
Índice

A

Ação de gerador, 34–35
Aceleração, 4, 6
Aceleração angular, 4, 7
Acionamentos de frequência variável
 para a partida do motor síncrono, 292
 para o controle de velocidade do motor de indução, 367, 370, 372–379
Agrupamento de fase, 650
Ajuste de frequência, 373–374
Alteração do número de polos, 363–367
Alternadores, 191. *Veja também*
 Geradores síncronos
Anéis coletores, 193–194
Anéis de curto-circuito, 293, 310
Ângulo de conjugado, 199, 206–208
Ângulo de fator de potência, 91, 331–332
Ângulo de impedância
 em circuitos CA monofásicos, 48–52
 modelo de circuito para o motor de indução, 384
Ângulo interno, 199, 206
Aquecimento. *Veja também*
 Sobreaquecimento
 efeitos sobre a isolação de um transformador, 139
 efeitos sobre a isolação de uma máquina, 139, 182, 183, 454
 especificações nominais de geradores CA e, 252–253
Arco elétrico, 435
Armaduras. *Veja* Rotores
Autoindutância, 201

Autotransformadores

 características básicas, 109–111
 controle de velocidade com, 588
 impedância interna, 115–116
 relações de tensão e corrente, 111–112
 vantagem de potência aparente nominal, 112–115
Autotransformadores abaixadores, 109, 110
Autotransformadores elevadores, 109, 110
Autotransformadores variáveis, 115

B

Barramento infinito, 233–238
Bobinas. *Veja também*
 Enrolamentos
 construção nos rotores de máquinas CC, 421–423
 harmônicas e, 639, 644–648
 passo, 640–641 (*Veja também* Bobinas de passo encurtado)
 Bobinas de estator pré-moldadas, 648–649
 Bobinas de passo encurtado ou fracionário
 com enrolamentos distribuídos, 650, 651
 definição, 422, 640
 descrição, 640–641
 supressão de harmônicas usando, 639, 644–648
 tensão induzida, 641–644
 Bobinas de passo pleno, 421, 640
 Bobinas de rotor, 421–423
 Bobinas de rotor pré-moldadas, 421, 422
 Bobinas de sombreamento, 584–587

C

Caminhos de corrente nos enrolamentos do rotor, 424–427
Campo magnético coercitivo, 492, 494
Campos magnéticos
 efeitos sobre fios condutores de corrente, 33–38
 lei de Faraday, 28–32
 motores de indução, 330–331, 570–573, 575–577, 590–591
 rotação em máquinas CA, 160–169
 modelo de circuito, 11–15
 princípios básicos, 8–12
Campos magnéticos girantes, 160–169
Capacitor
 motor síncrono como, 289, 290
 tensão *versus* corrente no, 389, 390
Característica de terminal gerador CC composto cumulativo ou aditivo, 544–548
 gerador CC composto diferencial ou subtrativo, 549–551
 gerador CC de excitação independente, 528–530
 gerador CC em derivação, 537–540
 gerador CC série, 541–542
 motor CC série, 470–472, 495–496
Característica de um circuito aberto ou a vazio
 geradores síncronos, 198, 208–209
 motores CC em derivação, 490–491

- Característica descendente de frequência *versus* potência, 229, 242–244
- Características de conjugado *versus* velocidade
- com resistência de rotor aumentada em máquinas síncronas, 392–393
 - dedução para o motor de indução, 328–343
 - efeito da mudança das ligações de estator, 366
 - efeito das variações de resistência, 371, 482–483, 485–486
 - efeito do controle da tensão nos motores em derivação, 484
 - máquina primária ou motriz, 236–237
 - máquinas CA, 186
 - modificação nos motores de indução, 310
 - motor CC série, 496
 - motor com partida a capacitor, 582
 - motor de polos sombreados, 586
 - motor de relutância de partida própria, 599
 - motores CC compostos, 501–503
 - motores CC em derivação, 470–472
 - motores de histerese, 600, 601
 - motores de indução monofásicos, 571–574, 579
 - motores síncronos, 275–277
 - motores universais, 566–568
 - para frequências variáveis, 368–370, 375–378
 - região de geração da máquina de indução, 388
 - regulação de velocidade como medida rudimentar, 464–465
 - sistema Ward-Leonard, 516
 - variações em motores de indução, 343–353
- Características de curto-circuito, 209–210
- Carcaça (máquina CC), 449
- Carcaças, 452
- Carga reativa, 391
- Cargas adiantadas, 288
- Cargas capacitivas, 51, 52
- Cargas desequilibradas, 118–119
- Cargas indutivas, 51–52
- Chaves, 510–511
- Chaves com mola, 510–511
- Chaves de botoeira, 510–511
- Circuito equivalente por fase
- análise de sistema com, 625, 626
 - geradores síncronos, 202, 204
- Circuito limitador de corrente, 524
- Circuitos CA, potência de entrada, 46–52
- Circuitos CA monofásicos, 46–52
- Circuitos de aceleração/desaceleração, 524
- Circuitos de controle baseados em tiristores, 517–519, 588
- Circuitos de partida para motor de indução magnética, 359–362
- Circuitos de partida/parada, 521–522
- Circuitos de regulação de velocidade, 522–523
- Circuitos equivalentes
- gerador CC, 527, 528
 - gerador CC composto cumulativo ou aditivo, 543
 - gerador CC composto diferencial ou subtrativo, 548
 - gerador CC de excitação independente, 528, 529
 - gerador CC em derivação ou *shunt*, 535
 - gerador CC série, 541
 - gerador síncrono, 198–203
 - gerador síncrono de polos salientes, 660–666
 - motor CC, 467–468
 - motor CC composto, 501
 - motor CC série, 495
 - motor de indução, 315–321, 380–387
 - motor de indução monofásico, 590–597
 - motor síncrono, 272–273
 - transformador real, 86–94
- Circuitos trifásicos
- análise, 625–632
 - gerador de potência elétrica, 613–616
 - relações de potência, 622–625
 - tensões e correntes na ligação estrela (Y), 617–620
 - tensões e correntes na ligação triângulo, 620–621
- Classes de projeto. *Veja*
- Classificação
- Classes de sistemas de isolamento, 182, 261, 454–455
- Classificação. *Veja também*
- Especificações nominais
- construção do rotor, 345–350
 - isolamento, 182, 261, 454–455
- Componentes harmônicas de fluxo, 118–120, 639, 644–648, 654–656
- Composto cumulativo ou aditivo, 500
- Comutação
- bobinas de rotor, 421–423
 - em uma espira em rotação, 410
 - enrolamento autoequalizado, 432, 433
 - enrolamento imbricado, 424–427
 - enrolamento ondulado, 427–431
 - máquina CC simples de quatro espiras, 416–421
 - problemas nas máquinas CC reais, 433–438
 - soluções para os problemas, 439–444
 - tipos de ligação de enrolamento, 423–424
- Condensador, motor síncrono como, 289, 290
- Condição de rotor bloqueado ou travado, 317
- Condutores, 34–35, 421
- Condutores inclinados de rotor, 656, 657
- Conexões de conjugado do tipo usado em ventilador, 366
- Conexões de potência constante, 366
- Conjugado
- de enrolamentos amortecedores, 294–296
 - de relutância, 597, 659, 660

