

Departamento de Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico

Universidade Federal de Santa Catarina

Caixa Postal 5119, CEP: 88040-970 - Florianópolis - SC

Tel. (048) 3721.9204 - Fax: (048) 3234.5422 – e.mail: denizar@inep.ufsc.br

PLANO DE ENSINO

1. DISCIPLINA: Acionamentos Elétricos e Eletrônicos

CÓDIGO: EEL 7202

Nº DE SEMANAS:15

TOTAL DE HORAS: 60 horas/aula

2. OFERECIDA PARA O CURSO: Engenharia Elétrica

3. TURMA: 9202

4. OBJETIVOS:

Proporcionar o aprendizado de:

4.1. princípios básicos de modelagem e de especificação das máquinas de corrente contínua e alternada;

4.2. funções básicas dos conversores estáticos e máquinas elétricas;

4.3. noções básicas de acionamentos de máquinas elétricas e conversores estáticos.

5. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

5.1 ACIONAMENTO EM CORRENTE CONTÍNUA

PARTE I

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ACIONAMENTO ELÉTRICO DE MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

1. COMPORTAMENTO DO MOTOT DE CORRENTE CONTÍNUA EM REGIME PERMANENTE

1.1. MODELO GERAL

1.2. MOTOR COM EXCITAÇÃO SEPARADA CONSTANTE E TENSÃO DE ARMADIRA VARIÁVEL

1.3. MOTOR COM EXCITAÇÃO SEPARADA, CORRENTE DE ARMADURA COSNTANTE E CORRENTE DE CAMPO VARIÁVEL

1.4. MOTOR COM EXCITAÇÃO SEPARADA, TENSÃO DE ARMADURA CONSTANTE E CORRENTE DE CAMPO VARIÁVEL

1.5. MOTOR COM EXCITAÇÃO SÉRIE

2. MÉTODOS TRADICIONAIS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

- 2.1. RESISTÊNCIA EM SÈRIE
- 2.2. SISTEMA WARD-LEONARD
- 2.3. TRANSFORMADOR COM TAP's VARIÁVEIS ACOLADO À UM RETIFICADOR

- 3. MODELOS PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO E TRANSITÓRIO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**
- 3.1. MODELO COMPLETO
- 3.2. MODELO SIMPLIFICADO

- 4. PRINCÍPIO DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE E DE CORRENTE**
- 4.1. INTRODUÇÃO
- 4.2. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO MOTOR E DO CONVERSOR
- 4.3. REGULADOR DE VELOCIDADE
- 4.3.1. REGULADOR PROPORCIONAL
- 4.3.2. REGULADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL
- 4.4. REGULADOR DE CORRENTE
- 4.5. MÉTODOS DE MONITORAÇÃO DE VELOCIDADE
- 4.5.1. MÉTODO DA FORÇA-ELETROMOTRIZ
- 4.5.2. USO DE TACOGERADOR
- 4.6. SENSORES DE CORRENTE
- 4.6.1. USO DE TRANSFORMADOR DE CORRENTE NO LADO AC
- 4.6.2. SENSOR RESISTIVO
- 4.6.3. TRANSDUTOR MAGNÉTICO DE CORRENTE CONTÍNUA
- 4.6.4. TRANSDUTOR ELETRÔNICA DE CORRENTE CONTÍNUA
- 4.6.5. SENSOR AFEITO HALL
- 4.7. REGULADORES DE CORRENTE E VELOCIDADE EM PARALELO

- 5. PROJETO DOS REGULADORES EM CASCATA**
- 5.1. ESTUDO DA MALHA DE CORRENTE
- 5.2. GANHO DO REGULADOR DE CORRENTE EM FUNÇÃO DO ERRO ESTÁTICO
- 5.3. ESTUDO DA MALHA DE VELOCIDADE

- 6. PROJETO DOS REGULADORES EM PARALELO**
- 6.1. ESTUDO DA MALHA DE CORRENTE
- 6.2. ESTUDO DA MALHA DE VELOCIDADE

- 7. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA**
- 7.1. RESPOSTA DA VELOCIDADE
- 7.2. RESPOSTA DA CORRENTE
- 7.3. PROCEDIMENTO PARA A MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

PARTE II

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DAS ASSOCIAÇÕES DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA E DOS CONVERSORES ESTÁTICOS

- 1. GENERALIDADE (CRITÉRIOS DE DESEMPENHO)**
- 1.1. CARACTERÍSTICAS TORQUE-VELOCIDADE
- 1.2. FATOR DE POTÊNCIA
- 1.3. CONTEÚDO HARMÔNICO

