ПРЕДГОВОР

Овај уџбеник намијењен је студентима који се по први пут срећу са проблематиком електричних машина. Градиво обрађено у уџбенику засновано је на предавањима и вјежбама које сам држао на Електротехничком факултету у Бањој Луци и Електротехничком факултету у Источном Сарајеву. Изложена материја прати одговарајући наставни програм на предмету Електричне машине 1 Електротехничког факултета у Бањој Луци.

Потреба за писањем овог уџбеника настала је првенствено због усвајања нових наставних планова по којима се Електричне машине слушају на нижим годинама студија, са смањеним бројем часова и дјелимично редукованим планом и програмом. Увјерио сам се да многи студенти нису у довољној мјери стекли потребна предзнања за ову комплексну област, па тако, и поред велике воље, тешко могу да прате градиво из Електричних машина. Градиво је обрађено тако да од студената тражи елементарно познавање основа електротехнике и математике.

Уџбеник је подијељен у четири цјелине: увод у електричне машине, основе електромеханичког претварања енергије, машине једносмјерне струје, и енергетски трансформатори.

У првој глави наведен је значај електричних машина и њихова улога у електроенергетском систему, након чега слиједи преглед основних физичких закона неопходних за изучавање електричних машина. Обрађени су основни елементи конструкције струјних и магнетских кола електричних машина за једносмјерну и наизмјеничну струју и проблеми у њиховој практичној реализацији. Након тога, пажња је посвећена анализи основних и секундарних појава у струјним и магнетским колима заједничким за све врсте електричних машина. Излагање је заокружено анализом термичких појава и примјеном закона сличности неопходним за основне димензионе и економске прорачуне електричних машина.

У другој глави обрађен је процес електромеханичког претварања енергије који је, уз одговарајуће идеализације, разрађен за случајеве обртних и линеарних електричних машина. Детаљно су анализирани кључни ефекти генерисања момента претварања обртних електромеханичких претварача, а затим је обрађена примјена формираног математичког апарата на типичне конфигурације које се сусрећу у пракси. На крају главе дат је детаљан поступак прорачуна индуктивности електричних машина.

Трећа глава је посвећена машинама за једносмјерну струју. Описани су елементи конструкције, принцип рада, начини практичне реализације и поступци за сузбијање неизбјежних негативних ефеката везаних за проблеме комутације. Анализиране су све битне врсте машина једносмјерне струје, њихове механичке карактеристике, начини управљања, примјена, одговарајући модели, те је на крају изложен динамички модел машине једносмјерне струје који служи као основа за даљу анализу и пројектовање одговарајућих регулационих структура.

Четврта глава обрађује енергетске трансформаторе. Излагање почиње прегледом различитих врста и примјена енергетских трансформатора у електроенергетском систему, карактеристичних елемената конструкције и технологије израде, након чега слиједи извођење одговарајућих математичких модела идеализованог и реалног енергетског трансформатора. Обрађени су процеси магнетисања монофазних и трофазних трансформатора за различите врсте спреге и различите конфигурације магнетског кола. Слиједи анализа типичних радних режима енергетских трансформатора, тј. прорачуни пада напона, степена искоришћења снаге, расподјеле оптерећења паралелно везаних трансформатора, да би се након тога пажња посветила посебним варијантама енергетских трансформатора: аутотрансформаторима, тронамотајним, регулационим и мјерним трансформаторима. Затим је дата анализа несиметричних режима рада трофазних

енергетских трансформатора. На крају су дате основе анализе прелазних појава, математичка анализа и начини рјешавања проблема у пракси.

С обзиром на то да електричне машине имају веома дуг радни вијек, да је просјечна старост машина у експлоатацији на нашим просторима између 20 и 40 година, будући инжењери електроенергетике морају се оспособити за рад са технологијама које потичу из неколико генерација. Развој рачунарских метода пројектовања и технологијā изградње, те примјена нових материјала и техника управљања, поставила је додатне изазове пред будуће инжењере. Управо зато овај уџбеник треба да им послужи као полазни уџбеник, како би након савладавања елементарних знања могли да се упусте у савладавање обимне стручне литературе и дубље проучавање појединих проблема.