- dedução para o motor de indução, 329–339
- em uma espira de fio em rotação, 156–160, 411–413
- fatores de conversão, 669
- geradores síncronos, 207–208, 244–245, 274
- geradores síncronos de polos salientes, 666–667
- induzido em máquinas CC, 40–41, 447–448, 468
- induzido em motores CC em derivação, 471
- induzido no motor CC série, 493–495
- máquinas CC lineares, 40–41
- motores de indução, 311–313, 321–328, 594
- motores de passo do tipo de relutância, 605
- motores síncronos, 274–277
- princípios básicos, 5–6, 7
- produzido em máquinas CA, 160–169, 178–181
- Conjugado máximo, 336
- motores de indução, 330, 332, 336, 338–339
- motores síncronos, 276–277
- Conjugado máximo como gerador, 388
- Conjugado máximo em geradores síncronos, 245
- Conjugado ou torque desenvolvido, 325
- Conjugado ou torque induzido
- efeitos da variação da resistência de campo, 480–481, 483
- em uma espira em rotação, 156–160, 411–413
- geradores síncronos, 207–208, 244–245, 274
- geradores síncronos de polos salientes, 667, 668
- máquinas CA, 158, 159, 178–181
- máquinas CC, 40–41, 447–448, 468
- motor CC em derivação ou *shunt*, 471
- motor CC série, 493–495
- motores de indução, 325, 329–336, 594
- motores síncronos, 274–275, 277, 290, 294
- Constantes, 669
- Construção do comutador, 452
- Contatos normalmente abertos, 510–511
- Contatos normalmente fechados, 511
- Controladores
- com sistemas de barramento infinito, 236–237
- função na máquina primária ou motriz, 229–230
- impacto sobre geradores CA que operam em conjunto, 238, 242
- Controladores de estado sólido
- controle de velocidade de motores CC, 517–524
- controle de velocidade de motores de indução, 370, 372–379
- para partida de motores síncronos, 292
- Controle de velocidade
- abordagens para motores de indução, 363–371
- acionamentos de estado sólido para, 370, 372–379
- motor CC composto cumulativo ou aditivo, 505
- motor CC em derivação, 479–490
- motor CC série, 499
- motores de indução monofásicos, 588–589
- motores síncronos, 276
- motores universais, 567
- sistema Ward-Leonard, 514–517, 519
- vantagens do motor CC, 464–465
- Controles da tensão de armadura
- princípios básicos, 483–484
- sistema Ward-Leonard, 514–517, 519
- usando resistência de campo, 485–486
- Convenção do ponto ou da marca, 70–71, 83–85, 500
- Correção do fator de potência, 285–289
- Corrente
- em circuitos CA monofásicos, 48
- geração trifásica, 613–616
- letras de código de partida de motores de indução, 357–359
- limites do motor de indução, 394
- na ligação em estrela (Y), 617–620
- na ligação em triângulo, 620–621
- problemas de partida, 42–44
- produção de fluxo magnético, 11–12
- Corrente CA, 2, 26–28, 67
- Corrente CC
- comportamento em materiais ferromagnéticos, 21–24
- primeiros sistemas de distribuição de energia elétrica baseados em, 66–67
- problemas de partida, 42–44
- Corrente comum, 109
- Corrente de campo
- aumento em geradores síncronos em paralelo, 237, 238, 242
- especificações nominais de um gerador, 253, 255
- fontes em máquinas CA, 152, 194–195, 196
- gerador CC composto cumulativo ou aditivo, 543
- gerador CC composto diferencial ou subtrativo, 549
- geradores CC de excitação independente, 528, 530
- impacto da variação em motores síncronos, 280–285
- máquinas CC, 468–469
- motor CC composto, 500
- motores CC em derivação ou *shunt*, 476
- razão de curto-circuito, 212
- relação com a resistência de campo, 216
- relação com a tensão gerada interna, 198, 204

