

ÍNDICE

PREÂMBULO

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Evolução Histórica da Energia Eléctrica

1.2 Formas de Energia

1.3 O Contexto Energético⁴

1.3.1 Mundo

1.3.2 União Europeia

1.3.3 Portugal

1.3.4 Península Ibérica

1.4 Energia Eléctrica e Ambiente

1.5 O Sistema de Energia Eléctrica

1.5.1 Estrutura

1.5.2 Componentes

1.5.3 Requisitos

1.5.4 Esquema Unifilar

1.6 Redes Eléctricas

1.6.1 Tensão Nominal

1.6.2 Função

1.6.3 Estrutura Topológica

1.7 A Rede Eléctrica Portuguesa

1.8 Sumário

Anexo 1-A

Anexo 2-A

CAPÍTULO 2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1 Introdução

2.2 Energia e Potência. Diagrama de Carga

2.3 Potência em Sistemas de Energia Eléctrica

2.3.1 Potência Activa e Reactiva

2.3.2 Potência Complexa e Aparente

2.4 Sistema Eléctrico Trifásico

2.4.1 Tensão e Corrente

2.4.2 Potência Activa e Reactiva

2.4.3 Carga Ligada em Triângulo

2.4.4 Esquema Monofásico Equivalente

2.5 Valores por Unidade

2.5.1 Sistemas Monofásicos

2.5.2 Sistemas Trifásicos

2.6 Transmissão de Energia

2.6.1 Em Corrente Alternada

- 2.6.2 Em Corrente Contínua
- 2.7 Caracterização das Cargas
 - 2.7.1 Tipologia
 - 2.7.2 Elasticidades
 - 2.7.3 Elasticidade em Relação à Tensão
 - 2.7.4 Elasticidade em Relação à Frequência
- 2.8 Sumário

CAPÍTULO 3 MÁQUINA SÍNCRONA

- 3.1 Introdução
- 3.2 Princípio de Funcionamento
- 3.3 Força Electromotriz
- 3.4 Reacção do Induzido
- 3.5 Características de Funcionamento
 - 3.5.1 Em Vazio e em Curto-Circuito
 - 3.5.2 Em Carga
- 3.6 Fórmulas da Potência Activa e Reactiva
- 3.7 Efeito da Saliência
 - 3.7.1 Reactâncias Segundo os Eixos Directo e de Quadratura
 - 3.7.2 Fórmulas da Potência Activa e Reactiva Modificadas
- 3.8 Modos de Funcionamento
 - 3.8.1 Gerador
 - 3.8.2 Motor
 - 3.8.3 Compensador Síncrono
 - 3.8.4 Diagramas de Fasores
- 3.9 Estabilidade da Marcha Síncrona
- 3.10 Sumário

CAPÍTULO 4 TRANSFORMADOR E MÁQUINA ASSÍNCRONA

- 4.1 Transformador
 - 4.1.1 Introdução
 - 4.1.2 Princípio de Funcionamento
 - 4.1.3 Corrente de Magnetização
 - 4.1.4 Esquema Equivalente
 - 4.1.5 Transformador com Três Enrolamentos
 - 4.1.6 Autotransformador
 - 4.1.7 Transformador Trifásico
 - 4.1.8 Transformador com Regulação de Tensão
 - 4.1.9 Transformador Desfasador
- 4.2 Máquina Assíncrona
 - 4.2.1 Introdução
 - 4.2.2 Princípio de Funcionamento
 - 4.2.3 Modelo Matemático
 - 4.2.4 Potência Mecânica e Rendimento
 - 4.2.6 Funcionamento como Gerador