Посебну захвалност дугујем младом асистенту, Ђорђу Лекићу, дипл. инж, који ми је помогао током техничке припреме текста, слика и цртежа, као и што је дао многобројне драгоцјене коментаре и сугестије. Такође, захваљујем колегама са Електротехничког факултета у Источном Сарајеву, проф. др Миломиру Шоји и проф. др Слободану Лубури, те колегама са Факултета техничких наука у Новом Саду, проф. др Дарку Марчетићу и др Марку Гецићу на подршци и корисним примједбама. Антонела Плиснић, лектор, својим сугестијама је допринијела квалитету и разумљивости текста, на чему сам јој веома захвалан.

Захваљујем рецензентима, проф. др Слободану Вукосавићу са Електротехничког факултета у Београду и проф. др Верану Васићу са Факултета техничких наука у Новом Саду, на пажљивом читању рукописа.

Позивам све читаоце, првенствено студенте, да ми доставе све своје примједбе, сугестије и коментаре.

У Бањој Луци, септембра 2016.

Аутор

САДРЖАЈ

1. УВОД У ЕЛЕКТРИЧНЕ МАШИНЕ 1

1.1. Значај и примјена електричних машина 2

1.2. Енергетски биланси електричних машина 4

1.3. Електромагнетно поље у машини 7

1.4. Основни физички закони у електричним машинама 7

1.4.1. Амперов закон 8

1.4.1.1. Примјена Амперовог закона у електричним машинама 8

1.4.1.2. Магнетне особине материјала 8

1.4.1.3. Магнетни флукс 10

1.4.1.4. Гранични услови 11

1.4.1.5. Аналогије магнетних и електричних величина 12

1.4.2. Фарадејев закон 17

1.4.2.1. Електромоторне силе трансформације 18

1.4.2.2. Магнетна кола са константним и промјењивим флуксом 19

1.4.2.3. Електромоторне силе кретања 21

1.4.3. Сила на проводник са струјом 22

1.4.4. Ротационо кретање 24

1.4.5. Механичка снага и моментна раван 27

1.4.5.1. Моментне карактеристике реактивних оптерећења 28

1.4.5.2. Моментне карактеристике потенцијалних оптерећења 28

1.4.6. Аналогије величина линеарног и ротационог кретања 30

1.4.7. Примјена основних физичких закона у електричним машинама 30

1.5. Основни облици струјних и магнетних кола ротационих машина 33

1.5.1. Машине са истуреним статором 36

1.5.2. Машине са истуреним ротором 38

1.5.3. Машине са цилиндричним статором и ротором 40

1.5.4. Осврт на практичне проблеме 42

1.6. Трофазне машине и обртно магнетно поље 43

1.6.1. Генератори трофазних система напона 43

1.6.2. Обртно поље полифазног намотаја 45

1.6.3. Пулсирајуће поље 48

1.7. Магнетно коло машине 49

1.7.1. Магнећење феромагнетних материјала 50

1.7.2. Утицај нелинеарности на таласне облике напона, струје и флукса 52

1.7.3. Губици усљед хистерезиса 56

1.7.4. Губици усљед вртложних струја 58

1.7.5. Укупни губици у гвожђу и еквивалентне синусоиде магнећења 60
1.8. Струјно коло машине 62
1.8.1. Промјена отпорности намотаја 63
1.8.1.1. Промјена отпорности намотаја са температуром 63
1.8.1.2. Промјена отпорности намотаја због површинског ефекта 64
1.8.2. Губици у струјном колу 64
1.9. Губици усљед трења и вентилације 66
1.10. Структура губитака и степен искориштења снаге 66
1.11. Термички прорачун електричних машина 67
1.11.1. Класа изолације електричних машина 67
1.11.2. Термички прорачун машине као термички хомогеног тијела 68
1.12. Закон сличности електричних машина 74

2. ОСНОВЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧКОГ ПРЕТВАРАЊА ЕНЕРГИЈЕ 76
2.1. Општа блок шема електричне машине 76
2.2. Идеализације у моделовању електричних машина 77
2.3. Једначине појединих подсистема модела машине 78
2.3.1. Једначине напонске равнотеже и флуксних обухвата 78
2.3.2. Електрични пролаз P_e 80
2.3.3. Електрични излаз g_e 81
2.3.4. Електрична акумулација a_e 81
2.3.5. Механички пролаз P_m 82
2.3.6. Механички излаз g_m 82
2.3.7. Механичка акумулација a_m 82
2.3.8. Снага и момент конверзије 82
2.3.9. Њутнова једначина ротационог кретања 83
2.4. Преглед једначина математичког модела ротационих машина 84
2.5. Математички модел линеарних електричних машина 85
2.6. Оцјена квалитета момента електричних машина 85
2.6.1. Једначина слагања брзина цилиндричних машина 86
2.6.2. Ротационе машине са истурењима 91
2.7. Анализа момента конверзије типичних електричних машина 93
2.7.1. Синхрона релуктантна машина 93
2.7.2. Синхрона машина са цилиндричним статором и ротором 96
2.7.3. Синхрона машина са истуреним ротором и побудом 98
2.7.4. Асинхрона машина 100
2.7.5. Машина једносмјерне струје и универзални мотор 102
2.7.6. Једнофазне асинхроне машине 105

2.8. Прилог: Индуктивности ротационих машина 105
2.8.1. Одређивање индуктивности ротационих машина 105
2.8.1.1. Индуктивности машине са цилиндричним статором и ротором 107
2.8.1.2. Индуктивност машине са истурењем и једним намотајем 108
2.8.1.3. Индуктивности машине са истурењем и два намотаја 111
2.8.2. Индуктивности карактеристичних конфигурација машина 113

3. МАШИНЕ ЗА ЈЕДНОСМЈЕРНУ СТРУЈУ 117
3.1. Елементи конструкције и принцип рада 117
3.2. Конструкција намотаја побуде 121
3.3. Конструкција намотаја ротора 122
3.4. Реакција индукта 128
3.4.1. Моделовање реакције индукта 129
3.4.2. Начини за умањење и елиминацију реакције индукта 132
3.4.2.1. Помјерање четкица у стварну неутралну зону 132
3.4.2.2. Додавање компаундног намотаја 133
3.4.2.3. Додавање компензационог намотаја 133
3.4.2.4. Додавање помоћних полова 135
3.4.3. Осврт на практичне проблеме 135
3.5. Комутација 136
3.6. Индуковане електромоторне силе 139
3.7. Електромагнетни момент машине једносмјерне струје 142
3.8. Математички модел и еквивалентна шема за устаљено стање 142
3.9. Врсте машина за једносмјерну струју 144
3.9.1. Машине са независном побудом 145
3.9.1.1. Моментна карактеристика 146
3.9.1.2. Управљање брзином обртања у широком опсегу 150
3.9.1.3. Покретање мотора једносмјерне струје са независном побудом 154
3.9.1.4. Генератор једносмјерне струје са независном побудом 155
3.9.1.5. Биланс снаге и структура губитака 155
3.9.2. Машине са паралелном побудом 156
3.9.2.1. Моментна карактеристика 157
3.9.2.2. Генератор једносмјерне струје са паралелном побудом 159
3.9.3. Машине са редном побудом 160
3.9.3.1. Управљање брзином обртања машина са редном побудом 162
3.9.3.2. Утицај нелинеарности магнетног кола 163
3.9.3.3. Универзални мотор 164
3.9.4. Машине са сложеном побудом 165

3.9.5. Динамички модел машине једносмјерне струје ... 168
3.9.5.1. Симулација рада машине једносмјерне струје ... 169
3.9.5.2. Нормализовани динамички модел ... 171

4. ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ ... 175
4.1. Основни појмови о енергетским трансформаторима ... 175
4.1.1. Основни елементи конструкције и врсте трансформатора ... 179
4.1.2. Значај и примјена енергетских трансформатора ... 181
4.1.2.1. Блок трансформатори ... 181
4.1.2.2. Преносни и интерконективни трансформатори ... 182
4.1.2.3. Тронамотајни трансформатори ... 182
4.1.2.4. Дистрибутивни трансформатори ... 183
4.1.2.5. Мјерни трансформатори ... 183
4.1.2.6. Регулациони трансформатори ... 184
4.1.2.7. Специјални трансформатори ... 184
4.1.3. Идеални трансформатор ... 185
4.2. Елементи конструкције трансформатора ... 188
4.2.1. Магнетно коло трансформатора ... 193
4.2.2. Струјно коло трансформатора ... 199
4.2.2.1. Конструкција и врсте намотаја ... 199
4.2.2.2. Означавање намотаја ... 202
4.3. Уљни трансформатори ... 204
4.3.1. Конзерватор и Бухолц реле ... 208
4.3.2. Хлађење уљних трансформатора ... 210
4.4. Суви трансформатори ... 212
4.5. Трофазни трансформатори и спреге ... 213
4.5.1. Основни типови спрега трофазних трансформатора ... 214
4.5.2. Сатни број трофазног трансформатора ... 217
4.5.2.1. Сатни бројеви 0, 4 и 8 ... 219
4.5.2.2. Сатни бројеви 6, 10 и 2 ... 221
4.5.2.3. Сатни бројеви 1, 5 и 9 ... 223
4.5.2.4. Сатни бројеви 11, 3 и 7 ... 225
4.5.3. Спрега сломљена звијезда ... 227
4.5.4. Осврт на практичне проблеме при спрезању трансформатора ... 231
4.6. Празан ход и магнећење трансформатора ... 233
4.6.1. Основни хармоник струје магнећења ... 233
4.6.2. Трансформатор као извор виших хармоника ... 234
4.6.2.1. Трећи хармоник струје магнећења ... 236

4.6.2.2. Трећи хармоник флукса магнећења 237
4.6.2.3. Трећи хармоник индуковане електромоторне силе 237
4.6.3. Магнећење трансформатора спреге Ynyn и Yny 238
4.6.4. Магнећење трансформатора спреге Yyn или Yy 240
4.6.5. Магнећење трансформатора са барем једном страном у троуглу 244
4.6.6. Терцијарни намотај 245
4.7. Еквивалентна шема трансформатора 246
4.7.1. Еквивалентна шема за простопериодични режим 251
4.7.2. Динамички модел трансформатора 252
4.7.3. Одређивање параметара еквивалентне шеме трансформатора 254
4.7.3.1. Оглед празног хода 254
4.7.3.2. Оглед кратког споја 256
4.7.4. Еквивалентна шема трофазног трансформатора 260
4.7.5. Фазорски дијаграм енергетског трансформатора 263
4.8. Пад напона на трансформатору 264
4.8.1. Прорачун пада напона 264
4.8.2. Капов дијаграм 268
4.9. Губици и степен искоришћења снаге трансформатора 270
4.9.1. Губици у гвожђу трансформатора 271
4.9.2. Губици у бакру трансформатора 272
4.9.3. Биланс снага енергетског трансформатора 275
4.9.4. Степен искоришћења снаге 276
4.9.5. Осврт на практичне проблеме везане за економичност 278
4.10. Паралелан рад трансформатора 279
4.10.1. Расподјела оптерећења трансформатора у паралелном раду 282
4.10.2. Спрезање трофазних трансформатора у паралелни рад 284
4.10.3. Осврт на практичне проблеме у паралелном раду 286
4.11. Тронамотајни трансформатори 287
4.11.1. Конструкција тронамотајних трансформатора 288
4.11.2. Одређивање параметара еквивалентне шеме 290
4.12. Аутотрансформатори 295
4.12.1. Пролазна и типска снага аутотрансформатора 296
4.12.2. Параметри еквивалентне шеме аутотрансформатора 298
4.12.3. Трофазни аутотрансформатори 300
4.12.4. Лабораторијски аутотрансформатори 301
4.13. Регулациони трансформатори 303
4.13.1. Регулациони трансформатори за подужну регулацију напона 304
4.13.1.1. Подужна регулација без оптерећења 306

