ESTRATÉGIA DE CONTROLE E INTEGRAÇÃO CONVERSOR-MOTOR

Gabriel Indalêncio Rochi, Alessandro Luiz Batschauer

INTRODUÇÃO

A crescente adoção de veículos elétricos tem impulsionado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas de propulsão mais eficientes, confiáveis e robustos. Dentro desse contexto, os acionamentos elétricos desempenham papel fundamental, uma vez que são responsáveis pela conversão e controle da energia entregue às máquinas elétricas de tração.

Os motores multifásicos surgem como uma alternativa promissora aos acionamentos trifásicos convencionais devido às vantagens associadas à tolerância a falhas, redução das oscilações de torque, melhor distribuição das correntes de fase e aumento da confiabilidade do sistema. Entre essas configurações, os motores de indução hexafásicos assimétricos apresentam características atrativas para aplicações de média e alta potência, especialmente em sistemas de propulsão elétrica.

Paralelamente, a utilização de plataformas de simulação em tempo real tem permitido reduzir custos e riscos durante as etapas de desenvolvimento e validação de estratégias de controle. Ferramentas Hardware-in-the-Loop (HIL) possibilitam reproduzir o comportamento de sistemas em ambiente controlado antes da implementação experimental.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar estratégias de controle para integração entre conversores estáticos e motores de indução, utilizando a plataforma Typhoon HIL 402 para simulação em tempo real. O estudo contempla inicialmente a implementação de técnicas de controle em um motor de indução trifásico e, posteriormente, sua aplicação em uma máquina de indução hexafásica assimétrica, visando futuras análises de desempenho e operação sob condições de falha.

DESENVOLVIMENTO

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre sistemas de propulsão elétrica, controle vetorial orientado ao campo (Field Oriented Control - FOC), técnicas de enfraquecimento de campo e simulação em tempo real aplicada a acionamentos elétricos. Como etapa de aprendizado da plataforma Typhoon HIL 402, foi desenvolvido um modelo de motor de indução trifásico acionado por um inversor fonte de tensão trifásico do tipo NPC (Neutral Point Clamped Voltage Source Inverter), operando em malha fechada por meio da estratégia FOC.

Além da implementação do controle vetorial convencional, foi desenvolvida uma estratégia de enfraquecimento de campo para permitir a operação da máquina em velocidades superiores à velocidade nominal. Com o objetivo de aproximar as simulações de uma aplicação real de tração elétrica, também foi implementado um modelo de torque resistente baseado no modelo longitudinal de um veículo elétrico urbano, permitindo reproduzir as cargas mecânicas encontradas em condições reais de operação veicular. Esse modelo foi desenvolvido com base na metodologia apresentada por Pedro da Silveira Vianna em seu trabalho sobre sistemas de tração para veículos elétricos utilizando simulação em tempo real.

Após a validação do modelo trifásico, iniciou-se o estudo de uma máquina de indução hexafásica assimétrica composta por dois conjuntos trifásicos defasados de 30°. Essa configuração apresenta vantagens relacionadas à redução de harmônicos, diminuição das oscilações de torque e maior tolerância a falhas. Os parâmetros elétricos e mecânicos da máquina foram obtidos a partir do

trabalho desenvolvido por Arif Iqbal, no qual é apresentada a modelagem e validação em ambiente HIL de uma máquina de indução hexafásica assimétrica controlada por FOC.

A estrutura proposta utiliza dois inversores NPC trifásicos independentes para alimentação dos dois conjuntos de enrolamentos do motor hexafásico. Para o desenvolvimento da estratégia de controle foi adotada uma abordagem baseada em dupla transformação dq, permitindo a decomposição das variáveis elétricas em subespaços ortogonais e o controle desacoplado do fluxo e do torque da máquina.

RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da utilização da plataforma Typhoon HIL 402 para desenvolvimento e validação de estratégias de controle aplicadas a acionamentos elétricos. Inicialmente, foi implementado um sistema de acionamento para um motor de indução trifásico alimentado por um inversor fonte de tensão do tipo NPC e controlado por meio da estratégia Field Oriented Control (FOC).

Nas condições nominais de operação, observou-se comportamento adequado do sistema em regime permanente, com correntes trifásicas balanceadas e defasadas de 120°, além do correto rastreamento das referências das correntes nos eixos d e q. Os resultados também evidenciaram o desacoplamento entre fluxo e torque característico da técnica FOC, mantendo a velocidade de referência e reduzidas oscilações de torque em regime permanente.

