

COMPARAÇÃO DA DISSIPAÇÃO DE POTÊNCIA NO ISOLAMENTO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA ACIONADA POR INVERSOR PWM

ALEX FRANCISCO DE SOUSA FERREIRA¹, JÚLIO CARLOS TEIXEIRA²

¹Aluno de graduação do curso de Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica, UFABC, Santo André-SP, alex.chicosousa@hotmail.com;

² Prof. Dr. em engenharia elétrica, Prof. Associado, CECS, UFABC, Santo André SP
julioCarlos.teixeira@ufabc.edu.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Este estudo objetivou analisar o efeito da portadora (senoidal e senoidal com injeção de terceiro harmônico) da técnica *PWM* sobre a dissipação de potência ao longo do isolante imerso no ferro de uma máquina elétrica, motivado pelos efeitos negativos do desgaste e envelhecimento do isolante na performance da máquina. Na metodologia, utilizou-se um modelo para o estator da máquina – obtido através de revisão bibliográfica – com o auxílio do Método dos Elementos Finitos no software FEMM para a obtenção dos parâmetros de capacitância e indutância, e cálculo analítico para a obtenção das resistências do modelo. Em seguida, empregou-se, por meio de simulação no software MATLAB, formas de onda de tensão provenientes da saída de um inversor trifásico alternando as portadoras da modulação PWM, e calculou-se o valor da potência instantânea dissipada nas resistências modeladas nos isolantes das ranhuras selecionadas. Observou-se que, apesar das técnicas por portadora com terceiro harmônico, na bibliografia revisada, apresentarem melhores taxas de distorção harmônica, as mesmas também apresentam maior dissipação de potência quando comparadas com técnicas por portadora senoidal. Além disso, observou-se a não uniformidade na dissipação de potência calculada ao longo da bobina estudada.

PALAVRAS-CHAVE: Isolação de máquina elétrica, Método dos Elementos Finitos, dissipação de potência em máquinas elétricas.

A STUDY OF THE DISSIPATION OF POWER IN THE INSULATION OF AN ELECTRIC MACHINE FOR CARRIERS WITH PDPWM MODULATION TECHNIQUE

ABSTRACT: This study aimed to analyze the effect of the carrier (sinusoidal and sinusoidal with third harmonic injection) used in the PWM technique on the power dissipation along the insulator immersed in the iron of an electrical machine, motivated by the negative effects of wear and aging of the insulating the performance of the machine. In the methodology, we used the simplification of a model for the machine stator - obtained through a literature review - with the aid of the Finite Element Method in the FEMM software to obtain the capacitance and inductance parameters of the simplified model, and analytical calculation to obtain the resistances of the model. Then, through simulation in MATLAB software, voltage waveforms from the output of a three-phase inverter were used, alternating the PWM modulation carriers, and the value of the instantaneous power dissipated in the resistances modeled in the insulators of the slots was calculated. selected. It was observed that, although third harmonic carrier techniques, in the revised bibliography, present better harmonic distortion rates, they also present greater power dissipation when compared to sinusoidal carrier techniques. Furthermore, it was observed the non-uniformity in the power dissipation calculated along the studied coil.

INTRODUÇÃO

O uso de inversores em sistemas de acionamento de motores elétricos, por conta da utilização de dispositivos semicondutores IGBTs, permitiu operações em alta frequência e melhorou o desempenho do sistema em termos de controle de tensão, corrente e torque; entretanto, concomitantemente a essas vantagens, o sistema apresenta características indesejáveis, como a circulação de correntes de modo comum, efeito agravado devido à alta frequência de chaveamento, altas taxas de variação de tensão no tempo (dv/dt). Algumas das consequências destes fenômenos no motor podem ser: diminuição do seu tempo de vida útil, circulação de correntes através das capacitâncias intrínsecas ao sistema, problemas de interferência magnética, desgaste prematuro na isolamento da máquina (Flávio, 2010), (Kuchenbecker, 2020), (Chaves, 2011).

