IMPLEMENTAÇÃO DE HARDWARE DIGITAL NO SIMULADOR DE TEMPO REAL DSPACE MICROLABBOX

João Pedro Hostin, Ademir Nied

INTRODUÇÃO

Apesar dos avanços consolidados na teoria de controle de máquinas elétricas, a validação prática dessas estratégias enfrenta limitações operacionais relevantes. Como alternativa segura para a verificação de estratégias de controle, a simulação e a prototipagem rápida de sistemas aproximam os modelos virtuais da implementação prática em bancada (PARMA, 2007). Falhas nas etapas iniciais de depuração do software de controle podem resultar em danos permanentes aos equipamentos de acionamento.

Frente a esse cenário, os ambientes de simulação e a metodologia de Projeto Baseado em Modelos consolidam-se como etapas prévias essenciais antes do embarque em hardware digital, como a plataforma dSPACE MicroLabBox. Por meio do ambiente MATLAB/Simulink, torna-se viável representar matematicamente plantas complexas e simular com precisão o comportamento do sistema em malha fechada. Essa estratégia atenua os riscos operacionais, viabilizando o ajuste fino de ganhos, a análise de resposta em frequência e a verificação dos limites operacionais em um ambiente computacional seguro.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar, no ambiente MATLAB/Simulink, a estrutura completa de acionamento e controle de um Motor de Indução Trifásico. Tal desenvolvimento representa a etapa fundamental e indispensável para a futura implementação em hardware digital no simulador dSPACE. Como objetivos específicos, destacam-se a modelagem dinâmica não linear do motor, o projeto dos controladores Proporcional-Integral (PI) em cascata via alocação de polos e a validação da estratégia de Controle Vetorial Orientado ao Campo Indireto (IFOC) sob variações de referência e perturbações de carga mecânica.

DESENVOLVIMENTO

A metodologia adotada fundamentou-se no fluxo de trabalho de Prototipagem Rápida de Controle, concentrando o desenvolvimento na estruturação de diagramas de blocos no ambiente MATLAB/Simulink. O projeto foi conduzido em três etapas sequenciais: modelagem da planta, concepção da estratégia de controle e parametrização dos cenários de validação.

Na primeira etapa, realizou-se a modelagem matemática do motor de indução trifásico no referencial síncrono dq, contemplando as dinâmicas elétricas do estator e do rotor. Incorporou-se também a equação mecânica rotacional, correlacionando o torque eletromagnético desenvolvido, o torque de carga aplicado, o momento de inércia do conjunto e o coeficiente de atrito viscoso.

A segunda etapa englobou o projeto da arquitetura do IFOC. Essa técnica emprega malhas em cascata para promover o desacoplamento dinâmico entre o fluxo magnético e o torque, conferindo à máquina de indução uma resposta análoga à de um motor de corrente contínua. Estruturou-se uma malha interna de malha rápida para o controle das correntes e uma malha externa de dinâmica mais lenta voltada à regulação da velocidade mecânica.

A metodologia do trabalho consistiu na sintonia analítica dos controladores Proporcional-Integral (PI) via técnica de alocação de polos. Para a malha de velocidade, os ganhos foram dimensionados a partir da planta mecânica, impondo ao sistema em malha fechada um comportamento de segunda ordem criticamente amortecido, com fator de amortecimento unitário e tempo de acomodação de 100 ms. Para a malha interna de corrente, projetou-se o cancelamento do polo elétrico do motor (relação entre indutância e resistência), aproximando a resposta dinâmica à de um sistema de primeira ordem.

Na terceira etapa, o ambiente de simulação foi configurado com passo de integração fixo, emulando a taxa de amostragem de um processador digital embarcado. Foram estruturados ensaios virtuais para a analisar o desempenho transitório, como tempo de subida e sobressinal, além da aplicação de distúrbios controlados mediante a inserção de degraus de carga mecânica no eixo do motor.

RESULTADOS

Os ensaios conduzidos no ambiente MATLAB/Simulink validaram o equacionamento da máquina de indução e a eficácia da arquitetura de Controle Vetorial Indireto Orientado ao Campo (IFOC). A sintonia da malha interna de corrente pelo cancelamento do polo elétrico da planta proporcionou uma resposta rápida, estável e isenta de sobressinal frente a variações em degrau, atingindo uma frequência de corte estimada entre 65 Hz e 70 Hz. Essa elevada largura de banda foi essencial para garantir a regulação do torque e do fluxo sem comprometer o desempenho do controle externo. Por sua vez, a malha de velocidade, projetada por alocação de polos para um comportamento de segunda ordem criticamente amortecido e tempo de acomodação de 1 segundo, apresentou uma resposta suave e sem sobre-elevação na partida, confirmando a adequada separação e desacoplamento entre as escalas de tempo elétrica e mecânica.