- 1.4. FATOR DE FORMA DA CORRENTE DE ARMADURA
- 1.5. CORRENTE DE PICO
- 1.6. RENDIMENTO

2. TEORIA BÁSICA DOS RETIFICADORES ALIMENTANDO CARGA RLE

- 2.1. INTRODUÇÃO
- 2.2. ÁBASCO DE PUSCHLOWSKI
- 2.3. INDUTÂNCIA CRÍTICA
- 2.4. ESTRUTURAS RETIFICADORAS EM QUESTÃO
- 2.5. CÁLCULO DAS TENSÕES MÉDIAS
- 2.6. TENSÃO MÉDIA PRODUZIDA PELO RETIFICADOR
- 2.7. EXPRESSÃO CLÁSSICA DA TENSÃO
- 2.8. COMPORTAMENTO DO MOTOR CC COM EXCITAÇÃO SEPARADA ALIMENTADO
- 2.9. POR RETIFICADOR A TIRISTOR

3. ESTUDO DO MOTOR CC COM EXCITAÇÃO SEPARADA ALIMENTADO POR RETIFICADOR CONTROLADO

- 3.1. RETIFICADOR DE MEIA ONDA
- 3.2. RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM DIODO DE RODA LIVRE
- 3.3. RETIFICADOR MISTO DE ONDA COMPLETA COM DIODO DE RODA LIVRE
 - 3.3.1. ESTRUTURA
 - 3.3.2. FORMAS DE ONDA
 - A) Condução Contínua
 - B) Condução Descontínua
 - 3.3.3. EQUACIONAMENTO
 - A) Condução Contínua
 - B) Condução Descontínua
 - 3.3.4. CÁLCULO DA INDUTÂNCIA CRÍTICA

4. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA ASSOCIADO A CONVERSORES CC-CC

- 4.1. INTRODUÇÃO
- 4.2. COMPORTAMENTO DO MOTOR EM REGIME PERMANENTE
- 4.3. CÁLCULO DA INDUTÂNCIA CRÍTICA
- 4.4. CONVERSOR CC-CC A TRANSISTOR ALIMENTANDO UM MOTOR CC
 - 4.4.1. INTRODUÇÃO
 - 4.4.2. CIRCUITO DE AJUDA À COMUTAÇÃO (CAC)
 - 4.4.3. COMANDO DE BASE DOS TRANSISTORES DE POTÊNCIA
- 4.5. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL DE DOIS QUADRANTES
- 4.6. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL DE QUATRO QUADRANTES
- 4.7. CONVERSOR CC-CC DE CORRENTE EM QUATRO QUADRANTE
 - 4.7.1. INTRODUÇÃO
 - 4.7.2. PRINCÍPIO DA TÉCNICA
 - a) Apresentação
 - b) Configuração do Conversor CC-CC de Corrente
 - c) Seqüência de Funcionamento do Conversor de Corrente
 - d) Dimensionamento do Circuito de Comutação
 - 4.7.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5. CONVERSORES CC-CC PARA O ACIONAMENTO DO SERVOMOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

- 5.1. INTRODUÇÃO
- 5.2. O CONVERSOR DUAL

- 5.3. O CONVERSOR CC-CC
- 5.4. TÉCNICAS EMPREGANDO A CONVERSÃO DIRETA
- 5.5. TÉCNICAS EMPREGANDO A CONVERSÃO INDIRETA
 - 5.5.1. PRIMEIRA ESTRUTURA
 - 5.5.2. SEGUNDA ESTRUTURA
 - 5.5.3. TERCEIRA ESTRUTURA
- 5.6. CONCLUSÕES

6. COMENTÁRIOS FINAIS

7. ANEXOS

5.2. ACIONAMENTOS EM CORRENTE ALTERNADA

PARTE I

PRINCÍPIO BÁSICOS DE ACIONAMENTO ELÉTRICO DO MOTOR DE INDUÇÃO

CAPÍTULO 1: MOTOR DE INDUÇÃO, ALIMENTAÇÃO SENOIDAL, FREQUÊNCIA VARIÁVEL, REGIME PERMANENTE

- 1.1. MODELO PARA ALIMENTAÇÃO SENOIDAL
- 1.2. PRINCÍPIO DO CONTROLE DE VELOCIDADE A FREQUÊNCIA VARIÁVEL
- 1.3. CARACTERÍSTICA TORQUE-VELOCIDADE
- 1.4. LEI TENSÃO-FREQUÊNCIA PARA MANTER O FLUXO CONSTANTE
- 1.5. ALIMENTAÇÃO DIRETA
- 1.6. ALIMENTAÇÃO COM ω_r , IMPOSTO (AUTOPILOTAGEM)
- 1.7. REGULAÇÃO DE VELOCIDADE
- 1.8. CONTROLE INDIRETO DO TORQUE

