САДРЖАЈ

1 УВОД 1
1.1 Енергетски претварачи и електричне машине 1
1.1.1 Обртни енергетски претварачи 1
1.1.2 Статички енергетски претварачи 2
1.1.3 Улога електромеханичког претварања енергије 2
1.1.4 Принципи рада 3
1.1.5 Магнетска и струјна кола 3
1.1.6 Обртне електричне машине 4
1.1.7 Реверзибилне машине 5
1.2 Значај и примена електричних машина 6
1.3 Величине и релације обртног кретања 11
1.3.1 Означавање величина и систем јединица 13
1.4 Циљана знања и начин излагања 15
1.4.1 Циљана знања о електричним машинама 16
1.4.2 Заменске шеме 16
1.4.3 Механичка карактеристика 16
1.4.4 Прелазни процеси у електричним машинама 17
1.4.5 Математички модел 18
1.5 Приступ анализи и редослед излагања 18
1.5.1 Потребна предзнања 20
1.5.2 Напомене о пројектовању електричних машина 21

2 Електромеханичко претварање енергије 27
2.1 Лоренцова сила 27
2.2 Узајамно дејство паралелних проводника 29
2.3 Електромоторна сила у покретном проводнику 30
2.4 Генераторски режим 32
2.5 Релуктантни моменат 34
2.6 Релуктантна сила 35
2.7 Дејство сила на проводнике у електричном пољу 36
2.8 Промена пермитивности 37
2.9 Пиезоелектрични ефекат 41
2.10 Магнетострикција 42

2.11 Претварачи са електричним спрежним пољем 43
2.11.1 Наелектрисање, капацитивност и енергија 43
2.11.2 Рад извора, механички рад и промена енергије 45
2.11.3 Израз за силу 46
2.11.4 Циклус претварања 48
2.11.5 Густина енергије поља и величина претварача 50
2.11.6 Пренос енергије путем поља 51
2.12 Претварач са магнетским спрежним пољем 52
2.12.1 Линеарни претварач 53
2.12.2 Обртни претварач 55
2.12.3 Контра-електромоторна сила 58
2.13 Магнетско коло 60
2.13.1 Анализа магнетских кола 61
Закон о конзервацији магнетског флукса 62
Уопштени облик Амперовог закона 62
Конститутивна веза магнетског поља и индукције 63
2.13.2 Вектор флукса 64
2.13.3 Карактеристике магнетисања феромагнетика 64
2.13.4 Магнетска отпорност кола 65
2.13.5 Енергија у магнетском колу 69
2.13.6 Референтни смер магнетског кола 70
2.14 Губици у магнетским колима 72
2.14.1 Губици услед хистерезиса 72
2.14.2 Губици услед вихорних струја 73
2.14.3 Укупни губици у магнетском колу 75
2.14.4 Начини за смањење губитака у гвожђу 75
2.14.5 Процена ефеката ламинације феромагнетика 77
2.15 Обртне електричне машине 80
2.15.1 Магнетско коло обртних машина 81
2.15.2 Механички прилаз 82
2.15.3 Намотаји 83
2.15.4 Жлебови у магнетском колу 85
2.15.5 Положај и ознаке оса намотаја 87
2.15.6 Губици у претварању 89
2.15.7 Поље у ваздушном зазору и у магнетском колу 92
2.15.8 Расположиви моменат, енергија поља 94
2.16 Моделирање електричних машина 98
2.16.1 Потреба за моделирањем 99
Проблеми моделирања 100
2.16.2 Занемарења 102
Занемарење ефеката расподељених параметара 102
Занемарење паразитних капацитивности 103

