

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Emerson Guilherme Alves Estevam

**APLICAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO A UM SISTEMA DE
CONTROLE DE VELOCIDADE SENSORLESS DO IPMSM UTILIZANDO AS
ESTRATÉGIAS CONTROLE DIRETO DE TORQUE
E MÁXIMO TORQUE POR AMPÈRE**

Belo Horizonte

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

E79a Estevam, Emerson Guilherme Alves
Aplicação do filtro de kalman estendido a um sistema de controle de velocidade sensorless do IPMSM utilizando as estratégias controle direto de torque e máximo torque por ampère / Emerson Guilherme Alves Estevam. Belo Horizonte, 2014.
113 f. : il.

Orientadora: Zélia Myriam Assis
Coorientadora: Flávia Magalhães Freitas Ferreira
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Máquinas elétricas síncronas. 2. Kalman, Filtragem. 3. Controle automático. I. Assis, Zélia Myriam. II. Ferreira, Flávia Magalhães Freitas. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.313

Emerson Guilherme Alves Estevam

**APLICAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO A UM SISTEMA DE
CONTROLE DE VELOCIDADE SENSORLESS DO IPMSM UTILIZANDO AS
ESTRATÉGIAS CONTROLE DIRETO DE TORQUE
E MÁXIMO TORQUE POR AMPÈRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Zélia Myriam Assis Peixoto
Coorientadora: Profa. Dra. Flávia Magalhães Freitas Ferreira

Belo Horizonte
2014

Emerson Guilherme Alves Estevam

**APLICAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO A UM SISTEMA DE
CONTROLE DE VELOCIDADE SENSORLESS DO IPMSM UTILIZANDO AS
ESTRATÉGIAS CONTROLE DIRETO DE TORQUE
E MÁXIMO TORQUE POR AMPÈRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Profa. Dra. Zélia Myriam Assis Peixoto
(Orientadora)- PUC Minas

Prof. Dr. Paulo Fernando Seixas - UFMG

Prof. Dr. Mário Fabiano Alves - PUC Minas

Profa. Dra. Flávia Magalhães Freitas Ferreira
(Coorientadora) - PUC Minas (Suplente)

Belo Horizonte, 30 de abril de 2014.

Aos meus pais, Niva e Tarcizo, e às minhas irmãs, Carla e Francimara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, aos meus pais, Niva e Tarcizo, que mais que com palavras, souberam educar-me por exemplos que são, algo imutável na personalidade que me conferiram, e à qual sou grato e orgulhoso por ter. Minhas irmãs, Carla e Francimara, não diferentemente, puderam testemunhar e absorver tamanho amor e exemplo oferecidos por nossos pais, contribuindo para minha formação pessoal, já que sou o caçula. Meus amados, a vocês devo minha vida e minha gratidão, não só pelo imensurável apoio durante esta jornada, mas por tudo mais!

À Profa. Zélia, agradeço todo apoio e orientação despendidos desde o processo seletivo, mesmo sem saber do meu desejo em tê-la como orientadora. Ela, assim como a Profa. Flávia, mostrou-me mais que sábios ensinamentos de engenharia, mas o significado do substantivo Professor no âmbito da pesquisa. Obrigado a vocês pela dedicação.

Aos demais professores do PPGEE, meus agradecimentos pelos ensinamentos ministrados. Aos colegas e funcionários, agradeço a companhia, serviços prestados e, em algumas vezes, a paciência diante da minha incontrolável convicção de ser um comediante. Aos meus coorientados, obrigado pela confiança.

Gostaria ainda de deixar meus agradecimentos aos demais queridos familiares e aos grandes amigos, que aliás poucos não são, por se fazerem sempre presentes (às vezes até um pouco chatos – esses se reconhecerão), com incentivos, companheirismo, boas conversas, pedal e bastante cerveja. À Élika, tão presente e companheira, independentemente da distância, deixo meu carinho e gratidão.

