

ALEXANDRE, Denis Carlini; COSTA, Cesar da; CAPORALI, Alexandre Simião. Desenvolvimento de algoritmo embarcado para controle de torque de motor de indução trifásico. In: WORKSHOP DE INOVAÇÃO, PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO, 3., 2018, São Carlos, SP. *Anais...* São Carlos, SP: IFSP, 2018. p. 175-178. ISSN 2525-9377.

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO EMBARCADO PARA CONTROLE DE TORQUE DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

DENIS CARLINI ALEXANDRE; CESAR DA COSTA; ALEXANDRE SIMIAO
CAPORALI

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil

RESUMO: Na indústria, grande parte dos processos de fabricação utilizam motores de indução trifásicos (MITs), e necessitam de controle de rotação. A solução mais eficiente para controlar o torque e a rotação dos MITs é o controle vetorial. Neste trabalho, é proposto o desenvolvimento de um sistema de controle de rotação e torque, baseado na técnica IFOC, sem a utilização de sensores (*sensorless*), embarcado em dispositivo microprocessado, tipo DSP (*Digital Signal Processor*), para aplicação em motor de indução trifásico. Para a realização de ensaios práticos e a validação do sistema de controle de torque e rotação proposto foi implementada uma bancada de ensaios. Apresentam-se os resultados das medições de rotações estimadas e medidas, úteis para comparações (de rendimento) com outras técnicas de controle de torque e rotação existentes, que podem ser ensaiadas na bancada de testes experimentais desenvolvida.

PALAVRAS-CHAVE: Controle. Motor de Indução Trifásico. Processador Digital de Sinais.

ABSTRACT: In industry, most manufacturing processes use three-phase induction motors (MITs), and require rotation control. The most efficient solution for controlling torque and rotation of MITs is vector control. In this work, it is proposed the development of a rotation and torque control system, based on the IFOC technique, without the use of sensors (*sensorless*), embedded in a microprocessed device, DSP (*Digital Signal Processor*) type, for application in induction motor three-phase. In order to carry out practical tests and the validation of the torque and rotation control system proposed, a test bench was implemented. The results of the estimated and measured rotations measurements, useful for comparisons (yield) with other torque and rotation control techniques, are presented, which can be tested in the experimental test bench developed.

KEYWORDS: Control. Three-Phase Induction Motor. Digital Signal Processor.

INTRODUÇÃO

Os MITs apresentam não linearidades em seu modelo matemático, além do acoplamento existente entre o fluxo magnético e o torque eletromagnético. Entretanto, foram propostos vários métodos de controle vetorial (ZELECHOWSKI, 2005). Os primeiros métodos de controle vetorial aplicados ao MIT foram apresentados no começo da década de setenta por Blaschke e Hasse. Estes métodos baseiam-se no controle por orientação de campo (*Field Orientation Control* - FOC), onde as equações do motor são transformadas para o sistema de coordenadas móveis, em sincronismo com o fluxo do rotor (AJLAN; IDRIS; LEE, 2016; ALSOFYANI; IDRIS, 2016). O objetivo é produzir um desacoplamento entre o fluxo magnético e o torque eletromagnético, possibilitando controlar o MIT de forma semelhante a um motor de corrente contínua. O princípio da técnica FOC, independentemente do tipo de motor, consiste em encontrar-se a posição do fluxo do rotor, e controlar-se a intensidade e a posição da corrente de estator, em relação ao fluxo do rotor (ALTUNA et al., 2015). Quando a corrente de estator encontra-se em quadratura em relação ao fluxo do rotor, o torque produzido é proporcional à intensidade da corrente de estator. A posição do fluxo do rotor pode ser medida

diretamente, através de sensores de efeito Hall (técnica FOC), ou indiretamente (técnica IFOC), quando estimada através de observadores (ANUCHIN et al., 2016).