Com o objetivo de expandir a faixa operacional do acionamento, foi implementada uma estratégia de enfraquecimento de campo. Os resultados obtidos demonstraram a capacidade do sistema operar em velocidades superiores à nominal, alcançando aproximadamente 3000 rpm com estabilidade e adequado acompanhamento das variáveis de controle. Nessa condição, observou-se o comportamento esperado da corrente de eixo direto, assumindo valores negativos para redução do fluxo magnético e possibilitando a operação na região de potência constante. As correntes trifásicas permaneceram equilibradas e a velocidade apresentou comportamento estável, validando a estratégia implementada.

Atualmente, foi implementada a estrutura inicial do controle vetorial para a máquina hexafásica utilizando dupla transformação dq, encontrando-se em desenvolvimento a etapa de fechamento da malha de controle e validação do desempenho dinâmico da estratégia proposta.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a aquisição de conhecimentos nas áreas de eletrônica de potência, acionamentos elétricos, controle digital e simulação em tempo real. A implementação do controle vetorial em uma máquina de indução trifásica, associada à estratégia de enfraquecimento de campo e à modelagem de carga veicular, permitiu validar o ambiente de desenvolvimento e estabelecer uma base sólida para os estudos subsequentes.

Além disso, a modelagem da máquina de indução hexafásica assimétrica e a implementação da estrutura inicial de controle representam etapas importantes para a investigação de acionamentos multifásicos aplicados à mobilidade elétrica. Como continuidade da pesquisa, pretende-se concluir o fechamento da malha de controle do motor hexafásico e avaliar seu desempenho em diferentes condições de operação, incluindo cenários de falta de fase, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de propulsão elétrica mais robustos e confiáveis.

Palavras-chave: eletrônica de potência; máquinas multifásicas; simulação em tempo real.