- relação com o fluxo em geradores síncronos, 208–209
- Corrente de campo equivalente, 476, 531
- Corrente de excitação
 como porcentagem de plena carga, 89
 modelo para transformadores, 87
 transformadores monofásicos reais, 83, 84
- Corrente de magnetização, 81–83, 389
- Corrente de perdas no núcleo, 81, 83, 87
- Corrente de regime permanente durante uma falta elétrica, 249
- Corrente em série (autotransformador), 109
- Corrente subtransitória durante uma falta elétrica, 248–249
- Corrente transitória durante uma falta elétrica, 249
- Corrente transitória inicial, 139–140
- Curta duração, limites de operação de geradores síncronos, 260
- Curto-circuito, proteção contra, 361
- Curto-circuito em geradores síncronos, 246–250
- Curva V do motor síncrono, 281
- Curvas de dano térmico, 260, 261
- Curvas de magnetização
 características básicas, 21–23
 geradores CC em derivação, 539
 geradores síncronos, 198
 máquinas CC, 468–469
 máquinas de indução, 316, 317, 389, 390
 material ferromagnético típico, 492, 493
 transformadores ideais, 85
- Curvas de saturação, 21–23, 28
- D**
- Densidade de fluxo dos campos magnéticos
 fatores de conversão, 669
- nas máquinas CA, 163–164, 169–170
 nos polos do motor CCIP, 492, 494
 princípios básicos, 9–12
- Derivações, 108–109, 131
- Desequilíbrios de carga, 118–119
- Deslocamento de escovas, 439
- Deslocamento de fase, 120
- Deslocamento do plano neutro, 433–435
- Desmagnetização, 492
- Diagrama de frequência *versus* potência, 234
- Diagramas de capacidade, 254–259
- Diagramas de fluxo de potência
 máquinas CA, 185–186
 máquinas CC, 456–457
 motores de indução, 321–322, 592
- Diagramas fasoriais
 fluxo de potência em máquinas síncronas, 297
 geradores síncronos, 202–205
 geradores síncronos de polos salientes, 664
 motores síncronos, 277, 278
 para duas sequências de fases, 617
 transformadores, 100–103
- Diagramas unifilares, 632, 633
- Distribuição da densidade de fluxo no entreferro, 639
- Domínios em materiais ferromagnéticos, 27–28
- E**
- Edison, Thomas, 66
- Efeitos de espraiamento, 14–15
- Eficiência
 máquinas CA, 184
 motores CC, 524–526
 motores de indução, 354–357
 relação com o fator de potência de motores síncronos, 288
 transformadores, 101–107
- Enfraquecimento de fluxo, 435–436, 439, 442, 443
- Enrolamento auxiliar, 578–580
- Enrolamento terciário, 66
- Enrolamentos
 amortecedores, 248, 293–297
 bobinas de rotor e, 421–423
 conexão com os segmentos do comutador, 423–424
 de compensação, 443–444
 de geradores síncronos, 192, 252–253, 260
 de passo encurtado, 422, 639–648
 distribuídos, 648–656
 fase dividida, 578–580
 isolamento, 454–455
 perdas no cobre, 455–456
 tipos principais em máquinas CC, 451
- Enrolamentos autoequalizadores, 432, 433
- Enrolamentos com número inteiro de ranhuras, 656
- Enrolamentos com um número fracionário de ranhuras, 656
- Enrolamentos comuns, 109
- Enrolamentos de armadura
 bobinas e, 421–423
 corrente máxima aceitável, 252–253, 260
 definição, 192, 451
 perdas no cobre, 455
- Enrolamentos de camada dupla, 422, 650
- Enrolamentos de campo. *Veja também* Enrolamentos de estator corrente máxima aceitável, 253, 260
 definição, 192, 451
 desligamento na partida do motor, 294, 296
 perdas no cobre, 455
- Enrolamentos de entrada, 66
- Enrolamentos de estator
 como autotransformador, 588–589
 construção típica, 648–650
 definição, 192
 distribuídos, 648–656
 métodos para o controle de velocidade, 363–367
 motores de indução, 308, 321
 motores de passo do tipo de relutância, 605

- Enrolamentos de estator de quatro fases, 605
- Enrolamentos de rotor. *Veja*
- Enrolamentos de armadura
- Enrolamentos de saída, 66
- Enrolamentos do primário
- definição, 66
- em um transformador ideal, 69
- fluxo de dispersão, 79
- na construção de um transformador, 67
- Enrolamentos do secundário
- definição, 66
- fluxo de dispersão, 79–80
- na construção do transformador, 67
- no transformador ideal, 69
- Enrolamentos duplos (duplex), 423
- Enrolamentos em série (autotransformador), 109
- Enrolamentos encurtados, 422, 641
- Enrolamentos imbricados, 424–428, 432
- Enrolamentos múltiplos (multiplex), 424, 431–432
- Enrolamentos múltiplos de estator, 364–367
- Enrolamentos ondulados, 428–432
- Enrolamentos progressivos, 423, 431
- Enrolamentos retrógrados, 423, 431
- Enrolamentos simples (simplex), 423, 431
- Enrolamentos triplos (triplex), 424
- Ensaio a vazio ou de circuito aberto, 90–92, 208–209
- Ensaio a vazio ou sem carga, 380–382
- Ensaio CC, 382–383
- Ensaio de curto-circuito, 91–92, 209–210
- Ensaio de rotor bloqueado ou travado, 382–385
- Entreferros, 14–15, 449
- Entrepolos, 439–442, 444, 452
- Envolvido, transformador de núcleo, 67, 68
- Equalizadores, enrolamentos, 425–427
- Escalares, 3
- Escorregamento (motores de indução)
- princípios básicos, 313–314
- relação com a resistência do rotor, 339
- relação com a tensão, 317–318, 320
- variações na característica de conjugado *versus* velocidade, 332
- Escorregamento de rotor. *Veja*
- Escorregamento
- Escovas
- características básicas, 193–194, 410, 420
- efeitos dos problemas de comutação, 435, 438, 454
- nas máquinas CC reais, 421, 452–454
- tensão nas, 418
- Especificações nominais. *Veja também* Classificação
- geradores síncronos, 251–260
- motores de indução, 393–394
- motores síncronos, 298–299
- transformadores, 134–139
- Espira de fio em rotação
- conjugado induzido, 156–160, 411–413
- tensão CC de uma, 409–410
- tensão induzida em, 153–156, 404–409
- Estatores
- campo magnético girante em, 160–169
- desenvolvimento do projeto de, 355
- motores de indução, 308
- perdas no cobre, 184, 321, 322, 324
- tensão de pico, 177
- Estatores de dois polos, 173–176, 363, 364
- Excitatriz piloto, 195, 196
- Excitatriz sem escovas, 194–196, 292
- F**
- Faces polares, 449, 451
- Faces polares chanfradas, 451
- Faces polares excêntricas, 451
- Faltas nos geradores síncronos, 246–250
- Fase dividida, motores de indução, 578–580
- Fase fantasma, 127
- Fasores, representação impressa, 3
- Fator de distribuição, 650–652
- Fator de enrolamento, 653
- Fator de passo, 422, 644, 647
- Fator de potência
- em circuitos CA monofásicos, 51–52
- ensaio de rotor bloqueado ou travado, 384
- no modelo do transformador, 91–92, 101–103
- rotor do motor de indução, 331–332
- Fator de potência atrasado, 101–102
- Fator de potência de um circuito aberto ou a vazio, 91
- Fator de serviço, 260
- Fatores de conversão, 669
- Fatores de potência adiantados, 298–299
- Fatores para conversão de comprimentos, 669
- Fatores para conversão de energia, 669
- Fatores para conversão de força, 669
- Fatores para conversão de massa, 669
- Fluxo
- cálculo, 10–17
- comportamento em materiais ferromagnéticos, 21–24, 26–28
- dispersão, 14–15, 79–80, 86–87
- distribuição em máquinas CA, 169–172
- lei de Faraday, 28–32
- máximo em transformadores, 139–140
- médio por espira, 78
- motor CC série, 493, 495
- no núcleo do motor de indução, 367