CAPÍTULO 2: ESTUDO DOS VALORES INSTANTÂNEO DA CORRENTE DO ESTATOR E DO TORQUE PARA ALIMENTAÇÃO RETANGULAR EM TENSÃO

- 2.1. INTRODUÇÃO
- 2.2. CÁLCULO DA CORRENTE DO ESTATOR POR FASE EM REGIME
 - 2.2.1. MÉTODO DAS HARMÔNICAS
 - 2.2.2. MÉTODO DA EXPONENCIAL DE MATRIZES
- 2.3. CÁLCULO DA PULSAÇÃO DO TORQUE PARA ALIMENTAÇÃO RETANGULAR
 - 2.3.1. EXEMPLO
 - 2.3.2. COMENTÁRIOS
- 2.4. INFLUÊNCIA DA REATÂNCIA DE DISPERSÃO
- 2.5. PERDAS ADICIONAIS
 - 2.5.1. PERDAS JOULE NO ESTATOR (P_1)
 - 2.5.2. PERDAS JOULE NO ROTOR (P_2)
 - 2.5.3. PERDAS NO FERRO
- 2.6. MÉTODO APROXIMADO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO

- 2.6.1. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA
- 2.6.2. REGULADOR PROPORCIONAL
- 2.6.3. REGULADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL
- 2.6.4. OBSERVAÇÕES IMPORTANTES

CAPÍTULO 3: MOTOR DE INDUÇÃO ALIMENTADO EM CORRENTE SOB FREQUÊNCIA VARIÁVEL EM REGIME PERMANENTE → CORRENTES SENOIDAIS

- 3.1. INTRODUÇÃO
- 3.2. TENSÃO ESTATÓRICA E FLUXO
- 3.3. TORQUE ELETROMAGNÉTICO
- 3.4. COMPORTAMENTO COM ω_r IMPOSTO
- 3.5. INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO SOBRE O TORQUE
- 3.6. OPERAÇÃO COM FLUXO CONSTANTE
- 3.7. A QUESTÃO DA REVERSIBILIDADE
 - 3.7.1. TRAÇÃO
 - 3.7.2. FRENAGEM
- 3.8. CONTROLE DA VELOCIDADE
- 3.9. OBTENÇÃO DE CARACTERÍSTICAS PARA UM MOTOR PARTICULAR

CAPÍTULO 4: MOTOR ALIMENTADO POR CORRENTES RETANGULARES

- 4.1. ONDULAÇÃO DE TORQUE
- 4.2. ESTUDO ANÁLITICO DA COMUTAÇÃO
 - 4.2.1. ESTRUTURA DO CONVERSOR
 - 4.2.2. DESCRIÇÃO DA COMUTAÇÃO
 - 4.2.3. ESTUDO ANALÍTICO DA COMUTAÇÃO
 - 4.2.4. INDUTÂNCIA DE COMUTAÇÃO
 - 4.2.5. CÁLCULO DE τ_2
 - 4.2.6. CORRENTES DE FASE DURANTE A COMUTAÇÃO
 - 4.2.7. CÁLCULO DA TENSÃO DO CAPACITOR
 - 4.2.8. CÁLCULO DE τ_1
 - 4.2.9. CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMPO t_q
 - 4.2.10. CONSIDERAÇÕES SOBRE O DIMENSIONAMENTO DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA COMUTAÇÃO
 - 4.2.11. POSSIBILIDADE DE EXISTÊNCIA DE COMUTAÇÃO NATURAL
 - 4.2.12. TENSÕES DE FASE DURANTE A COMUTAÇÃO – MÉTODO APROXIMADO

CAPÍTULO 5: CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO POR MEIO DE GRADADOR

- 5.1. INTRODUÇÃO
- 5.2. O EMPREGO DO GRADADOR
- 5.3. EMPREGO PRIVILEGIADO DO MOTOR ALIMENTADO POR GRADADOR
 - 5.3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS
 - 5.3.2. CONTROLE DA PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO
 - 5.3.3. CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO
 - APLICAÇÕES NO CONTROLE DE VELOCIDADE

