FUNDAMENTOS DE PROJETO PARA A CONFIABILIDADE DE ACIONAMENTOS ELÉTRICOS PARA ROBÔS HUMANOIDES

Pedro Afonso Rank, Sérgio Vidal Garcia Oliveira

INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda o desafio de garantir a confiabilidade dos acionamentos elétricos em robôs humanoides, sistemas severamente exigidos térmica e mecanicamente por ciclos contínuos de operação. Para mitigar falhas e maximizar a segurança, a pesquisa teve como objetivos projetar e avaliar um motor PMSM sob uma ótica multifísica, além de analisar preventivamente cenários operacionais que possam comprometer o uso final dos produtos.

DESENVOLVIMENTO

Como primeiro passo para o desenvolvimento desta pesquisa, foi necessária uma revisão bibliográfica aprofundada, principalmente sobre o acionamento de motores elétricos em geral e aplicados a robôs e automação, além de materiais que dissertavam mais a fundo sobre o tema de confiabilidade e possíveis falhas.

Após esta revisão, a etapa seguinte foi entender qual perfil de missão estava associado ao tema central da pesquisa: robôs humanoides. Isso envolvia a busca por informações como: quais tipos de motores estavam presentes em robôs humanoides; como funciona o acionamento destes motores; quais os esforços realizados por eles e qual a sua alimentação. Primeiramente, busquei informações junto ao MobiLab da UDESC, no Centro de Ciências Tecnológicas, por possuírem um robô do modelo Unitree G1. Porém, devido a segredos de indústria, as informações disponibilizadas nos datasheets e manuais do robô são bem limitadas.

Apesar das limitações citadas anteriormente, foi possível determinar uma ótima direção e o próximo passo necessário. Com as informações de torque, tensão de terminais e capacidade da bateria, iniciou-se a busca por motores no mercado que possuíssem datasheet público e fossem compatíveis com a nossa aplicação.

Com um motor selecionado e suas informações coletadas, foi possível determinar quais seriam os componentes críticos a serem analisados e iniciar as simulações computacionais utilizando o software Altair PSIM para extrair as informações necessárias. Assim, tornou-se possível partir para uma análise mais crítica, para gerar os resultados esperados.

RESULTADOS

A seleção do motor Kollmorgen TBM(S)-12941-B, cujas características elétricas e mecânicas assemelham-se às aplicadas no robô Unitree G1, que foi tomado como exemplo inicial, viabilizou a simulação do cenário de maior desgaste operacional: a articulação do joelho sob demanda de torque constante. Por meio de uma caixa de redução com relação de 7:1, o torque simulado no motor de aproximadamente 13 N.m resultou em uma força útil de aproximadamente 91 N.m a 82 RPM após a redução, suprindo a referência de 90 N.m estipulada para manobras de prevenção de quedas, os valores pré-redução podem ser observados na **Figura 1**.

Em regime de funcionamento permanente, as simulações no software Altair PSIM permitiram mapear o perfil de missão elétrico do inversor, considerando a alimentação do sistema robótico em 48V. A análise de confiabilidade centrou-se na medição contínua das correntes do transistor Q1 e do diodo D1 (**Figura 1**), registrando os picos de esforço responsáveis pelas perdas por condução e comutação. Cabe destacar que o mapeamento destes componentes é representativo para todo o

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

conjunto, visto que os demais semicondutores estão sujeitos a esforços de magnitude similar, diferindo apenas pela defasagem temporal, o que dispensa análises gráficas redundantes.

Pela física de falhas, as perdas elétricas convertem-se em calor na junção do chip, gerando ciclos severos de oscilação térmica. Essas variações cíclicas de temperatura induzem forças de cisalhamento decorrentes da diferença nos coeficientes de expansão térmica dos materiais, provocando desgastes críticos como a fadiga das soldas de fixação e o rompimento dos fios de ligação (*bond wires*).