- relação com a força magnetomotriz, 12–14
relação com a intensidade do campo, 9–10
- Fluxo concatenado, 31, 77–78
- Fluxo mútuo, 79, 80
- Fluxo por polo, 446, 447
- Fluxo residual
definição, 27
em geradores CC em derivação, 535, 536
em máquinas CCIP, 492
- Força induzida em condutores, 33–35
- Força magnetomotriz
cálculo, 11–13
coercitiva, 27
comportamento em materiais ferromagnéticos, 21
gerador CC composto cumulativo, 543
gerador CC composto diferencial, 547–549
geradores CC de excitação independente, 530–531
geradores síncronos de polos salientes, 662
máquinas CA, 169–172
máquinas CC, 468, 475–476
motor CC composto, 500
transformadores monofásicos reais, 83–85
- Frenagem por inversão de fases, 337
- Frequência
controle de velocidade pela variação da, 367–370, 372–378
especificações nominais de geradores síncronos, 251–252
especificações nominais de transformadores, 134–135
redução na partida do motor, 291–292
relação com a potência em geradores síncronos, 230
- Frequência a vazio ou sem carga, 234–235
- Frequência de linha. *Veja* Frequência
- Frequência do rotor, 314
- Fusíveis, 510, 511, 521
- Fusível limitador de corrente, 521
- ## G
- Gerador CC composto cumulativo ou aditivo, 543–547
- Gerador CC composto diferencial ou subtrativo, 547–551
- Gerador hipercomposto, 545
- Geradores. *Veja também os tipos específicos de geradores*
diagramas de fluxo de potência, 185
indução, 388–393
máquinas lineares CC como, 41–42
princípios básicos, 1–2, 8–9, 34–35
regulação de tensão, 186, 215–216
sistema Ward-Leonard, 516–517
trifásicos, 613–616
- Geradores CC
características básicas, 527
circuitos equivalentes, 528
composto cumulativo ou aditivo, 543–547
composto diferencial ou subtrativo, 547–551
de excitação independente, 528–534
em derivação ou *shunt*, 534–540
em série, 540–542
sistema Ward-Leonard, 516–517
tipos principais, 526
- Geradores compostos normais, 545
- Geradores entrando em paralelo, 226
- Geradores eólicos, 392
- Geradores hipocompostos, 545
- Geradores para soldagem a arco elétrico, 542
- Geradores síncronos
características de potência na operação em paralelo, 229–233
- circuito equivalente para polos salientes, 660–666
construção, 192–195
definição, 191
determinação do circuito equivalente, 198–202
diagrama fasorial, 202–205
enrolamentos amortecedores, 296
equações de conjugado e de potência para polos salientes, 666–667
especificações nominais, 251–260
motores síncronos e, 297–299
operação em paralelo com outros geradores de mesmo tamanho, 237–244
operação em paralelo em sistemas de potência de grande porte, 233–237
operando isolado, 213–224
parâmetros do modelo, 208–213
potência e conjugado, 205–208
procedimentos na operação em paralelo, 228–229
requerimentos da operação em paralelo, 226–228
rotores cilíndricos *versus* de polos salientes, 659
tensão gerada interna, 197–198
transitórios, 244–250
velocidade de rotação, 197
visão geral da operação em paralelo, 224–226
- Grandezas de fase, 617, 623–624
- Grandezas de linha, 617, 624–625
- Grandezas elétricas em negrito, 3
- Grupo de fase, 650
- Guias de fluxo, 598
- ## H
- Harmônicas de grupo, 646
- Harmônicas de n múltiplo de três, 646
- Harmônicas de ranhura, 648, 654–656
- Histerese, 26–27, 77, 78