- 5.4. VANTAGENS EM RELAÇÃO AOS MÉTODOS CLÁSSICOS DE PARTIDA
- 5.5. CONTROLE DE POTÊNCIA
- 5.6. CONEXÕES DA CARGA E DIAGRAMA DE BLOCOS DO GRADADOR
- 5.7. QUESTIONÁRIO RESOLVIDO

CAPÍTULO 6: CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO POR MEIO DE CONVERSOR CC-CC NO ROTOR

- 6.1. INTRODUÇÃO
- 6.2. O EMPREGO DO CONVERSOR CC-CC
- 6.3. RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA VISTA PELO ROTOR E A RESISTÊNCIA VISTA PELO RETIFICADOR
- 6.4. UMA NOVA TÉCNICA DE CONTROLE DO MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR BOBINADO
 - 6.4.1. INTRODUÇÃO
 - 6.4.2. UMA NOVA TÉCNICA DE CONTROLE DO MIRB
 - 6.4.3. COMPORTAMENTO DO PULSADOR
 - 6.4.4. REALIZAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE LABORATÓRIO
 - 6.4.5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS
 - 6.4.6. CONCLUSÕES

CAPÍTULO 7 : ACIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO (MIRB) POR CASCATA DE CONVERSORES

- 7.1. INTRODUÇÃO
- 7.2. A CASCATA DE CONVERSORES
- 7.3. CÁLCULO APROXIMADO DO TORQUE
- 7.4. CARACTERÍSTICAS TORQUE-VELOCIDADE LEVANDO-SE EM CONTA OS PARÂMETROS DO MOTOR
- 7.5. CARACTERÍSTICA TORQUE-VELOCIDADE CONSIDERANDO A RESISTÊNCIA DO INDUTOR DE FILTRAGEM
- 7.6. EXPRESSÃO DO TORQUE CONSIDERANDO O EFEITO DA COMUTAÇÃO E DAS PERDAS NOS DIODOS E TIRISTORES
- 7.7. AVALIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DA CASCATA (MÉTODO SIMPLIFICADO)
- 7.8. DIMENSIONAMENTO DOS CONVERSORES E DO TRANSFORMADOR DA CASCATA
 - 7.8.1. RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO
 - 7.8.2. POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR
 - 7.8.3. EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO
- 7.9. PARTIDA DA CASCATA
- 7.10. MODELO SIMPLIFICADO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO
 - 7.10.1. EQUAÇÃO ELÉTRICA
 - 7.10.2. EQUAÇÃO MECÂNICA
- 7.11. MODELO PARA PEQUENAS PERTURBAÇÕES – LINEARIZAÇÃO DO MODELO ORIGINAL
 - 7.11.1. EQUAÇÃO ELÉTRICA
 - 7.11.2. EQUAÇÃO MECÂNICA
- 7.12. CONTROLE DA VELOCIDADE E DO TORQUE

- 7.13. MODELO DA CASCATA PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO EMPREGANDO AS EQUAÇÕES COMPLETAS DO MOTOR
- 7.14. APLICAÇÕES DA CASCATA
- 7.15. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS
- 7.16. EXERCÍCIOS PROPOSTOS

PARTE II

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ACIONAMENTO ELÉTRICO DO MOTOR SÍNCRONO

CAPÍTULO 1: CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR SÍNCRONO

- 1.9. INTRODUÇÃO
- 1.10. EXPRESSÃO DO TORQUE DO MOTOR SÍNCRONO ALIMENTADO EM CORRENTE
- 1.11. ALIMENTAÇÃO DIRETA
- 1.12. ALIMENTAÇÃO COM β IMPOSTO
- 1.13. A QUESTÃO DA COMUTAÇÃO NATURAL
- 1.14. POR QUE DA ALIMENTAÇÃO EM CORRENTE?