Занемарење губитака у гвожђу 103
Занемарење нелинеарности средине 103
2.16.3 Снага извора ... 104
2.16.4 Електромоторна сила ... 105
2.16.5 Једначине равнотеже напона ... 106
2.16.6 Флукс расипања ... 108
2.16.7 Енергија спрежног поља ... 112
2.16.8 Снага претварача ... 113
2.16.9 Израз за моменат ... 116
2.16.10 Механички подсистем ... 119
2.16.11 Губици у механичком подсистему ... 120
2.16.12 Кинетичка енергија ... 121
2.16.13 Модел механичког подсистема ... 122
2.16.14 Биланс снаге у електромеханичком претварачу . 124
2.16.15 Једначине математичког модела ... 126
2.17 Једнострано и двострано напајани претварачи ... 127
2.17.1 Анализа једнострано напајаног претварача ... 129
2.17.2 Промена сопствене индуктивности ... 130
2.17.3 Израз за снагу и моменат ... 132
2.17.4 Анализа двострано напајаног претварача ... 135
2.17.5 Промена међусобне индуктивности ... 136
2.17.6 Израз за моменат ... 138
Средња вредност момента 139
Услови за развијање момента 140
2.17.7 Магнетски полови ... 141
2.17.8 Машине за једносмерну и наизменичну струју ... 142
2.17.9 Одређивање момента из векторског производа ... 143
2.17.10 Положај вектора флукса код обртних машина 146
2.17.11 Обртно поље ... 150
2.17.12 Врсте електричних машина ... 152
Машине за једносмерну струју 152
Асинхроне машине 153
Синхроне машине 153
2.18 Анализа магнетског поља у зазору ... 154
2.18.1 Статорски намотај са расподељеним навојцима .. 155
2.18.2 Простопериодично расподељени струјни плашт .. 158
2.18.3 Компоненте статорског поља ... 160
Аксијална компонента поља 161
Тангенцијална компонента поља 163
Радијална компонента поља 166
2.18.4 Преглед компоненти магнетског поља статора ... 170
2.18.5 Конвенција о представљању поља вектором ... 172

2.18.6 Компоненте роторског поља 177
Аксијална компонента поља 180
Тангенцијална компонента поља 180
Радијална компонента поља 182
Преглед компоненти магнетског поља ротора 184
2.18.7 Конвенција о представљању поља вектором..... 185
2.18.8 Интеракција статорског и роторског поља..... 187
2.18.9 Енергија магнетског поља у зазору 189
2.18.10 Електромагнетски моменат..... 193
Израз електромагнетски моменат 194
2.18.11 Флукс навојка и флукс намотаја 196
Флукс кроз један навојак статора 198
Флукс кроз један навојак ротора 199
Флукс намотаја 201
Вектор флукса намотаја 205
2.18.12 Положај осе намотаја и правац вектора флукса. 206
2.18.13 Векторски производ флукса статора и ротора 207
2.18.14 Услови за стварање константног момента 210
2.18.15 Веза момента и димензија машине..... 213
2.18.16 Обртно магнетско поље 215
Систем са два ортогонална намотаја 215
Систем са три намотаја 220
2.19 Електромоторне силе индуковане у намотајима 223
2.19.1 Подела електромоторних сила..... 224
2.19.2 Електромоторна сила навојка..... 224
Израчунавање првог извода флукса у навојку 225
Збрајање електромоторних сила проводника 226
Равнотежа напона у навојку 227
Облик електромоторне силе 228
Ефективна вредност електромоторне силе 229
2.19.3 Електромоторна сила намотаја 229
Концентрисани намотај 230
Расподељени намотај 230
Тетивни навојни сачинилац 231
Појасни навојни сачинилац 236
Навојни појас и елиминација виших хармоника 238
2.19.4 Електромоторна сила у сложеном намотају..... 242
2.20 Виши хармоници..... 243
2.20.1 Електромоторна сила у идеалном намотају..... 244
Одређивање флукса у једном навојку 246
Простопериодично расподељени намотај 247
Флукс намотаја са произвољном расподелом 249

2.20.2 Одређивање виших хармоника 250
2.20.3 Електромоторна сила намотаја 252
Елиминација виших хармоника 252
Флукс намотаја 252
Електромоторна сила 253

