ПРЕДГОВОР

Књига *Електричне машине 2* настала је на основу предавања која сам током претходних десет година изводио на Електротехничким факултетима Универзитета у Бањој Луци и Универзитета у Источном Сарајеву. У књизи су обрађене класичне обртне машине за наизмјеничну струју, синхроне и асинхроне машине, у складу са одговарајућим наставним програмима та два факултета.

Уџбеник је организован у три цјелине: Увод у обртне машине за наизмјеничну струју, Синхроне машине и Асинхроне машине. Конципиран је првенствено као основни материјал за студенте који се по први пут срећу са проблематиком синхроних и асинхроних машина, али, осим као основни уџбеник, може да послужи и за стицање дубљих знања из области развоја и примјене динамичких модела синхроних и асинхроних машина. Градиво у овом уџбенику се надовезује на градиво из уџбеника *Електричне машине 1* истог аутора. За праћење излагања потребно је познавање основних физичких закона који описују рад електричних машина, принципа рада машина једносмјерне струје и енергетских трансформатора, те разумијевање општег процеса електромеханичког претварања енергије.

Прва глава обрађује основне и заједничке појмове о електричним машинама наизмјеничне струје и представља основу за главе које слиједе. Прво су обрађени основни појмови о обртним машинама наизмјеничне струје (значај и примјена, елементи конструкције, обртна електромагнетна поља), а затим је дата рекапитулација основних физичких закона на којима се заснива њихов рад. Примјењујући основне физичке законе, дата су образложења за избор потребних облика и карактеристика струјних и магнетних кола, те је описан је начин добијања Теслиног обртног поља и његова полифазорска представа. Дат је преглед типичних конфигурација струјних и магнетних кола које се користе при практичној изради електричних машина наизмјеничне струје. У наредна два поглавља уводног дијела детаљно је објашњен поступак прорачуна индукованих електромоторних сила у намотајима електричних машина, те поступак прорачуна одговарајућих магнетопобудних сила. Ова два прорачуна су постепено објашњена, почевши од елементараног проводника и навојка, преко концентрисаног намотаја, до расподијељеног двослојног намотаја са скраћеним кораком. У излагању су обухваћени и секундарни ефекти који се при томе јављају, односно виши хармоници и сложеност израде, те конструкциони захвати којима се ови ефекти умањују. Излагање је заокружено осврту на практичну израду и закон сличности, који важе за све врсте обртних машина за наизмјеничну струју.

Друга глава се бави синхроним машинама, а организована је у шест поглавља. Прво поглавље посвећено је уводу у синхроне машине, гдје су истакнути њихов значај и примјена, поступак усвајања референтних смјерова снага за генераторски и моторски режим рада, те класификација према врсти мреже и начину израде ротора. У другом поглављу обрађене су синхроне машине са цилиндричним ротором: конструкција и принцип рада, замјенска шема и начин одређивања параметара, структура губитака, моментна и угаона каркатеристика, те управљање активном и реактивном снагом, погонска карта, прелазни процеси при промјени оптерећења и рад на сопственој мрежи. У трећем поглављу обрађене су синхроне машине са истуреним ротором, на исти начин као и са цилиндричним, те су наглашене међусобне сличности и разлике. Посебна пажња посвећена је релуктантној компоненти момента која је присутна код машина са истуреним ротором и која модификује њене карактеристике у односу на машине са цилиндричним ротором. Четврто поглавље описује кључне аспекте експлоатације синхроних машина у пракси: синхронизацију и покретање, рад на крутој мрежи, помоћне системе генератора, синхроне моторе и компензаторе, те најбитније врсте специјалних синхроних машина. У петом поглављу изведен је динамички модел синхроне машине који служи за анализу прелазних процеса примјеном рачунарских метода. Модел је изведен полазећи од општег модела електромеханичког претварача, а затим, примјеном

теорије просторних вектора, трансформисан у синхроно-ротирајући координатни систем. Добијени модел је проширен примјеном на синхроне машине са перманентним магнетима на ротору, које се у последњих неколико година све више користе. Објашњен је начин израде рачунарских симулација добијених модела за различите режиме рада, те су анализирани прелазни процеси промјене оптерећења и трополни кратак спој. Анализа трополног кратког споја обрађена је и на начин какав се примјењује у прорачуну струја кварова у електроенергетском систему, те садржи и аналитичке изразе за струју квара, као и поступак одређивања параметара машине за прелазне режиме. У шестом поглављу ове главе налази се прилог са детаљним објашњењима извођења динамичког модела синхроне машине примјеном теорије просторних вектора.

