



Otimização da malha de velocidade do controle de um motor síncrono de ímã permanente

Optimization of the speed loop control of a permanent magnet synchronous motor

Kaio Ferreira Andrade, Marcelo Favoretto Castoldi, Alessandro Goedtel

RESUMO

O foco principal desse trabalho é apresentar a otimização da malha de velocidade do controle de máquinas elétricas, com foco nas máquinas síncronas de ímã permanente, uma vez que trata-se de máquinas modernas e que estão em plena expansão de utilização. Através da otimização da malha, será possível melhorar o sistema de controle de velocidade e torque da máquina, objetivando um bom desempenho quando sua velocidade é variada ou a carga em seu eixo alterada. O trabalho será desenvolvido utilizando a ferramenta MATLAB® e, por meio da realização das simulações e testes, será possível escolher a sintonia dos parâmetros do controlador que proporcionam um melhor controle da máquina.

Palavras-chave: motor síncrono, ímã permanente, otimização

ABSTRACT

The main focus of this work is to present the optimization of the speed loop of the control of electric machines, with a focus on synchronous permanent magnet machines, since they are modern machines that are in full expansion of use. Through the optimization of the loop, it will be possible to improve the speed and torque control system of the machine, aiming at a good performance when its speed is varied or the load on its axis changed. The work will be developed using the MATLAB® tool and, through the realization of simulation and tests, it will be possible to choose the tuning of the controller parameters that provide a better control of the machine.

Keywords: synchronous motor, permanent magnet, optimization



1 INTRODUÇÃO

As máquinas síncronas de ímãs permanentes (MSIP), tem se tornado muito usuais nas últimas décadas, podendo ser empregadas em diversas aplicações e diversas áreas. O que mais chama atenção neste tipo de máquinas, é a relação do volume do torque produzido pelo motor, com a alta eficiência que esse tipo de máquina apresenta. O motor síncrono de ímã permanente possui esse nome pois os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanentes (FITZGERALD et al, 2014).

Por conta da ausência de um enrolamento rotórico e da ausência de escovas, além desse motor apresentar alta eficiência e um grande volume de torque, essas características também acarretam em uma grande diminuição das perdas, como por exemplo as perdas ôhmicas e perdas joule, perdas relacionadas com as desvantagens da presença de um comutador eletrônico e anéis deslizantes.

O motor utilizado para realizar todos os experimentos, foi o motor do bloco AC6 – PM Synchronous 3HP Motor Drive, o qual se encontra na biblioteca Simscape do Matlab. Este bloco representa um drive de controle vetorial clássico para motores síncronos de ímã permanente e possui um controle de velocidade de malha fechada. A malha de controle de velocidade fornece o torque eletromagnético de referência da máquina.

Dessa maneira, a proposta desse estudo consiste em avaliar a possibilidade de aplicação de algoritmos de otimização para sintonia dos parâmetros do controlador inserido na malha de velocidade do acionamento de um motor síncrono de ímã permanente. Nesse trabalho a otimização inicial foi feita com método de tentativa e erro.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Uma otimização consiste em encontrar uma maneira que seja mais viável de maximizar os fatores que são desejados e minimizar os indesejáveis (SUBRAMANI e RAVI, 2015). Assim, a utilização de SIs através de meios computacionais fará com que ocorra uma busca por uma minimização ou maximização de uma determinada função objetivo.

Os Sistemas Inteligentes (SI) são baseados em utilizar a tecnologia para receber as informações e a partir destas manipular ou adaptar as mesmas a fim de obter um resultado final satisfatório ou melhorado. O algoritmo evolutivo (AE), o qual é um ramo dos sistemas são basicamente métodos evolutivos utilizados para otimização de determinados problemas. São implementados computacionalmente e se baseiam em problemas da vida real e em processos evolutivos naturais (HUANG et al., 2007).

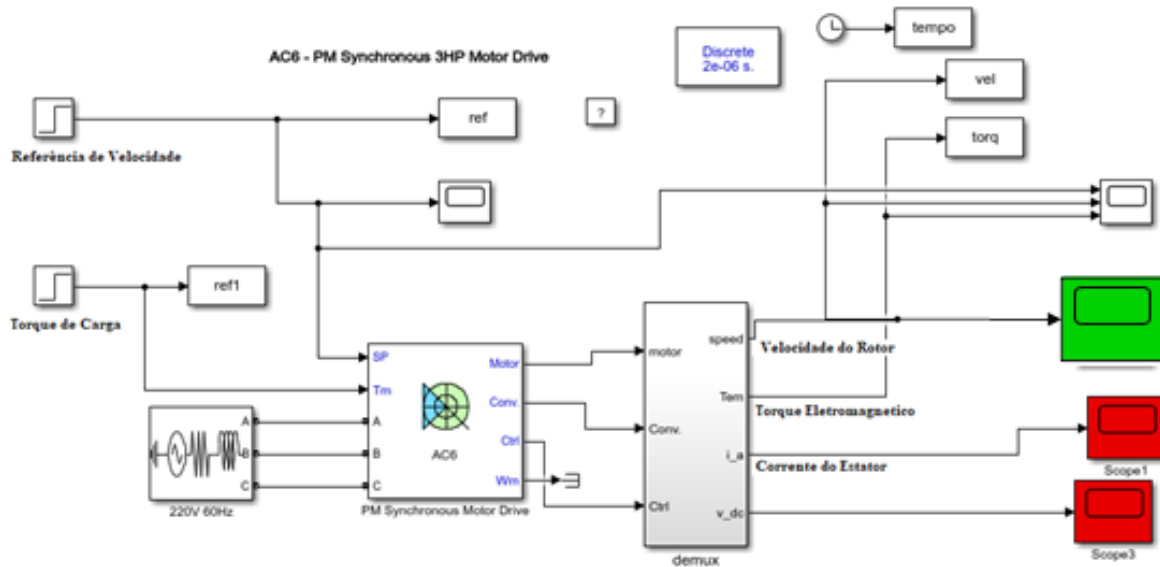
Um algoritmo evolutivo padrão pode ser dividido por etapas, as quais são: inicialização da população, operadores, fitness e seleção dos próximos indivíduos (BERNARDES, 2019).

