CONFIABILIDADE DE ACIONAMENTOS ELÉTRICOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Alexandre Verdi, Sérgio Vidal Garcia Oliveira

INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda a confiabilidade dos inversores de frequência usados em sistemas de refrigeração, que sofrem constante desgaste elétrico e térmico. Para evitar falhas e aumentar a vida útil do equipamento, a pesquisa teve como objetivo analisar o estresse nos capacitores da placa eletrônica, avaliando preventivamente como o calor e a corrente afetam o sistema durante o seu funcionamento real.

DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento da pesquisa seguiu um passo a passo prático para avaliar a confiabilidade de inversores de frequência usados em sistemas de refrigeração. O primeiro passo foi revisar a literatura sobre a troca dos compressores tradicionais pelos modelos Inverter, entendendo os problemas reais que a eletrônica de potência traz, o passo seguinte foi garantir que a simulação refletisse a operação real do equipamento. Para isso, a carga mecânica do compressor foi modelada com base na literatura de acionamentos elétricos, onde o torque do compressor foi representado por uma equação de segundo grau dependente da velocidade.

Foram utilizados dados de catálogos de compressores reais da Embraco, focando no FMXD9C, que tem 8,74 cm^3 de deslocamento, roda a 4000 RPM e entrega 179 W de potência mecânica. Com isso, realizamos o cálculo para descobrir o torque de partida (T_0) e a constante da carga (k), gerando expressões exatas que foram implementadas nos blocos dinâmicos do software Altair PSIM (Figura 2). Em paralelo, a pesquisa explorou metodologias de avaliação de risco, partindo do modelo estatístico tradicional MIL-HDBK-217F e evoluindo para a metodologia FIDES. Fundamentada na física das falhas, essa abordagem possibilitou integrar perfis de missão reais e fatores de aceleração da degradação, isolando os módulos semicondutores (IGBTs) e os capacitores eletrolíticos do barramento DC-link como os elos mais vulneráveis do inversor.

Para reproduzir o ambiente de estresse, o barramento de corrente contínua foi montado utilizando três conjuntos em paralelo de dois capacitores eletrolíticos associados em série. Essa configuração busca garantir a divisão das tensões de operação e fazer com que a corrente ripple individual não ultrapasse o limite especificado pelo fabricante. A quantificação da vida útil foi então embasada no modelo estendido da Lei de Arrhenius, o qual integra múltiplas variáveis de estresse. O modelo analítico considerou a extração da corrente eficaz de ripple, o cálculo da potência dissipada internamente na Resistência Série Equivalente (ESR) e a aplicação da resistência térmica estimada do invólucro (R_{th}) para quantificar o autoaquecimento contínuo do núcleo (ΔT), além de contabilizar o estresse dielétrico gerado pela tensão aplicada.

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

RESULTADOS

Em regime de funcionamento permanente, o modelo no Altair PSIM estabilizou operando com um torque de carga de 7,91 N · m e velocidade de 1799,97 RPM. Essa demanda mecânica exigiu do inversor uma tensão média total de 750,8 V no barramento CC.

Esse valor de tensão fez com que fosse necessária a utilização de capacitores em série. Dessa forma, o projeto manteve a operação dentro de uma margem de segurança para componentes comerciais isolados para 400 V, eliminando o risco imediato de ruptura dielétrica por sobretensão. O dado crítico extraído da simulação para a análise de confiabilidade foi a corrente ripple absorvida pelo banco de capacitores, que atingiu um valor RMS de 3,20 A (Figura 1a).

Olhando para a física das falhas, um ripple alto gera calor por efeito Joule. Como a ESR extraída do catálogo para o capacitor é de 0,045 Ω, essa corrente gerou uma perda contínua de 0,46 W. Usando a resistência térmica de 12,7 °C/W, vimos que o capacitor esquenta cerca de 5,85 °C além da temperatura do ambiente. Com estes dados, utilizando a Lei de Arrhenius, montamos um gráfico da vida útil (Figura 1b). A análise desta curva provou que a elevação da temperatura ambiente externa atua em conjunto com o autoaquecimento, reduzindo a capacidade de troca térmica do capacitor. Esse acoplamento térmico-elétrico pode derrubar a expectativa de vida útil do componente de milhares de horas para dezenas de horas em picos térmicos, evidenciando que a degradação química do eletrólito antecipará falhas elétricas muito antes do surgimento de desgastes mecânicos do compressor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa comprovou que a durabilidade dos inversores utilizados na refrigeração depende, fundamentalmente, do gerenciamento térmico do barramento CC. A adoção da estrutura em série e paralelo resolveu o risco de sobretensão no circuito e garantiu que a elevada corrente ripple exigida pela carga fosse dividida entre os componentes.