I

Ímãs de terras raras, 492

Ímãs permanentes, 28

Impedância

autotransformadores, 115–116

definição, 72

desprezando ao usar o triângulo de potência, 632, 634

em um transformador ideal, 72–73

equivalente Thevenin, 335

interna da máquina, 210

modelo de circuito do motor de indução, 382, 384, 592–593

modelo do circuito de rotor, 318–319

Impedância aparente, 72–73. *Veja também* Impedância

Impedância de entrada, 382

Indutância de dispersão, 86, 87

Indutores, 359

Intensidade de campo magnético, 9–10, 21–23, 669

Inversão do sentido de rotação de um campo magnético, 167–168

Isolação

efeitos do sobreaquecimento sobre, 139, 182, 183, 454

em autotransformadores, 114–115

enrolamentos de máquinas CA, 182, 183, 260

enrolamentos de máquinas CC, 454–455

J

Joelho da curva de saturação, 21

L

Lâminas, 31

Lei de Ampère, 8–10

Lei de Faraday, 28–32, 77, 80, 367

Lei de Kirchhoff das tensões

circuito equivalente do gerador síncrono, 200–201

circuito equivalente do motor síncrono, 272–273, 289

gerador CC em derivação, 535, 539

gerador CC série, 541

geradores CC de excitação independente, 529

máquinas CC lineares, 37–39

motor CC composto, 500

motor CC série, 493

motores CC de excitação independente e em derivação, 469, 471

transformadores, 101–102

Lei de Lenz, 29–30

Lei de Newton, 6–7, 37–38

Lei de Ohm, 11–12

Letras de código, 357, 358

Ligação em derivação curta, 544

Ligação em triângulo aberto, 126–129

Ligação estrela (Y), 617–620, 624

Ligação estrela aberta – triângulo aberto, 130–131

Ligação estrela-estrela (Y-Y), 118–120

Ligação estrela-triângulo na partida de motores de indução, 358, 359

transformadores trifásicos, 120–121

Ligação Scott-T, 131, 132

Ligação T trifásica, 131, 133

Ligação triângulo, 620–621, 624

Ligação triângulo-estrela, 121–122

Ligação triângulo-triângulo, 123

Ligações de conjugado constante, 366

Ligações de neutro

sistemas de potência trifásicos, 615–616, 625

transformadores trifásicos, 119

Limite de estabilidade dinâmica, 245–246

Limite de estabilidade estática, 207, 246

Linha de entreferro, 209

M

Máquinas CA

conjugado induzido, 160–169, 178–181

efeitos do passo de bobina, 639–648

enrolamentos distribuídos, 648–656

força magnetomotriz e distribuição de fluxo, 169–172

isolação de enrolamento, 182, 183

modelos de espira simples, 153–160

perdas e fluxos de potência, 182–186

tensão induzida, 172–178

visão geral, 152–153

Máquinas CC

bobinas de rotor, 421–423

como geradores, 41–42

como motores, 38–41

comutação em uma máquina simples de quatro espiras, 416–421

conjugado induzido, 40–41, 447–448

construção, 449–455

curva de magnetização, 468–469

definição, 404

enrolamentos autoequalizados em, 432, 433

enrolamentos imbricados em, 424–428

enrolamentos ondulados em, 428–432

fluxo de potência e perdas, 455–457

modelo linear básico, 36–38

modelo para espira simples, 404–413

partida, 37–40, 42–44

problemas de comutação, 433–438

soluções para os problemas de comutação, 439–444

tensão gerada interna, 445–447

Máquinas CC de quatro espiras, 416–421

Máquinas CC lineares

como geradores, 41–42

como motores, 38–42

modelo básico, 36–38

partida, 37–40, 42–44

- Máquinas de excitação simples, 316. *Veja também* Motores de indução
- Máquinas de indução, definição, 152, 307
- Máquinas elétricas, 1–2
- Máquinas primárias
para geradores CC, 527
para geradores síncronos, 192, 205, 229–230, 236–237
tipos externos para partida de motor, 292
- Máquinas síncronas, 152, 192
- Mary Ann de pernas longas, gerador, 527
- Materiais ferromagnéticos
comportamento magnético, 21–24
definição, 9–10
perdas de energia, 26–28
permeabilidade, 10, 13–15, 21–24, 25
- MATLAB, programas
campo magnético girante, 168–169
característica de conjugado *versus* velocidade do motor de indução, 342–343, 351–353
característica de terminal do gerador síncrono, 223–224
controle de velocidade do motor CC em derivação, 488–489
curva de conjugado *versus* velocidade do motor CC em derivação, 478–479
curva de conjugado *versus* velocidade do motor CC série, 498–499
curva de magnetização de um transformador, 136–138
curva V do motor síncrono, 284–285
curvas de magnetização, 469
fluxo no núcleo, 16–17
regulação de tensão em função da carga, 106–107
velocidade de uma máquina CC linear, 46
- Medições. *Veja* Unidades de medida
- Método das três lâmpadas, 227, 228
- Método dos polos consequentes, 363–364
- Modelos aproximados de transformador, 89
- Modelos de espira de fio. *Veja* Espira de fio em rotação
- Modulação de largura de pulso, 372–375
- Momento de inércia, 7
- Motor CC composto cumulativo ou aditivo, 501–502
- Motor CC composto diferencial ou subtrativo, 502–503
- Motor em derivação estabilizado, 491
- Motor para relógio, 600
- Motor síncrono de dois polos, 271–272
- Motor Syncrospeed, 598, 599
- Motores. *Veja também tipos específicos de motores*
diagramas de fluxo de potência, 185
máquinas CC lineares como, 38–42
princípios básicos, 1–2, 8–9, 34–35
regulação de velocidade, 186, 464–465
- Motores CC
análise não linear do motor em derivação, 475–476
aplicações comuns, 464–465
características de terminal do motor CC em derivação, 470–472
circuito de campo aberto no motor em derivação, 490–491
circuitos equivalentes, 467–468
compostos, 500–505
controle de velocidade, 479–490, 514–524
definição do tipo em derivação, 470
eficiência, 524–526
em série, 493–500, 566
excitação independente, 469–470, 483
fonte de potência CA para, 566
ímãs permanentes, 491–493
partida, 505–514
princípios básicos, 40–41, 464–466
sem escovas, 606–609
- Motores CC em derivação
análise não linear, 475–476
características de terminal, 470–472
circuitos de campo aberto, 490–491
com resistência de partida, 506
controle de velocidade, 479–490
- Motores CC série, 493–500, 566
- Motores com capacitor de partida, 581–583
- Motores com capacitor permanente, 582–584
- Motores com dois capacitores, 582–583
- Motores de histerese, 598–601
- Motores de indução
circuito equivalente, 315–321, 380–387
como geradores, 388–393
construção, 309–311
controle de velocidade, 363–371
especificações nominais, 393–394
evolução do projeto, 353–357
harmônicas de ranhura em, 656
monofásicos (*veja* Motores de indução monofásicos)
obtido as características de conjugado *versus* velocidade, 328–343
partida, 343–344, 357–362
potência e conjugado, 321–328
princípios básicos, 311–315
variações na característica de conjugado *versus* velocidade, 343–353
- Motores de indução de partida suave, 350, 378
- Motores de indução monofásicos com capacitor permanente, 582–584
com partida a capacitor, 581–583

