

Sumário

Redes de energia eléctrica: uma análise sistémica - 4^a ed.

ÍNDICE

- **PREFÁCIO** — XV
- **PREÂMBULO** — xvii
- **LISTA DE SÍMBOLOS** — xxi

- 1. **INTRODUÇÃO** — 1
 - 1.1 Evolução Histórica da Energia Eléctrica — 1
 - 1.2 Formas de Energia — 3
 - 1.3 A Electricidade no Contexto Energético — 5
 - 1.3.1 Mundo — 6
 - 1.3.2 União Europeia — 6
 - 1.3.3 Portugal — 8
 - 1.3.4 Península Ibérica — 9
 - 1.4 Energia Eléctrica e Ambiente — 14
 - 1.5 O Sistema de Energia Eléctrica — 15
 - 1.5.1 Estrutura — 19
 - 1.5.2 Componentes — 19
 - 1.5.3 Requisitos — 20
 - 1.5.4 Esquema unifilar — 25
 - 1.6 Redes Eléctricas — 25
 - 1.6.1 Tensão nominal — 27
 - 1.6.2 Função — 27
 - 1.6.3 Estrutura topológica — 28
 - 1.7 A Rede Eléctrica Portuguesa — 28
 - 1.8 Sumário — 30
 - **Apêndice** — 32

- 2. **CONCEITOS BÁSICOS** — 33
 - 2.1 Introdução — 35
 - 2.2 Energia e Potência. Diagrama de Carga — 35
 - 2.3 Potência em Sistemas de Energia Eléctrica — 37

- 2.3.1 Potência activa e reactiva — 37
 - 2.3.2 Potência complexa e aparente — 40
- 2.4 Sistema Eléctrico Trifásico — 42
 - 2.4.1 Tensão e corrente — 42
 - 2.4.2 Potência activa e reactiva — 45
 - 2.4.3 Carga ligada em triângulo — 46
 - 2.4.4 Esquema monofásico equivalente — 47
- 2.5 Valores por Unidade — 49
 - 2.5.1 Sistemas monofásicos — 50
 - 2.5.2 Sistemas trifásicos — 51
- 2.6 Transmissão de Energia — 53
 - 2.6.1 Em corrente alternada — 53
 - 2.6.2 Em corrente contínua — 56
- 2.7 Caracterização das Cargas — 58
 - 2.7.1 Tipologia — 58
 - 2.7.2 Elasticidades — 59
 - 2.7.3 Elasticidade em relação à tensão — 60
 - 2.7.4 Elasticidade em relação à frequência — 63
- 2.8 Sumário — 64

3. MÁQUINA SÍNCRONA — 67

- 3.1 Introdução — 69
- 3.2 Princípio de Funcionamento — 69
- 3.3 Força Electromotriz — 73
- 3.4 Reacção do Induzido — 76
- 3.5 Características de Funcionamento — 79
 - 3.5.1 Em vazio e em curto-circuito — 79
 - 3.5.2 Em carga — 82
- 3.6 Fórmulas da Potência Activa e Reactiva — 85
- 3.7 Efeito da Saliência — 88
 - 3.7.1 Reactâncias segundo os eixos directo e de quadratura — 88
 - 3.7.2 Fórmulas da potência activa e reactiva modificadas — 90
- 3.8 Modos de Funcionamento — 92
 - 3.8.1 Gerador — 92
 - 3.8.2 Motor — 94
 - 3.8.3 Compensador síncrono — 94
 - 3.8.4 Diagramas de fasores — 95
- 3.9 Estabilidade da Marcha Síncrona — 96
- 3.10 Sumário / Referências Bibliográficas — 101

