

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Plano de Trabalho de Iniciação Científica

Título: Identificação e Controle Clássico Linear e Baseado em Dados de Conversores CC-CC Buck, Boost e Buck-Boost

Campo	Informação
Aluno(a)	Luiz Felipe Souza de Lima Silva
Matrícula	[Matrícula]
Curso	Engenharia Elétrica
Modalidade	[PIBIC / Voluntária de Iniciação Científica]
Orientador	Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira
Unidade	Faculdade de Engenharia Elétrica – Campus Universitário de Tucuruí
Projeto de pesquisa vinculado	Identificação, Estimação e Controle Baseados em Dados e Inteligência Computacional Aplicados a Conversores de Potência e Acionamentos Elétricos
Período de execução	12 meses
Carga horária	20 horas semanais

Resumo

Este plano de trabalho propõe o estudo, a modelagem, a identificação de sistemas e o controle de três topologias de conversores CC-CC — Buck, Boost e Buck-Boost — implementadas sobre uma plataforma comercial de controle digital da Texas Instruments, composta pelo kit de desenvolvimento LAUNCHXL-F28379D (microcontrolador de sinais digitais Delfino de duplo núcleo), pela BoosterPack conversora BOOSTXL-BUCKCONV para a topologia Buck, e pelos módulos de acionamento de chaves (gate drivers) DRV8323RS e DRV8320RS para a montagem

dos estágios de potência Boost e Buck-Boost. O uso de uma plataforma comercial validada, amplamente adotada pela indústria e pela academia, permite concentrar o esforço de pesquisa nas etapas de identificação de sistemas e de projeto de controladores, reduzindo os riscos e o tempo associados ao desenvolvimento de hardware de controle dedicado. Serão aplicadas técnicas clássicas lineares de identificação — mínimos quadrados convencionais (MQC) e recursivos (MQR) — para obtenção de modelos entre a razão cíclica e a tensão de saída de cada conversor, e serão projetados, simulados e implementados de forma embarcada controladores clássicos (PI) e controladores baseados em dados — controle preditivo baseado em modelo (MPC), a partir dos modelos identificados, e controle preditivo direto por dados (DeePC). O trabalho contempla fundamentação teórica, modelagem analítica, simulação computacional, montagem das bancadas físicas, identificação experimental e implementação embarcada dos controladores nas três topologias, com avaliação comparativa de desempenho.

Introdução e Justificativa

Os conversores CC-CC Buck, Boost e Buck-Boost constituem o conjunto fundamental de topologias não isoladas da eletrônica de potência, sendo empregados de forma isolada ou combinada em fontes de alimentação, sistemas fotovoltaicos, carregadores de baterias e veículos elétricos. Embora compartilhem princípios de operação semelhantes — comutação em alta frequência, armazenamento de energia em elemento indutivo e filtragem capacitiva —, cada topologia apresenta características dinâmicas distintas: o conversor Boost e o conversor Buck-Boost, em particular, exibem função de transferência de fase não mínima entre razão cíclica e tensão de saída, o que impõe desafios de controle não presentes no conversor Buck. O estudo comparativo das três topologias, sob um mesmo arcabouço de identificação e controle, permite avaliar a generalidade e os limites de aplicação das técnicas investigadas.

A implementação física de conversores de potência controlados digitalmente exige, tradicionalmente, o desenvolvimento de hardware de controle dedicado — placas de condicionamento de sinais, circuitos de acionamento de chaves (gate drive) e interfaces de aquisição de dados —, etapa que consome parcela significativa do tempo de um projeto de iniciação científica e introduz riscos de falha por problemas de hardware não relacionados ao objeto central da pesquisa. A adoção de uma plataforma comercial validada mitiga esse risco. O kit de desenvolvimento LAUNCHXL-F28379D, baseado no microcontrolador de sinais digitais da família C2000 Delfino (TMS320F28379D, de duplo núcleo), é referência da indústria para controle digital de conversores de potência e acionamentos elétricos, dispondo de módulos de PWM de alta resolução, conversores analógico-digitais rápidos e núcleo de coprocessamento em tempo real (CLA), recursos essenciais para a implementação embarcada de controladores avançados com período de amostragem reduzido. A BoosterPack BOOSTXL-BUCKCONV

