Fundamentos de Projeto para a Confiabilidade de Acionamentos Elétricos para Meios de Transporte

João Gabriel Vargas de Souza, Sérgio Vidal Garcia de Oliveira

INTRODUÇÃO

A substituição da frota baseada em motores de combustão interna por veículos elétricos (VEs) consiste na principal medida tecnológica adotada para mitigar as emissões ambientais (Bilgin; Emadi, 2014). O esgotamento de combustíveis fósseis exige sistemas de propulsão eficientes, de alta densidade de potência e elevadas metas de confiabilidade (Chowdhury *et al*., 2019). O ambiente automotivo impõe condições estocásticas e severas, como vibração mecânica contínua e amplas variações térmicas, que afetam diretamente a vida útil do inversor e do motor de tração. A falha destes subsistemas acarreta a inoperância do veículo, exigindo a aplicação de métodos avançados de *Design for Reliability* (DfR) e o estudo da Física de Falhas (PoF) (Blaabjerg *et al*., 2021). O presente resumo tem como objetivo realizar uma compilação técnica sobre a confiabilidade de semicondutores e capacitores, abordar métodos de diagnóstico de falhas em sistemas de tração e desenvolver a modelagem de um motor Síncrono de Ímãs Permanentes Internos (IPMSM) no Motor-CAD com co-simulação no Simulink.

DESENVOLVIMENTO

A metodologia da pesquisa inicia-se com uma revisão estruturada da literatura científica focada nos mecanismos de degradação dos principais componentes de inversores de tração. Nos módulos semicondutores, o estresse termo-mecânico é impulsionado pelas flutuações da temperatura de junção, resultando em falhas como ruptura de fios de alumínio (*lift-off*) em pacotes *wire-bonded* ou desgaste por atrito (*fretting*) em módulos *press-pack* (Busca *et al*., 2011). A estimativa de dano acumulado é realizada através de redes térmicas de parâmetros concentrados, combinadas a algoritmos de contagem *Rainflow* e modelos analíticos de vida útil, como o de Coffin-Manson (Vernica; Wang; Blaabjerg, 2018).

No escopo dos motores elétricos, avaliam-se falhas operacionais e estruturais severas. O curto-circuito entre espiras (ITSF) distorce o fluxo magnético e atua como gatilho primordial para a desmagnetização irreversível dos ímãs de terras-raras devido aos picos térmicos locais e campos reversos intensos (Fitouri; Bensalem; Abdelkrim, 2016; Lee; Kim; Hur, 2014). Para mitigar esses efeitos, o estudo aborda a implementação de algoritmos de Diagnóstico e Detecção de Falhas (FDD), englobando desde a Análise de Assinatura de Corrente (MCSA) auxiliada por Transformada de Fourier até métodos avançados orientados a dados (*Data-Driven*) que utilizam Redes Neurais Convolucionais (CNN) para detecção incipiente e manutenção preditiva em tempo real (Khaneghah; Alzayed; Chaoui, 2023).

Dentre as topologias veiculares (IM, SRM, SPMSM e IPMSM), o motor Síncrono de Ímãs Permanentes Internos (IPMSM) foi selecionado por apresentar alta densidade de fluxo contínuo e capacidade de retenção mecânica dos ímãs contra forças centrífugas extremas, além da extração adicional do torque de relutância (Bilgin; Emadi, 2014; Menezes, 2022). A parametrização estrutural do motor foi baseada no propulsor do Nissan Leaf 2012 (Motor Design Limited, 2018). O modelo foi integralmente construído na plataforma Ansys Motor-CAD, apresentado na Figura 1, estruturado com 8 polos de ímãs de Neodímio (NdFeB N30UH) dispostos em formato "V" e um estator de 48 ranhuras laminado em aço elétrico 30DH, utilizando refrigeração por jaqueta de água em formato caracol. A magnéticos, levantando perdas parasitas por efeito Kelvin no cobre e processando a termodinâmica iterativamente. As equações que regem o motor são dadas abaixo:

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico · CAPES · UDESC · fapesc · nPEE Núcleo de Processamento de Energia Elétrica

$$V_d = R_s I_d - w_e L_q I_q \ (1)$$
$$V_q = R_s I_q + w_e L_d I_d + E \ (2)$$
$$E = w_e \lambda_m \ (3)$$
$$T = \frac{3}{2} p\left[\lambda_m I_q + \left(L_d - L_q\right) I_d I_q\right] \ (4)$$

em que λm é o fluxo concatenado, p os pares de polos e E a força contra-eletromotriz., enquanto os subíndices d e q indicam a qual eixo o parâmetro pertence (Menezes, 2022).