4. TRANSFORMADOR E MÁQUINA ASSÍNCRONA — 103

- 4.1 Transformador — 105

- 4.1.1 Introdução — 105
- 4.1.2 Princípio de funcionamento — 105
- 4.1.3 Corrente de magnetização — 107
- 4.1.4 Esquema equivalente — 110
- 4.1.5 Transformador com três enrolamentos — 117
- 4.1.6 Autotransformador — 120
- 4.1.7 Transformador trifásico — 122
- 4.1.8 Transformador com regulação de tensão — 127
- 4.1.9 Transformador desfasador — 130
- 4.2 Máquina Assíncrona — 132
 - 4.2.1 Introdução — 132
 - 4.2.2 Princípio de funcionamento — 133
 - 4.2.3 Modelo matemático — 134
 - 4.2.4 Potência mecânica e rendimento — 136
 - 4.2.5 Binário — 138
 - 4.2.6 Representação em valores p.u. — 143
 - 4.2.7 Funcionamento como gerador — 146
- 4.3 Sumário / Referências Bibliográficas — 150

5. LINHA ELÉCTRICA DE ENERGIA — 151

- 5.1 Introdução — 153
- 5.2 Resistência e Condutância Transversal — 154
- 5.3 Reactância Longitudinal — 156
 - 5.3.1 Linha Monofásica — 156
 - 5.3.2 Linha com n Condutores — 159
 - 5.3.3 Linha Trifásica — 161
 - 5.3.4 Linha Trifásica com Dois Condutores em Feixe — 164
 - 5.3.5 Cabos Subterrâneos — 166
- 5.4 Admitância Transversal — 167
 - 5.4.1 Linha Monofásica — 167
 - 5.4.2 Linha com n Condutores — 169
 - 5.4.3 Influência da Terra — 169
 - 5.4.4 Linha Trifásica — 172
 - 5.4.5 Linha Trifásica com Dois Condutores em Feixe — 175
 - 5.4.6 Cabos Subterrâneos — 176
- 5.5 Modelo da Linha em Regime Estacionário — 176
 - 5.5.1 Modelo Exacto — 176
 - 5.5.2 Esquema Equivalente em Pi — 184
 - 5.5.3 Esquema Equivalente em T Nominal — 185
 - 5.5.4 Modelo da Linha Curta — 187
- 5.6 Linha Terminada pela Impedância de Onda — 189
 - 5.6.1 Linha com Perdas — 189

- 5.6.2 Linha sem Perdas — 191
- 5.6.3 Capacidade de Transporte — 195
- 5.6.4 Limite Térmico — 196
- 5.6.5 Limite de Estabilidade Estática — 198
- 5.6.6 Limite de Estabilidade de Tensão — 201
- 5.7 Sumário — 205
- Referências Bibliográficas — 206

6. TRÂNSITO DE ENERGIA — 207

- 6.1 Introdução — 209
- 6.2 Sistema com Dois Barramentos — 209
 - 6.2.1 Equações do Trânsito de Energia — 210
 - 6.2.2 Equações na Forma Real — 212
 - 6.2.3 Características das Equações — 213
- 6.3 Sistema com N Barramentos — 218
 - 6.3.1 Modelo Matemático — 218
 - 6.3.2 Tipos de Barramentos — 221
 - 6.3.3 Classificação das Variáveis — 221
- 6.4 Solução do Trânsito de Energia — 222
 - 6.4.1 Cálculo das Tensões — 222
 - 6.4.2 Potência Injectada no Nó de Balanço — 223
 - 6.4.3 Potências Transitadas nas Linhas — 224
- 6.5 Método de Gauss-Seidel — 225
 - 6.5.1 Algoritmo — 225
 - 6.5.2 Barramentos Tipo PQ — 226
 - 6.5.3 Barramentos Tipo PV — 231
- 6.6 Controlo das Potências Transitadas — 235
 - 6.6.1 Baterias de Condensadores ou Reactâncias Indutivas — 235
 - 6.6.2 Transformadores com Regulação de Tensão — 236
 - 6.6.3 Desfasadores — 239
- 6.7 Representação das Cargas — 242
- 6.8 Método de Newton-Raphson — 245
 - 6.8.1 Algoritmo — 245
 - 6.8.2 Aplicação ao Trânsito de Energia — 247
 - 6.8.3 Processo Iterativo — 250
- 6.9 Método do Desacoplamento — 257
- 6.10 Modelo de Corrente Contínua — 261
- 6.11 Programas de Trânsito de Energia — 264
- 6.12 Barramento de Balanço Distribuído — 269
- 6.13 Análise de Contingências — 271
- 6.14 Sumário — 274
- Referências Bibliográficas — 275

7. CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO — 277

- 7.1 Introdução — 279
- 7.2 Corrente e Potência de Curto-Circuito — 280
 - 7.2.1 Teorema da Sobreposição — 281
 - 7.2.2 Teorema de Thévenin — 282
- 7.3 Curto-Circuito de Um Gerador Síncrono — 283
- 7.4 Modelos dos Elementos da Rede — 286
 - 7.4.1 Gerador — 286
 - 7.4.2 Transformador e Linha — 287
 - 7.4.3 Cargas — 287
- 7.5 Cálculo das Correntes de Curto-Circuito Simétrico — 289
 - 7.5.1 Redução da Rede — 289
 - 7.5.2 Impedância Equivalente a Montante — 293
 - 7.5.3 Matriz das Impedâncias Nodais — 296
- 7.6 Método das Componentes Simétricas — 301
- 7.7 Propriedades das Componentes Simétricas — 304
 - 7.7.1 Desacoplamento — 304
 - 7.7.2 Potência Trifásica — 305
- 7.8 Impedâncias Simétricas — 308
 - 7.8.1 Gerador — 308
 - 7.8.2 Linha — 311
 - 7.8.3 Transformador — 314
- 7.9 Curto-Circuitos Assimétricos — 320
 - 7.9.1 Curto-Circuito Fase-Terra — 323
 - 7.9.2 Curto-Circuito Fase-Fase — 329
 - 7.9.3 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra — 332
 - 7.9.4 Cálculo da Corrente nos Ramos da Rede — 335
- 7.10 Cálculo Digital das Correntes de Curto-Circuito — 335
- 7.11 Sumário — 346
- Referências Bibliográficas — 347

8. CONTROLO DE FREQUÊNCIA E DE TENSÃO — 349

- 8.1 Introdução — 351
- 8.2 Controlo Frequência-Potência Activa — 352
 - 8.2.1 Introdução — 352
 - 8.2.2 Controlo Primário e Secundário — 353
- 8.3 Regulador de Velocidade — 354
 - 8.3.1 Princípio de Funcionamento — 354
 - 8.3.2 Modelo Matemático do Regulador — 356
 - 8.3.3 Modelo Matemático da Turbina — 358
 - 8.3.4 Resposta em Regime Estacionário e Transitório — 359

- 8.4 Controlo de Uma Rede Isolada — 363
 - 8.4.1 Modelo Matemático — 363
 - 8.4.2 Controlo Primário — 367
 - 8.4.3 Controlo Secundário — 372
- 8.5 Controlo de Redes Interligadas — 376
 - 8.5.1 Modelo Matemático de Duas Redes Interligadas — 377
 - 8.5.2 Controlo Primário — 378
 - 8.5.3 Controlo Secundário — 384
 - 8.5.4 Controlo Secundário para N Redes Interligadas — 389
- 8.6 Controlo Terciário — 390
- 8.7 Controlo Tensão-Potência Reactiva — 390
 - 8.7.1 Introdução — 390
 - 8.7.2 Produção e Consumo de Potência Reactiva — 391
- 8.8 Regulador de Tensão — 392
 - 8.8.1 Princípio de Funcionamento — 392
 - 8.8.2 Modelo Matemático — 395
 - 8.8.3 Resposta em Regime Estacionário e Transitório — 397
 - 8.8.4 Compensação da Carga — 402
- 8.9 Injecção de Potência Reactiva — 403
 - 8.9.1 Modelo Simplificado do Sistema — 403
 - 8.9.2 Condensadores e Bobinas em Derivação — 404
 - 8.9.3 Condensadores em Série — 406
 - 8.9.4 Compensadores Síncronos — 407
 - 8.9.5 Compensadores Estáticos — 408
- 8.10 Transformadores com Regulação de Tensão — 414
- 8.11 Sumário — 418
- Referências Bibliográficas — 419