No ensaio de rejeição de perturbações, a aplicação de um degrau de carga mecânica de 0,61 Nm em regime permanente provocou uma desaceleração transiente no rotor. O controlador PI reagiu aumentando a referência de corrente no eixo em quadratura, gerando um pico temporário no torque eletromagnético necessário para vencer a inércia do conjunto e restaurar a velocidade de referência até a estabilização do sistema, como é possível observar na Figura 2. A simulação em ambiente virtual com passo de integração fixo permitiu observar variáveis internas de difícil medição prática e ajustar os controladores, consolidando a arquitetura sob a metodologia de Projeto Baseado em Modelos e deixando o algoritmo pronto para a futura implementação no hardware dSPACE MicroLabBox.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo alcançou com êxito as metas propostas ao consolidar validar de maneira consistente a estratégia de acionamento e controle de máquinas elétricas no ambiente MATLAB/Simulink. A aplicação da abordagem de Projeto Baseado em Modelos mostrou-se uma etapa indispensável, permitindo assegurar que o algoritmo de Controle Vetorial Indireto (IFOC) cumprisse os critérios de desempenho estabelecidos antes da exposição a riscos operacionais em uma bancada física.

O desempenho observado nas malhas de corrente e velocidade confirmou a eficácia do projeto de sintonia analítico fundamentado na alocação de polos. A resposta do sistema perante a aplicação de degraus de carga mecânica comprovou a robustez da estratégia. Assim, a estrutura computacional desenvolvida consolida-se como uma representação virtual fidedigna do sistema de acionamento.

Como etapas futuras, com a arquitetura de simulação plenamente validada, o algoritmo encontra-se apto para a geração automática de código C, via Simulink Coder. A sequência da pesquisa será o embarque da lógica sintonizada no hardware dSPACE MicroLabBox, viabilizando a execução das rotinas de controle diretamente sobre o inversor de frequência e o motor real, concluindo o ciclo de prototipagem rápida.

Palavras-chave: motor de indução trifásico; controle vetorial indireto; MATLAB.

ANEXOS

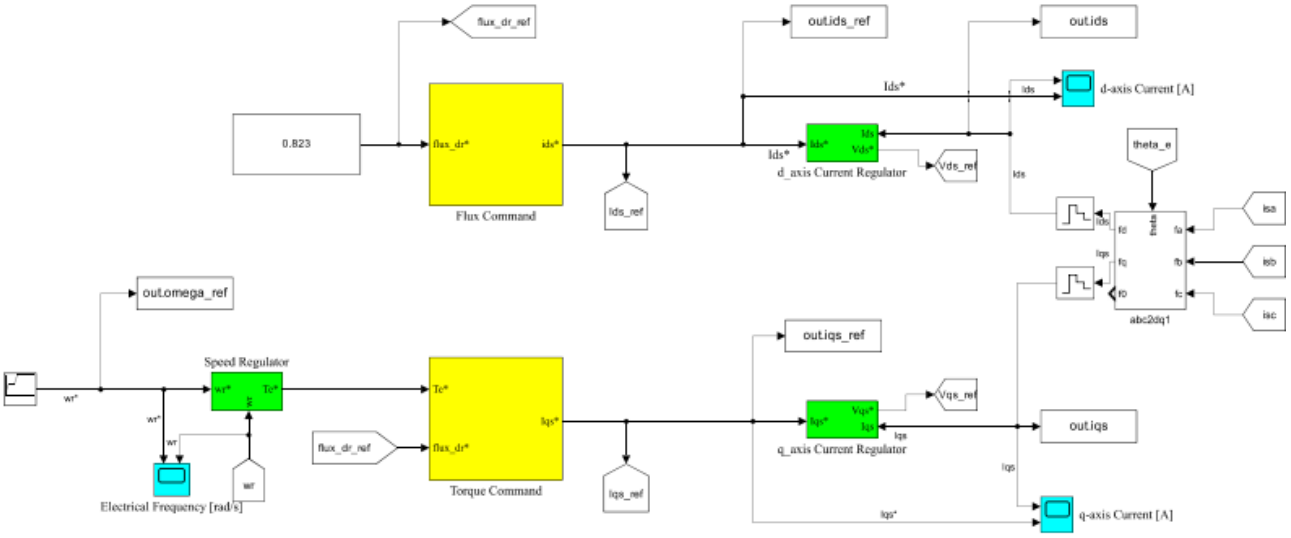


Figura 1. *IFOC desenvolvido no Simulink.*

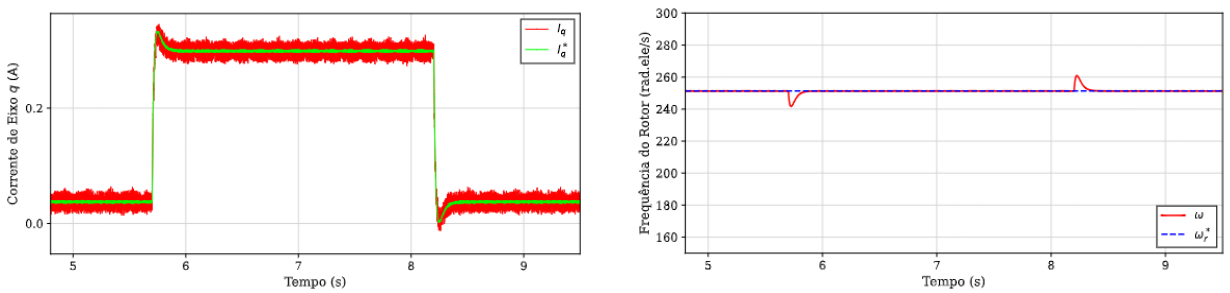


Figura 2. *Resultados do ensaio com degrau de carga.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PARMA, G. G.; DINAVAHI, V. **Real-Time Digital Hardware Simulation of Power Electronics and Drives.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 2, 2007.