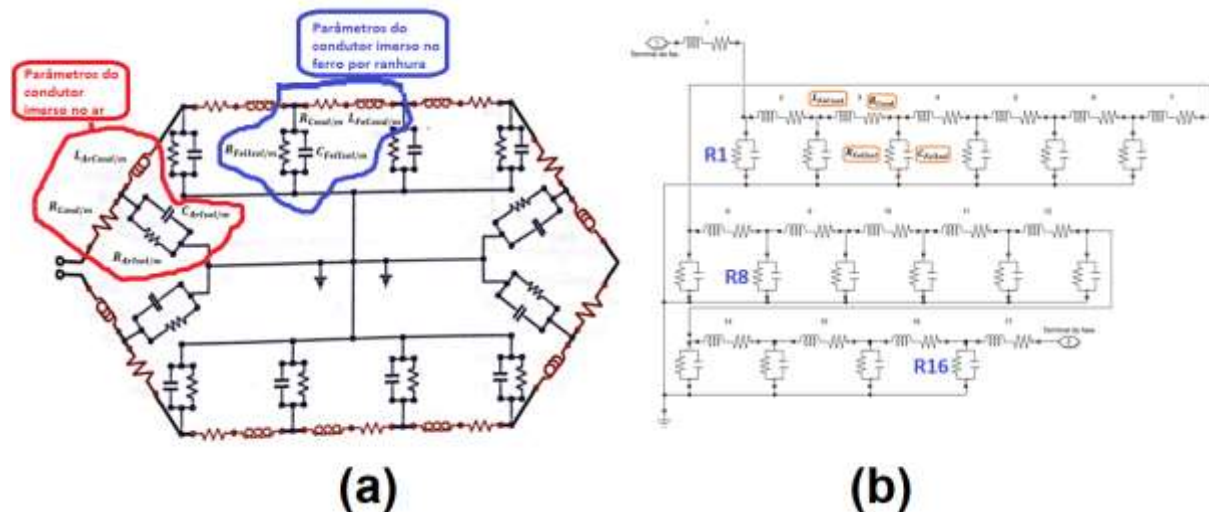
O motor poderá apresentar aumento de perdas e temperatura, aumento dos níveis de vibração, ruído e perda de rendimento dependendo, dentre outras particularidades do controle, da modulação PWM empregada e da frequência de chaveamento (Mascheroni; Lichtblau; Gerardi, [20-?]).

Considerando-se o emprego dos motores elétricos em diversos setores da atividade humana (Almeida, 2011), considera-se relevante um estudo sobre a influência da técnica de modulação PWM sobre a dissipação de potência nos isolantes dos enrolamentos dispostos dentro de ranhuras de uma máquina elétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo obtido através de revisão bibliográfica é de Runcos, 2018. Considerando a resistência e a capacitância do isolamento para o ar como desprezíveis e a indutância do condutor para o ar igual à indutância média do condutor imerso no ferro, obtém-se o modelo abaixo. As ranhuras objeto de cálculo de potência instantânea dissipada são identificadas por R1, R8 e R16.

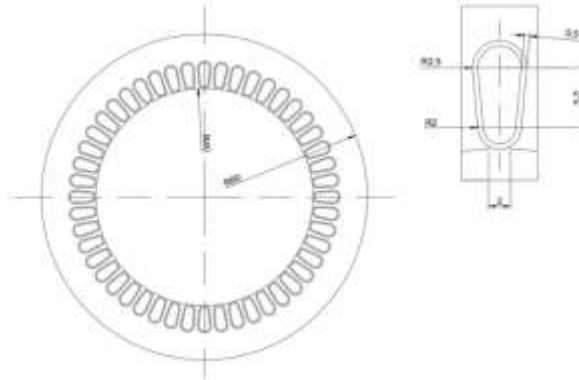
Figura 1. (a) Modelo do estator de uma máquina elétrica. (b) Modelo simplificado utilizado no estudo.



Fonte: Adaptado de Runcos, 2018, e autoria própria.

As dimensões do estator estudados são apresentadas no desenho abaixo. O comprimento do estator é de 95 mm.

Figura 3. Visão frontal fora de escala do estator utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Os condutores imersos no ferro têm cerca de 0,3 mm de diâmetro cada. Para uma área menor que 100 mm², Runcos, 2018 indica o uso de um fator de preenchimento de 0,35. Dessa forma, o cálculo do número de condutores por ranhura resulta em aproximadamente 208 condutores. No software FEMM com auxílio do Método dos Elementos Finitos (Meeker, 2015), desenhou-se esses condutores e obteve-se diferentes valores de capacitância ao dispor os condutores de forma arbitrária na ranhura. Após o cálculo do valor médio e do desvio padrão das capacitâncias, utilizou-se no modelo o valor do limite superior de capacitância calculado. Ainda utilizando o software FEMM, a partir do tipo de resolução de problemas magnéticos, desenhou-se uma ranhura estudada e utilizando o mesmo número de condutores usados na obtenção da capacitância e, com as propriedades do condutor idênticas a de um condutor 28 AWG, obteve-se os valores de indutância do condutor imerso no ferro e de resistência do condutor. Para a obtenção da resistência do isolamento para a massa, tomou-se a área interna da seção transversal da ranhura (obtida com o auxílio do FEMM), e supôs-se que a resistividade do isolante era idêntica à da mica para cálculo analítico da resistência.