Esse ripple gera um autoaquecimento contínuo devido à ESR do capacitor. Como demonstrado pela curva de Arrhenius, quando esse calor interno se soma a um ambiente externo mais quente, a expectativa de vida útil do capacitor despenca de forma drástica. Conclui-se, portanto, que o projeto eletrônico deve estar atrelado ao esforço mecânico do equipamento, sendo indispensável selecionar capacitores com alta tolerância térmica, pois a falha química do eletrólito vai interromper o funcionamento da placa muito antes de qualquer defeito no motor.

Palavras-chave: confiabilidade; inversores de frequência; capacitores eletrolíticos; sistemas de refrigeração; simulação.

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

ANEXOS

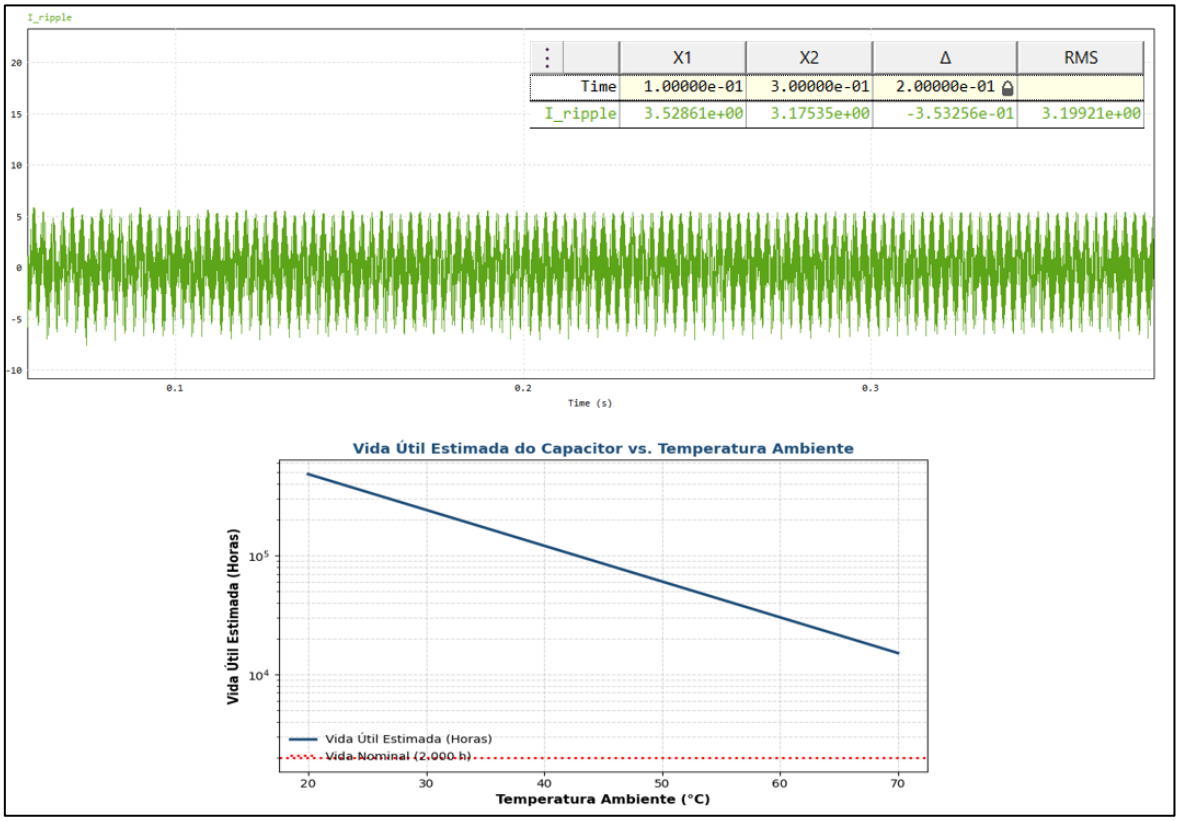


Figura 1. (a) *Corrente ripple em Regime Permanente*; (b)*Vida útil estimada do Capacitor.*