У трећој глави обрађене су асинхроне машине. Прво су истакнути значај и примјена асинхроних машина, а затим су објашњени елементи конструкције и принцип рада. Изведена је одговарајућа замјенска шема, објашњен начин добијања њених параметара и структура губитака, а након тога су обрађене струјна и механичка карактеристика. Механичка карактеристика је анализирана за различите утицаје управљачких акција и дејства поремећаја. Након тога слиједи опис експлоатације асинхроне машине (покретање мрежно напајане машине, методе за управљање брзином на више начина, те асинхрони генератори повезани у електроенергетски систем и у самосталном раду). Детаљно је обрађено фреквенцијско управљање, које је у данашње вријеме најзаступљенији поступак за управљање брзином асинхроних мотора. У наставку је обрађен несиметричан рад асинхроне машине, као и карактеристичан специјални случај – једнофазне асинхроне машине. Као и за синхроне машине, излагање је заокружено извођењем динамичког модела асинхроне машине примјеном теорије просторних вектора. Полазећи од модела у фазном домену, примјеном одговарајућих трансформација, изведен је модел у општем обртном координатном систему, те два његова специјална случаја: модел у непокретном систему оса и модел у синхроно-ротирајућем координатном систему. Објашњено је како се модел примјењује за израду одговарајућих симулација на рачунару, те су на основу резултата симулација анализирани прелазни режими покретања и промјене радних режима, утицај несиметричног напајања, те примјена фреквенцијског управљања. На крају ове главе налази се опширан прилог, са детаљним објашњењима поступка извођења динамичког модела асинхроне машине, одговарајућих трансформација и одређивања параметара модела.

У књизи се налази велики број ријешених примјера, чија је сврха помоћ у лакшем разумијевању ове сложене материје. Такође, путем рачунарских симулација илустрована је примјена динамичких модела синхроних и асинхроних машина за анализу различитих прелазних и устаљених режима рада. Вјерујем да ће, осим за стицање увида у прелазне појаве у електричним машинама, ови модели бити од користи читаоцима који су заинтересовани за даљи рад у области развоја алгоритама за дигитално управљање електричним машинама и погонима.

Захваљујем рецензентима, академику проф. др Слободану Вукосавићу са Електротехничког факултета у Београду, проф. др Верану Васићу са Факултета техничких наука у Новом Саду, те проф. др Стјепану Стипетићу са Факултета електротехнике и рачунарства у Загребу, на пажљивом читању рукописа и драгоцјеним сугестијама.

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

У Бањој Луци, 2022.

