Recenzija knjige

Rukopis predstavlja osnovno nastavno sredstvo – udžbenik u štampanom obliku namenjen predmetu „Regulacija elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije", koji se izvodi na master akademskim studijama studijskog programa Elektrotehnika i računarstvo, na modulu Elektroenergetski sistemi i smeru Obnovljivi izvori energije.

Osnovni tekst je struktuiran u 9 poglavlja. Prvo poglavlje je ujedno i uvod u kome su predstavljene osnovne karakteristike regulacije elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije i njene specifičnosti u odnosu na regulaciju u sistemima sa konvencionalnim energetskim resursima. Data su uvodna razmatranja u pogledu integracije obnovljivih izvora električne energije u elektroenergetski sistem sa aspekta upotrebe energetskih pretvarača. U tom smislu, dat je sažet presek stanja u oblasti sistema za skladištenje električne energije i predstavljeni su novi načini integracije obnovljivih izvora putem prenosnih mreža visokog napona sa DC prenosom i sa više krajnjih konvertorskih postrojenja za povezivanje sa standardnom AC mrežom. Svi opisani tehnički izazovi u prvom poglavlju imaju zajednički imenitelj, a to su uređaji energetske elektronike, čije je modelovanje predmet drugog poglavlja.

U okviru drugog poglavlja, obrađene su osnovne strukture naponski kontrolisanih konvertora (VSC): dvonivoski, tronivoski i višenivoski VSC, kao i multimodularni konvertori. Prikazani su osnovni koncepti modelovanja kao što su model usrednjavanja u prostoru stanja, model generalizovanog usrednjavanja, modelovanje u harmonijskom prostoru stanja i metoda crne kutije. Izabran je polumosni VSC, koji čini osnovnu komponentu za formiranje trofaznih konvertora, radi jednostavnijeg prikazivanja nabrojanih načina modelovanja.

Koncepti modelovanja elektroenergetskih sistema i njihovih komponenti predstavljeni su u trećem poglavlju. Izvršeno je poređenje različitih modela sa aspekta upotrebe u analizi stabilnosti radne tačke, analizi malih poremećaja linearizacijom, analizi signala sa višim harmonicima i analizi nesimetričnih radnih režima. Iako se pokazalo da izbor modela za analizu dinamike određenog sistema nije jednoznačan, niti jednostavan, $dq0$ sistem je izabran kao jedini koji je detaljno razmatran i

to u četvrtom poglavlju u predmetnom udžbeniku, zbog svojih karakteristika u primeni u simulacijama dinamičkih stanja, posebno sistema sa uređajima energetske elektronike. Dakle, u ovom poglavlju je prikazano modelovanje u $dq0$ koordinatnom sistemu: otpornika, induktivnosti, kapacitivnosti, linearnih mreža, sinhronog generatora, asinhrone mašine i VSC-a priključenog na mrežu.

U petom poglavlju su obrađene osnovne regulacione konture VSC: strujna regulacija i regulacija napona sa DC strane VSC. Predstavljeni su konvertori koji napajaju mrežu, konvertori za formiranje mreže i konvertori koji podržavaju mrežu. Detaljno su predstavljeni tipični sistemi upravljanja koji se primenjuju kod sve tri vrste konvertora.

Zbog visokog nivoa penetracije u elektroenergetske sisteme, fotonaponski (PV) sistemi su analizirani u šestom poglavlju. Prikazane su različite strukture PV sistema: PV sistemi povezani na mrežu, samostalni i hibridni PV sistemi. Dati su modeli i karakteristike PV sistema i prikazane postojeće MPP (*Maximum Power Point*) tehnike upravljanja. Data je klasifikacija PV sistema prema nivou na kojem se vrši MPP i u skladu sa tim, prikazani su sistemi sa centralizovanim upravljanjem i sistemi sa decentralizovanim upravljanjem. Date su osnove regulacije PV sistema, dinamički model PV modula i dinamički model PVSC modula (DC/DC energetskog pretvarača na strani PV modula).

Sedmo poglavlje se bavi sistemima za konverziju energije vetra u električnu energiju, vetrogeneratorima, sa prikazom svih njihovih komponenti. Izvršena je njihova klasifikacija sa aspekta brzine, a zatim su date osnovne karakteristike svih postojećih tipova vetroagregata. Izložene su osnovne karakteristike upravljačkog sistema vetroagregata i predstavljeni su modeli komponenti vetroagregata (turbine, regulatora ugla nagiba lopatica i pogonskog sklopa). Obrađena je MPPT (*Maximum Power Point Technique*) kao način upravljanja. Detaljno je prikazano upravljanje kod najzastupljenijih vetrogeneratora, dvostrano napajanih asinhronih generatora i sinhronih mašina sa permanentnim magnetima.