- comparação de tipos, 585–588
 controle de velocidade, 588–589
 de dois capacitores, 582–583, 585
 fase dividida, 578–580
 modelo de circuito, 590–597
 polos sombreados, 584–587
 problemas de partida, 569–570
 teoria do campo cruzado, 575–577
 teoria do campo girante duplo, 570–573, 590
- Motores de passo, 597, 602–606
- Motores de passo de ímã permanente, 604–605
- Motores de passo do tipo de relutância, 604, 605
- Motores de polos sombreados, 584–587
- Motores de relutância, 597–598
- Motores de relutância de partida própria, 597–599
- Motores para aplicações especiais
 motores de histerese, 598–601
 motores de passo, 597, 602–606
 motores de relutância, 597–598
 sem escovas, 606–609
- Motores síncronos
 características de conjugado *versus* velocidade, 275–277
 correção do fator de potência, 285–289
 efeito das variações de carga, 277–280
 efeito das variações na corrente de campo, 280–285
 especificações nominais, 298–299
 geradores síncronos *versus*, 297–299
 motores de passo, 602–606
 partida, 290–297
 princípios básicos, 271–275
- Motores síncronos de relutância, 597
- Motores síncronos sobre-
 excitados, 282, 288–289
- Motores síncronos subexcitados, 282
- Motores universais, 566–568
- N**
- NEMA, classe de projeto A, 345, 346, 349
- NEMA, classe de projeto B, 346–349
- NEMA, classe de projeto C, 346–349
- NEMA, classe de projeto D, 346, 347, 350
- NEMA, classe de projeto F, 351
- NEMA, classes de isolamento, 182, 261, 454–455
- NEMA, eficiência nominal, 355, 356
- NEMA, Norma MG1-1993, 455
- Norma IEEE 112, 355, 380
- Norma IEEE 113, 525
- Notação, 3
- Núcleo envolvente, transformador de, 67, 68
- O**
- Operação em paralelo de geradores CA
 característica de potência, 229–233
 com sistemas de potência de grande porte, 233–237
 para geradores de mesmo tamanho, 237–244
 procedimentos, 228–229
 requerimentos, 226–228
 vantagens, 224–226
- P**
- Padrão de conjugado elevado de partida, 377, 378
- Padrão de conjugado para ventilador, 379
- Partida
 corrente transitória inicial em transformadores, 139–140
 máquinas CC lineares, 37–40, 42–44
 motores CC, 505–514
 motores de indução, 343–344, 357–362
 motores de indução
 monofásicos, 578–588
 motores síncronos, 290–297
- Partida com ligação direta à linha, 357, 359–361
- Passo, 423, 427
- Passo de ranhura, 650
- Passo do comutador, 423, 427
- Passo polar, 640
- Peças polares, 449
- Perda de campo, circuito de proteção, 521
- Perdas. *Veja* Perdas de energia
- Perdas de energia
 compensação de, 83
 em núcleos ferromagnéticos, 26–28, 31
 funções do transformador e, 67
 geradores síncronos, 194, 205, 206, 253
 máquinas CA, 182–185
 máquinas CC, 455–458, 524–526
 motores de indução, 321–322, 324–326, 380
 motores de indução
 monofásicos, 592, 594
 motores síncronos, 288
 nos primeiros sistemas de distribuição de energia elétrica, 66
 nos transformadores reais, tipos principais, 86, 101–103
 redução, 31–32, 354–355
- Perdas de potência. *Veja* Perdas de energia
- Perdas de transmissão, 66–67
- Perdas elétricas, 184, 455–456. *Veja também* Perdas no cobre
- Perdas mecânicas
 geradores síncronos, 205, 206
 máquinas CA, 184–185
 máquinas CC, 456
 motores CC, 525
- Perdas nas escovas, 456
- Perdas no cobre
 impacto sobre a eficiência do transformador, 101–103
 máquinas CA, 184
 máquinas CC, 455–456, 524

- motores de indução, 321, 322, 324–326, 594
no comportamento de um transformador real, 86
no ensaio a vazio ou sem carga, 380
- Perdas no cobre do estator
máquinas síncronas CA, 184
motores de indução, 321, 322, 324
- Perdas no cobre do rotor
máquinas síncronas CA, 184
motores de indução, 321, 324–326, 594
- Perdas no núcleo
geradores síncronos, 205, 206
máquinas CA, 184
máquinas CC, 456, 525
motor de indução, 322, 324
princípios básicos, 26–28, 31
- Perdas por atrito
máquinas CA, 184
máquinas CC, 456
motores de indução, 321
- Perdas por corrente parasita
definição, 28
impacto na eficiência do transformador, 101–103
máquinas CA, 184
motores de indução, 321
no comportamento de transformadores reais, 86
redução, 31–32
- Perdas por histerese
definição, 28
efeito das excursões de força magnetomotriz, 28, 29
impacto sobre a eficiência de um transformador, 101–103
máquinas CA, 184
motores de indução, 321
no comportamento de transformadores reais, 86
- Perdas por queda de tensão nas escovas, 525
- Perdas por ventilação
máquinas CA, 184–185
máquinas CC, 456
motores de indução, 321
- Perdas rotacionais, 322, 380–382
- Perdas rotacionais a vazio ou sem carga, 185, 525
- Perdas suplementares
geradores síncronos, 205, 206
máquinas CA, 185
máquinas CC, 456
- Perdas variadas. *Veja* Perdas suplementares
- Período de regime permanente, 248
- Período subtransitório, 248
- Período transitório, 248
- Permeabilidade
comportamento em materiais ferromagnéticos, 21–25
princípios básicos, 10, 21
variação com o fluxo existente, 14–15
- Permeabilidade do ferro, 10, 27
- Permeabilidade magnética. *Veja* Permeabilidade
- Permeabilidade relativa, 10
- Permeância, 13–14
- Placas de identificação
motores de indução, 298–299, 393–394
- Placas de identificação de motores de indução de alta eficiência, 393–394
- Plano neutro magnético, 433–434
- Polaridade
em um transformador ideal, 70–71
força magnetomotriz, 12–13
lei de Lenz, 29–31
transformadores monofásicos reais, 83
- Polos de comutação, 439–442
- Polos deslizantes, 277
- Polos salientes em máquinas CC, 452
- Posição angular, 3
- Potência
circuitos trifásicos, 613, 622–625
em circuitos CA monofásicos, 46–52
em máquinas CC lineares, 38–42
em um transformador ideal, 71–72
ensaio de rotor bloqueado ou travado, 384
fatores de conversão, 669
geradores síncronos, 205–208, 229–233, 245, 254–255
geradores síncronos de polos salientes, 666–667
ligação em triângulo aberto de um transformador, 127–129
limites para o motor de indução, 394
motores de indução, 321–328, 369
no sistema por unidade, 95
perdas em máquinas CA, 182–186
princípios básicos, 7–9
- Potência aparente
autotransformadores, 112–115
em circuitos CA monofásicos, 49–52
em circuitos trifásicos, 625
especificações nominais de transformador, 138–139
geradores síncronos, 252–253, 255
ligação triângulo aberto em um transformador, 127–129
no transformador ideal, 72
- Potência ativa
circuitos CA monofásicos, 48–52
geradores síncronos, 205–206, 254
transformador ideal, 71–72
variação em máquinas síncronas, 297
- Potência complexa, 50–52
- Potência de entreferro, 321, 324, 333, 593–594
- Potência de entreferro por fase, 593
- Potência de entreferro progressiva, 593–594
- Potência de entreferro retrograda, 593, 594
- Potência instantânea em circuitos CA monofásicos, 47, 48
- Potência inversa, proteção contra fluxo de, 235
- Potência máxima em geradores síncronos, 245
- Potência mecânica, 457
- Potência mecânica desenvolvida, 324