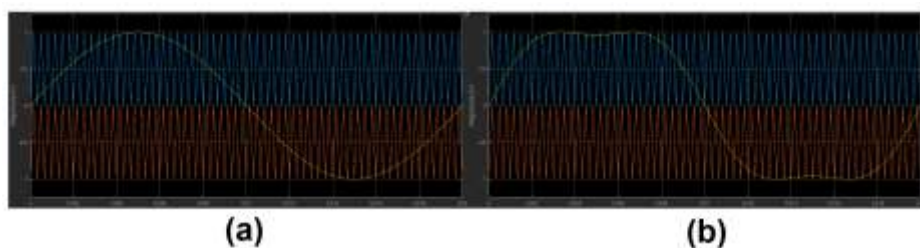
Tabela 1. Parâmetros do modelo simplificado com respectivos valores obtidos

Parâmetro	Descrição	Valor obtido
R_{Cond}	Resistência do condutor	5 Ω
L_{FeCond}	Indutância do condutor imerso no ferro	17 mH
R_{FeIsol}	Resistência do isolamento para a massa	2e-12 Ω
C_{FeIsol}	Capacitância do isolamento da parte do condutor imerso no ferro	45 pF

Fonte: Adaptada de Runcos, 2018 com coluna de valores de autoria própria.

Para a obtenção da tensão modulada, utilizou-se uma portadora de 50 Hz e frequência de chaveamento de 3 kHz. A técnica de modulação por portadora – senoidal e com injeção de terceiro harmônico – utilizada é a *Phase Disposition* PWM (Rathore; Kirar; Bhardwaj, 2015) apresentada na figura abaixo. Nota-se que a portadora com terceiro harmônico apresenta uma ondulação próximo aos valores de pico.

Figura 4. (a) PDPWM com portadora senoidal. (b) PDPWM com portadora senoidal com terceiro harmônico.

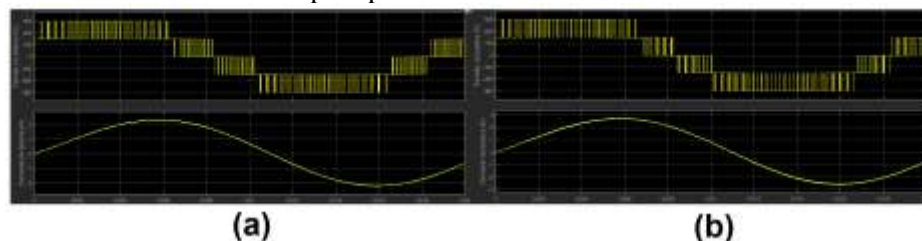


Fonte: Autoria própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tensão de linha proveniente de um inversor trifásico de três níveis com neutro grampeado é utilizada nos terminais da bobina do modelo elaborado. A corrente que circula pelo circuito do modelo é também demonstrada na figura abaixo. O aproveitamento do barramento CC é maior com a portadora senoidal com terceiro harmônico (Chokkalingham; Padmanaban; Blaabjerg, 2018), o que faz com que a corrente observada no modelo tenha maior amplitude para esta modulação.

Figura 5. (a) Tensão modulada e corrente do circuito para portadora senoidal (b) Tensão modulada e corrente do circuito para portadora senoidal com terceiro harmônico



Fonte: Autoria própria.

Já nas isolações representadas por R1, R8 e R16 na Figura 2, as potências instantâneas calculadas são apresentadas conforme tabela abaixo.

Tabela 2. Valores de tensão eficaz na bobina e potências médias dissipadas nos isolantes calculadas com proporção de aumento.