4.3 Sumário

CAPÍTULO 5 LINHA ELÉCTRICA DE ENERGIA

5.1 Introdução

5.2 Resistência e Condutância Transversal

5.3 Reactância Longitudinal

5.3.1 Linha Monofásica

5.3.2 Linha com n Condutores

5.3.3 Linha Trifásica

5.3.4 Linha Trifásica com Dois Condutores em Feixe

5.3.5 Cabos Subterrâneos

5.4 Admitância Transversal

5.4.1 Linha Monofásica

5.4.2 Linha com n Condutores

5.4.3 Influência da Terra

5.4.4 Linha Trifásica

5.4.5 Linha Trifásica com Dois Condutores em Feixe

5.4.6 Cabo Subterrâneo

5.5 Modelo da Linha em Regime Estacionário

5.5.1 Modelo Exacto

5.5.2 Esquema Equivalente em p

5.5.3 Esquema Equivalente em p Nominal

5.5.4 Modelo da Linha Curta

5.6 Linha Terminada pela Impedância de Onda

5.6.1 Linha com Perdas

5.6.2 Linha sem Perdas

5.7 Capacidade de Transporte

5.7.1 Limite Térmico

5.7.2 Limite de Estabilidade Estática

5.7.3 Limite de Estabilidade de Tensão

5.8 Sumário

CAPÍTULO 6 TRÂNSITO DE ENERGIA

6.1 Introdução

6.2 Sistema com Dois Barramentos

6.2.1 Equações do Trânsito de Energia

6.2.2 Equações na Forma Real

6.2.3 Características das Equações

6.3 Sistema com n Barramentos

6.3.1 Modelo Matemático

6.3.2 Tipos de Barramentos

6.3.3 Classificação das Variáveis

6.4 Solução do Trânsito de Energia

6.4.1 Cálculo das Tensões

6.4.2 Potência Injectada no Nó de Balanço

- 6.4.3 Potências Transitadas nas Linhas
- 6.5 Método de Gauss-Seidel
 - 6.5.1 Algoritmo
 - 6.5.2 Barramentos Tipo PQ
 - 6.5.3 Barramentos Tipo PV
- 6.6 Controlo das Potências Transitadas
 - 6.6.1 Baterias de Condensadores ou Reactâncias Indutivas
 - 6.6.2 Transformadores com Regulação de Tensão
 - 6.6.3 Desfasadores
- 6.7 Representação das Cargas
- 6.8 Método de Newton-Raphson
 - 6.8.1 Algoritmo
 - 6.8.2 Aplicação ao Trânsito de Energia
 - 6.8.3 Processo Iterativo
- 6.9 Método do Desacoplamento
- 6.10 Modelo de Corrente Contínua
- 6.11 Programas de Trânsito de Energia
- 6.12 Barramento de Balanço Distribuído
- 6.13 Análise de Contingências
- 6.14 Sumário

CAPÍTULO 7 CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

- 7.1 Introdução
- 7.2 Corrente e Potência de Curto-Circuito
 - 7.2.1 Teorema da Sobreposição
 - 7.2.2 Teorema de Thévenin
- 7.3 Curto-Circuito de um Gerador Síncrono
- 7.4 Modelos dos Elementos da Rede
 - 7.4.1 Gerador
 - 7.4.2 Transformador e Linha
 - 7.4.3 Cargas
- 7.5 Cálculo das Correntes de Curto-Circuito Simétrico
 - 7.5.1 Redução da Rede
 - 7.5.2 Impedância Equivalente a Montante
 - 7.5.3 Matriz das Impedâncias Nodais
- 7.6 Método das Componentes Simétricas
- 7.7 Propriedades das Componentes Simétricas
 - 7.7.1 Desacoplamento
 - 7.7.2 Potência Trifásica
- 7.8 Impedâncias Simétricas
 - 7.8.1 Gerador
 - 7.8.2 Linha
 - 7.8.3 Transformador
- 7.9 Curto-Circuitos Assimétricos
 - 7.9.1 Curto-Circuito Fase-Terra

- 7.9.2 Curto-Circuito Fase-Fase
- 7.9.3 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra
- 7.9.4 Cálculo da Corrente nos Ramos da Rede
- 7.10 Cálculo Digital das Correntes de Curto-Circuito
- 7.11 Sumário

