

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR CC DE ÍMÃ PERMANENTE ACIONADO POR CHOPPER

1. PROBLEMA E MOTIVAÇÃO



Necessidade de controle de velocidade de alto desempenho em motores CC de ímã permanente (PMDC).



Amplamente utilizados em aplicações industriais que exigem ampla faixa de velocidade e controle preciso.



Sistemas convencionais são afetados por perturbações de carga, força contra-eletromotriz (Back-EMF) e saturação integral do controlador.

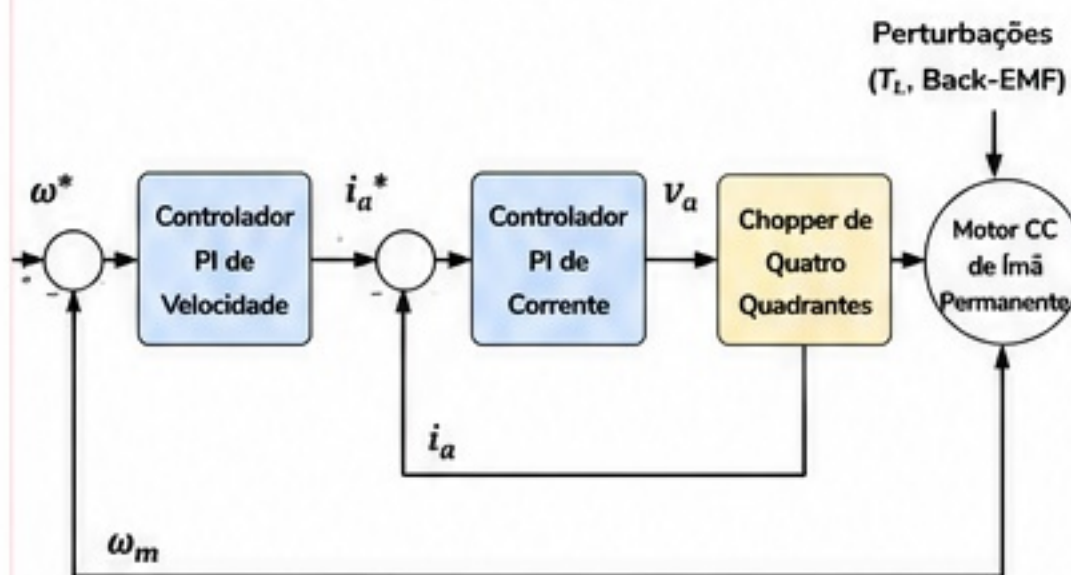


OBJETIVO:

Desenvolver e validar computacionalmente um sistema de controle de velocidade em cascata para motor CC de ímã permanente acionado por chopper de quatro quadrantes.

2. VISÃO GERAL DO SISTEMA

Estrutura de Controle em Cascata



PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- Controladores PI para as malhas de corrente e velocidade
- Controle antecipativo para compensação da Back-EMF
- Malha anti-windup para evitar saturação do integrador
- Sintonia por cancelamento de polos e zeros para desacoplamento
- Chopper de quatro quadrantes para operação bidirecional

3. METODOLOGIA



Modelagem matemática do motor PMDC (dinâmica elétrica e mecânica).



Modelagem do chopper de quatro quadrantes.



Arquitetura de controle em cascata:

- PI da corrente (malha interna)
- PI da velocidade (malha externa)



Controle antecipativo para compensação da força contra-eletromotriz (Back-EMF).



Controle anti-windup pelo método back-calculation.



Sintonia dos controladores por cancelamento de polos e zeros.



Simulação computacional no software MATLAB/Simulink.

4. MODELO DO MOTOR PMDC

- Modelo elétrico: circuito da armadura (resistência, indutância e Back-EMF).
- Modelo mecânico: dinâmica do torque, velocidade e carga.
- Torque eletromagnético proporcional à corrente de armadura.
- Back-EMF proporcional à velocidade do motor.



Motor CC de ímã permanente utilizado nos testes experimentais.

5. PROJETO DO CONTROLE



Malha de Corrente (interna)

Controlador PI com alta largura de banda para resposta rápida da corrente e rejeição de perturbações.



Malha de Velocidade (externa)

Controlador PI garantindo rastreamento preciso da referência e estabilidade.

