_2 = \frac{R_2}{L_2}$; $c_1 = \frac{1}{L_1'}$ são definidas como sendo as constantes das matrizes. Nas quais, $k_r = \frac{L_m}{L_2}$ é o fator de acoplamento do rotor e $L_1' = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$ é definida como indutância transitória de estator.

- Controle de Torque e de fluxo

correlações dos ganhos K_p e K_i com os desempenhos de controle apresentado abaixo, modifica-se os ganhos para alcançar a resposta desejada:

- **Overshoot** Se o sistema apresentar um overshoot excessivo (ultrapassagem do valor de referência), diminui-se K_p .
 - **Tempo de acomodação** Se o sistema levar muito tempo para se estabilizar, aumenta-se K_p ou K_i .
 - **Erro em regime permanente** Se houver um erro em regime permanente, aumenta-se K_i .
 - **Oscilações** Se o sistema apresentar oscilações, diminui-se tanto K_p quanto K_i .
3. Método baseado em modelos (MBM): Estes métodos utilizam um modelo matemático do processo para determinar os valores dos ganhos. Eles podem ser mais precisos do que os métodos baseados em testes, mas exigem um conhecimento mais profundo do sistema.
 4. Método de otimização (MO): Estes métodos utilizam técnicas de otimização, baseado em Ogata [2008], para encontrar os valores de K_p e K_i que entregue uma resposta com o menor overshoot e um tempo de acomodação que apresente um valor num intervalo de tempo desejado.

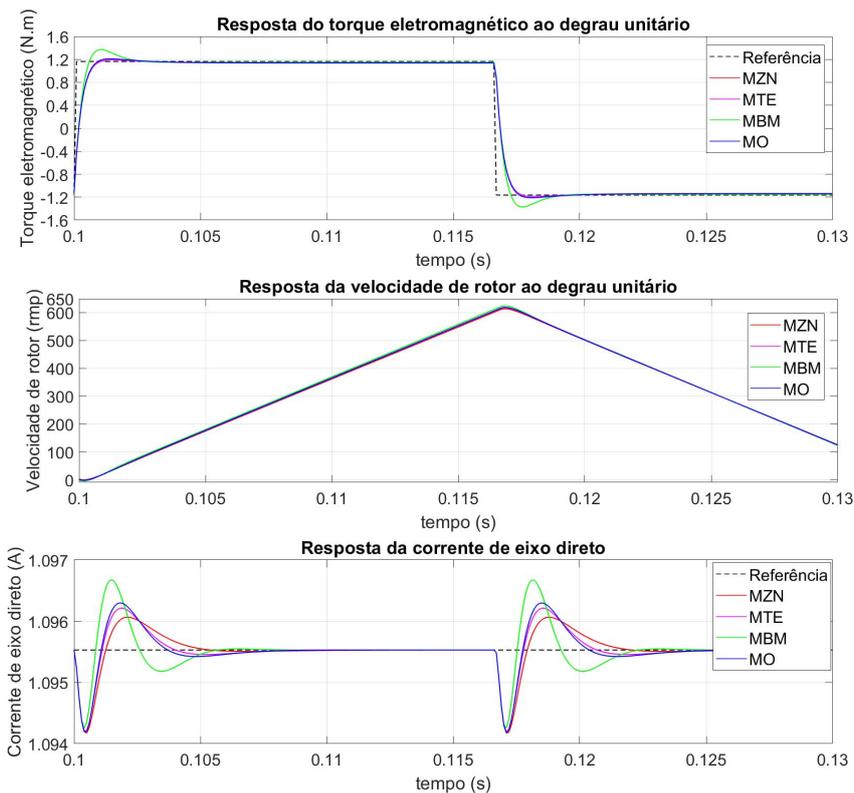


Figura 2: Malha de corrente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção apresenta os resultados das simulações, comparando o desempenho dos diferentes métodos de sintonia, para um motor de indução com os seguintes parâmetros:

A sintonia dos controladores PI foi projetada para atender os seguintes requisitos de desempenho:

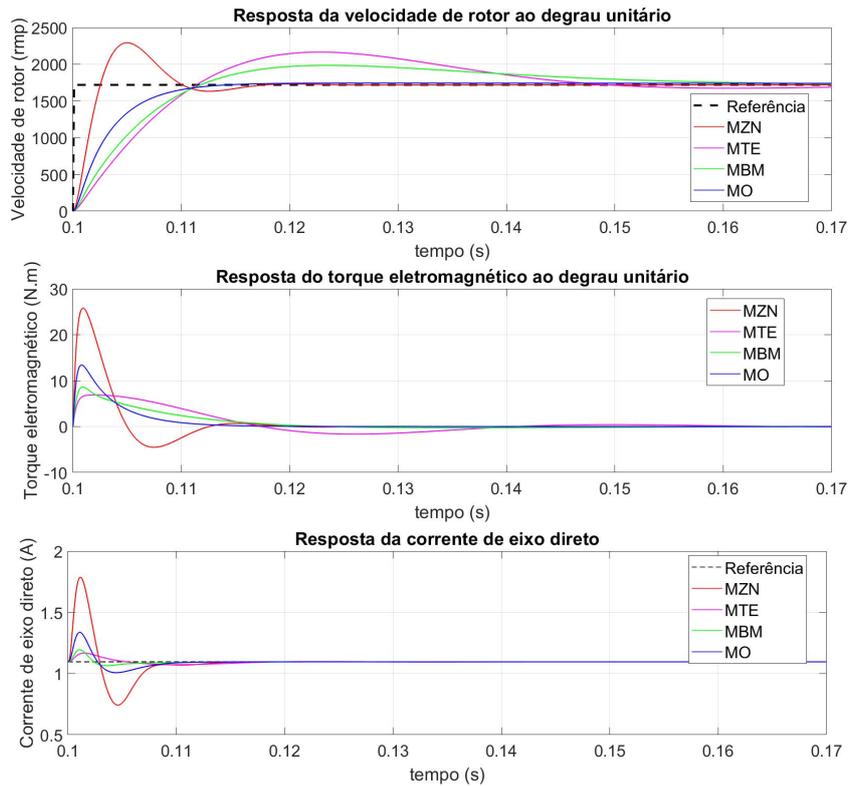


Figura 3: Malha de velocidade.

- Para a malha de torque/corrente: T_s entre 2 - 4 ms, M_p menor que 5 % e erro estacionário (EE) entre $\pm 2\%$. Para a malha de velocidade: T_s entre 10 - 14 ms, M_p menor que 10 % e erro estacionário (EE) entre $\pm 2\%$.

Foram realizados 2 testes de simulação para comparar o desempenho dos controladores PI para as diferentes técnicas de ajustes:

- Para o primeiro teste, atua-se somente a malha de torque/corrente: para o motor a vazio, realiza-se degraus no torque eletromagnético, que varia em forma de onda quadrada com amplitude de 1,164 A na frequência de 30Hz.
- Para o segundo teste, a malha de velocidade atua em cascata com a malha de corrente: para o motor a vazio, realiza-se um degrau na velocidade que varia de 0 rpm a 1432 rpm.

Resultados de Simulação:

A Figura 2 apresenta as respostas das componentes de eixo direto e em quadratura da corrente de estator e da velocidade de rotor para o primeiro teste, sendo que a análise de desempenho para a resposta da corrente em quadratura está apresentada na Tabela 1. Verifica-se que a velocidade tende a crescer linearmente ao degrau positivo do torque eletromagnético T_{em} de referência e tende a diminuir linearmente ao degrau negativo de T_{em} , validando a equação de movimento. A componente da corrente de eixo direto apresenta um pequeno distúrbio após cada degrau devido ao acoplamento entre as componentes.

A Figura 3 apresenta as respostas das componentes de eixo direto e em quadratura da corrente de estator e da velocidade de rotor para o segundo teste, sendo que a análise de desempenho para a resposta da corrente em quadratura está apresentada na Tabela 2. Verifica-se que o torque eletromagnético T_{em}

Tabela 1: Ganhos do PI e desempenho de controle para malha de corrente.

Estratégia	Ganhos do Controlador PI		Requisitos de desempenho		
	K_p	K_i	T_s (ms)	M_p (%)	EE (%)
MZN	174.5	114.940	1,8	3	2,1
MTE	174.5	114.940	1,8	3	2,1
MBM	167	237.707,8	2,4	21	1,3
MO	172	130.300	2,6	4,6	1,7

Tabela 2: Ganhos do PI e desempenho de controle para malha de velocidade.

Estratégia	Ganhos do Controlador PI		Requisitos de desempenho		
	K_p	K_i	T_s (ms)	M_p (%)	EE (%)
MZN	0.1417	60.71	15,7	33,3	0
MTE	0.0354	6.1	69	25,9	0
MBM	0.0463	2.22	60	15,24	0
MO	0.0851	0.41	11,5	1,45	0

de referência gerada pela saída do controlador PI e tende a aumentar após o degrau para a velocidade alcance a respectiva velocidade de referência. A componente da corrente de eixo direto apresenta um pequeno distúrbio após o degrau devido ao acoplamento entre as componentes.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou metodologias para sintonia de controladores PI para o controle vetorial por orientação de campo de rotor do MI, fornecendo uma análise comparativa detalhada dos diferentes métodos de sintonia de controladores PI para o controle vetorial de MI. Os resultados obtidos podem servir como guia para a seleção do método mais adequado em diferentes aplicações.

REFERÊNCIAS

aaaa.

Edson Bim. *Máquinas Elétricas e Acionamentos*. 4nd ed., GEN LTC, 2018.

Thiago Baldim dos Santos, Rafael Figueiredo, Igor Olini, Ademir Pelizari, and Alfeu J. Sguarezi Filho. Análise comparativa de técnicas de controle direto de torque e controle preditivo de torque aplicadas em tração elétrica. *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, 2022.

Antonio Barbosa De Souza Júnior. Estudo e implementação de um servo posicionador aplicando controle vetorial indireto a um motor de indução trifásico. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

Katsuhiko Ogata. *Matlab for Control Engineers*. Pearson, 2008.

Katsuhiko Ogata. *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson; 5ª edição, 2015.

Lucas Rabelo Rebouças. Controle de um motor de indução trifásico como servoposicionador aplicado a um manipulador robótico utilizando controle de campo orientado. Technical report, Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa, 2017.