4.13.1.2. Подужна регулација под оптерећењем 308
4.13.1.3. Допунски трансформатори за регулацију под оптерећењем 312
4.13.1.4. Еквивалентна шема трансформатора са подужном регулацијом 313
4.13.2. Регулациони трансформатори за попречну регулацију напона 316
4.13.3. Регулациони трансформатори за подужну и попречну регулацију 318
4.14. Мјерни трансформатори 320
4.14.1. Напонски мјерни трансформатори 321
4.14.2. Струјни мјерни трансформатори 324
4.14.3. Осврт на практичне проблеме при употреби мјерних трансформатора 330
4.15. Несиметрични режими енергетских трансформатора 332
4.15.1. Еквивалентне шеме трансформатора за несиметричне режиме 333
4.15.1.1. Еквивалентне шеме за директни и инверзни систем 333
4.15.1.2. Еквивалентне шеме за нулти систем 334
4.15.1.3. Утицај облика магнетног кола на нулту реактансу магнећења 335
4.15.1.4. Нулте компоненте струје и флукса спрега Yyn, Ynyn, Dyn 338
4.15.1.5. Нулте компоненте струје и флукса спрега Yy и Dd 344
4.15.1.6. Осврт на практичне проблеме једнофазне несиметрије 344
4.15.2. Несиметрични режими рада тронамотајних трансформатора 344
4.15.3. Спрега сломљена звијезда у несиметричним режимима 346
4.15.4. Одређивање импедансе нултог система трансформатора 346
4.15.5. Осврт на практичне проблеме при несиметричном раду 347
4.16. Прелазни процеси у трансформаторима 349
4.16.1. Укључење трансформатора 349
4.16.1.1. Анализа прелазног процеса укључења трансформатора 354
4.16.1.2. Осврт на практичне проблеме при укључењу трансформатора 358
4.16.2. Ударни кратак спој 361
4.16.2.1. Анализа прелазног процеса ударног кратког споја 361
4.16.2.2. Механичке силе у кратком споју 365
4.16.2.3. Осврт на практичне проблеме при појави ударних кратких спојева 368
4.16.3. Пренапонске појаве 369
4.16.3.1. Упрошћена анализа појаве пренапона на трансформатору 370
4.16.3.2. Осврт на практичне проблеме при појави пренапона 374
4.16.4. Прилог: Поступак рјешавања једначина за прелазне процесе 376
4.16.4.1. Диференцијална једначина за флукс укључења 376
4.16.4.2. Диференцијална једначина за струју кратког споја 378

5. ЛИТЕРАТУРА 381

1. УВОД У ЕЛЕКТРИЧНЕ МАШИНЕ

Електричне машине су уређаји који посредством електромагнетног поља претварају електричну енергију у механичку или механичку енергију у електричну. У првом случају их називамо *моторима*, а у другом *генераторима*. Процес претварања енергије из електричног у механички облик, односно механичког у електрични, назива се *електромеханичка конверзија енергије*. У електричне машине у ширем смислу спадају и *трансформатори*, који *трансформишу* енергију из електричног облика опет у електрични облик, без електромеханичке конверзије. На Сл. 1.1 приказане су двије велике електричне машине: синхрони генератор у термоелектрани и енергетски трансформатор у преносној мрежи.



а)



б)

Сл. 1.1. Фотографије електричних машина: а) синхрони генератор у термоелектрани (353 MVA, 20 kV, 3000 o/min) *и б) енергетски трансформатор* (300 MVA, 400/110 kV)

Електричне машине граде се за веома велике распоне снага, струја, напона и брзина, као и за веома различите начине уградње и експлоатације. Снаге машина крећу се од неколико μW у минијатурним уређајима до преко 1000 MW у великим електранама. Напони машина расту са растом снаге, и крећу се у опсегу од неколико mV у малим машинама, 25 kV у генераторима, па све до MV у великим трансформаторима. Брзине обртања достижу и до 100 000 o/min. На Сл. 1.2а приказани су дистрибутивни трансформатори, на Сл. 1.2б асинхрони мотор, а на Сл. 1.2в различите машине малих снага.