CAPÍTULO 8 CONTROLO DE FREQUÊNCIA E DE TENSÃO

- 8.1 Introdução
- 8.2 Controlo Frequência-Potência Activa
 - 8.2.1 Introdução
 - 8.2.2 Controlo Primário e Secundário
- 8.3 Regulador de Velocidade
 - 8.3.1 Princípio de Funcionamento
 - 8.3.2 Modelo Matemático do Regulador
 - 8.3.3 Modelo Matemático da Turbina
 - 8.3.4 Resposta em Regime Estacionário e Transitório
- 8.4 Controlo de Uma Rede Isolada
 - 8.4.1 Modelo Matemático
 - 8.4.2 Controlo Primário
 - 8.4.3 Controlo Secundário
- 8.5 Controlo de Redes Interligadas
 - 8.5.1 Modelo Matemático de Duas Redes Interligadas
 - 8.5.2 Controlo Primário
 - 8.5.3 Controlo Secundário
 - 8.5.4 Controlo Secundário para n Redes Interligadas
- 8.6 Controlo Terciário
- 8.7 Controlo Tensão-Potência Reactiva
 - 8.7.1 Introdução
 - 8.7.2 Produção e Consumo de Potência Reactiva
- 8.8 Regulador de Tensão
 - 8.8.1 Princípio de Funcionamento
 - 8.8.2 Modelo Matemático
 - 8.8.3 Resposta em Regime Estacionário e Transitório
 - 8.8.4 Compensação da Carga
- 8.9 Injecção de Potência Reactiva
 - 8.9.1 Modelo Simplificado do Sistema
 - 8.9.2 Condensadores e Bobinas em Derivação
 - 8.9.3 Condensadores em Série
 - 8.9.4 Compensadores Síncronos
 - 8.9.5 Compensadores Estáticos
- 8.10 Transformadores com Regulação de Tensão
- 8.11 Sumário

CAPÍTULO 9 ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

- 9.1 Introdução

- 9.2 Estabilidade Estática e Transitória
 - 9.2.1 Definições
 - 9.2.2 Modelos Matemáticos
- 9.3 Gerador Ligado a uma Rede Infinita
- 9.4 Modelo da Máquina Síncrona
 - 9.4.1 Regime Estacionário
 - 9.4.2 Regime Transitório
 - 9.4.3 Relação entre o Ângulo do Rotor e o Argumento da F.e.m.
- 9.5 Regime Transitório Electromecânico
 - 9.5.1 Dinâmica Rotacional
 - 9.5.2 Constante de Inércia
 - 9.5.3 Factor de Amortecimento
 - 9.5.4 Tempo de Arranque
 - 9.5.5 Equação de Oscilação
 - 9.5.6 Frequência Natural de Oscilação
- 9.6 Grandes Perturbações: Critério da Igualdade das Áreas
- 9.7 Aplicações do Critério da Igualdade das Áreas
 - 9.7.1 Aumento da Potência
 - 9.7.2 Desligação de uma Linha num Circuito Duplo e Religação
 - 9.7.3 Defeito numa Linha não Eliminado Instantaneamente
- 9.8 Extensão a um Sistema com Duas Máquinas
- 9.9 Solução no Domínio do Tempo por Integração Numérica
 - 9.9.1 Modelo Clássico
 - 9.9.2 Gerador
 - 9.9.3 Rede
 - 9.9.4 Cálculos Preliminares
 - 9.9.5 Integração das Equações de Oscilação
 - 9.9.6 Programa de Simulação
 - 9.9.7 Limitações do Modelo Clássico
- 9.10 Modelo Completo
 - 9.10.1 Modelo Electromagnético do Gerador
 - 9.10.2 Regulador de Tensão
 - 9.10.3 Regulador de Velocidade
- 9.11 Técnicas para Aumentar a Estabilidade Transitória
- 9.12 Sumário

CAPÍTULO 10 SOBRETENSÕES E TRANSITÓRIOS ELECTROMAGNÉTICOS

- 10.1 Introdução
- 10.2 Sobretensões Atmosféricas
- 10.3 Propagação de Ondas Electromagnéticas em Linhas
 - 10.3.1 Equação de Propagação
 - 10.3.2 Solução da Equação de Propagação
 - 10.3.3 Condições de Fronteira
 - 10.3.4 Linha em Vazio
 - 10.3.5 Linha em Curto-Circuito