CAPÍTULO 2: COMUTADOR ELETRÔNICO (BRUSH LESS MACHINES)

- 2.1. COMUTADOR MECÂNICO
 - 2.1.1. COLOCAÇÃO DE LÂMINAS
 - 2.1.2. DESVANTAGENS DO COMUTADOR MECÂNICO
- 2.2. COMUTADOR ELETRÔNICO
 - 2.2.1. ARMADURA DO ESTATOR
 - 2.2.2. ESTRUTURA TRIFÁSICA
- 2.3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

CAPÍTULO 3: ACIONAMENTO ELETRÔNICO DO MOTOR SÍNCRONO

- 3.1. INTRODUÇÃO
- 3.2. MOTOR SÍNCRONO ATRAVÉS DE INVERSOR DE CORRENTE
 - 3.3.1. OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE
 - EXEMPLOS
 - 3.3.2. MÉTODOS DE CONTROLE
 - a - TORQUE CONSTANTE PARA TODAS AS VELOCIDADES
 - b - TORQUE AUMENTANDO COM A VELOCIDADE

COMENTÁRIOS FINAIS

- OBSERVAÇÕES IMPORTANTES

ANEXOS

6. SISTEMA DE AVALIAÇÃO

São realizadas duas provas teóricas. Uma na área de acionamento em corrente contínua e outra na área de acionamento em corrente alternada. São apresentados três trabalhos, cuja média aritmética fornece uma nota.

Para ser aprovado o aluno deverá obter média aritmética igual ou superior a 6,0 (seis) nas duas provas mais a nota dos trabalhos. Caso não tenha sucesso, o aluno terá direito a uma prova de recuperação, cuja nota obtida somada à média anterior deverá ser igual ou superior a 6,0 (seis) para ser considerado aprovado. Em qualquer caso o aluno deverá ter frequência igual ou superior a 75% das aulas.

O aluno que não se enquadrar nas condições mencionadas cima será considerado reprovado.

7. EMENTA

Comportamento do motor de corrente contínua em regime permanente; Métodos tradicionais de variação de velocidade dos motores CC; Métodos para o estudo do comportamento dinâmico e transitório do motor CC; Princípio de regulação de velocidade e de corrente (torque); Projeto dos reguladores em cascata e em paralelo; Determinação dos parâmetros do motor CC; Introdução ao estudo da associação dos motores de corrente contínua aos conversores estáticos; Estudo do motor CC alimentado por retificador controlado; Estudo comparativo de estruturas retificadoras monofásicas a tiristor e a diodo associadas à máquina CC; Motor CC associado a conversores CC-CC. Motor de indução alimentado com tensão senoidal, frequência variável em regime permanente; Estudo dos valores instantâneos da corrente do estator e do torque para alimentação retangular em tensão; Motor de indução alimentado em corrente (senoidais) sob frequência variável em regime permanente; Motor de indução alimentado por corrente retangulares; Controle de velocidade do motor de indução por meio de gradador e por meio de conversor CC-CC no rotor; Acionamento do motor de indução com rotor bobinado por meio de cascata de conversores. Princípios básicos de acionamento elétrico do motor síncrono; Controle de Velocidade do motor síncrono; Alimentação em corrente do motor síncrono; Comutador eletrônico (Brush Less Machines).

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] I. Barbi, **Eletrônica de Potência**. Edição do autor, 5ª edição, Florianópolis, 2005.
- [2] D. C. Martins & I. Barbi, **Eletrônica de Potência – Conversor CC-CC Básicos Não Isolados**. Edição do autor, 3ª Edição, Florianópolis, 2008.
- [3] I. Barbi, **Teoria Fundamental do Motor de Indução**. Editora da UFSC, Florianópolis, 1985.
- [4] B. K. Bose, **Power Electronics and Drives**. Prentice-Hall, USA, 1986.
- [5] W. Leonhard, **Control of Electrical Drives**. Springer-Verlag, Germany, 1985.
- [6] V. Del Toro, **Electromechanical Devices for Energy Conversion and Control System**. Prentice-Hall, USA, 1986.
- [7] G.R. Slemon & A. Straughen, **Electric Machines**. Addison-Wesley, Canada, 1980.
- [8] D. C. Martins & I. Barbi, **Eletrônica de Potência – Introdução do Estudo dos Conversores CC-CA**. Edição do autor, 2ª Edição, Florianópolis, 2008.
- [9] J. Chiasson, **Modeling and High-Performance Control of Electric Machines**. John Wiley & Sons, Inc., Publication, New Jersey, USA, 2005.
- [10] E. Bim, **Máquinas Elétricas e Acionamento**. Elsevier Editora, Ltda., Rio de Janeiro, 2009.
- [11] R. Krishnan. **Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives**. CRC Press, London, 2010.

- [12] B. Bose, **Power Electronics and Motor Drives – Advances and Trends**. Academic Press Publications, USA, 2006.
- [13] A. Veltman, D. W. J. Pulle and R. W. De Doncker, **Fundamentals of Electrical Drives**. Springer, 2007.