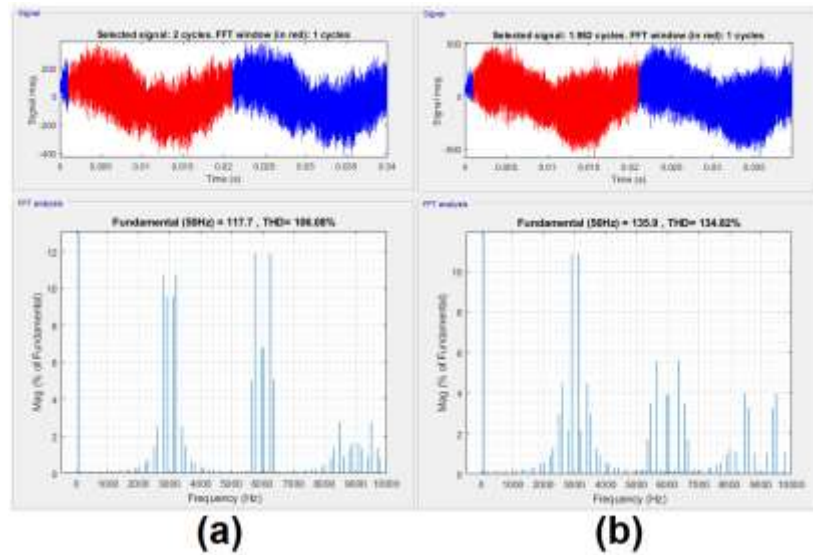
	Modulação por portadora senoidal	Modulação por portadora senoidal com terceiro harmônico	Proporção de aumento
Tensão eficaz da bobina (Vrms)	194,8	219,7	1,13
Potência dissipada em R1 (pW)	7,6	13,8	1,81
Potência dissipada em R8 (pW)	0,8	1,3	1,62
Potência dissipada em R16 (pW)	9,5	21,4	2,25

Fonte: Autoria própria

A proporção no aumento da potência dissipada nos resistores foi maior do que a proporção no aumento da tensão eficaz na bobina, o que sugere uma fonte de perdas relacionada à modulação.

Já na Figura 6, apresentada abaixo, monitorou-se os níveis de tensão na isolação representada pela resistência R1 e a taxa de distorção harmônica da mesma, e observou-se que a troca da portadora implicou em maiores amplitudes de tensão no isolamento. Além disso, o sinal de tensão sobre o isolante também apresentou taxa de distorção harmônica maior para modulação com portadora senoidal com terceiro harmônico.

Figura 6. (a) Tensão no isolante e respectivo espectrograma de frequência para portadora senoidal. (b) Tensão no isolante e respectivo espectrograma de frequência para portadora senoidal com terceiro harmônico.



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a dissipação de potência ao longo dos isolantes das ranhuras de uma bobina da máquina elétrica objeto do estudo não é uniforme, sendo maior nos isolantes das ranhuras próximas às extremidades da bobina. Espera-se, para a máquina estudada, uma potência dissipada na ordem de pW. A portadora escolhida para a modulação PWM da tensão aplicada nos terminais da bobina pode influenciar na magnitude das perdas.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Júlio Carlos Teixeira pela orientação ao longo do desenvolvimento da pesquisa e à Universidade Federal do ABC por todo o suporte.

REFERÊNCIAS

- Almeida, Welington. Contribuições ao estudo da tensão de eixo e correntes de modo comum em motores de indução acionados por conversores PWM. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2011.
- Chaves, Camilla. Determinação das capacitâncias de fuga de motores de indução através do Método dos Elementos Finitos. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2011.
- Chokkalingham, Haratiraja; Padmanaban, Sanjeevikumar; Blaabjerg, Frede. Investigation and Comparative Analysis of Advanced PWM Techniques for Three-Phase Three Level NPC-MLI Drives. *Electric Power Components and Systems*, [s. l.], 2018.
- Flávio, Camila. Projeto de filtros para atenuação de correntes de modo comum e de sobretensões em acionamentos de motores elétricos utilizando inversores PWM. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2010.
- Kuchenbecker, Walter. Critérios para avaliação do sistema de isolamento de máquinas elétricas girantes para a realização de serviços. Artigo técnico WEG, Artigo técnico WEG, 2020.
- Mascheroni, José; LICHTBLAU, Marcos; GERARDI, Denise. Guia de aplicação: Inversores de frequência. [S. l.: s. n.], [20-?].
- Meeker, David. Finite Element Method Magnetics user's manual. [S. l.: s. n.], 2015.
- Rathore, Sourach; KIRAR, Mukesh; Bhardwaj, S.K. Simulation of cascade H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)* V, [s. l.], 2015.
- Rüncos, Fredemar. Projeto e análise da máquina elétrica trifásica. [S. l.: s. n.], 2018.