9. ESTABILIDADE TRANSITÓRIA — 421

- 9.1 Introdução — 423
- 9.2 Estabilidade Estática e Transitória — 424
 - 9.2.1 Definições — 424
- 9.3 Modelos Matemáticos — 424
- 9.4 Gerador Ligado a Uma Rede Infinita — 425
 - 9.4.1 Modelo da Máquina Síncrona: Regime Estacionário — 426
 - 9.4.2 Regime Transitório — 428
 - 9.4.3 Relação entre o Ângulo do Rotor e o Argumento da Fem. — 432
- 9.5 Regime Transitório Electromecânico — 434
 - 9.5.1 Dinâmica Rotacional — 434
 - 9.5.2 Constante de Inércia — 435
 - 9.5.3 Factor de Amortecimento — 436
 - 9.5.4 Tempo de Arranque — 436

- 9.5.5 Equação de Oscilação — 437
- 9.6 Pequenas Perturbações — 438
 - 9.6.1 Linearização da Equação de Oscilação — 438
 - 9.6.2 Frequência Natural de Oscilação — 439
 - 9.6.3 Resposta no Domínio do Tempo — 440
- 9.7 Grandes Perturbações: Critério da Igualdade das Áreas — 441
- 9.8 Aplicações do Critério da Igualdade das Áreas — 448
 - 9.8.1 Aumento da Potência — 448
 - 9.8.2 Desligação de Uma Linha com Circuito Duplo — 448
 - 9.8.3 Defeito numa Linha com Circuito Duplo — 451
- 9.9 Extensão a um Sistema com Duas Máquinas — 457
- 9.10 Solução no Domínio do Tempo por Integração Numérica — 460
 - 9.10.1 Modelo Clássico — 460
 - 9.10.2 Gerador — 461
 - 9.10.3 Rede — 462
 - 9.10.4 Cálculos Preliminares — 463
 - 9.10.5 Integração das Equações de Oscilação — 464
 - 9.10.6 Programa de Simulação — 465
 - 9.10.7 Limitações do Modelo Clássico — 467
- 9.11 Modelo Completo — 472
 - 9.11.1 Modelo Electromagnético do Gerador — 473
 - 9.11.2 Regulador de Tensão — 474
 - 9.11.3 Regulador de Velocidade — 475
- 9.12 Técnicas para Ampliar os Limites de Estabilidade Transitória — 476
- 9.13 Sumário — 476
- Referências Bibliográficas — 478

10. SOBRETENSÕES E TRANSITÓRIOS ELECTROMAGNÉTICOS — 479

- 10.1 Introdução — 481
- 10.2 Sobretensões Atmosféricas — 481
- 10.3 Propagação de Ondas Electromagnéticas em Linhas — 482
 - 10.3.1 Equação de Propagação — 482
 - 10.3.2 Solução da Equação de Propagação — 483
 - 10.3.3 Condições de Fronteira — 485
 - 10.3.4 Linha em Vazio — 487
 - 10.3.5 Linha em Curto-Circuito — 487
 - 10.3.6 Outras Terminações — 490
 - 10.3.7 Efeito das Perdas na Linha — 492
- 10.4 Sobretensões de Manobra — 495
 - 10.4.1 Disjuntores — 497
 - 10.4.2 Corte de Uma Corrente de Curto-Circuito — 496
 - 10.4.3 Tensão Transitória de Restabelecimento — 498

- 10.4.4 Resistência em Paralelo com o Disjuntor — 509
- 10.4.5 Tensão de Restabelecimento à Frequência Nominal — 513
- 10.4.6 Defeito Quilométrico — 519
- 10.4.7 Corte de Uma Corrente Capacitiva — 529
- 10.4.8 Corte de Uma Corrente de Magnetização — 535
- 10.4.9 Defeito Consecutivo — 540
- 10.5 Cálculo Digital de Transitórios Electromagnéticos — 541
 - 10.5.1 Elementos com Parâmetros Concentrados — 542
 - 10.5.2 Elementos com Parâmetros Distribuídos — 551
 - 10.5.3 Equações Nodais — 553
 - 10.5.4 Alteração de Topologia — 553
- 10.6 Sumário — 555
- Referências Bibliográficas — 556

11. TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA — 557

- 11.1 Introdução — 559
- 11.2 Potência Transmitida em C.C. e em C.A. — 560
- 11.3 Vantagens da Transmissão em Corrente Contínua — 561
- 11.4 Aplicações da Transmissão em Corrente Contínua — 563
- 11.5 Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua — 564
 - 11.5.1 Configuração — 564
 - 11.5.2 Componentes — 565
- 11.6 Conversor Trifásico em Ponte — 567
 - 11.6.1 Válvulas — 568
 - 11.6.2 Análise do Funcionamento do Conversor — 569
 - 11.6.3 Controlo do Ângulo de Ignição — 572
 - 11.6.4 Factor de Potência — 572
 - 11.6.5 Dimensionamento do Transformador do Conversor — 574
- 11.7 Comutação da Corrente entre Válvulas — 575
 - 11.7.1 Ângulo de Comutação — 575
 - 11.7.2 Tensão Contínua — 577
 - 11.7.3 Factor de Potência — 579
- 11.8 Funcionamento como Inversor — 580
- 11.9 Conversor a 12 Pulsos — 584
- 11.10 Sistema de Transmissão em C.C. Biterminal — 586
 - 11.10.1 Modos Básicos de Funcionamento — 586
 - 11.10.2 Inversão do Trânsito de Potência — 591
- 11.11 Harmónicas e Filtros — 594
 - 11.11.1 Harmónicas no Lado da Corrente Alternada — 594
 - 11.11.2 Filtros de Corrente Alternada — 597
 - 11.11.3 Harmónicas no Lado da Corrente Contínua — 598
- 11.12 Controle dos Sistemas de Transmissão em C.C. — 600

- 11.12.1 Arquitectura do Sistema de Controlo — 600
 - 11.12.2 Sistemas de Ignição — 601
 - 11.12.3 Sistema de Controlo da Corrente — 605
- 11.13 Estabilidade do Sistema de Controlo de Corrente — 606
 - 11.13.1 Modelo Discreto do Conversor — 606
 - 11.13.2 Modelo Analítico de Um STCC Biterminal — 609
 - 11.13.3 Fronteiras de Estabilidade — 612
- 11.14 Trânsito de Energia em Sistemas C.A./C.C. — 613
 - 11.14.1 Equações em Valores p.u. — 613
 - 11.14.2 Modelo em Regime Estacionário do STCC — 616
 - 11.14.3 Solução Computacional — 618
- 11.15 Sumário — 622
- Referências Bibliográficas — 625

12. ELEMENTOS DE ANÁLISE ECONÓMICA E FINANCEIRA — 627

- 12.1 Introdução — 629
- 12.2 Valor Temporal do Dinheiro — 629
- 12.3 Custo da Energia Produzida — 631
 - 12.3.1 Custo Médio — 631
 - 12.3.2 Custo Marginal de Curto Prazo — 633
 - 12.3.3 Custo Marginal de Longo Prazo — 635
- 12.4 Preços de Mercado — 636
 - 12.4.1 Mercado Perfeito — 636
 - 12.4.2 Monopólio — 639
 - 12.4.3 Preços de Ramsey — 642
- 12.5 Avaliação Económica do Investimento — 645
 - 12.5.1 Valor Actual Líquido — 646
 - 12.5.2 Taxa Interna de Rentabilidade — 646
 - 12.5.3 Tempo de Retorno Bruto — 648
 - 12.5.4 Relação Benefício-Custo — 649
- 12.6 Sumário / Referências Bibliográficas — 651

13. OPERAÇÃO OPTIMIZADA — 651

- 13.1 Introdução — 653
- 13.2 Despacho Económico sem Perdas — 654
 - 13.2.1 Método dos Multiplicadores de Lagrange — 654
 - 13.2.2 Limites da Potência Gerada — 657
 - 13.2.3 Curva de Custo de Produção Linear — 658
- 13.3 Despacho Económico com Perdas — 660
- 13.4 Método dos Coeficientes B — 662
 - 13.4.1 Sistema com Dois Geradores — 662
 - 13.4.2 Sistema com Qualquer Número de Geradores — 667