Posteriormente, a caracterização analítica obtida (abrangendo indutâncias Ld e Lq, mapas de fluxo concatenado, temperatura média e máxima do estator e perfis de perdas) foi exportada para validação no ambiente MATLAB/Simulink. Projetou-se o acionamento elétrico em malha aberta com um inversor trifásico sob modulação por largura de pulso senoidal (SPWM) operando a 10 kHz, com barramento DC estabilizado em 375 V e capacitor de filtro de 1 mF. O motor foi operado no ponto operacional de 3000 RPM, aplicando-se um ângulo de carga compensado de 72,43°, permitindo a extração de oscilogramas em regime permanente para confrontar a precisão eletromagnética e a resposta térmica entre a ferramenta FEM e o simulador de sistemas dinâmicos. Os dados utilizados para a simulação do motor foram dados fixos para a análise sob 3000 RPM devido às limitações específicas do bloco do motor parametrizado utilizado no Simulink. A importação de uma matriz indutâncias causa diversos problemas para o solver devido a necessidade da solução da equação abaixo a cada passo:

$$\frac{d\lambda}{dt} = L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}$$

com isso, a exportação de fluxos concatenados seria mais adequada, mas esta não é possível de ser colocada no motor da biblioteca *Simescape Electrical*.

RESULTADOS

Na avaliação do Motor-CAD, o motor operou com correntes ideais e ondulação de torque característica da variação na densidade de fluxo. Na co-simulação em Simulink, registraram-se diferenças quantitativas. O valor médio do torque resultou em aproximadamente 386 Nm e a corrente de pico em 530 A, discrepando dos 323 Nm e 485,7 A analíticos. Identificou-se também um *ripple* de torque amplificado de ± 10 Nm devido às harmônicas de chaveamento do inversor SPWM. A Figura 2 ilustra estas discrepâncias, que ocorrem em virtude das diferenças na modelagem de saturação magnética e da ausência de malha fechada no Simulink.

A respeito da estabilidade térmica, os ímãs atingiram o patamar de 140 °C, permanecendo consideravelmente abaixo da temperatura limitante de Curie (300 °C), o que resguarda o rotor da desmagnetização. Todavia, a modelagem expôs *hotspots* nos enrolamentos do estator que superaram a temperatura média em cerca de 20 °C. Tais picos de calor consistem no principal agente acelerador de degradação do verniz isolante a longo prazo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação das diretrizes DfR evidencia que as avaliações puramente eletromagnéticas são insuficientes para garantir a vida útil de *powertrains* veiculares. O estudo de caso com o IPMSM demonstrou que, apesar do rotor apresentar alta resiliência à desmagnetização, as discrepâncias de simulação e os *hotspots* estatóricos demandam atenção prioritária. Conclui-se que o avanço da mobilidade elétrica depende intrinsecamente do Controle Térmico Ativo (ATC) conjugado a sistemas avançados de FDD para isolar curtos-circuitos em estágios incipientes, certificando a operação segura e ininterrupta do veículo sob condições reais de missão.

Palavras-chave: Veículos elétricos; Confiabilidade; IPMSM; Co-simulação; Diagnóstico de falhas.

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico · CAPES · UDESC · fapesc · nPEE Núcleo de Processamento de Energia Elétrica