O perfil de estresse extraído via PSIM fornece os parâmetros de entrada para métodos preditivos de dano acumulado, como a Regra de Miner. O cálculo quantitativo de ciclos até a falha está condicionado aos componentes eletrônicos específicos do inversor, uma vez que elementos discretos (transistores, diodos, capacitores) apresentam tolerâncias de fabricação e variações de lote, o que torna a resposta de vida útil vinculada à especificação exata do hardware utilizado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu estruturar uma metodologia voltada à avaliação da confiabilidade de acionamentos elétricos em robôs humanoides, contornando as restrições de dados proprietários de fabricantes por meio de simulações computacionais no software Altair PSIM.

A partir da definição do motor Kollmorgen TBM(S)-12941-B e de sua caixa de redução, foi possível simular com precisão o cenário de maior estresse operacional na junta do joelho (91 N·m a 82 RPM). Adicionalmente, o mapeamento dos esforços nos semicondutores (transistor Q1 e diodo D1) evidenciou os perfis de perdas elétricas e a consequente geração de ciclos térmicos, viabilizando a compreensão dos mecanismos de física de falhas associados à fadiga de soldas e ao rompimento de fios de ligação.

Por fim, conclui-se que a extração detalhada desses perfis de estresse eletrotérmico fornece a base necessária de dados que torna possível um projeto pautado na confiabilidade em eletrônica de potência além de fornecer a informações para um controle de sistema sofisticado (**Figura 2**). Ressalta-se que a quantificação exata da vida útil operacional está vinculada à escolha e às tolerâncias individuais dos componentes discretos do hardware real do inversor. Assim, a pesquisa cumpre seu objetivo ao estabelecer diretrizes metodológicas sólidas e consistentes para o projeto e a maximização da confiabilidade em sistemas robóticos de alta exigência.

Palavras-chave:
Confiabilidade; Acionamentos elétricos; Robôs humanoides; Motores PMSM; Simulação computacional.

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

ANEXOS

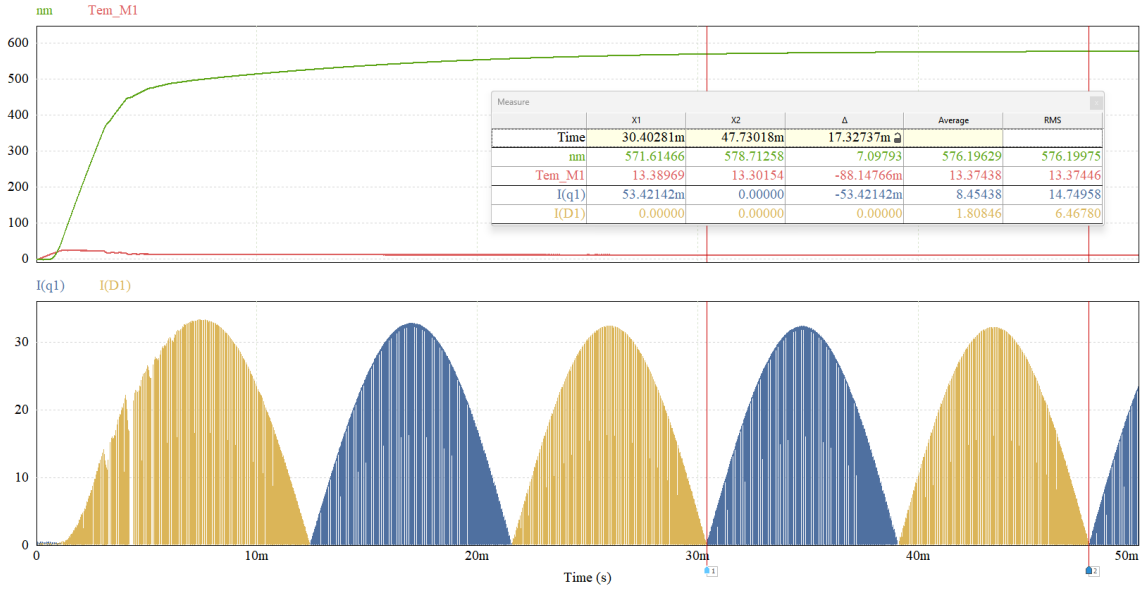


Figura 1. *Velocidade (nm), torque (Tem_M1) e corrente no transistor Q1 e diodo D1*