- 13.4.3 Procedimento Computacional — 669
- 13.5 Modelo das Perdas pelo Método do Nó de Balanço — 671
 - 13.5.1 Sistema com Dois Geradores — 672
 - 13.5.2 Sistema com Qualquer Número de Geradores — 675
 - 13.5.3 Procedimento Computacional — 678
- 13.6 Coordenação Hidro-Térmica — 680
- 13.7 Trânsito de Energia Optimizado — 686
 - 13.7.1 Método do Gradiente — 687
 - 13.7.2 Método de Newton — 691
- 13.8 Estimação de Estado — 699
 - 13.8.1 Definição — 699
 - 13.8.2 Método dos Mínimos Quadrados — 701
 - 13.8.3 Sistemas Não Lineares — 707
 - 13.8.4 Método AEP — 709
 - 13.8.5 Detecção de Dados Errados — 712
- 13.9 Diagrama de Transição de Estado — 713
- 13.10 Sumário
- Referências Bibliográficas — 716

14. ORGANIZAÇÃO E GESTÃO DO SISTEMA ELÉCTRICO — 719

- 14.1 Introdução — 721
- 14.2 A Reestruturação do Sector Eléctrico — 722
- 14.3 Características da Energia Eléctrica — 723
- 14.4 A Vertente Ambiental — 724
- 14.5 Modelos Organizacionais do Sistema Eléctrico — 725
- 14.6 Directivas Europeias — 730
 - 14.6.1 Directiva 92/96/CE — 730
 - 14.6.2 Directiva Europeia 2003/54/CE — 732
- 14.7 Quadro Legal em Portugal — 733
 - 14.7.1 Reforma de 1995 — 733
 - 14.7.2 Desenvolvimentos Recentes — 735
- 14.8 Regulação do Sector Eléctrico — 736
 - 14.8.1 Necessidade de Regulação — 736
 - 14.8.2 Formas de Regulação — 737
- 14.9 Mercados de Electricidade — 739
 - 14.9.1 Bolsa de Electricidade (pool) — 739
 - 14.9.2 Contratos Bilaterais — 740
 - 14.9.3 Remuneração da Disponibilidade — 742
 - 14.9.4 Contratos Financeiros — 744
- 14.10 Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL) — 744
- 14.11 Rede de Transporte — 745
 - 14.11.1 Congestionamento da Rede — 745

- 14.11.2 Gestão do Congestionamento — 746
 - 14.11.3 Preços Nodais — 749
 - 14.11.4 Tarifa de Uso da Rede — 750
 - 14.11.5 Remuneração das Perdas — 751
 - 14.11.6 Facturação da Energia Reactiva — 752
 - 14.11.7 Serviços de Sistema — 754
- 14.12 Cálculo dos Preços Nodais — 754
 - 14.12.1 Modelo Matemático Geral — 754
 - 14.12.2 Modelo Simplificado — 756
- 14.13 Sistema Tarifário Português — 760
 - 14.13.1 Princípios Básicos de Um Tarifário — 760
 - 14.13.2 Tarifa de Energia e Potência — 761
 - 14.13.3 Tarifa de Uso Global do Sistema — 762
 - 14.13.4 Tarifa de Uso da Rede de Transporte — 763
 - 14.13.5 Tarifa de Uso da Rede de Distribuição — 764
 - 14.13.6 Tarifa de Comercialização — 766
 - 14.13.7 Tarifa de Clientes Finais — 766
- 14.14 Qualidade da Energia Eléctrica — 767
 - 14.14.1 Forma de Onda da Tensão — 767
 - 14.14.2 Harmónicas — 768
 - 14.14.3 Transitórios Electromagnéticos — 770
 - 14.14.4 Cavas de Tensão — 770
 - 14.14.5 Continuidade de Serviço — 771
 - 14.14.6 Qualidade Comercial — 773
- 14.15 Produção Descentralizada — 774
 - 14.15.1 Introdução — 773
 - 14.15.2 Motivação — 774
 - 14.15.3 Situação na UE e em Portugal — 775
 - 14.15.4 Integração na Rede da Produção Descentralizada — 776
 - 14.15.5 Harmónicas e Tremulação — 779
- 14.16 O Hidrogénio — 779
- 14.17 Energia Eléctrica para o Futuro — 781
- 14.18 Sumário — 782
- Referências Bibliográficas — 784

ÍNDICE REMISSIVO — 785