3 MÉTODOS

Para a realização das simulações propostas neste trabalho, foi desenvolvida uma estrutura de ensaios no software MATLAB/Simulink., versão 2016b. O conversor foi alimentado com 3 fases de 220V e 60hz de frequência. Nas entradas do sistema de controle foram aplicados sinais de torque e de velocidade do motor. A Figura 1 mostra a estrutura completa do ensaio.

* Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; kaioferre@hotmail.com

Figura 1 – Simulação AC6 – PM Synchronous 3HP Motor Drive



Fonte: Autoria Própria (2021)

O motor do bloco AC6 – *PM Synchronous 3HP Motor Drive* possui uma velocidade nominal de 1800 rpm, sendo seus parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados MSIP Simulado.

Parâmetro	Valor
Resistência do Circuito (ohm)	0,2
Indutância do Eixo-D (H)	8,5e-3
Indutância do Eixo-Q (H)	8,5e-3
Constante de Fluxo (V.s)	0,175
Inercia (kg.m ²)	0,089
Fator de Atrito (N.m.s)	0,005
Pólos	4

Fonte: Autoria própria (2021).

Foi feito um ensaio utilizando a estrutura apresentada na Figura 1, na qual há variação de velocidade e carga. Foi definida uma referência de velocidade de 100 rpm desde a partida do motor, e uma carga de 10 N.m entra em seu eixo no instante 0,2 segundos. Foram utilizadas duas sintonias distintas do controlador PI, inserido na malha de controle, com o intuito de observar se a resposta do sistema era influenciada pela sintonia dos parâmetros destes controladores. Tal sintonia foi realizada utilizando o método de tentativa e

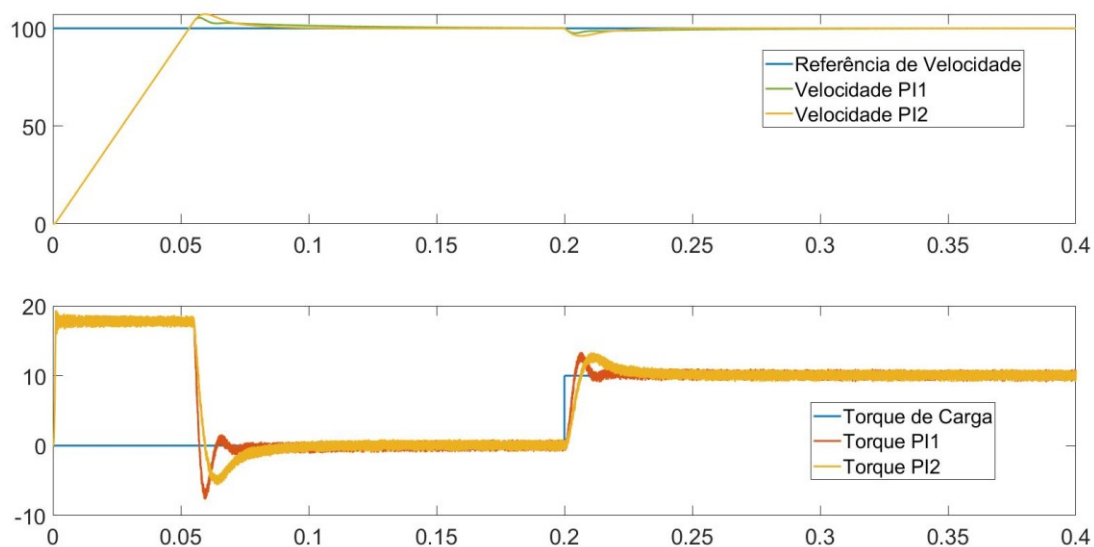
erro, tendo como valores ajustados para o PI1 $K_p=5$ e $K_i=100$, enquanto que para o PI2 os valores são $K_p=2.5$ e $K_i=150$.