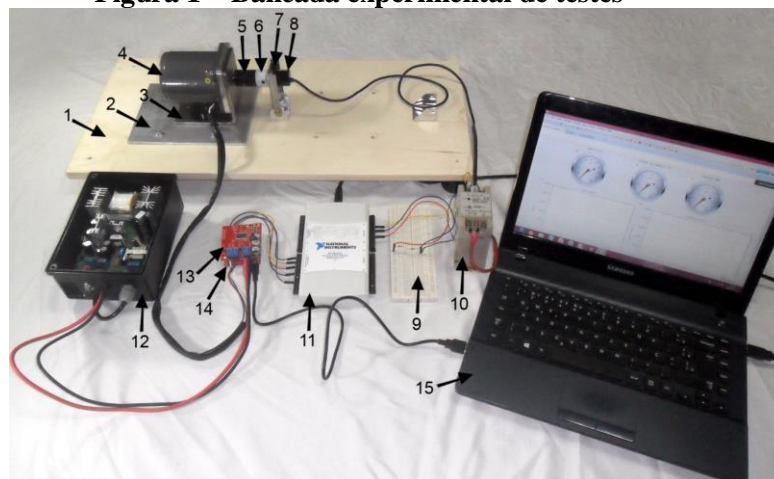
Tandel, Mate e Unde (2016), apresentam o desenvolvimento, simulação, e teste prático de um algoritmo estimador de velocidade de MIT, baseado na técnica IFOC, sem sensor de rotação. Este algoritmo estima o ângulo do fluxo do rotor e seu escorregamento. Simulou-se este algoritmo no programa MATLAB/Simulink®. Posteriormente, ele foi compilado e gravado na memória de um DSP TMS320F28335 da Texas Instruments®. Holzmüller et al. (2017), apresentam um método para diminuir o tempo de resposta da estratégia FOC. Na implementação prática da técnica FOC com um DSP, as fontes de atraso encontram-se na amostragem do conversor analógico-digital.

Este projeto de pesquisa torna-se relevante por pretender implementar a técnica de controle vetorial IFOC, utilizando-se um estimador para substituir o sensor de rotação e o sensor de torque, que possuem um alto custo de mercado. Apresenta-se um caso de estudo real de aplicação de controle de torque de um motor de indução.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização de ensaios e a validação do sistema de controle de torque e rotação, desenvolveu-se uma bancada de ensaios. Esta bancada foi projetada para permitir o reposicionamento de alguns dos materiais que a compõem, conforme o método de ensaio (com o motor em vazio, ou, com o motor com carga). A Figura 1 ilustra a bancada experimental de testes.

Figura 1 – Bancada experimental de testes



A bancada é constituída dos seguintes materiais: (1) Base de madeira, utilizada na fixação de alguns dos componentes da bancada de ensaios; (2) Base de fixação confeccionada em alumínio, utilizada para fixar o suporte à base de madeira; (3) Suporte confeccionado em inox, com furação para fixação do MIT; (4) Motor de indução trifásico da marca EMsynergy®, modelo 800006, com rotor do tipo gaiola de esquilo, potência de saída de 0,0184 CV (13,6W), torque de 0,116 Nm (plena carga), 4 pólos, tensão nominal de 14,7V, rotação nominal de 1121RPM. (5) Conjunto acoplador de eixos com três peças, sendo duas confeccionadas em aço e uma em plástico, utilizado no acoplamento do eixo do MIT aos acopladores de nylon conforme ensaio em vazio ou com carga; (6) Acoplador confeccionado em nylon, utilizado no acoplamento do eixo do encoder ao conjunto de acopladores; (7) Suporte para fixação do *encoder* e alinhamento de eixos; (8) *Encoder* rotativo e incremental da marca Omron®, modelo E6A2-CW5C, com saída a transistor do tipo NPN com coletor aberto, 200 pulsos por volta; (9) Matriz de contatos com resistores de 2,2kOhm; (10) Fonte de corrente contínua da marca Omron®, modelo S82K-01524, com tensão de saída de 24V, potência nominal de saída de 14,4W; (11) Placa de aquisição de dados (*Data Acquisition - DAQ*) da marca National Instruments®, modelo NI USB-6212; (12) Fonte de corrente contínua da marca Voltec, modelo CH2126, com tensão de saída de 24V, potência nominal de

saída de 120W; (13) Placa de controle com processador DSP da marca Texas Instruments®, modelo LaunchXL-F28027F; (14) Placa dedicada ao acionamento de motores trifásicos da marca Texas Instruments®, modelo BoostXL-DRV8301; (15) Computador pessoal com sistema operacional Microsoft® Windows.