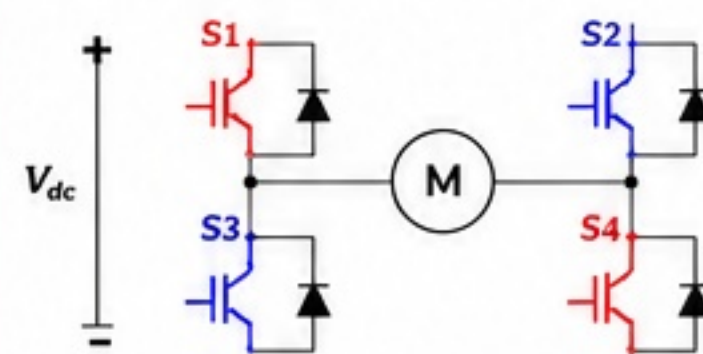


Estratégias de Aprimoramento

- Compensação antecipativa da Back-EMF
- Controle anti-windup (back-calculation)
- Cancelamento de polos e zeros para desacoplamento das malhas

6. CHOPPER DE QUATRO QUADRANTES

- Conversor CC-CC de quatro interruptores controlados.
- Permite fluxo de energia bidirecional.
- Suporta modos de motorização e frenagem regenerativa.
- Operação estável em todos os quatro quadrantes.
- Melhora o desempenho dinâmico e a eficiência energética.



7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Teste 1 – Degrau de velocidade (8650 rpm) – Sem carga (sentido horário)



- Resposta rápida
- Sem overshoot
- Erro em regime permanente nulo

Teste 2 – Degrau de carga ($T_L = 0,1155$ N-m) (sentido horário)



- Excelente rejeição de perturbações
- Velocidade rapidamente restaurada à referência
- Estabilidade comprovada

Teste 3 – Inversão de sentido (Sem carga)



- Frenagem rápida até zero
- Inversão suave da rotação
- Operação estável nos dois sentidos

Teste 4 – Degrau de carga em sentido reverso ($T_L = 0,1155$ N-m)



- Carga aplicada no sentido reverso
- Velocidade rapidamente restaurada à referência
- Corrente e torque estáveis

8. CONCLUSÃO



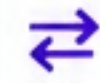
O sistema de controle proposto apresentou excelente desempenho dinâmico e robustez.



Rastreamento preciso da referência de velocidade sem overshoot.



Alta estabilidade e rápida recuperação diante de perturbações de carga.



Operação estável em todos os quatro quadrantes.



O uso combinado de cancelamento de polos e zeros, controle antecipativo e anti-windup resulta em controle de velocidade superior.



Os resultados computacionais validam a eficácia da estratégia de controle proposta para acionamentos de motores CC de ímã permanente.



PREPRINTS
O manuscrito não é preprint.



CONFLITO DE INTERESSES
Os autores declaram não haver conflito de interesses.



DISPONIBILIDADE DE DADOS
Os dados foram publicados no próprio artigo e estão incluídos no corpo do manuscrito.



AGRADECIMENTOS
Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio institucional e disponibilizado.



LICENÇA
Este trabalho está licenciado sob Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0).

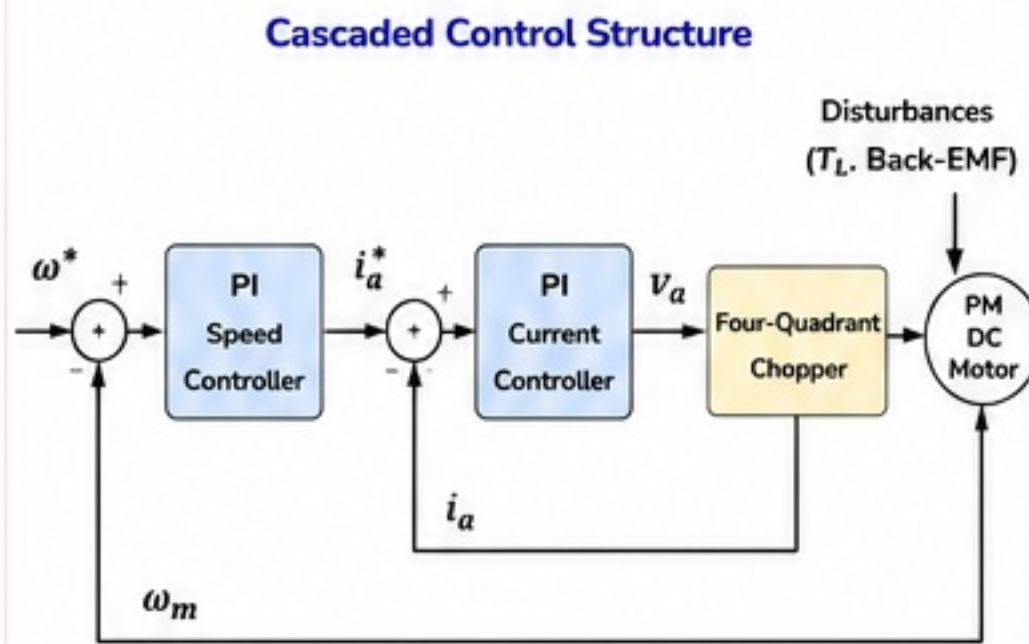
COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE SPEED CONTROL OF A PERMANENT MAGNET DC MOTOR DRIVEN BY A CHOPPER