ANEXOS

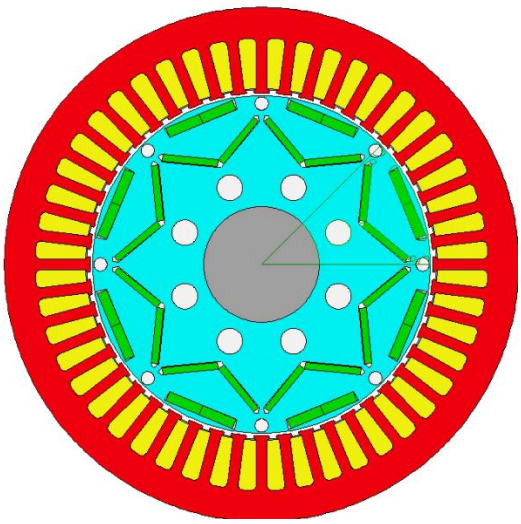


Figura 1. *Motor modelado no MotorCAD*

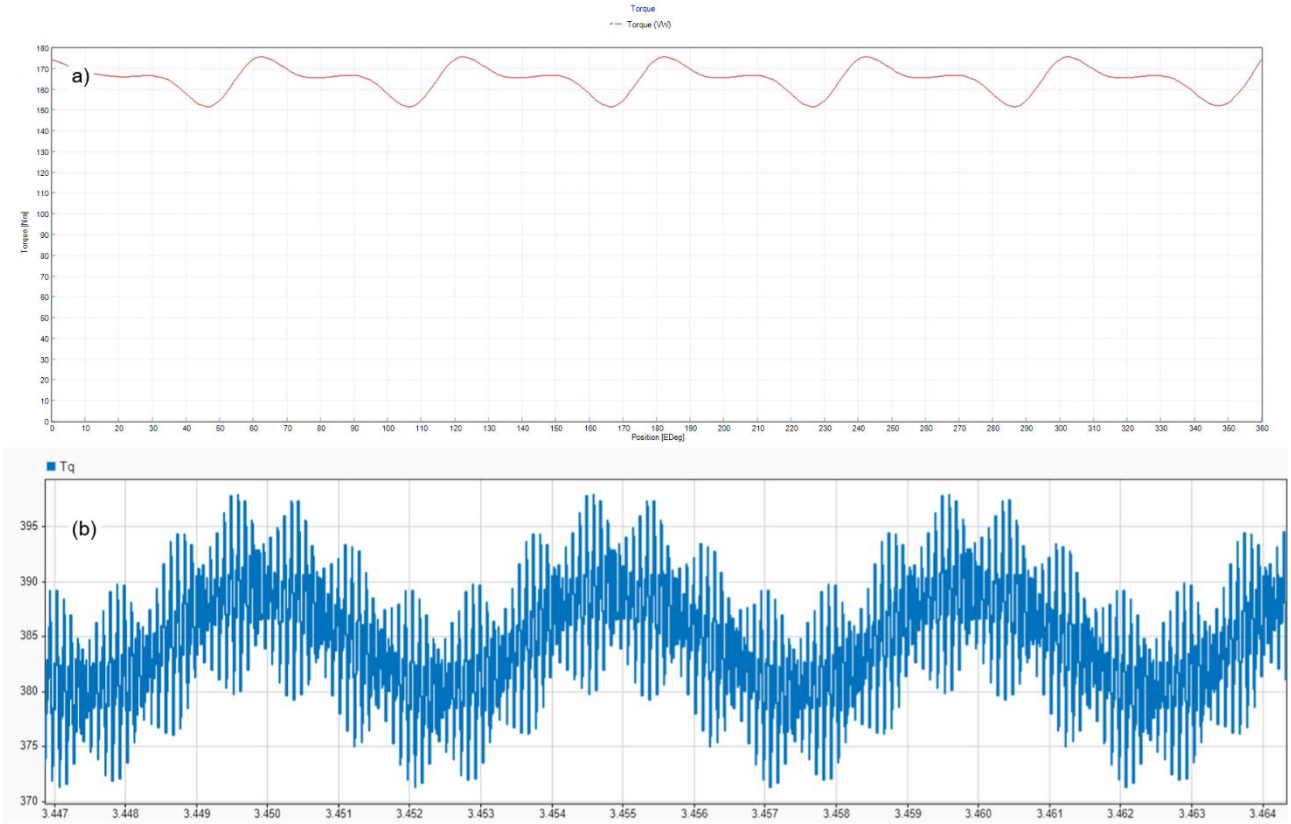


Figura 2. *Torque simulado no (a) MotorCAD e (b) Simulink*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BILGIN, B.; EMADI, A. Electric Motors in Electrified Transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system. **IEEE Power Electronics Magazine**, v. 1, n. 2, p. 10-17, 2014.

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico · CAPES · UDESC · fapesc · nPEE Núcleo de Processamento de Energia Elétrica

BLAABJERG, F. *et al*. Reliability of Power Electronic Systems for EV/HEV Applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 6, p. 1060-1076, 2021.
BUSCA, C. *et al*. An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications. **Microelectronics Reliability**, v. 51, p. 1903-1907, 2011.
CHOWDHURY, S. *et al*. Enabling Technologies for Compact Integrated Electric Drives for Automotive Traction Applications. *In*: **Oak Ridge National Laboratory, IEEE**, 2019.
FITOURI, M.; BENSALEM, Y.; ABDELKRIM, M. N. Analysis and Co-Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor with short-circuit fault by Finite Element Method. *In*: **2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)**, p. 472-477, 2016.
KHANEGHAH, M. Z.; ALZAYED, M.; CHAOUI, H. Fault Detection and Diagnosis of the Electric Motor Drive and Battery System of Electric Vehicles. **Machines**, v. 11, n. 7, p. 713, 2023.
LEE, Y.-S.; KIM, K.-T.; HUR, J. Finite-Element Analysis of the Demagnetization of IPM-Type BLDC Motor With Stator Turn Fault. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 50, n. 2, p. 7022004, 2014.
MENEZES, G. G. **Projeto de motor de ímãs permanentes aplicado à tração veicular**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.
MOTOR DESIGN LIMITED. **Motor-CAD Software Tutorial**: Modelling the Nissan Leaf Motor using Motor-CAD. Wrexham, UK: Motor Design Limited, 2018.
VERNICA, I.; WANG, H.; BLAABJERG, F. Uncertainties in the Lifetime Prediction of IGBTs for a Motor Drive Application. *In*: **2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 2018.