3 Машине за једносмерну струју 257
3.1 Конструкција и принцип рада 259
3.2 Конструкција статора 259
3.3 Машине са независном побудом 260
3.4 Струја у проводницима ротора 261
3.5 Механички комутатор 262
3.6 Намотај ротора 264
3.7 Комутација 269
3.8 Функција комутатора 272
3.9 Начин формирања намотаја ротора 273
3.10 Проблеми са комутацијом 278
3.11 Реакција индукта 282
3.12 Струјна и магнетска кола 284
3.13 Магнетска кола 285
3.14 Струјна кола 285
3.15 Директна и попречна оса машине 289
Векторски приказ флуксева појединих намотаја. 290
Резултантни флуксеви статора и ротора 290
Резултантни флукс машине 290
3.16 Електромоторна сила и моменат 292
3.17 Електромоторна сила арматурног намотаја 292
3.18 Стварање електромагнетског момента 295
3.19 Изрази за моменат и електромоторну силу 296
Одређивање електромоторне силе E_a 298
Одређивање момента M_{em} 299
3.20 Математички модел машине за једносмерну струју 300
3.21 Једначина равнотеже напона у намотају побуде 301
3.22 Једначина равнотеже напона у намотају ротора 303
3.23 Промена угаоне брзине обртања 305
3.24 Математички модел 306
3.25 Модел машине са сталним магнетима 307
3.26 Графички приказ математичког модела 307
3.27 Управљање моментом 309
3.28 Заменска шема за устаљена стања 310
3.29 Механичка карактеристика 312
Стабилна равнотежа 315

3.30 Стрмина карактеристике и брзина празног хода 316
3.31 Промена брзине обртања 317
3.32 Генератор за једносмерну струју 320
3.33 Напајање мотора за једносмерну струју 322
3.33.1 Утврђивање карактеристика извора за напајање арматуре 322
3.33.2 Четири квадранта у *M* - Ω и *U* - *I* дијаграму 324
I квадрант: 324
II квадрант: 325
III квадрант: 325
IV квадрант: 325
3.33.3 Четвороквадрантни енергетски претварач 325
3.33.4 Промена арматурног напона применом ширинске модулације 329
Потреба за променом арматурног напона. 330
Ширинска модулација 331
Средња вредност поворке импулса 331
Наизменичне компоненте напона 332
Нископропусна природа електричних машина 332
3.33.5 Валовитост струје 333
3.33.6 Топологије енергетских претварача 338
3.34 Основне карактеристике 341
3.34.1 Номинални напон 341
3.34.2 Механичка карактеристика 342
3.34.3 Природна карактеристика 342
3.34.4 Номинална струја 342
3.35 Термички модел машине и интермитенција 343
3.36 Номинални флукс 348
3.37 Номинална брзина 348
3.38 Слабљење поља 349
Рад са брзинама већим од номиналне 349
Промена момента и снаге у зони слабљења поља 350
Промена флукса у зони слабљења поља 351
Електромоторна сила у зони слабљења поља 351
Промена струје у зони слабљења поља 352
Промена момента у зони слабљења поља 352
Промена снаге у зони слабљења поља 352
Потреба за радом у зони слабљења поља 352
3.39 Транзијентна карактеристика 353
3.40 Експлоатациона карактеристика 353
3.41 Губици и биланс снаге 354
Снага извора 354

Губици у бакру побудног намотаја 355
Губици у бакру арматурног намотаја 355
Снага електромеханичког претварања 355
Губици у гвожђу 355
Губици у механичком систему (P_F) 355
Губици услед обртања ($P_{Fe}+P_F$) 356
Механичка снага 356
3.42 Номиналне и називне величине ... 358
3.43 Подаци који стоје на натписној плочици машине ... 358