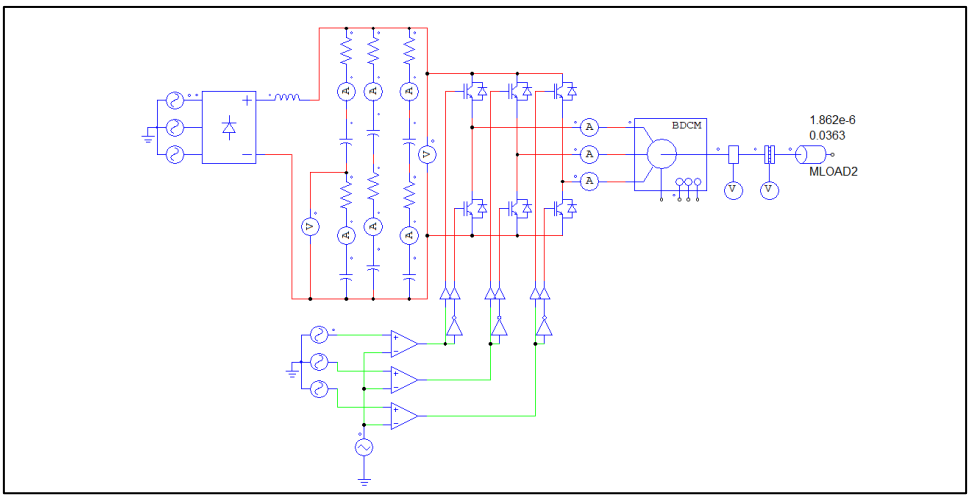


Figura 2. *Esquemático do circuito de acionamento modelado no Altair PSIM.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

KADWANE, Sumant G. et al. Reliability evaluation of BLDC drive in refrigeration systems. In: **IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S. l.]: IEEE, 2016.

ANTON, D.; SU, K. N.; KWAN, K. Y. Future Drives of Home Appliances: Elimination of the Electrolytic DC-Link Capacitor in Electrical Drives for Home Appliances. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 9, n. 3, p. 10-18, set. 2015. DOI: 10.1109/MIE.2014.2367051.

HOTA, A. et al. A Novel Three-Phase Induction Motor Drive for Domestic Fan Application with Improved Reliability. In: **2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)**, Chennai, Índia, 2018. Anais... [S. l.]: IEEE, 2018. p. 1-5. DOI: 10.1109/PEDES.2018.8707651.

LIM, G. C. et al. Cost-Effective Fault Diagnosis for Motor and Inverter Using Bootstrap Charging and Single DC Link Current Sensor. In: **2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**, Atlanta, EUA, 2025. Anais... [S. l.]: IEEE, 2025. p. 2937-2942. DOI: 10.1109/APEC48143.2025.10977437.

DONLON, J. et al. Power Modules for Appliance Motor Control. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 8, n. 4, p. 26-34, jul./ago. 2002. DOI: 10.1109/MIA.2002.1011185.

DURANTAY, Lionel et al. State-of-the-Art for full electric driven refrigeration compressors solutions using adjustable speed drive: Which combination of technology platforms leads to the best CAPEX and OPEX solution up to 100 MW? **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 3, p. 2992-3004, 2018.

WANG, H.; BLAABJERG, F. Power Electronics Reliability: State of the Art and Outlook. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 9, n. 6, p. 6476-6493, dez. 2021. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3037161.

FALCK, J. et al. Reliability of Power Electronic Systems: An Industry Perspective. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 12, n. 2, p. 24-35, jun. 2018. DOI: 10.1109/MIE.2018.2825481.

ROSU, Marius et al. **Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics and drives**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2017.

ATASHIN, Soroush Ahooye *et al*. DC-Link Capacitor Design for High-Speed Integrated Motor Drives: Reliability and System-Level Constraints. In: IEEE SOUTHERN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (SPEC), 10., 2025. **Anais...** IEEE, 2025. p. 1-6. Disponível em: https://doi.org/10.1109/SPEC64875.2025.11376952.