U osmom poglavlju su obrađena mrežna pravila za rad obnovljivih izvora energije i to za priključenje, za operativan rad i tržišna mrežna pravila. Zatim su razmatrane sistemske usluge, kao što su regulacija frekvencije, regulacija napona i obezbeđivanje dodatne razmene električne energije angažovanjem balansne rezerve. Obrađena su mrežna pravila za integraciju obnovljivih izvora energije, kroz operativne zahteve koji se odnose na regulaciju frekvencije, regulaciju reaktivne snage i napona i zahteve regulacije pri velikim poremećajima.

Fleksibilna regulacija obnovljivih izvora energije, kojom su obuhvaćeni vetrogeneratori kroz skivenu inerciju, emulaciju brze rezerve snage i turbinsku regulaciju, kao i fotonaponski sistemi kroz ograničavanje maksimalne proizvedene snage, regulaciju rezerve snage i ograničenje brzine promene snage, izloženi su u devetom poglavlju, koje je ujedno i poslednje.

Rukopis je predviđen da bude udžbenik, odnosno osnovno nastavno sredstvo namenjeno za predmet „Regulacija elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije", koji se izvodi u prolećnom semestru master akademskih studija, studijskog programa Elektrotehnika i računarstvo, na modulu Elektroenergetski sistemi i smeru Obnovljivi izvori energije.

Rukopis je izvorno delo i predstavlja originalni udžbenik iz ove oblasti na srpskom jeziku. Zasnovan je na savremenim naučnim i stručnim dostignućima i predstavlja sveobuhvatan i detaljan prikaz svih elemenata iz oblasti regulacije elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije.

Sadržaj rukopisa je izložen metodološki ispravno, iznesen je pregledno i jasno, kako u jezičkom, tako i u konceptualnom smislu. Izlaganje teorijskih koncepata potpomognuto je brojnim slikama i tabelama i usklađeno sa korišćenom literaturom. Na taj način omogućava studentima da steknu dublji uvid u datu oblast i kvalitetno znanje, zbog čega predstavlja značajan doprinos kvalitetu nastave iz navedenog predmeta, a mogu ga koristiti svi studenti master i doktorskih studija zainteresovani za oblast primene energetskih pretvarača u elektroenergetskim sistemima.

Treba posebno napomenuti da je ovaj rukopis, prema saznanjima recenzenata, prvi iz ove oblasti koji se objavljuje našoj zemlji i da će biti od velike koristi ne samo studentima, već i svim inženjerima koji se ovom problematikom bave u redovnoj inženjerskoj praksi.

Beograd, 5. 6. 2023. godine

RECENZENTI
dr Dragutin Salamon, vanredni profesor u penziji
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Leposava Ristić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Goran Dobrić, docent
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Sadržaj

Recenzija knjige 5

1 **Osnovne karakteristike regulacije elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije** 13

2 **Modelovanje uređaja energetske elektronike u elektroenergetskim sistemima** 23

2.1. Energetski pretvarači 25

2.2. Strukture naponski kontrolisanih konvertora (VCS – Voltage Source Converter) 27

2.2.1. Osnovne strukture dvonivoskih VSC 27

2.2.2. Strukture tronivoskih i višenivoskih VSC 31

2.2.3. Multimodularni konvertori 33

2.2.4. Eliminacija harmonika korišćenjem konvertora nižeg reda . . 35

2.2.5. Širinska modulacija 38

2.3. Osnovni koncepti modelovanja energetskih pretvarača 40

2.3.1. Model usrednjavanja u prostoru stanja 41

2.3.2. Model generalizovanog usrednjavanja 42

2.3.3. Modelovanje u harmonijskom prostoru stanja 42

2.3.4. Metoda crne kutije 43

2.4. Modelovanje polumosnog VSC 43

2.4.1. Primena SSA u modelovanju polumosnog VSC 47

2.4.2. Osnovne regulacione konture polumosnog VSC 49

3 **Koncepti modelovanja elektroenergetskih sistema i njihovih komponenti** 55

3.1. Transformacije frekvencijskog spektra 58

3.1.1. Klasični fazorski modeli 60

3.1.2. Dinamički fazori 61

3.1.3. $dq0$ transformacija 64
3.1.4. Poređenje primenljivosti predloženih koncepcija 64
3.2. Razvoj $dq0$ komponentnog sistema 66
3.3. Izrazi za snagu trofaznog sistema 72