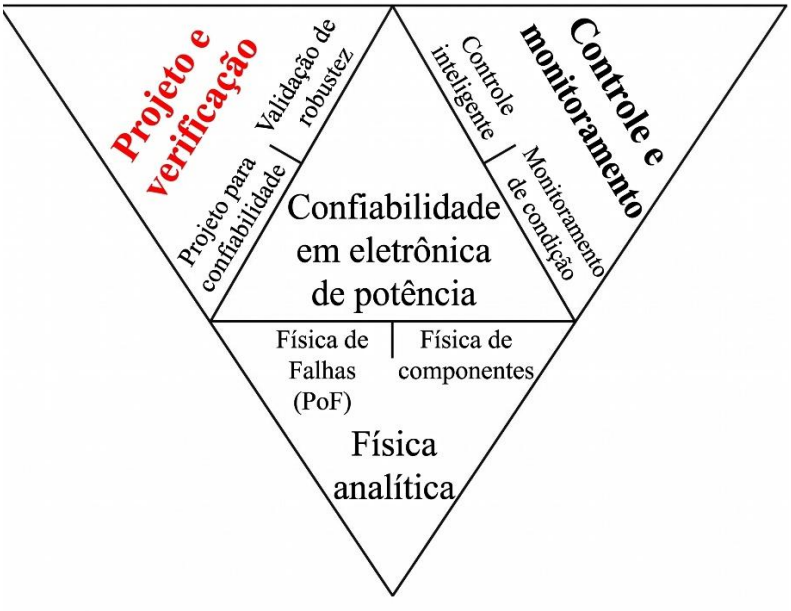


Figura 2. *Aspectos da avaliação da confiabilidade em sistemas de eletrônica de potência. Adaptado de Wang et al. (2014).*

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

R. D. Lorenz, "Robotics and automation applications of drives and converters," in Proceedings of the IEEE, vol. 89, no. 6, pp. 951-962, June 2001.

P. T. Luu, J. -Y. Lee, J. -H. Lee and J. -W. Park, "Electromagnetic and Thermal Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Motors for Cooperative Robot Applications," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 56, no. 3, pp. 1-4, March 2020, Art no. 7512804.

FAN, Peng et al. From chip to inverter: electro-thermal modeling and design for paralleled power devices in high power application. Microelectronics Reliability, [S. l.], v. 87, p. 271-277, 2018.

JADLI, Utkarsh et al. A method for selection of power MOSFETs to minimize power dissipation. Electronics, Basel, v. 10, n. 17, p. 1-8, set. 2021.

LENSCHOW, Felipe. Desenvolvimento de uma pata de robô quadrúpede: integração de eletrônica, controle e mecânica. 2024. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2024.

XIA, Xianqi; ZHANG, Bao; LI, Xiantao. High precision low-speed control for permanent magnet synchronous motor. Sensors, Basel, v. 20, n. 5, p. 1-19, mar. 2020.

SOARES, Itamar Fernandes. Fundamentos de confiabilidade aplicados a sistemas de eletrônica de potência. Joinville: UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina, [s.d.a]. Não publicado.

SOARES, Itamar Fernandes. Fundamentos de ensaios de confiabilidade aplicados a sistemas de eletrônica de potência. Joinville: UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina, [s.d.b]. Não publicado.

M. -T. Duong, T. -P. Luu, T. D. Do and Y. Perriard, "Design of High Torque Density Permanent Magnet Motors and Drives for Collaborative Robot Applications," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1060-1064.

WANG, H. et al. Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 2, n. 1, p. 97–114, 2014.