

Volume 2

Capítulo 5

GERADORES E MOTORES SÍNCRONOS POLIFÁSICOS

5.1	Introdução	227
5.2	Princípio de funcionamento	227
5.3	Formas construtivas	227
5.4	F.m.m. intensidade de campo, densidade de fluxo, f.e.m. e fluxo produzidos pelo indutor. Ângulo magnético	228
5.4.1	F.m.m., H e B	228
5.4.2	Fluxo – ângulos magnéticos	229
5.4.3	Fluxo concatenado e f.e.m. do indutor	231
5.5	F.m.m., intensidade de campo, densidade de fluxo, f.e.m. e fluxo produzidos pelo induzido	233
5.5.1	F.m.m., H , B , f.e.m. e fluxo produzidos por um enrolamento monofásico concentrado em uma única bobina de passo pleno	233
5.5.2	Decomposição das distribuições retangulares de H e B em componentes senoidais ..	235
5.5.3	f.m.m. H , B , f.e.m. e ϕ_a produzidos por um enrolamento trifásico concentrado, com bobinas de passo pleno – campo rotativo	236
5.6	Indutores e induzidos com mais de dois pólos	243
5.7	Geometria dos enrolamentos de induzidos distribuídos: de simples camada com passo pleno, de dupla camada com passo pleno e de dupla camada com passo encurtado	246
5.8	Influência da distribuição e do encurtamento sobre o fluxo concatenado f.m.m., H , B , e f.e.m. produzidos pelo induzido	249
5.8.1	Encurtamento de passo	249
5.8.2	Distribuição das bobinas de cada fase	252
5.8.3	Distribuição e encurtamento	256
5.9	Representação das máquinas síncronas polifásicas	261
5.10	Fluxos da máquina síncrona e seus efeitos	262
5.11	Reatâncias e resistências equivalentes. Circuito equivalente da máquina síncrona de indutor cilíndrico em regime permanente senoidal	264
5.12	Máquina síncrona em um sistema de potência	266
5.13	Máquina síncrona de indutor cilíndrico, com potência mecânica nula e sem perdas, ligada a barramento infinito	268
5.13.1	Excitação normal ($E_0 = V_a$)	269
5.13.2	Superexcitação ($E_0 > V_a$)	270
5.13.3	Subexcitação ($E_0 < V_a$)	273
5.13.4	Excitação nula ($E_0 = 0$)	275
5.13.5	Curto-circuito nos terminais do induzido ($V_a = 0$)	276
5.14	A máquina síncrona de indutor cilíndrico, sem perdas, ligada a barramento infinito e apresentando potência mecânica	276
5.14.1	Funcionamento como gerador síncrono em regime permanente	277
5.14.2	Funcionamento como motor síncrono em regime permanente	280
5.14.3	Métodos de partida dos motores síncronos	282
5.15	Consideração da resistência por fase de armadura	284
5.16	Diagrama geral de fasores da máquina síncrona de indutor cilíndrico, sem perda, em barramento infinito	285
5.17	Máquina síncrona de pólos salientes-introdução à teoria da dupla reação	290
5.17.1	Considerações sobre as f.m.m., fluxos e indutâncias	290
5.17.2	Definição das reatâncias associadas aos eixos, direto e quadratura	293
5.17.3	Equação das tensões e diagrama de fasores para máquinas de pólos salientes	293

5.18	Potência e conjugado desenvolvidos pela máquina síncrona em função do ângulo de potência	295
5.19	Regulação das máquinas síncronas	296
5.20	Rendimento das máquinas síncronas	298
5.21	Fator de potência das máquinas síncronas	298
5.22	Valores nominais das máquinas síncronas	299
5.23	Gerador de tensão alternativa funcionando isolado do sistema de potência e alimentando carga passiva	299
5.24	Alguns fenômenos transitórios das máquinas síncronas	301
5.24.1	Equação dinâmica da máquina síncrona – estabilidade dinâmica	302
5.24.2	Sincronização dos motores síncronos e a perda de sincronização dos motores e geradores	305
5.24.3	Variação da corrente do induzido – solução do problema por subdivisão do tempo de duração do fenômeno – reatâncias transitória e subtransitória	306
5.25	Máquina síncrona como elemento de comando e controle	308
5.26	Efeito da saturação magnética nas máquinas síncronas	310
5.27	Sugestões e questões para laboratório	310
5.27.1	Equipamento básico para ensaios de máquinas rotativas e sua utilização	310
5.27.2	Curva de magnetização da máquina síncrona – efeito de saturação	313
5.27.3	Verificação da influência da natureza da carga	314
5.27.4	Medida da regulação de gerador síncrono	314
5.27.5	Ensaio em curto-circuito – determinação da reatância síncrona	315
5.27.6	Determinação das reatâncias associadas aos eixos direto e quadratura	317
5.27.7	Partida do motor síncrono e perda de estabilidade	318
5.27.8	Observação do ângulo de potência no motor síncrono	319
5.27.9	Observação da corrente transitória de curto-circuito em um alternador	319
5.27.10	Medida direta do rendimento de um motor síncrono – curvas V	319
5.27.11	Observação do gerador síncrono conectado a um sistema de potência	319
5.27.12	Montagem de um enrolamento trifásico e observação do campo rotativo	320
5.28	Exercícios	320