Аутор

САДРЖАЈ

1. УВОД У ОБРТНЕ МАШИНЕ ЗА НАИЗМЈЕНИЧНУ СТРУЈУ 1

1.1. Основни појмови о обртним машинама наизмјеничне струје 2

1.1.1. Значај и улога електричних машина наизмјеничне струје 2

1.1.2. Основни елементи конструкције 4

1.1.3. Обртна магнетна поља и принцип рада 6

1.1.3.1. Обртно поље добијено кретањем и Теслино обртно поље 7

1.1.3.2. Принцип рада синхроних и асинхроних машина 8

1.2. Основни физички закони у електричним машинама 10

1.2.1. Фарадејев закон и индуковане електромоторне силе 10

1.2.2. Амперов закон и магнетопобудне силе 17

1.2.2.1. Избор одговарајуће контуре 18

1.2.2.2. Магнетопобудне силе концентрисаног и расподијељеног намотаја 20

1.2.3. Електромагнетни момент машина за наизмјеничну струју 22

1.3. Врсте машина за наизмјеничну струју 24

1.3.1. Машине са магнетним колом са истурењима на ротору 26

1.3.2. Машине са цилиндричним обликом магнетног кола на ротору 31

1.3.3. Машине са цилиндричним обликом магнетног кола на статору 35

1.3.3.1. Трофазни намотај и Теслино обртно поље 37

1.3.3.2. Пулсирајуће поље 40

1.3.3.3. Полифазорска представа обртних магнетних поља 41

1.3.4. Конфигурације трофазних машина и осврт на практичне проблеме 43

1.3.4.1. Синхроне машине са истуреним ротором 43

1.3.4.2. Синхроне машине са цилиндричним ротором 44

1.3.4.3. Асинхроне машине 44

1.4. Прорачун индукованих електромоторних сила 45

1.4.1. Индукована електромоторна сила навојка 46

1.4.1.1. Електромоторна сила пречничког навојка 46

1.4.1.2. Електромоторна сила скраћеног навојка 48

1.4.1.3. Трофазне електромоторне силе три пречничка навојка 48

1.4.2. Индукована електромоторна сила концентрисаног намотаја 50

1.4.3. Индукована електромоторна сила расподијељеног намотаја 50

1.4.3.1. Расподијељени намотај 50

1.4.3.2. Појасни сачинилац 52

1.4.3.3. Расподијељени једнофазни намотај у пракси 56

1.4.3.4. Расподијељени трофазни намот 57

1.4.4. Виши хармоници електромоторне силе 60

1.4.4.1. Индуковане електромоторне силе виших хармоника 61
1.4.4.2. Тетивни намотај 62
1.4.4.3. Тетивни сачинилац 63
1.4.4.4. Навојни сачинилац 65
1.4.4.5. Трофазне машине са двослојним намотајем и скраћеним кораком 68
1.5. Прорачун магнетопобудних сила 70
1.5.1. Магнетопобудна сила навојка и концентрисаног намотаја 70
1.5.2. Магнетопобудна сила расподијељеног намотаја 72
1.5.3. Магнетопобудна сила трофазног намота 76
1.5.3.1. Просторни хармоници обртне магнетопобудне силе 78
1.5.3.2. Временски хармоници обртне магнетопобудне силе 80
1.5.3.3. Просторни и временски хармоници обртне магнетопобудне силе 81
1.5.4. Магнетопобудна сила побудног намотаја на цилиндричном ротору 82
1.5.5. Магнетопобудна сила побудног намотаја на истуреном ротору 84
1.6. Осврт на врсте и израду трофазних намота 85
1.7. Основне димензије машина за наизмјеничну струју 88

2. СИНХРОНЕ МАШИНЕ 90
2.1. Увод у синхроне машине 91
2.1.1. Класификација према смјеру активне и реактивне снаге 91
2.1.2. Класификација према врсти ротора 93
2.1.3. Класификација према врсти мреже у генераторском раду 96
2.1.4. Значај и примјена синхрони машина 96
2.2. Синхроне турбомашине 97
2.2.1. Конструкција синроних турбомашина 98
2.2.1.1. Магнетна кола статора и ротора 98
2.2.1.2. Струјна кола статора и ротора 99
2.2.1.3. Клизни колутови и четкице 100
2.2.1.4. Хлађење турбомашина 100
2.2.1.5. Осврт на механичке проблеме 101
2.2.2. Принцип рада синроних турбомашина 102
2.2.3. Еквивалентна шема и фазорски дијаграми синхроне турбомашине 107
2.2.4. Одређивање параметара еквивалентне шеме за устаљено стање 112
2.2.5. Структура губитака 115
2.2.6. Моментна карактеристика 116
2.2.7. Угаоне карактеристике синхроне турбомашине 117
2.2.8. Управљање производњом активне и реактивне снаге 121
2.2.9. Погонска карта синхроног турбогенератора 123

2.2.10. Промјена оптерећења и пригушни намот 126
2.2.11. Рад турбогенератора на сопственој мрежи 131
2.2.12. Одређивање промјене напона Потјеовом методом 135
2.3. Синхроне хидромашине 137
2.3.1. Конструкција синхроних хидромашина 137
2.3.1.1. Магнетна кола статора и ротора 138
2.3.1.2. Струјно коло статора и ротора 140
2.3.1.3. Клизни колутови и четкице 142
2.3.1.4. Хлађење хидрогенератора 143
2.3.1.5. Осврт на механичке проблеме 143
2.3.2. Принцип рада синхроне хидромашине 146
2.3.3. Фазорски дијаграми синхроне хидромашине 151
2.3.4. Одређивање параметара еквивалентне шеме за устаљена стања 154
2.3.5. Угаона карактеристика синхроне хидромашине 157
2.3.6. Управљање производњом активне и реактивне снаге и погонска карта 161
2.3.7. Прелазни процеси и пригушни намот синхроне хидромашине 163
2.4. Експлоатација синхроних машина 163
2.4.1. Натписна плочица синхроне машине 163
2.4.2. Систем релативних јединица примијењен на синхроне машине 164
2.4.3. Синхрони генератор на крутој мрежи 168
2.4.3.1. Синхронизација генератора на круту мрежу 168
2.4.3.2. Побудни системи синхроних генератора 173
2.4.3.3. Помоћни системи генератора за рад на крутој мрежи 175
2.4.4. Синхрони мотори и компензатори 178
2.4.4.1. Синхрони мотори 178
2.4.4.2. Синхрони компензатори 180
2.4.4.3. Покретање синхроних мотора и компензатора 183
2.4.5. Специјалне синхроне машине 185
2.4.5.1. Синхрони генератори без четкица 185
2.4.5.2. Синхроне машине са перманентним магнетима 186
2.4.5.3. Синхрони генератори за напајање потрошача једносмјерне струје 188
2.5. Динамички модел синхроне машине 189
2.5.1. Динамички модел у природним координатама 189
2.5.2. Динамички модел у синхроно-ротирајућем координатном систему 193
2.5.3. Модел мотора са перманентним магнетима 200
2.5.4. Модел синхроне машине прикључене на круту мрежу 201
2.5.5. Модел синхроног генератора на сопственој мрежи 205
2.5.6. Трополни кратак спој синхроног генератора 207