- 10.3.6 Outras Terminações
- 10.3.7 Efeito das Perdas na Linha
- 10.4 Sobretensões de Manobra
 - 10.4.1 Disjuntores
 - 10.4.2 Corte de uma Corrente de Curto-Circuito
 - 10.4.3 Tensão Transitória de Restabelecimento
 - 10.4.4 Resistência em Paralelo com o Disjuntor
 - 10.4.5 Tensão de Restabelecimento à Frequência Nominal
 - 10.4.6 Defeito Quilométrico
 - 10.4.7 Corte de uma Corrente Capacitiva
 - 10.4.8 Corte de uma Corrente de Magnetização
 - 10.4.9 Defeito Consecutivo
- 10.5 Cálculo Digital de Transitórios Electromagnéticos
 - 10.5.1 Elementos com Parâmetros Concentrados
 - 10.5.2 Elementos com Parâmetros Distribuídos
 - 10.5.3 Equações Nodais
 - 10.5.4 Interruptores
- 10.6 Sumário

CAPÍTULO 11 TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

- 11.1 Introdução
- 11.2 Potência Transmitida em C.C. e em C.A.
- 11.3 Vantagens da Transmissão em Corrente Contínua
- 11.4 Aplicações da Transmissão em Corrente Contínua
- 11.5 Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua
 - 11.5.1 Configuração
 - 11.5.2 Componentes
- 11.6 Conversor Trifásico em Ponte
 - 11.6.1 Válvulas
 - 11.6.2 Análise do Funcionamento do Conversor
 - 11.6.3 Controlo do Ângulo de Ignição
 - 11.6.4 Factor de Potência
 - 11.6.5 Dimensionamento do Transformador do Conversor
- 11.7 Comutação da Corrente entre Válvulas
 - 11.7.1 Ângulo de Comutação
 - 11.7.2 Tensão Contínua
 - 11.7.3 Factor de Potência
- 11.8 Funcionamento como Inversor
- 11.9 Conversor a 12 Pulsos
- 11.10 Sistema de Transmissão em C.C. Biterminal
 - 11.10.1 Modos Básicos de Funcionamento
 - 11.10.2 Inversão do Trânsito de Potência.
- 11.11 Harmónicas e Filtros
 - 11.11.1 Harmónicas no Lado da Corrente Alternada
 - 11.11.2 Filtros de Corrente Alternada

- 11.11.3 Harmónicas no Lado da Corrente Contínua
- 11.12 Controlo dos Sistemas de Transmissão em C.C.
 - 11.12.1 Arquitectura do Sistema de Controlo
 - 11.12.2 Sistemas de Ignição
 - 11.12.3 Sistema de Controlo da Corrente
- 11.13 Estabilidade do Sistema de Controlo de Corrente
 - 11.13.1 Modelo Discreto do Conversor
 - 11.13.2 Modelo Analítico de um STCC Biterminal
 - 11.13.3 Fronteiras de Estabilidade
- 11.14 Trânsito de Energia para Sistemas C.A./C.C.
 - 11.14.1 Equações em Valores P.U.
 - 11.14.2 Modelo em Regime Estacionário do STCC
 - 11.14.3 Solução Computacional
- 11.15 Sumário

CAPÍTULO 12 ELEMENTOS DE ANÁLISE ECONÓMICA E FINANCEIRA

- 12.1 Introdução
- 12.2 Valor Temporal do Dinheiro
- 12.3 Custo da Energia Produzida
 - 12.3.1 Custo Médio
 - 12.3.2 Custo Marginal de Curto Prazo
 - 12.3.3 Custo Marginal de Longo Prazo
- 12.4 Preços de Mercado
 - 12.4.1 Mercado Perfeito
 - 12.4.2 Monopólio
 - 12.4.3 Preços de Ramsey
- 12.5 Avaliação Económica do Investimento
 - 12.5.1 Valor Actual Líquido
 - 12.5.2 Taxa Interna de Rentabilidade
 - 12.5.3 Tempo de Retorno Bruto
 - 12.5.4 Relação Benefício/Custo
- 12.6 Sumário