Por fim, agradeço à CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem, mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir. (EINSTEIN, 2014).

RESUMO

A eficiência energética destaca-se como uma das questões de grande importância para os sistemas elétricos e de transporte na atualidade. Várias iniciativas vêm sendo adotadas nesse sentido, dentre elas, o desenvolvimento de máquinas elétricas mais eficientes, o aprimoramento das estratégias de controle de máquinas elétricas nas aplicações industriais e a utilização de propulsores elétricos em veículos automotores. O motor síncrono a ímãs permanentes internos (IPMSM) apresenta características – como alta relação torque por volume, alta relação torque por Ampère, capacidade de operação em regime de sobrecarga e robustez mecânica – que vêm incentivando sua utilização em sistemas de acionamento de corrente alternada de alto desempenho. Pesquisas recentes, disponíveis na literatura técnico-científica atual, destacam a associação das técnicas Controle Direto de Torque (DTC) e Filtro de Kalman Estendido (EKF) na realização de sistemas de controle de velocidade *sensorless* que possam assegurar respostas rápidas de torque, e o aproveitamento da capacidade torque por Ampère do IPMSM, contribuindo para a eficiência do sistema com redução de custos e maior confiabilidade em função da eliminação de sensores eletromecânicos e da maior robustez obtida às variações paramétricas, aos ruídos de medições e aos distúrbios de carga. Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um sistema DTC com rastreamento dos pontos de máximo torque por Ampère (MTPA) aplicado ao IPMSM, com estimação do fluxo de estator e velocidade e posição do rotor através do EKF. Após a contextualização do tema, são apresentados os fundamentos teóricos relativos às técnicas envolvidas e análises através de simulações. Uma alternativa ao comparador com histerese, utilizado nas estratégias DTC tradicionais, é proposta visando à redução do *ripple* de torque sem perda de desempenho. Métodos para a sintonia das matrizes de covariância do EKF são investigadas. As simulações realizadas, com base na associação do EKF-DTC-IPMSM ao MTPA, indicam o bom desempenho do sistema e incentivam uma futura implementação experimental.

Palavras-chave: Controle Direto de Torque. Filtro de Kalman Estendido. Máximo Torque por Ampère. Motor Síncrono a Ímãs Permanentes Internos. Redução de *Ripple*.

ABSTRACT

Energy efficiency stands out as one of the issues of great importance for present electrical and transportation systems. Several initiatives are being taken in this regard, among them the development of more efficient electric machines, the improvement of electric machines control strategies in industrial applications and the use of electric propulsion in motor vehicles. The internal permanent magnet synchronous motor (IPMSM) has characteristics such as high torque to volume ratio, high torque per Ampère ratio, operating capacity under overload and mechanical robustness, coming to encourage their use in high performance alternate current drive systems. Recent researches, available in the current scientific and technical literature, highlight the association of Direct Torque Control (DTC) and Extended Kalman Filter (EKF) techniques while design the sensorless speed control systems that can ensure quick torque responses, and utilization of torque per Ampère capacity of the IPMSM, contributing to system efficiency with reduced costs and increased reliability, due to the elimination of electromechanical sensors and the robustness obtained in regard to parametric variations, measurement noises and load disturbances. This dissertation presents the development of a DTC system with tracking of maximum torque per Ampère (MTPA) points applied to the IPMSM, estimating stator flux and rotor speed and position through the EKF. After theme contextualization, theoretical foundations concerning the techniques involved and analysis through simulations are presented. An alternative to the comparator with hysteresis, used in traditional DTC strategies, is proposed in order to reduce torque ripple without loss of performance. Methods for tuning the covariance matrix of the EKF are investigated. Simulations based on the association of EKF-DTC-IPMSM to MTPA show good performance of the system and encourage future experimental implementation.

Keywords: Direct Torque Control. Extended Kalman Filter. Internal Permanent Magnet Synchronous Motor. Maximum Torque per Ampère. Ripple Reduction.