2.5.6.1. Таласни облици струја трополног кратког споја 207
2.5.6.2. Физичко тумачење појава при трополном кратком споју генератора .. 211
2.5.6.3. Аналитички облик струје кратког споја генератора 215
2.5.7. Параметри синхроне машине за прелазне процесе 218
2.5.8. Еквивалентне шеме за несиметричне режиме рада 223
2.6. Прилози 225
2.6.1. Диференцијална једначина за промјену угла оптерећења генератора 225
2.6.2. Трансформације математичких модела обртних машина 226
2.6.3. Извођење динамичког модела синхроне машине 231

3. АСИНХРОНЕ МАШИНЕ 236
3.1. Увод у асинхроне машине 237
3.1.1. Основни елементи конструкције 238
3.1.1.1. Конструкција статора 238
3.1.1.2. Конструкција ротора 239
3.1.1.3. Основни дијелови асинхроне машине 241
3.1.2. Принцип рада асинхроне машине 243
3.1.3. Натписна плочица 248
3.2. Еквивалентна шема и моментна карактеристика 250
3.2.1. Еквивалентна шема за устаљена стања 250
3.2.1.1. Режим отвореног ротора 250
3.2.1.2. Режим краткоспојеног ротора 252
3.2.2. Структура губитака 254
3.2.3. Одређивање параметара еквивалентне шеме 256
3.2.3.1. Оглед празног хода 256
3.2.3.2. Оглед кратког споја 258
3.2.4. Струјне карактеристике 261
3.2.5. Моментна карактеристика 263
3.2.6. Клосова формула 268
3.2.7. Анализа моментне карактеристике 269
3.2.7.1. Утицај напона напајања 269
3.2.7.2. Утицај редослиједа фаза 271
3.2.7.3. Утицај учестаности напајања 274
3.2.7.4. Утицај отпорности ротора 276
3.2.7.5. Утицај броја полова 279
3.3. Експлоатација асинхроних машина 281
3.3.1. Методе за ограничење полазне струје 281
3.3.1.1. Смањењење напона помоћу аутотрансформатора 282

3.3.1.2. Смањењење напона помоћу пригушнице 283
3.3.1.3. Смањење напона пребацачем звијезда-троугао 285
3.3.1.4. Софт-стартер 288
3.3.1.5. Осврт на практичне проблеме при покретању сниженим напоном 289
3.3.1.6. Роторски упуштач 290
3.3.1.7. Машине са дубоким жљебовима на ротору 295
3.3.1.8. Осврт на додатне проблеме при директном покретању 298
3.3.2. Методе за управљање брзином 300
3.3.2.1. Промјена клизања промјеном напона 300
3.3.2.2. Промјена клизања роторским отпорником 303
3.3.2.3. Промјена клизања двострано напајаних асинхроних машина 305
3.3.2.4. Промјена броја полова 307
3.3.2.5. Промјена напона и учестаности 311
3.3.3. Асинхрони генератори 318
3.3.3.1. Кавезни асинхрони генератор на крутој мрежи 319
3.3.3.2. Двострано напајани асинхрони генератор на крутој мрежи 321
3.3.3.3. Генератор на сопственој мрежи 324
3.4. Несиметричан рад и једнофазне асинхроне машине 327
3.4.1. Несиметричан рад трофазне асинхроне машине 327
3.4.1.1. Еквивалентне шеме и моментне карактеристике 328
3.4.1.2. Прекид фазе трофазног асинхроног мотора 333
3.4.2. Једнофазне асинхроне машине 337
3.4.2.1. Конструкција и принцип рада једнофазних асинхроних машина 338
3.4.2.2. Покретање и врсте једнофазних асинхроних мотора 341
3.5. Динамички модел асинхроне машине 347
3.5.1. Динамички модел у природним координатама 347
3.5.2. Модел у генерализованом *xy* координатном систему 352
3.5.3. Модел у статорском $\alpha\beta$ координатном систему 353
3.5.4. Модел у синхроно-ротирајућем *dq* координатном систему 358
3.5.5. Параметри динамичког модела асинхроне машине 362
3.6. Прилози 366
3.6.1. Извођење израза за струјну карактеристику 366
3.6.2. Извођење израза превални момент 367
3.6.3. Извођење Клосове формуле 368
3.6.4. Трансформисање динамичког модела асинхроне машине 369

4. ЛИТЕРАТУРА 375