- Potência reativa
em circuitos CA monofásicos, 49–52
em circuitos trifásicos, 625
em um transformador ideal, 72
expressão para geradores síncronos, 206, 255
ligação de transformadores em triângulo aberto, 129
na operação em paralelo de geradores CA, 238, 242
relação com a tensão de terminal nos geradores síncronos, 230–231, 242
requerimentos de um motor de indução, 388, 389
variação em máquinas síncronas, 297
versus tensão de terminal em um barramento infinito, 233–234, 236–237
- Princípios do movimento de rotação, 3–9
- Princípios dos circuitos magnéticos, 11–15
- Proteção, circuitos de, 521
- Q**
- Queda de tensão nas escovas, 467
- Queda de velocidade, 229, 242–244
- R**
- Rampas de aceleração, 378
- Rampas de desaceleração, 378
- Razão ou relação de curto-circuito, 212
- Reação de armadura
geradores síncronos de polos salientes, 660, 663–664
geradores síncronos de rotor cilíndrico, 198, 199–201
máquinas CC, 433–436, 439
motores CC de ímã permanente, 492
motores CC em derivação ou *shunt*, 471–472, 476
- Reatância
ensaio de rotor bloqueado ou travado, 385
equivalente Thévenin, 335
geradores síncronos, 201, 210–211, 250
geradores síncronos de polos salientes, 660, 663–664
modelo para transformadores, 87, 98
motor universal, 567
motores de indução, 316, 318, 344–346
rotor *versus* estator, 385
- Reatância de dispersão, 344–346
- Reatância síncrona, 201, 210–211
- Reatância síncrona direta, 663
- Reatância síncrona em quadratura, 663
- Reatância síncrona não saturada, 211
- Reatância subtransitória durante uma falta elétrica, 250
- Reatância transitória durante uma falta, 250
- Recuperação de energia, 391–392
- Recuperação do campo magnético residual, 536
- Rede de energia elétrica, comportamento de geradores na, 233–237
- Rede nacional de energia elétrica, comportamento de geradores na, 233–237
- Redução de tensão nominal, 135, 367
- Refletir ou referir, 73
- Região de escorregamento baixo, 332
- Região de escorregamento elevado, 332
- Região de escorregamento moderado, 332
- Regiões não saturadas, 21
- Regra da mão direita, 12–13, 161
- Regulação de tensão
geradores, 186, 215–216
geradores CC, 527
transformadores, 98–103, 108–109
- Regulação de tensão a plena carga, 100–101
- Regulação de velocidade, 186, 464–465
- Reguladores de tensão, 109
- Relação de corrente, 83–86
- Relação de espiras
derivações e, 108–109
motores de indução, 317, 320
no transformador ideal, 69, 70, 320
- Relação de tensão
no transformador, 78–81
transformadores trifásicos, 118, 120, 122, 123
- Relés
perda de campo, 491, 513–514
retardo de tempo, 361–362, 511–512
símbolos para, 511
- Relés sensores de contratensão, 513
- Relógios elétricos, 600
- Relutância, 12, 14
- Resistência crítica, 537
- Resistência de campo
controle de velocidade pela variação da, 480–483
efeito sobre a tensão de terminal do gerador CC, 537
em motores CC, 525
- Resistência de estator, 382–383
- Resistência do rotor
controle de velocidade pela variação da, 370
efeitos sobre os geradores de indução, 392–393
ensaio CC, 382–383
ensaio de rotor bloqueado ou travado, 385
- Resistência e resistor
acréscimo no controle de velocidade do motor CC em derivação, 484–486
controle de velocidade de motor CC baseado em, 480–486
controle de velocidade pela variação da, 370, 371
de drenagem, 545, 546
ensaio CC, 382–383
ensaio de rotor bloqueado ou travado, 385
equivalente Thévenin, 335
geradores de indução, 392–393
geradores síncronos, 201, 211–212

- modelo para transformadores, 87, 98
 motores de indução, 316, 318
 na partida de um motor CC, 506–510
 na partida de um motor de indução, 359, 361
 no controle de velocidade do motor de indução, 588
 Resistências de partida, 506–510
 Resistores de drenagem, 545, 546
 Rotores
 características básicas em geradores síncronos, 192
 classes padronizadas de projeto NEMA, 346, 347, 349–350
 condutores inclinados, 656, 657
 construção em máquinas CC, 452
 desenvolvimento de projetos, 355
 efeitos do projeto sobre as características do motor de indução, 345–348, 392–393
 enrolamentos amortecedores, 293–297
 modelo de circuito para motor de indução, 317–320
 perdas no cobre, 184, 321, 324–326, 594
 polos salientes (*Veja* Rotores de polos salientes)
 tipos de motor de indução, 309–311
 Rotores bobinados, 310, 311, 344, 392–393
 Rotores de barras profundas, 346–348
 Rotores de gaiola
 características básicas, 308–310
 efeitos do projeto sobre as características do motor de indução, 345–348
 letras de código de partida, 357, 358
 Rotores de gaiola dupla de esquilo, 348
 Rotores de ímã permanente, 608–609
 Rotores de polos não salientes, 169, 170, 192
 Rotores de polos salientes
 cilíndricos *versus*, 659
 circuito equivalente de máquina, 660–666
 conjugado e potência de máquina, 666–668
 definição, 169, 192
 ilustrados, 170, 193
S
 Sapatas polares, 449
 Seção de eletrônica de alta potência, 522
 Seção de eletrônica de baixa potência, 522–524
 Segmentos de comutador, 410, 420–421
 Sensores de posição, 606, 609
 Sequência de fases, 226–228, 616
 Sincroscópio, 228–229
 Sistema de medição por unidade, 94–99, 123–126
 Sistema Internacional (SI), 2–3, 669
 Sistema Ward-Leonard, 514–517, 519
 Sistemas de controle de dois quadrantes, 517, 518
 Sistemas de controle de quatro quadrantes, 517–519
 Sistemas de potência trifásicos
 abordagem usando o triângulo de potência, 632–635
 análise, 625–632
 diagramas, 632, 633
 vantagens, 613
 Sobreaquecimento. *Veja também* Aquecimento
 geradores síncronos, 252–253, 260
 máquinas CA, 182, 183
 máquinas CC, 454–455
 transformadores, 139
 Sobrecarga, circuito de proteção de tempo inverso, 521
 Sobrecarga, circuito de proteção estático instantâneo, 521
 Sobrecarga, proteção
 acionamentos de frequência variável de estado sólido, 378
 motores de indução, 361
 símbolos, 511
 Sobretemperatura, circuito de proteção, 521
 Subtensão, proteção contra, 361, 378, 521
T
 Tensão. *Veja também* Tensão de terminal
 controle de velocidade pela variação da, 370–378
 em circuitos CA monofásicos, 48
 em uma espira de fio em rotação, 153–156, 404–409
 Equivalente Thévenin, 333–335
 especificações nominais do gerador síncrono, 251–252
 especificações nominais do transformador, 134–135
 funções do transformador de, 2, 67
 geração inicial de tensão (escorvamento) no gerador em derivação, 535–537
 geração inicial de tensão (escorvamento) no gerador síncrono, 389–391
 geração trifásica, 613–616
 induzida em bobinas de passo encurtado, 641–644
 induzida em um condutor dentro de um campo magnético, 34–37
 induzida nas máquinas CA, 172–178
 interna gerada, 197–198, 445–447, 468, 476
 limites em um motor de indução, 394
 na transmissão de energia elétrica, 67, 76–77
 nas escovas de uma máquina CC simples, 418
 nas ligações em estrela (Y), 617–620
 nas ligações em triângulo, 620–621

