

Desenvolvimento de um driver de potência com forma de onda de corrente arbitrária para um PMSM

Pedro Conti Hernandez¹, Renato Camargo Giacomini², André Luiz Perin³, Cleiton Fidelix Pereira⁴, Milene Galeti⁵, Marco Antonio Assis de Melo⁶, Rudolf Theoderich Buhler⁷, Walter Pereira da Silva Junior⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8} Departamento Engenharia Elétrica, Centro Universitário FEI

uniephernandez@fei.edu.br, renato@fei.edu.br, andreperin@fei.edu.br, cleitonfidelix@fei.edu.br, mgaleti@fei.edu.br, mant@fei.edu.br, buhler@fei.edu.br, walterjr@fei.edu.br

Resumo: Este projeto teve como objetivo aprimorar a compreensão do Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM) e criar um conjunto abrangente de ferramentas e um ambiente para o desenvolvimento de acionamentos eletrônicos e estratégias de controle. Esse framework incluiu um gerador de forma de onda digital trifásico e circuitos de potência. O circuito digital foi testado em um FPGA, e o protótipo do circuito de potência está em testes de laboratório.

1. Introdução

O Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM) é um motor elétrico trifásico com várias aplicações, como robótica, aeroespacial e indústrias de máquinas [1]. Ele também tem sido uma opção preferida para aplicações veiculares devido às suas características de alta eficiência, como alta densidade de potência [2], [3]. No entanto, devido aos seus aspectos construtivos, sua caracterização não é tão simples, o que requer o estabelecimento de novos métodos que permitam um melhor controle do motor e, assim, extrair o máximo desempenho em cada faixa de operação [4] [5] [6]. Isso requer um estudo detalhado do PMSM, dos dispositivos de acionamento e dos circuitos, além dos circuitos de controle digital.

2. Materiais e Métodos

Foi utilizado um motor síncrono de ímã permanente industrializado (Motor Samsung de acionamento direto trifásico) com 12 polos, número da peça DC96-01218E, potência de 600 W e velocidade máxima de rotação de 1400 rpm. A placa de controle foi projetada para este estudo e continha todos os componentes eletrônicos necessários para acionar o motor, incluindo o sistema de controle de potência integrado. Assim, para o desenvolvimento do protótipo, foi utilizado o módulo de potência trifásico IGCM15F60GA do fabricante *Infineon*. O software *FUSION 360* foi utilizado para criar o esquemático elétrico e o design 2D da placa de circuito impresso (PCB). O esquema elétrico previamente projetado foi simulado usando o software PSIM. O circuito digital foi implementado usando o software Quartus Prime e a linguagem de hardware VHDL. A técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) foi utilizada para controlar os níveis de tensão. Para o primeiro teste, foi utilizada uma síntese digital de uma forma de onda senoidal através de uma tabela de pesquisa, descrita por um vetor de 10 bits. No entanto, para caracterizar o comportamento do motor para diferentes sinais de entrada, a geração de até cinco harmônicas de uma série de Fourier foi adicionada ao circuito de controle digital.

3. Resultados

3.1 Simulação Módulo IGBT

Inicialmente, foram realizadas simulações utilizando o simulador de inversor trifásico IPM fornecido pelo fabricante. Este simulador permitiu a implementação de um sistema de acionamento de motor trifásico para simular a perda de energia e a temperatura da junção de cada dispositivo dentro do IPM (Módulo de Potência Integrado) sob condições de carga estática.

3.2 Simulação usando o software PSIM

Utilizando o software PSIM, os componentes do módulo IGBT foram adicionados para visualização e medição dos sinais do circuito de potência. Após a simulação, foi possível verificar as formas de onda da corrente de saída dos Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT) na Figura 1. Pode-se observar que as três ondas senoidais estão defasadas em 120°, garantindo o funcionamento suave do motor.

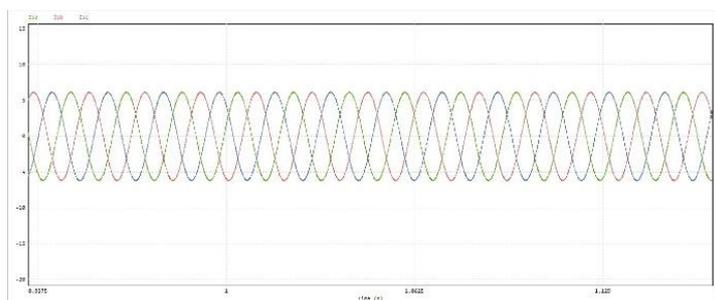


Figura 1 – Corrente na saída do IGBT para cada fase.

3.3 Design da PCB

Após conduzir as simulações necessárias para compreender o funcionamento do módulo IGBT, foram analisados alguns documentos fornecidos pelo fabricante do componente eletrônico, onde o esquemático elétrico do módulo de potência trifásico IGCM15F60GA pode ser visto na figura 2.

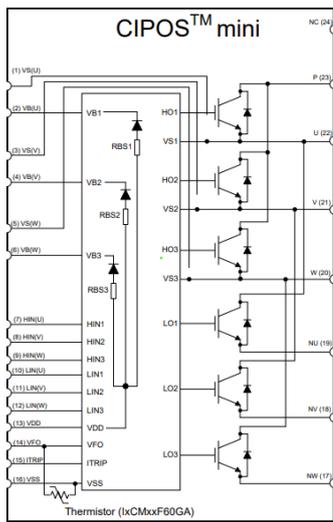


Figura 2 – Circuito Elétrico Módulo de Potência Trifásico.