ANEXOS

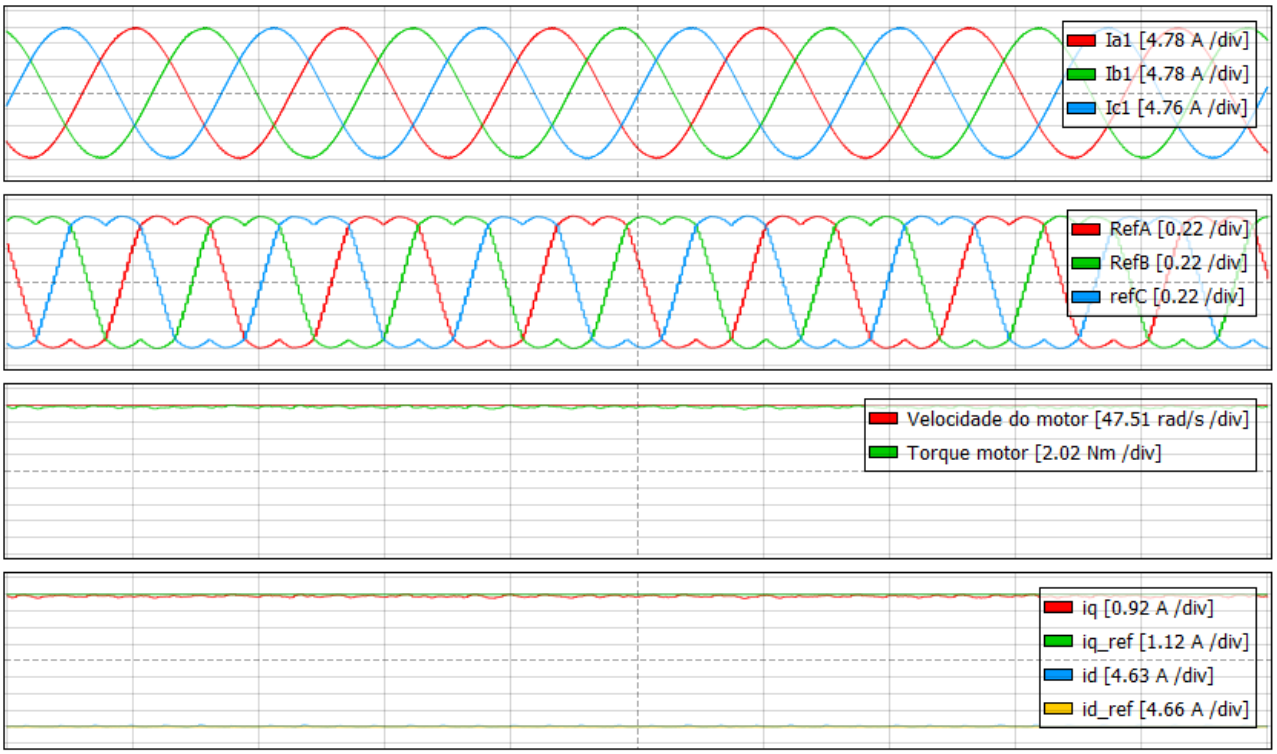


Figura 1. Medidas do motor operando em velocidade nominal

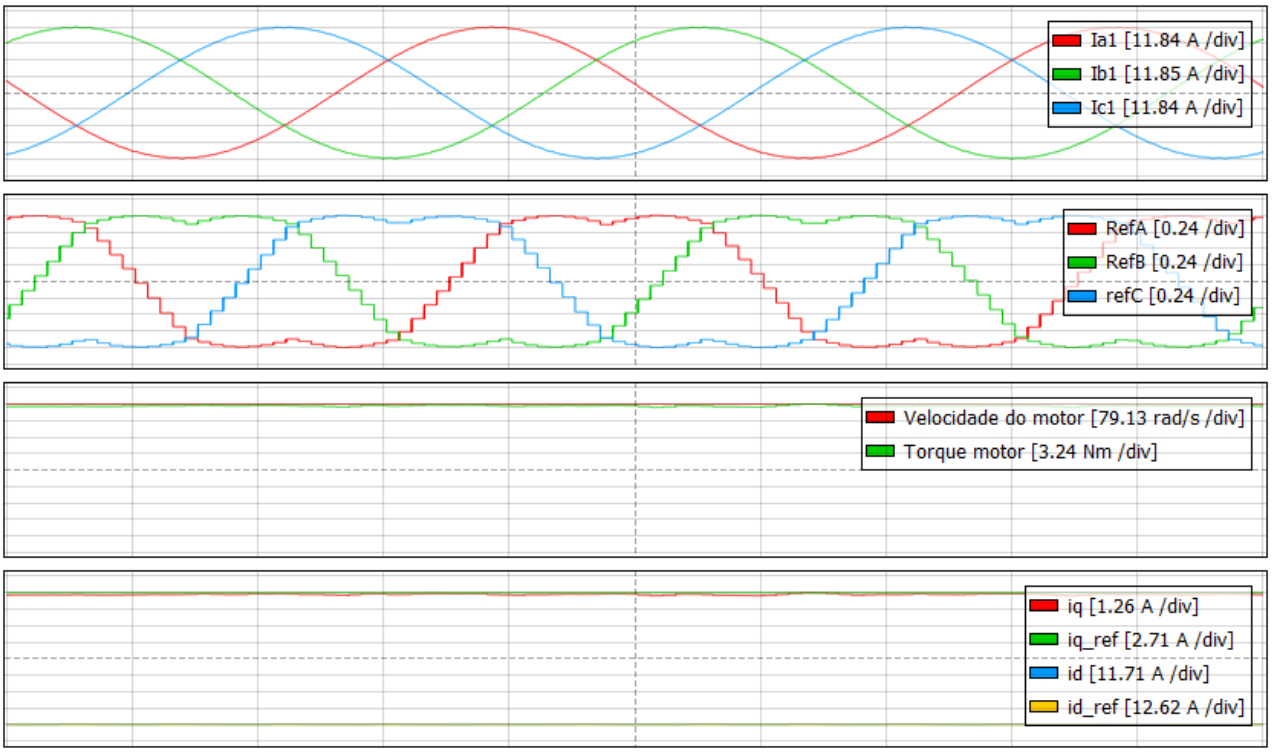


Figura 2. Medidas do motor operando na região de enfraquecimento de campo

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IQBAL, A.; BAKHSH, F. I.; SINGH, G. K. *Operation and Testing of Indirect Field Oriented Control of Asymmetrical Six-Phase Open-Ended Winding Induction Machine Using Hardware-in-Loop (HIL) Emulator*. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2023.

VIANNA, P. S. *Desenvolvimento de Sistemas de Tração para Veículos Elétricos Urbanos Utilizando Simulação em Tempo Real*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Orientador: Cassiano Rech. Coorientador: Alessandro Luiz Batschauer.