- no sistema por unidade, 95
 produzida em motores de indução, 311–312
 queda nas escovas, 467
 redução na partida de um motor, 358–359
 variação no controle de velocidade de um motor CC em derivação, 483–485
- Tensão comum, 109
- Tensão de linha. *Veja* Tensão
- Tensão de terminal
 controle em geradores de indução, 388–390
 corrigindo a variação em geradores síncronos, 216
 determinação em geradores síncronos, 201, 204
 efeito das variações de carga em geradores de indução, 391
 efeito das variações de carga em geradores síncronos, 215, 230–231
 gerador CC composto cumulativo ou aditivo, 546
 gerador CC composto diferencial ou subtrativo, 549
 gerador CC de excitação independente, 529–530
 gerador CC em derivação, 538, 540
 máquina CC simples de quatro espiras, 420
 máquinas CA ligadas em estrela *versus* máquinas ligadas em triângulo, 177
 redução na partida de um motor, 358–359
 redução no controle de velocidade de um motor de indução, 367, 588
 relação com a potência reativa em geradores síncronos, 231, 242
- Tensão em série (autotransformador), 109
- Tensão gerada interna
 geradores síncronos, 197–198
 máquinas CC, 445–447, 468, 476
- Tensão induzida
 bobinas de passo encurtado, 641–644
 condutor deslocando-se em um campo magnético, 34–35
 em uma espira em rotação, 153–156, 404–409
 enrolamentos amortecedores, 294
 lei de Faraday, 28–32
 máquinas CA, 172–178
 máquinas CC, 445–447
 motores de indução, 311–312, 317–320
- Tensões de terceira harmônica, 118–120, 646
- Tensões $L di/dt$, 436–438
- Teorema de Thévenin, 333–335
- Teoria do campo cruzado, 575–577
- Teoria do duplo campo girante, 570–573, 590
- Tesla, Nicola, 353
- Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 355
- Trabalho, princípios básicos, 7
- Transformador com mudança de derivação sob carga, 109
- Transformador da unidade de geração, 68
- Transformador de equilíbrio, 131
- Transformador principal, 131
- Transformador TCUL, 109
- Transformadores
 aplicações especiais, 140–142
 autotransformadores, 109–116, 588
 corrente transitória inicial, 139–140
 derivações, 108–109
 determinação de circuitos equivalentes, 86–94
 dispositivos ideais, 69–77
 eficiência, 101–107
 especificações nominais, 134–139
 lei de Faraday, 28–32
 medições por unidade, 94–99, 123–126
 motores de indução como, 316–317
 operação monofásica, 77–86
 placas de identificação 140, 141
 princípios básicos, 2, 8–9, 66–67
 regulação de tensão, 98–103, 108–109
 tipos de ligações trifásicas, 118–123, 126–131
 tipos e construção, 67–69
 visão geral trifásica, 116
- Transformadores abaixadores, 77
- Transformadores de corrente, 69, 141–142
- Transformadores de distribuição, 69
- Transformadores de instrumentação, 140–142
- Transformadores de potência, 67–69. *Veja também* Transformadores
- Transformadores de potencial, 69, 141
- Transformadores de subestação, 69
- Transformadores elevadores, 77
- Transformadores ideais
 análise de circuitos contendo, 73
 características básicas, 69–71
 curva de magnetização, 85
 potência em, 71–72
 transformadores monofásicos reais como, 85–86
- Transformadores monofásicos, 116, 117
- Transformadores trifásicos
 formas de construção de, 116, 117
 medições por unidade, 123–126
 métodos de ligação de dois transformadores, 126–133
 tipos de ligação entre primário e secundário, 118–123
- Transitórios, 244–250
- Triângulo de potência, 51–52, 632–635
- U**
- Unidades de medidas
 aceleração, 6

campo magnético, 9, 10
conjugado, 6
densidade de fluxo, 10
fatores de conversão, 669
fluxo concatenado, 31
força, 6
força magnetomotriz, 11–12
intensidade de campo magnético, 10
permeabilidade, 10
potência, 7
potência aparente, 50
potência ativa, 31, 48
potência reativa, 49
relutância, 12–13
sistema por unidade, 94–99
trabalho, 7

velocidade angular e aceleração angular, 4
visão geral, 2–3
Unidades do SI, 2–3, 669
Unidades do sistema métrico, 2–3, 669
Unidades inglesas, 2–3, 669
Unidades padrões, 2–3, 669

V

Variações de carga
gerador CC composto cumulativo, 544–545
gerador CC em derivação, 537–538
gerador de indução, 391

gerador síncrono operando isolado, 214–216
geradores síncronos em paralelo, 230–231
motor síncrono, 277–280
Velocidade, 5
Velocidade, representação, 4
Velocidade angular, 3–4
Velocidade angular unidimensional, 3
Velocidade de base, 367–370
Velocidade de escorregamento, 313
Velocidade em disparada, 491
Velocidade nominal, 251–252
Velocidade síncrona, 363
Vetores, 3