ESTUDO DE TÉCNICA DE CONTROLE TOLERANTE À FALHAS

Gabriel Lima, Ademir Nied

INTRODUÇÃO

Os motores de corrente contínua sem escovas (*Brushless DC* - BLDC) têm ganhado amplo destaque na indústria e em aplicações de alto desempenho devido à sua elevada eficiência energética, alta densidade de potência e confiabilidade operacional. Contudo, em aplicações críticas que exigem segurança extrema, apenas a robustez inerente ao motor não é suficiente, tornando essencial a implementação de estratégias de Controle Tolerante a Falhas (CTF). Em sistemas de acionamento, o CTF atua na mitigação de anomalias, evitando paradas abruptas e reduzindo o risco de severos prejuízos materiais, perdas financeiras ou ameaças à integridade humana. Um exemplo prático da necessidade desse sistema ocorre em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs, ou drones): a falha em um único propulsor, sem o devido controle tolerante, compromete o equilíbrio aerodinâmico e ocasiona a queda do equipamento. Diante deste cenário, este trabalho tem como objetivo investigar e analisar o desempenho de uma técnica de controle tolerante a falhas aplicada a um motor BLDC, focando especificamente na manutenção da operação diante da perda (abertura) de uma de suas fases de alimentação.

DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento desta pesquisa iniciou-se com o estudo das características dinâmicas e da modelagem matemática do motor BLDC, tanto em condições normais de operação quanto sob a falta de uma fase. Para a elaboração, estruturação e parametrização do motor no ambiente de simulação MATLAB/Simulink, o presente trabalho baseou-se na dissertação de Liberato (2017). Deste documento foram extraídos os parâmetros elétricos e mecânicos reais da máquina (tais como indutância de fase de 52 mH, constante de fluxo, momento de inércia e coeficiente de atrito), garantindo a fidelidade do modelo computacional, além das frequências de discretização e ganhos dos controladores Proporcional-Integral (PI) das malhas de corrente e velocidade.

A construção da simulação foi dividida em três etapas principais. Inicialmente, implementou-se o sistema de acionamento convencional six-step de 120° com controle em cascata. Em seguida, desenvolveu-se a lógica de injeção da falha, capaz de impor a interrupção (abertura) de uma das fases de alimentação em um instante predeterminado. Por fim, implementou-se a estratégia de Controle Tolerante a Falhas (CTF). Esta estratégia consistiu em alterar a comutação do inversor para 180° nas fases saudáveis e multiplicar a corrente de referência por uma onda trapezoidal unitária sincronizada com a força contraeletromotriz (BEMF) de linha, visando minimizar o valor RMS da corrente. Adicionalmente, a banda passante do controlador de velocidade foi reduzida na condição de falha para evitar que o controle distorcesse a corrente na tentativa de compensar a oscilação mecânica.

A validação da técnica foi realizada submetendo o motor a diferentes perfis de carga e degraus de velocidade. O sistema foi monitorado durante os períodos transitórios e em regime permanente, avaliando-se variáveis críticas como as correntes estatóricas, o ripple (oscilação) de velocidade e o comportamento do torque eletromagnético, o que permitiu confirmar a capacidade do CTF em reestabilizar o sistema e preservar a integridade das bobinas saudáveis.

RESULTADOS

Os resultados obtidos por meio das simulações computacionais no MATLAB/Simulink evidenciaram a eficácia das estratégias de Controle Tolerante a Falhas (CTF) implementadas. Na ocorrência da abertura de fase sem a atuação do controle compensatório, observou-se uma elevação acentuada no

valor RMS das correntes nas fases saudáveis e uma oscilação severa na velocidade mecânica do rotor, decorrentes da ausência de fluxo magnético no setor correspondente à fase defeituosa. Com a inserção da técnica de controle tolerante em 180º (utilizando a corrente de referência com formato trapezoidal sincronizada à força contraeletromotriz), registrou-se uma redução significativa da corrente RMS circulante nas bobinas remanescentes, atingindo níveis até 35% menores em comparação ao acionamento em falha sem tratamento.

Essa diminuição direta da corrente é altamente relevante, pois reduz drasticamente o aquecimento por efeito Joule, evitando a degradação e a queima das fases saudáveis do motor e permitindo que o sistema opere em segurança por tempo suficiente para um desligamento controlado. Como limitação inerente ao método, notou-se a permanência de uma ondulação (*ripple*) de velocidade, especialmente em baixas rotações, visto que a técnica foca primariamente na proteção elétrica do equipamento. O uso alternativo da técnica de corrente trapezoidal dinâmica demonstrou ser uma solução intermediária vantajosa, conseguindo equilibrar a manutenção da corrente RMS dentro de limites seguros e a mitigação parcial da oscilação mecânica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho permitiu avaliar o comportamento de motores BLDC submetidos a condições críticas de falha por abertura de fase e a eficácia das estratégias de Controle Tolerante a Falhas (CTF) implementadas no MATLAB/Simulink. A utilização de parâmetros baseados em dados reais da literatura garantiu a fidelidade da simulação computacional do sistema. Os resultados demonstraram que o acionamento convencional sob falha compromete a vida útil do motor devido à sobrecorrente nas bobinas saudáveis. Em contrapartida, a técnica de imposição de corrente trapezoidal sincronizada à BEMF mostrou-se eficiente ao reduzir substancialmente a corrente RMS, preservando a integridade térmica do motor, com a vantagem de dispensar modificações estruturais ou redundâncias de hardware. Conclui-se que o controle tolerante implementado constitui uma solução viável e de baixo custo computacional, ideal para aplicações sensíveis onde a parada abrupta deve ser evitada. Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a expansão da plataforma para testes práticos em bancada e o refinamento do controle dinâmico para diferentes perfis de carga.

Palavras-chave: controle tolerante a falhas; motores BLDC; falta de fase; redução de corrente; MATLAB/Simulink.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBERATO, C. S. *Controle para motores BLDC sob falta de fase com redução de corrente*. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.