4 Асинхроне машине ... 361
4.1 Елементи конструкције и принципи рада ... 363
4.2 Магнетско коло ... 364
4.3 Струјно коло ... 365
4.4 Кавезни и намотани ротор ... 367
4.5 Трофазни намотај статора ... 368
4.6 Обртно магнетско поље ... 370
4.7 Принципи развијања момента ... 372
4.8 Зависност момента од клизања и флукса ... 374
4.9 Моделирање трофазних асинхроних машина ... 375
4.10 Структура модела ... 376
4.11 Трофазне и двофазне машине ... 377
4.12 Кларкина трансформација ... 381
4.12 Двофазни еквивалент ... 383
4.13 Инваријантност ... 385
4.13.1 Кларкина трансформација са $K = 1$ ... 389
4.13.2 Кларкина трансформација са $K = (2/3)^{0,5}$ ... 389
4.13.3 Кларкина трансформација са $K = 2/3$ ... 390
4.14 Свођење на двофазни еквивалент ... 390
4.15 Модел статора ... 392
4.16 Једначине равнотеже напона у намотајима статора ... 393
4.17 Моделирање роторског кавеза ... 394
4.18 Једначине равнотеже напона у намотају ротора ... 396
4.19 Матрица индуктивности ... 397
4.20 Флукс расипања и међусобни флукс ... 397
4.21 Спрега статора и ротора ... 399
4.22 Елементи матрице индуктивности ... 400
4.23 Свођење роторских величина на страну статора ... 401
4.24 Једначине модела ... 403
4.25 Недостаци модела ... 404
4.26 Модел машине у синхроном координатном систему ... 407
4.27 Паркова обртна трансформација ... 408

4.28 Матрица обртне трансформације 410
4.29 Трансформисање роторских величина у *dq* систем 411
4.30 Представљање вектора комплексним бројем 413
Упрошћени запис обртне трансформације 413
4.31 Матрица индуктивности у *dq* систему 414
4.32 Једначине равнотеже напона у *dq* систему 416
4.33 Једначине модела у *dq* систему 417
4.34 Улазна снага 419
4.35 Израз за момент 419
4.36 Релативно клизање 420
4.37 Губици и механичка снага 420
4.38 Рад асинхроних машина у устаљеном стању 422
4.39 Аналогија са обртним трансформатором 425
4.40 Одређивање струја и момента из заменске шеме 427
4.41 Одређивање момента у устаљеном стању 429
4.42 Рад са релативним вредностима 432
4.43 Сведена вредност динамичког момента 436
4.44 Одређивање параметара заменске шеме 438
Мерење отпорности ротора 443
4.45 Анализа механичке карактеристике 445
4.46 Рад у области малих клизања 448
4.47 Рад у области великих клизања 450
4.48 Полазак мрежом напајане машине 451
4.49 Превални моменат и превално клизање 451
4.50 Клосов образац 453
4.51 Стабилна и лабилна равнотежа 454
4.52 Област трајног рада 456
4.53 Губици у асинхроним машинама и биланс снаге 457
4.54 Губици у асинхроним машинама 458
4.55 Снага обртног поља и унутрашња механичка снага 458
4.56 Веза напона и флуксева 460
4.57 Биланс снаге у моторном режиму рада 460
4.58 Промена брзине мрежом напајане машине 462
4.59 Ефекти промене амплитуде статорског напона 463
4.60 Машине са намотаним ротором 465
4.61 Промена броја полова 468
Утицај броја пари полова на изразе за брзину и м 471
4.62 Предности и мане вишеполних машина 471
Вишеполне машине напајане из статичких прет 472
Мрежом напајане вишеполне машине 473
Недостаци вишеполних машина 473
4.63 Двобрзински намотај статора 476