CAPÍTULO 13 OPERAÇÃO OPTIMIZADA

- 13.1 Introdução
- 13.2 Despacho Económico sem Perdas
 - 13.2.1 Método dos Multiplicadores de Lagrange
 - 13.2.2 Limites da Potência Gerada
 - 13.2.3 Curva de Custo de Produção Linear
- 13.3 Despacho Económico com Perdas
- 13.4 Método dos Coeficientes B
 - 13.4.1 Sistema com Dois Geradores
 - 13.4.2 Sistema com Qualquer Número de Geradores
 - 13.4.3 Procedimento Computacional
- 13.5 Modelo das Perdas pelo Método do Nó de Balanço

- 13.5.1 Sistema com Dois Geradores
- 13.5.2 Sistema com Qualquer Número de Geradores
- 13.5.3 Procedimento Computacional
- 13.6 Coordenação Hidro-Térmica
- 13.7 Trânsito de Energia Optimizado
- 13.7.1 Método do Gradiente
- 13.7.2 Método de Newton
- 13.8 Estimação de Estado
- 13.8.1 Definição
- 13.8.2 Método dos Mínimos Quadrados
- 13.8.3 Sistemas Não Lineares
- 13.8.4 Método AEP
- 13.8.5 Detecção de Dados Errados
- 13.9 Diagrama de Transição de Estado
- 13.10 Sumário

CAPÍTULO 14 ORGANIZAÇÃO E GESTÃO DO SISTEMA ELÉCTRICO

- 14.1 Introdução
- 14.2 A Reestruturação do Sector Eléctrico
- 14.3 Características da Energia Eléctrica
- 14.4 A Vertente Ambiental
- 14.5 Modelos Organizacionais do Sistema Eléctrico
- 14.6 Directivas Europeias
- 14.6.1 Directiva 92/96/CE
- 14.6.2 Directiva Europeia 2003/54/CE
- 14.7 Quadro Legal em Portugal
- 14.8 Regulação do Sector Eléctrico
- 14.8.1 Necessidade de Regulação
- 14.8.2 Formas de Regulação
- 14.9 Mercados de Electricidade
- 14.9.1 Bolsa de Electricidade (pool)
- 14.9.2 Contratos Bilaterais
- 14.9.3 Remuneração da Disponibilidade
- 14.9.4 Contratos Financeiros
- 14.10 Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL)
- 14.11 Rede de Transporte
- 14.11.1 Congestionamento da Rede
- 14.11.2 Preços Nodais
- 14.11.3 Comércio Inverso
- 14.11.4 Tarifa de Uso da Rede
- 14.11.5 Remuneração das Perdas
- 14.11.6 Facturação da Potência Reactiva
- 14.11.7 Serviços de Sistema
- 14.12 Cálculo dos Preços Nodais
- 14.12.1 Modelo Matemático Geral
- 14.12.2 Modelo Simplificado

- 14.13 Sistema Tarifário Português
 - 14.13.1 Princípios Básicos de um Tarifário
 - 14.13.2 Tarifa de Energia e Potência
 - 14.13.3 Tarifa de Uso Global do Sistema
 - 14.13.4 Tarifa de Uso da Rede de Transporte
 - 14.13.5 Tarifa de Uso da Rede de Distribuição
 - 14.13.6 Tarifa de Comercialização
 - 14.13.7 Tarifa de Clientes Finais
- 14.14 Qualidade da Energia Eléctrica
 - 14.14.1 Forma de Onda da Tensão
 - 14.14.2 Harmónicas
 - 14.14.3 Transitórios Electromagnéticos
 - 14.14.4 Cavas de Tensão
 - 14.14.5 Continuidade de Serviço
 - 14.14.6 Qualidade Comercial
- 14.15 Produção Descentralizada
 - 14.15.1 Introdução
 - 14.15.2 Motivação
 - 14.15.3 Situação na UE e em Portugal
 - 14.15.4 Integração na Rede da Produção Descentralizada
 - 14.15.5 Harmónicas e Tremulação
- 14.16 O Futuro: Hidrogénio
- 14.17 Sumário

BIBLIOGRAFIA

ÍNDICE REMISSIVO