fornece um estágio de potência Buck sincronamente comutado já validado, com sensoramento de tensão e corrente integrado, permitindo iniciar de imediato os experimentos de identificação e controle sobre essa topologia. Para as topologias Boost e Buck-Boost, cujos estágios de potência serão dimensionados e montados pelo(a) aluno(a) bolsista, o acionamento das chaves será realizado por meio dos módulos de gate driver trifásico inteligente DRV8323RS e DRV8320RS, dispositivos comerciais de referência para acionamento de meia-ponte com proteção integrada, amplamente utilizados tanto em acionamentos de máquinas elétricas quanto, como neste plano de trabalho, no acionamento de conversores CC-CC de topologia não isolada.

Do ponto de vista de controle e identificação, este plano de trabalho articula duas frentes complementares. A primeira, de natureza clássica linear, compreende a identificação por mínimos quadrados (convencional e recursivo) da relação entre a razão cíclica aplicada ao conversor e a tensão de saída regulada, e o projeto de controladores Proporcional-Integral (PI) a partir dos modelos obtidos — abordagem consolidada e de referência de desempenho para as demais estratégias. A segunda frente, de controle baseado em dados, compreende o controle preditivo baseado em modelo (MPC), que permite incorporar restrições operacionais — como limites de razão cíclica e de corrente no indutor — diretamente na lei de controle, e o controle preditivo direto por dados (DeePC), que dispensa a etapa de identificação explícita ao construir o preditor diretamente a partir de trajetórias de entrada e saída medidas na planta. A comparação entre essas abordagens, implementadas de forma embarcada nas três topologias, permite avaliar o ganho de desempenho e o custo computacional associado a estratégias de controle mais avançadas frente à referência clássica.

Este plano de trabalho insere-se no projeto de pesquisa "Identificação, Estimação e Controle Baseados em Dados e Inteligência Computacional Aplicados a Conversores de Potência e Acionamentos Elétricos", contribuindo para as etapas de fundamentação teórica, modelagem, identificação de sistemas e controle avançado dos conversores CC-CC previstas no projeto principal, com o diferencial de utilizar uma plataforma de controle digital comercial de referência industrial, ampliando a maturidade tecnológica e a reprodutibilidade dos resultados obtidos, além de proporcionar ao(à) aluno(a) bolsista formação em uma ferramenta de desenvolvimento amplamente empregada pela indústria de eletrônica de potência.

| Objetivos

Objetivo Geral

Investigar a identificação de sistemas por métodos clássicos lineares e o controle clássico e baseado em dados dos conversores CC-CC Buck, Boost e Buck-Boost, implementados sobre a

plataforma comercial de controle digital Texas Instruments LAUNCHXL-F28379D, com estágios de potência BOOSTXL-BUCKCONV (Buck) e acionamento por gate drivers DRV8323RS/DRV8320RS (Boost e Buck-Boost).

Objetivos Específicos

- Estudar os fundamentos teóricos dos conversores CC-CC Buck, Boost e Buck-Boost, incluindo modos de condução contínua e descontínua, e o princípio de modulação por largura de pulso digital;
- Estudar a arquitetura da plataforma LAUNCHXL-F28379D (microcontrolador TMS320F28379D), incluindo módulos de PWM de alta resolução (ePWM/HRPWM), conversão analógico-digital e recursos de processamento em tempo real, e o ambiente de desenvolvimento associado (Code Composer Studio);
- Estudar o funcionamento da BoosterPack BOOSTXL-BUCKCONV e configurá-la para operação com o conversor Buck sobre a plataforma LAUNCHXL-F28379D;
- Estudar o funcionamento dos módulos de gate driver DRV8323RS e DRV8320RS e projetar, dimensionar e montar os estágios de potência dos conversores Boost e Buck-Boost, acionados por esses módulos e controlados pela plataforma LAUNCHXL-F28379D;
- Derivar os modelos de pequenos sinais das três topologias pela técnica de média no espaço de estados, obtendo as funções de transferência entre razão cíclica e tensão de saída;
- Simular as três topologias no ambiente MATLAB/Simulink, validando o comportamento estático e dinâmico em malha aberta e malha fechada, com geração de dados para identificação de sistemas;
- Aplicar técnicas de identificação por mínimos quadrados convencionais (MQC) e recursivos (MQR) sobre as três plantas físicas implementadas, obtendo modelos ARX entre razão cíclica e tensão de saída, e validá-los frente aos modelos analíticos de pequenos sinais;
- Projetar e implementar, de forma embarcada na plataforma LAUNCHXL-F28379D, controladores PI para regulação de tensão de saída das três topologias, com ajuste por alocação de polos e validação experimental;
- Projetar e implementar controladores preditivos baseados em modelo (MPC), a partir dos modelos ARX identificados, incorporando restrições de razão cíclica e de corrente no indutor;
- Projetar e implementar controladores preditivos diretos por dados (DeePC), avaliando a viabilidade de dispensa da etapa de identificação explícita nas três topologias;
- Comparar experimentalmente o desempenho das estratégias PI, MPC e DeePC nas três topologias quanto a tempo de acomodação, sobressinal, erro em regime permanente e rejeição a perturbações de carga;