O método de controle, ensaiado neste trabalho, baseia-se na técnica conhecida como FOC indireto, ou IFOC. Nesta técnica, não é necessária a utilização de sensores para medição do fluxo magnético no interior do motor, pois, o sistema de controle utiliza um estimador de fluxo magnético (algoritmo proposto). Adicionalmente, neste trabalho, o torque e a rotação também são estimados. Portanto, o sistema de controle ensaiado, depende somente do conhecimento dos parâmetros do MIT, e, dos sensores que medem as tensões e correntes da linha de alimentação do motor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados diversos ensaios do sistema de controle de rotação utilizando-se a bancada desenvolvida (Figura 1) para esta finalidade. Os resultados dos ensaios, com o MIT com carga, encontram-se descritos na TABELA 1. Nesta tabela, comparam-se os valores estimados aos valores medidos.

TABELA 1 - Análise comparativa dos dados do ensaio com carga

Referência em RPM	Média em RPM		Erro %		Desvio Padrão	
	Valor Estimado	Valor Medido	Valor Estimado	Valor Medido	Valor Estimado	Valor Medido
200	199,28	207,9	-0,36	3,95	23,06	11,58
400	400,08	408,44	0,02	2,11	5,66	2,14
600	599,59	608,36	-0,068	1,39	7,06	3,38
800	799,96	808,58	-0,005	1,0725	10,21	4,12
1000	1001,98	992,94	0,198	-0,706	36,11	5,28

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados revelaram que as maiores taxas de erro de RPM ocorreram durante os ensaios com as menores rotações, entretanto, este fato já era esperado, pois as técnicas de controle de torque e rotação, com ou sem sensores, apresentam esta característica. Observou-se que as menores taxas de erro de RPM ocorreram nos ensaios com carga, e nas rotações próximas à nominal, ou seja, nas condições onde o MIT apresenta melhor rendimento.

CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados dos ensaios, conclui-se que o sistema de controle de rotação apresentou desempenho satisfatório. Para a realização de ensaios e a validação do sistema de controle de torque e rotação, propôs-se o desenvolvimento de uma bancada de ensaios. Esta bancada mostrou-se viável à realização de ensaios do MIT em vazio e com carga, e na implementação de ensaios da técnica IFOC sem sensores (*sensorless*), para controle de torque e rotação.

Considerando os resultados, os objetivos deste trabalho foram atingidos, pois, comprovou-se que a técnica IFOC sem sensores (*sensorless*) é uma alternativa viável para redução do custo relativo aos sensores, e para uso em ambientes industriais agressivos.

REFERÊNCIAS

AJLAN, A.; IDRIS, N. R. N.; LEE, S. S. Minimization of Torque Ripple in Direct Torque Control of Induction Motor at Low Speed. In: 2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY, 28-29 Nov. 2016. Melaka. **Proceedings...** PECon, 2016. p. 222-227.

ALSOFYANI, I. M.; IDRIS, N. R. N. Simple Flux Regulation for Improving State Estimation at Very Low and Zero Speed of a Speed Sensorless Direct Torque Control of an Induction Motor. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 4, p. 3027-3035, abr. 2016.

ALTUNA, J. A. T.; JACOMINI, R. V.; PUMA, J. L. A.; CAPOVILLA, C. E.; SGUAREZI FILHO, A. J. Controlador Deadbeat Aplicado ao Controle Direto de Torque do Motor de Indução Trifásico. **Eletrônica de Potência**, Campo Grande, v. 20, n. 3, p. 236-243, jun./ago. 2015.

ANUCHIN, A.; SHPAK, D.; ALIAMKIN, D.; BRIZ, F. Adaptive Observer for Field Oriented Control Systems of Induction Motors. In: 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 13-14 out., 2016. Riga. **Proceedings... RTUCOM**, 2016. p. 1-4.

HOLZMÜLLER, T. et al. Compensation of Delay Time in the Current Control Loop of Field-Oriented Control. In: 19th EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 11-14 set., 2017. Warsaw. **Proceedings... EPE**, 2017. p. 1-8.

TANDEL, T.; MATE, U.; UNDE, S. Speed Estimation of Induction Motor Using TMS320F28335 Digital Signal Processor. In: POWER INDIA INTERNATIONAL CONFERENCE, 25-27 Nov. 2016. Bikaner. **Proceedings... PIICON**, 2016. p. 1-6.

ZELECHOWSKI, M. **Space Vector Modulated** – Direct Torque Controlled (DTC - SVM) Inverter – Fed Induction Motor Drive. 2005. 175 p. Tese (Doutorado). Warsaw University of Technology, 2005.