1. PROBLEM AND MOTIVATION

- Need for high-performance speed control in permanent magnet DC (PMDC) motor drives.
- Widely used in industrial applications that require a wide speed range and precise control.
- Conventional systems are affected by load disturbances, Back-EMF and integrator saturation.

OBJECTIVE:
 To develop and validate computationally a cascaded speed control system for a permanent magnet DC motor driven by a four-quadrant chopper.

2. OVERVIEW OF THE SYSTEM



KEY FEATURES

- PI controllers for current and speed loops
- Feedforward compensation of Back-EMF
- Anti-Windup to prevent integrator saturation
- Pole-zero cancellation for loop decoupling
- Four-quadrant chopper for bidirectional operation

3. METHODOLOGY

- Mathematical modeling of the PMDC motor (electrical and mechanical dynamics).
- Modeling of the four-quadrant chopper.
- Cascaded control architecture:

 - PI current controller (inner loop)
 - PI speed controller (outer loop)
- Feedforward control to compensate the Back-EMF.
- Anti-Windup control using the back-calculation method.
- Tuning by pole-zero cancellation technique.
- Computational simulation in MATLAB/Simulink.

4. PMDC MOTOR MODEL

- Electrical model: armature circuit (resistance, inductance and Back-EMF).
- Mechanical model: dynamics of torque, speed and load.
- Electromagnetic torque proportional to armature current.
- Back-EMF proportional to motor speed.



PMDC motor used in the experimental tests.

5. CONTROL DESIGN



Current Loop (inner)
 PI controller designed for high bandwidth ensuring fast current response and disturbance rejection.



Speed Loop (outer)
 PI controller ensuring accurate speed tracking and stability.

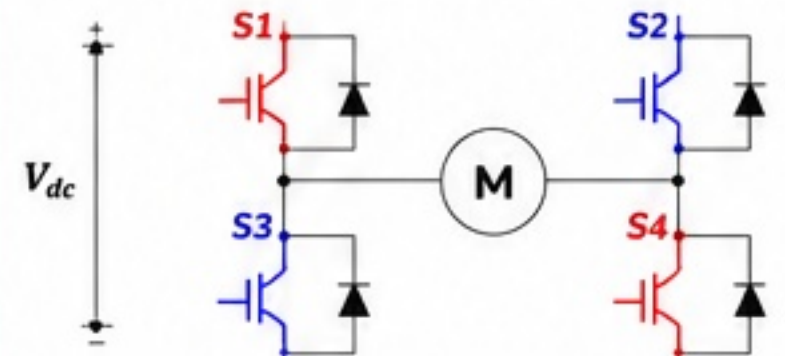


Control Enhancements

- Feedforward compensation of Back-EMF
- Anti-Windup (back-calculation method)
- Pole-zero cancellation for loop decoupling

6. FOUR-QUADRANT CHOPPER

- Four controlled switches enabling bidirectional energy flow.
- Supports motoring and regenerative braking in both directions.
- Allows stable operation in all four quadrants.
- Improves dynamic performance and energy efficiency.



7. COMPUTATIONAL SIMULATION RESULTS

Test 1 – Speed Step
 (8650 rpm)
 No Load (Forward)



- Fast response
- No overshoot
- Zero steady-state error

Test 2 – Load Step
 ($T_L = 0.1155 \text{ N-m}$)
 (Forward)



- Excellent disturbance rejection
- Speed quickly restored to reference
- Stability verified

Test 3 – Direction Reversal
 (No Load)



- Fast braking to zero
- Smooth reversal of rotation
- Stable operation in both directions

Test 4 – Load Step in Reverse
 ($T_L = -0.1155 \text{ N-m}$)



- Load applied in reverse direction
- Speed quickly restored to reference
- Stable current and torque response

8. CONCLUSIONS

- The proposed control system ensures excellent dynamic performance and robustness.
- Accurate reference tracking without overshoot.
- High stability and fast recovery under load disturbances.
- Stable operation in all four quadrants.
- Pole-zero cancellation, feedforward compensation and anti-windup result in superior speed control.
- The computational results validate the effectiveness of the proposed control strategy for PMDC motor drives.