Com base nessas informações e dados, o esquema elétrico foi desenvolvido utilizando o software *FUSION 360* visto na figura 3.

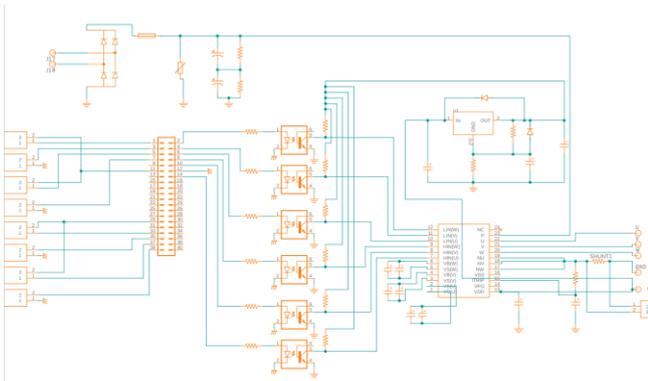


Figura 3 – Esquemático Elétrico Protótipo.

Após realizar o roteamento das trilhas e dimensionar o protótipo, a fabricação da placa de circuito impresso (PCB) e a soldagem dos componentes foram realizadas, e o protótipo pode ser visto na Figura 2.



Figura 4 - Protótipo.

3.4 Circuito Digital

A Figura 3 mostra o diagrama de blocos do circuito digital desenvolvido para gerar um sistema trifásico

senoidal controlado por PWM na saída. Esse circuito foi implementado no software Quartus e testado na placa Intel DE10 Lite

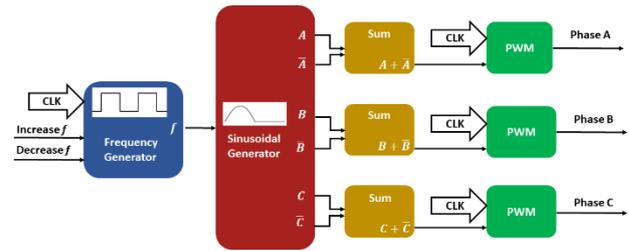


Figura 5 - Diagrama de Blocos de Circuito Digital.

3.5 Circuito de Controle

O circuito mostrado no diagrama de blocos da Figura 3 foi desenvolvido no Quartus e após passar por um filtro RC passa-baixa é possível observar a correta construção do sinal senoidal com os deslocamentos de fase apropriados

O próximo passo foi a criação dos primeiros 5 harmônicos de uma série de Fourier, para gerar diferentes formas de onda de saída. O resultado da saída com os 5 harmônicos medidos com o osciloscópio é mostrado na Figura 4.

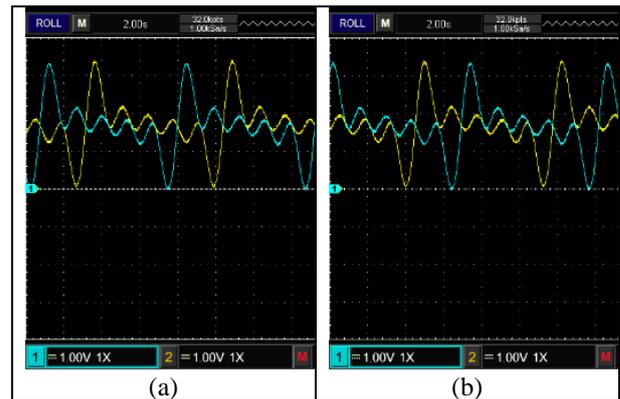


Figura 6 - Saída do circuito de controle com os 5 harmônicos (a) Fases A (azul) e B (amarelo); (b) Fases A (azul) e C (amarelo).

4. Conclusões

O circuito de potência e a placa de controle foram testados, revelando a necessidade de melhorias no projeto, como trilhas de potência mais espessas e valores otimizados dos componentes eletrônicos. O estudo demonstrou a eficácia do PWM no controle preciso do motor e a capacidade de gerar diversas formas de onda. No entanto, pesquisas adicionais são necessárias para caracterizar completamente o PMSM e explorar aprimoramentos no design do driver de potência.

5. Referências

- [1] T. Barbosa, “FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO Controle do motor PMSM aplicado no FEUP VEC.”
- [2] U.S. Department of Energy, “The history of the electric car.”

- <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> (accessed Feb. 10, 2022).
- [3] U.S. Department of Energy., “Determining Electric Motor Load and Efficiency.” <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/10097517.pdf> (accessed Feb. 07, 2023).
- [4] R. Gudivada, K. K. Bodnapu, and K. R. Vavillapalli, “Virtual characterization of Interior Permanent Magnet (IPM) motor for EV traction applications,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, IEEE, Dec. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/ITEC-India.2017.8333875.
- [5] Z. Wu, S. Zuo, and S. Chen, “Analytical Modeling and Calculation of Electromagnetic Torque of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Ripple Characteristics,” *SAE Int J Adv Curr Pract Mobil*, vol. 3, no. 4, pp. 2021-01–0769, Apr. 2021, doi: 10.4271/2021-01-0769.
- [6] F. J. M. Guevara, “Controlo de um Motor Síncrono Baseado em FPGA,” Braga, Oct. 2015. Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/51281>

Agradecimentos

À instituição Centro Universitário FEI pelo suporte financeiro (PIBIC-FEI) em 2022/2023.