- Elaborar relatórios técnicos parciais e final, e produzir material para eventual submissão a evento científico ou periódico, sob orientação do coordenador do projeto.
-

Metodologia

O plano de trabalho será executado em oito etapas ao longo de 12 meses, em consonância com a metodologia do projeto de pesquisa ao qual este plano está vinculado.

Etapas 1 — Revisão bibliográfica e fundamentação teórica

Estudo dos fundamentos de operação dos conversores CC-CC Buck, Boost e Buck-Boost, dos modos de condução contínua e descontínua, e da modulação por largura de pulso digital gerada por microcontrolador. Estudo da arquitetura da plataforma C2000 Delfino (TMS320F28379D) e de seus periféricos relevantes para controle digital de conversores de potência (ePWM/HRPWM, ADC, CLA).

Etapas 2 — Familiarização com a plataforma de desenvolvimento

Configuração do ambiente de desenvolvimento Code Composer Studio (ou do suporte C2000 do MATLAB/Simulink Embedded Coder) para o kit LAUNCHXL-F28379D. Implementação de rotinas básicas de geração de PWM, leitura de conversor analógico-digital e comunicação serial para aquisição de dados em tempo real, como base para os experimentos das etapas seguintes.

Etapas 3 — Montagem das bancadas físicas dos três conversores

Configuração da BoosterPack BOOSTXL-BUCKCONV sobre a plataforma LAUNCHXL-F28379D para operação do conversor Buck, com verificação do sensoramento de tensão e corrente integrado. Projeto analítico, dimensionamento e montagem dos estágios de potência dos conversores Boost e Buck-Boost (indutor, capacitor, chaves e diodo ou retificação síncrona), acionados pelos módulos de gate driver DRV8323RS e DRV8320RS, com implementação dos circuitos de sensoramento de tensão de saída e de corrente no indutor para essas duas topologias. Caracterização estática e dinâmica das três bancadas em malha aberta, com cargas resistivas.

Etapas 4 — Modelagem analítica e simulação computacional

Derivação do modelo de pequenos sinais de cada topologia pela técnica de média no espaço de estados, obtendo a função de transferência entre razão cíclica e tensão de saída. Construção dos modelos de simulação das três topologias no ambiente MATLAB/Simulink (Simscape

Electrical), com validação do comportamento estático e dinâmico em malha aberta e geração de dados de entrada e saída para uso na identificação de sistemas.

Etapa 5 — Identificação de sistemas

Aplicação de sinais de excitação (PRBS ou degraus) na razão cíclica de cada um dos três conversores implementados, com aquisição simultânea da tensão de saída via plataforma LAUNCHXL-F28379D, para identificação por mínimos quadrados convencionais (MQC), obtendo modelos ARX de baixa ordem. Aplicação do algoritmo de mínimos quadrados recursivos (MQR) com fator de esquecimento variável para acompanhamento de variações paramétricas decorrentes de mudanças de carga e de ponto de operação. Validação cruzada dos modelos identificados frente aos modelos analíticos obtidos na Etapa 4, para as três topologias.