Capítulo 6

MOTORES E GERADORES ASSÍNCRONOS

6.1	Introdução	323
6.2	Princípios de funcionamento	323
6.3	Formas construtivas	324
6.4	f.m.m. H , B , f.e.m. e fluxo produzido por estatores de dois ou mais pólos	325
6.5	Escorregamento das máquinas assíncronas	325
6.6	Previsão qualitativa das curvas de conjugado e corrente	327
6.7	Aspectos qualitativos da influência da tensão e da resistência rotórica sobre as curvas de corrente e conjugado-aplicações	333
6.8	Máquina assíncrona como modificador de frequência – fluxos de potência	336
6.9	Fluxos magnéticos da máquina assíncrona	338
6.10	f.e.m. e correntes das máquinas assíncronas – resistências e reatâncias para fins de circuito equivalente	339
6.11	Circuito equivalente da máquina assíncrona em regime permanente senoidal, com escorregamento $s = 0$ e $s = 1$	340
6.12	Circuito equivalente em regime permanente senoidal, com escorregamentos diferentes de 0 e 1	342
6.13	Diagrama de fasores para a máquina de indução	345
6.14	Solução por modelos de circuitos equivalentes aproximados	345
6.15	Equação do conjugado eletromecânico	346
6.16	Fator de potência, perdas e rendimento dos motores de indução	350
6.17	Independência da quantidade de fases do circuito rotórico	352

6.18	Potência mecânica e perda Joule rotórica em função do escorregamento	353
6.19	Motores de indução monofásicos	354
6.19.1	Princípio de funcionamento	354
6.19.2	Métodos de partida	357
6.20	Máquina assíncrona com elemento de comando e controle	359
6.20.1	Servomotor de indução difásico, autofreante	359
6.20.2	Motor de indução de rotor em lâmina	361
6.20.3	Eixos elétricos polifásicos	362
6.20.4	Eixos elétricos monofásicos	365
6.20.5	Sincros de controle como detetores de erro angular	367
6.20.6	Sincro de controle como detetores de erro de velocidade ou de deslocamento angular	368
6.21	Máquina assíncrona como variador de tensão	369
6.22	Máquina assíncrona como acoplamento entre eixos	371
6.23	Máquina assíncrona plana	371
6.24	Sugestões e questões para laboratório	372
6.24.1	Ensaio em vazio	372
6.24.2	Ensaio com rotor bloqueado	373
6.24.3	Traçado das curvas de conjugado e corrente primária em função de escorregamento, funcionando como motor	373
6.24.4	Verificação da influência da resistência externa secundária sobre o conjugado e a corrente primária de partida	374
6.24.5	Influência da tensão V_1 sobre o conjugado e a corrente de partida	374
6.24.6	Sugestão para medida de escorregamento nominal em motores de anéis	374
6.24.7	Outras questões	374
6.25	Exercícios	375