4.64 Ознаке за брзину и учестаност 478
4.65 Напајање из извора променљиве учестаности 479
4.66 Карактеристике извора променљиве учестаности 480
4.67 Топологија енергетског претварача 481
4.68 Импулсно ширинска модулација 481
4.69 Промена средње вредности фазног напона 482
4.70 Простопериодична промена напона 483
4.71 Импулсна природа напона 484
4.72 Валовитост струје код импулсног начина напајања 486
4.73 Фреквенцијски регулисане машине 488
4.74 Слабљење поља 490
4.75 Експлоатационе и транзијентне карактеристике 492
4.76 Граничне вредности величина у трајном раду 493
RI компензација 495
Критична брзина 496
4.77 Конструкција асинхроних машина 498
4.77.1 Мрежно напајане машине 498
4.77.2 Машине за рад са променљивом учестаношћу 501

5 Синхроне машине 503
5.1 Елементи конструкције и принципи рада 504
5.2 Намотаји статора 504
5.3 Обртно поље 505
5.4 Флукс побуде 508
5.5 Конструкција синхроних машина 511
5.6 Магнетско коло статора 511
5.7 Конструкција ротора 513
5.8 Напајање побудног намотаја са стране статора 514
5.9 Напајање побуде помоћу обртног трансформатора 515
5.10 Ротор са сталним магнетима 516
5.11 Основне карактеристике сталних магнета 518
5.12 Магнетска кола са сталним магнетима 520
5.13 Утицај начина уградње магнета на параметре машине 521
5.14 Утицај начина уградње магнета на карактеристике 523
5.15 Моделирање синхроних машина 524
5.16 Магнетопобудна сила статора 525
5.17 Двофазни еквивалент 527
5.18 Кларкина 3Ф/2Ф трансформација 528
5.19 Матрица индуктивности и равнотежа напона 531
5.20 Обртна трансформација 532
5.21 Матрица индуктивности 534

5.22 Приказивање вектора комплексним бројем 536
5.23 Једначине равнотеже напона..... 536
5.24 Модел електричног подсистема изотропне машине 538
5.25 Моменат изотропне синхроне машине 540
5.26 Синхроне машине са анизотропним ротором..... 541
5.27 Релуктантни момент..... 543
5.28 Релуктантни мотор 544
5.29 Анализа рада синхроне машине у устаљеном стању .. 546
5.30 Једначине равнотеже напона у устаљеном стању..... 546
5.31 Заменска шема 548
5.32 Вршне и ефективне вредности струја и напона..... 549
5.33 Фазорски дијаграм изотропне синхроне машине..... 551
5.34 Фазорски дијаграм анизотропне синхроне машине..... 555
5.35 Моменат анизотропне синхроне машине 556
5.36 Промена момента у функцији угла снаге 557
5.37 Механичка карактеристика синхроне машине 558
5.38 Рад синхроне машине напајане из круте мреже..... 559
5.39 Рад синхроног генератора у устаљеном стању 560
Увећање снаге турбине 561
Увећање мрежне учестаности 561
Промена реактивне снаге и напона 562
Промена угла снаге 562
5.40 Временске константе електричног и механичког подсистема..... 565
5.41 Њихање синхроне машине 565
5.42 Пригушење осцилација *LC* кола..... 568
5.43 Пригушење осцилација синхроне машине 571
5.44 Пригушни намотај..... 571
5.45 Кратак спој синхоне машине..... 573
Једносмерна компонента 574
Одређивање струје I_{SK1} 575
Одређивање струје I_{SK2} 576
Одређивање струје I_{SK3} 579
5.46 Одређивање струје квара коришћењем матрице $\underline{L}$ 580
5.47 Транзијентне и субтранзијентне појаве 583
Интервал 1 583
Интервал 2 583
Интервал 3 583
5.48 Машине напајане из извора променљиве учестаности 584
5.49 Принципи управљања моментом..... 585
5.50 Топологија претварача за напајање 586
5.51 Промена струје статора 587

5.52 Рад синхроне машине у области слабљења поља 589
5.53 Експлоатациона и транзијентна карактеристика 591

Литература 595