Etapa 6 — Projeto e implementação do controle clássico (PI)

Projeto de controladores PI para a malha de tensão de cada uma das três topologias, por alocação de polos a partir dos modelos identificados. Implementação embarcada na plataforma LAUNCHXL-F28379D e validação experimental em malha fechada, estabelecendo a referência de desempenho para as estratégias baseadas em dados investigadas na etapa seguinte.

Etapa 7 — Projeto e implementação do controle baseado em dados (MPC e DeePC)

Projeto de controladores preditivos baseados em modelo (MPC), com horizonte de predição finito, a partir dos modelos ARX identificados na Etapa 5, incorporando restrições de razão cíclica e de corrente máxima no indutor, para as três topologias. Projeto de controladores preditivos diretos por dados (DeePC), construídos a partir de trajetórias de entrada e saída medidas diretamente nas plantas físicas, sem uso de modelo explícito. Implementação embarcada de ambas as estratégias na plataforma LAUNCHXL-F28379D e testes experimentais em malha fechada nas três topologias.

Etapa 8 — Análise comparativa de resultados e redação

Comparação experimental do desempenho das estratégias PI, MPC e DeePC nas três topologias, quanto a tempo de acomodação, sobressinal, erro em regime permanente e rejeição a perturbações de carga (degraus de carga resistiva). Consolidação dos resultados e redação do relatório técnico final do plano de trabalho, com produção de material para eventual submissão a evento científico ou periódico.

Ferramentas computacionais e plataforma de hardware

Resultados Esperados

Espera-se, ao final da execução deste plano de trabalho, dispor de: (i) três bancadas físicas funcionais de conversores CC-CC (Buck, Boost e Buck-Boost) implementadas sobre a plataforma comercial LAUNCHXL-F28379D, com estágios de potência BOOSTXL-BUCKCONV e acionamento por DRV8323RS/DRV8320RS; (ii) modelos dinâmicos identificados experimentalmente entre razão cíclica e tensão de saída para as três topologias; (iii) controladores PI, MPC e DeePC projetados, implementados de forma embarcada e validados experimentalmente nas três topologias, com avaliação comparativa de desempenho; (iv) relatório técnico final e material para submissão a evento científico ou periódico da área; e (v) formação prática do(a) aluno(a) bolsista no uso de uma plataforma de controle digital de referência industrial, contribuindo para os objetivos do projeto de pesquisa ao qual este plano está vinculado.

Referências

- AGUIRRE, Luis Antonio. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015. ISBN 978-85-423-0079-6.
- CAMACHO, Eduardo F.; BORDONS, Carlos. *Model Predictive Control*. 2. ed. London: Springer, 2007. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). ISBN 978-1-85233-694-3. DOI: 10.1007/978-0-85729-398-5.
- COULSON, Jeremy; LYGEROS, John; DÖRFLER, Florian. Data-enabled predictive control: In the shallows of the DeePC. In: EUROPEAN CONTROL CONFERENCE (ECC), 2019. *Proceedings...* p. 307-312. DOI: 10.23919/ECC.2019.8796571.
- ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. *Fundamentals of Power Electronics*. 3. ed. Cham: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-43879-1. DOI: 10.1007/978-3-030-43881-4.
- LJUNG, Lennart. *System Identification: Theory for the User*. Upper Saddle River: PTR Prentice Hall, 1999.
- MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 978-0-471-22693-2.
- TEXAS INSTRUMENTS. *TMS320F28379D Dual-Core Delfino Microcontroller — Data Manual*. Dallas: Texas Instruments.

- TEXAS INSTRUMENTS. *LAUNCHXL-F28379D — C2000 Delfino LaunchPad Development Kit — User's Guide*. Dallas: Texas Instruments.
- TEXAS INSTRUMENTS. *BOOSTXL-BUCKCONV — Buck Converter BoosterPack — User's Guide*. Dallas: Texas Instruments.
- TEXAS INSTRUMENTS. *DRV8323R — Automotive, 100-V Three-Phase Smart Gate Driver — Datasheet*. Dallas: Texas Instruments.
- TEXAS INSTRUMENTS. *DRV8320R — Automotive, 100-V Three-Phase Gate Driver — Datasheet*. Dallas: Texas Instruments.
- TEXAS INSTRUMENTS. *DRV8323RS-EVM / DRV8320RS-EVM — User's Guide*. Dallas: Texas Instruments.