4 RESULTADOS

A Figura 2 exibe a resposta da velocidade e torque do sistema quando o teste proposto é executado. Pode-se perceber por meio da Figura 2 que o tempo de subida utilizando os dois PI's são bem próximos. O PI1 possui *overshoot* maior, porém tem um tempo de acomodação menor. Já o PI2 tem um *overshoot* menor, porém demora mais para atingir o valor de referência.

Ainda considerando a Figura 2, pode-se perceber que o torque chega em seu valor limite na região de aceleração, fazendo com que o tempo de subida considerando os dois PI's sejam bem parecidos. Este valor limite, que influencia no tempo de subida e, portanto, na dinâmica do sistema, pode ser ajustado, sendo tema do prosseguimento desta pesquisa. Além disso, pode-se observar que o torque, quando o motor opera a vazio, tem um valor pequeno, somente para vencer as perdas rotacionais. Posteriormente, com a entrada da carga, o torque eletromagnético aumenta.

Figura 2 - Simulação com degrau de torque.



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se verificar que diferentes sintonias dos parâmetros do controlador inserido na malha de velocidade geram resultados diferentes. Desta forma, pode-se aplicar algoritmos de otimização, utilizando métricas de sintonia de controladores, para que a resposta do sistema seja ótima de acordo com algum critério de desempenho específico. Desta forma, pretende-se, na continuação deste projeto, aplicar um algoritmo de otimização para sintonizar os parâmetros do controlador da malha de velocidade de um motor síncrono de ímã permanente. Para isso, quatro índices de desempenho serão considerados, a saber: Critério ISE (do inglês, *Integral of Squared Error*), Critério IAE (do inglês, *Integral of Absolut Error*), Critério ITSE (do inglês, *Integral of Time multiply Squared Error*) e Critério



ITAE (do inglês, *Integral of Time multiply Absolute Error*). As equações que representam cada um dos quatro critérios que serão adotados podem ser verificadas nas equações (1)-(4).

A partir da de otimização espera-se alterar os valores para conseguir melhorar o desempenho do controle de velocidade do acionamento do motor de acordo com as funções mencionadas no capítulo anterior (ISE, IAE, ITAE e ITSE).

ISE – Eleva o erro ao quadrado de forma que a ocorrência de um erro negativo possa ser considerada de forma equivalente ao erro positivo.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1)$$

IAE – Aumenta o erro independente se for positivo ou negativo.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e^2(t)| dt \quad (2)$$

ITAE – Aumenta o erro multiplicando pelo tempo, com isso fazendo com que sistemas com erro após longo período da inicialização do sistema de controle sejam mais penalizados.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (3)$$

ITSE – Aumenta o seu erro pois também é uma integral que utiliza o tempo como multiplicador.

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (4)$$

Onde t é o tempo e e é o erro entre a referência e o valor medido ou estimado.

Diante dos resultados obtidos, será feita uma análise da resposta entregue pela malha de velocidade usando cada uma das métricas usadas na sintonia do PI do bloco AC6 utilizado no experimento e, a partir disso, observar os resultados apresentados.

Espera-se por resultados melhores se comparados a métodos que empregam tentativa e erro, tendo em vista que muito empregados em problemas envolvendo otimização de parâmetros em diversas áreas, principalmente de motores de elétricos, os quais são muito utilizados no setor industrial, onde tempo e eficiência energética são fatores de extrema importância (MAIAGOLI et al. (2014)).

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, pode-se observar que a sintonia dos parâmetros do controlador inserido na malha de velocidade exerce forte influência na resposta do sistema. Desta forma, aplicar algoritmos de otimização na tarefa de sintonia deste controlador tende a melhorar o desempenho da resposta de velocidade do acionamento.

Na continuação deste trabalho, será feita uma análise da resposta entregue pela malha de velocidade usando cada uma das métricas apresentadas na sintonia do PI do bloco AC6 utilizado no experimento e, a partir disso, fazer uma análise detalhada dos resultados conseguidos.



AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica – PIVICT pela oportunidade de aprimoramento do meu conhecimento acadêmico e profissional.

REFERÊNCIAS

BERNARDES, I. O. **Aplicação do algoritmo de evolução diferencial na estimação dos parâmetros elétricos de um MIT operando em regime permanente. 2019.** Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GUEDES, J. J. et al. Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution. **Electric Power Systems Research**, v. 154, p. 204-212, 2018.

GUIMARÃES, Frederico G. **Algoritmos de evolução diferencial para otimização e aprendizado de máquinas**, 17, 2009, Ouro preto. Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Ouro Preto: UFOP, 2009.

MAIAGOLI, Juliana A.; LOBATO, Frans S.; CAMACHO, José R. **Projeto de estator de máquinas de indução trifásica usando o algoritmo de evolução diferencial.** XI Simpósio de mecânica computacional. Juíz de Fora, maio 2014.

STORN, R.; PRICE, K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341-359, December 01 1997.

SUBRAMANI, T.; RAVI, G. Experimental investigation of coarse aggregate with steel slag in concrete. **IOSR Journal of Engineering**, v. 5, n. 5, p. 64-73, 2015.