а)



б)

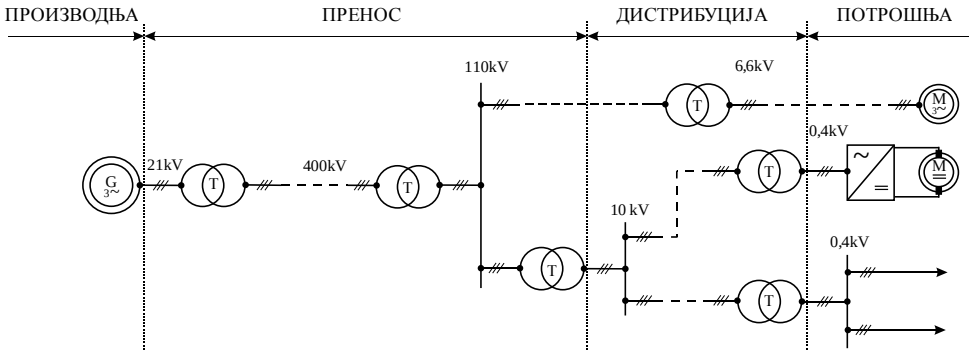


в)

Сл. 1.2. Фотографије електричних машина: а) дистрибутивни трансформатори 20kV/400V*; б) асинхрони мотор* 380 V 750 W *и в) машине малих снага*

1.1. Значај и примјена електричних машина

Електричне машине су кључни елементи у свим сегментима електроенергетског система (ЕЕС): производњи, преносу, дистрибуцији и потрошњи електричне енергије. На Сл. 1.3 приказана је типична структура једног ЕЕС-а и назначене су улоге појединих машина у њему. Машине у електроенергетском систему су генератори (G), трансформатори (T) и мотори (M).

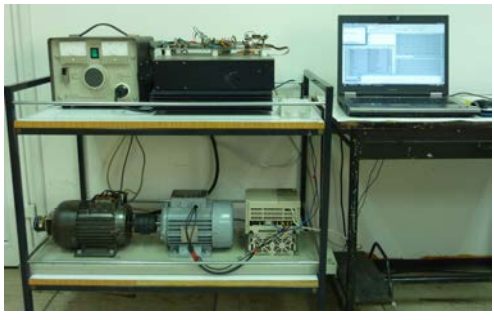


Сл. 1.3. Структура електроенергетског система

Електрична енергија добија се конверзијом механичке енергије у електричну помоћу генератора у хидро, термо, вјетро и нуклеарним електранама. Врло су ријетки изузеци када се електрична енергија добија директно, без посредовања механичке енергије (нпр. у фотонапонским електранама). Директни процеси конверзије углавном не могу да обезбиједе значајније количине енергије и често су непрактични. Због тога се највећа количина електричне енергије добија индиректно, претварањем енергије примарних извора (фосилних горива, хидро потенцијала воде итд.) прво у механичку енергију (у турбинама), а затим у електричну енергију, у електричним генераторима.

Трансформаторима се мијењају међусобни односи улазних и излазних напона и струја, и на тај начин се значајно смањују губици у преносу и дистрибуцији, повећавањем напона и смањењем струје кроз електроенергетску мрежу. Након што се енергија транспортује до потрошачких центара, наредном трансформацијом се поново мијења однос напона и струја тако да се електрична енергија користи при безбједнијим напонским нивоима. Трансформатори спадају у најбројније електричне машине у ЕЕС-у. Електрична енергија од мјеста производње до мјеста потрошње обично прође кроз најмање три трансформације, на границама између подсистема производња-пренос, пренос-дистрибуција, дистрибуција-потрошња.

На крају, највећа количина електричне енергије се у потрошњи претвори у механичку енергију у електричним моторима (у развијеним земљама и преко 60%). Од електричних мотора се тражи да буду управљани на одговарајући начин (са прецизним управљањем брзином, односно контролом кретања) уз што већу ефикасност, те чине основни елемент електромоторних погона. У савременим електромоторним погонима електрични мотор напајан је из сложеног претварача енергетске електронике, којим се управља помоћу дигиталног сигналног микропроцесора високих перформанси (Сл. 1.4).



Сл. 1.4. Окружење за развој регулисаног електромоторног погона са асинхроним мотором