Capítulo 7

MOTORES E GERADORES DE TENSÃO CONTÍNUA

7.1	Introdução	377
7.2	Princípios de funcionamento	377
7.3	Formas construtivas	377
7.4	f.m.m., intensidade de campo, densidade de fluxo produzido pelo indutor.....	380
7.5	Enrolamentos de induzido com comutador – ação motora e ação geradora – comutação	382
7.5.1	Ação motora e geradora	382
7.5.2	Funcionamento do enrolamento com comutador	384
7.5.3	Comutação – interpolos	386
7.5.4	Influência da posição das escovas	387
7.6	f.m.m. H , B e ϕ produzidas pelo enrolamento induzido	391
7.7	Distribuições resultantes no entreferro e fluxo resultante – efeito de saturação ..	394
7.8	Interpolos e sua excitação	395
7.9	Enrolamento de compensação	396
7.10	Força eletromotriz entre escovas – valor médio	397
7.11	Conjugado desenvolvido – valor médio	399
7.12	Circuito equivalente da máquina de C.C. – resistência de armadura	400
7.13	Máquina de corrente contínua em linha infinita em regime permanente	403
7.14	Demonstração de quantidade do número de derivações em máquinas com mais de dois pólos	407
7.14.1	Enrolamento embricados	407
7.14.2	Enrolamentos ondulados	409
7.15	Magnetização das máquinas de corrente contínua	412
7.16	Regulação dos motores e geradores de C.C.	414
7.17	Rendimento das máquinas C.C.	415
7.18	Modalidades do auto-excitação no eixo direto	415

7.19	Característica externa dos motores C.C.	417
7.19.1	Motores com excitação independente e excitados em derivação	417
7.19.2	Motores com excitação composta	418
7.19.3	Motores com excitação série	421
7.20	Métodos de ajuste de velocidade nos motores de C.C.	422
7.21	Métodos de partida dos motores C.C.	425
7.22	Características externas dos geradores C.C.	426
7.22.1	Geradores com excitação independente	426
7.22.2	Geradores com auto-excitação em derivação	427
7.22.3	Gerador com auto-excitação composta	430
7.22.4	Gerador auto-excitado em série	431
7.23	Operação dinâmica – alguns fenômenos transitórios nas máquinas C.C.	431
7.23.1	Variação de tensão de excitação de um dinamo	432
7.23.2	Auto-escorvamento dos dinamos auto-excitados – resistência crítica – importância de fenômeno de saturação	434
7.23.3	Variação na tensão de armadura de um motor C.C. – aceleração do motor de excitação independente	435
7.23.4	Aceleração do motor C.C. por aplicação de tensão de excitação em degrau	439
7.23.5	Gerador de C.C. como amplificador eletromecânico	442
7.24	Máquina de C.C. segundo a teoria dos dois eixos	444
7.25	Motor de comutador sob tensão alternativa – motores universais	444
7.26	Máquina de C.C. como elemento de comando e controle	445
7.26.1	Gerador tacométrico de C.C.	445
7.26.2	Motores pilotos de C.C.	445
7.26.3	Geradores amplificadores especiais	445
7.27	Sugestões e questões para laboratório	446
7.27.1	Curva de magnetização da máquina de C.C. – observações da resistência crítica	446
7.27.2	Determinação prática dos eixos diretos ou das posições normais das escovas	447
7.27.3	Influência da posição das escovas em funcionamento	448
7.27.4	Observação das formas de distribuição de B no espaço	448
7.27.5	Curvas características externas dos motores C.C.	448
7.27.6	Variação de velocidade do motor C.C. por variação de V_a e I_{exc}	449
7.27.7	Curva característica externa de geradores C.C.	449
7.27.8	Inversão de velocidade e de polaridade	449
7.28	Exercícios	449

Apêndice 1

SOLUÇÃO DO REGIME SENOIDAL PERMANENTE PELO MÉTODO DOS COMPLEXOS

a)	Respostas transitória e permanente para as excitações senoidais	452
b)	Fasores	453
c)	Transformação de uma equação – impedância complexa	455
d)	Diagrama de fasores	457

Apêndice 2

APLICAÇÕES DA TRANSFORMAÇÃO DE LAPLACE – TIPOS DE EXCITAÇÃO DOS SISTEMAS ELETROMECCÂNICOS

a)	Introdução – definições	459
b)	Transformação de uma equação – propriedades	460
c)	Transformação das funções de excitação mais importantes	462
d)	Expansão em frações parciais – teorema de maior interesse	466
d1)	Expansão em frações parciais	466

d2) Teorema do valor final	469
d3) Teorema do valor inicial	469
d4) Teorema da defasagem, ou da translação real	469
d5) Teorema da translação no campo complexo	469
e) Tabela de pares para transformação de Laplace	470
Referências	472
Índice	475