4 **Modelovanje komponenti elektroenergetskog sistema u dq koordinatama** 75
4.1. Modelovanjenje otpornika, induktivnosti i kapacitivnosti 76
4.2. Generalizovani model linearnih mreža 78
4.3. Model sinhronog generatora 79
4.4. Model asinhrone mašine 87
4.5. Model VSC priključenog na mrežu 92
4.6. Odabir referentnog koordinatnog sistema 96

5 **Osnovne regulacione konture VSC** 101
5.1. Strujna regulacija VSC 102
5.2. Izbor nivoa napona sa DC strane VSC 106
5.3. Regulacija DC napona na krajevima VSC 106
5.4. Modovi regulacije VSC 108
5.4.1. Tipični sistemi upravljanja kod VSC za napajanje mreže 111
5.4.2. Sistemi upravljanja kod VSC za formiranje mreže 117
5.4.3. Sistemi upravljanja VSC za podršku mreži 125

6 **Fotonaponski sistemi** 137
6.1. Strukture PV sistema 138
6.1.1. PV sistemi povezani na mrežu 140
6.1.2. Samostalni PV sistemi 143
6.1.3. Hibridni PV sistemi 144
6.2. Modeli PV sistema 145
6.2.1. Karakteristike PV sistema 147
6.2.2. Modelovanje zasenčenja 150
6.3. MPPT tehnike 153
6.3.1. *Perturb and Observe* (P&O) 156
6.3.2. Metoda inkrementalne konduktanse 157
6.3.3. Konstantan udeo napona praznog hoda (*Fractional Voc*) 160
6.3.4. Deo struje kratkog spoja, I_{sc} 161
6.3.5. MPPT upravljanje *fuzzy* logikom 162
6.3.6. Neuralne mreže 163
6.3.7. *Ripple Corelation Control* 163
6.3.8. *Current Sweep* 164

6.3.9. Regulacija jednosmernog napona kondenzatora pomoću *droop* karakterisitke . . . 165
6.3.10. Maksimizacija struje ili napona opterećenja . . . 166
6.3.11. dP/dV ili dP/dI povratna sprega . . . 167
6.4. Klasifikacija PV sistema . . . 169
6.4.1. Sistemi sa centralizovanim upravljanjem . . . 169
6.4.2. Sistemi sa decentralizovanim upravljanjem . . . 172
6.5. Regulacija PV . . . 175
6.5.1. Dinamički model PV modula . . . 178
6.5.2. Dinamički model PVSC . . . 179

7 **Vetrogeneratori** 185
7.1. Komponente vetrogeneratorskih sistema . . . 185
7.2. Klasifikacija vetrogeneratora . . . 187
7.2.1. Tip 1 – Vetrogeneratori sa fiksnom brzinom obrtanja (*Fixed Speed Wind Turbine*) . . . 188
7.2.2. Tip 2 – Vetrogeneratori sa delimično promenljivom brzinom obrtanja . . . 189
7.2.3. Tip 3 – Vetrogeneratori sa promenljivom brzinom obrtanja sa pretvaračem smanjene snage . . . 189
7.2.4. Tip 4 – Vetrogeneratori promenljive brzine sa punim opsegom pretvarača snage . . . 191
7.3. Upravljački sistemi vetrogeneratora . . . 192
7.4. Modeli komponenti vetroturbina . . . 194
7.4.1. Aerodinamički modeli turbine i kontroler ugla nagiba lopatica 194
7.4.2. Model pogonskog sklopa . . . 199
7.5. Praćenje tačke maksimalne snage – MPP . . . 202
7.6. Upravljanje dvostrano napajanim indukcionim generatorom – DFIG 208
7.7. Upravljanje sinhronim mašinama sa permanentnim magnetima – PMSM . . . 221

8 **Mrežna pravila za rad obnovljivih izvora energije** 227
8.1. Sistemske usluge . . . 229
8.1.1. Regulacija frekvencije . . . 232
8.1.2. Regulacija napona . . . 235
8.1.3. Uticaj obnovljivih izvora energije na sistemske usluge . . . 237
8.2. Mrežna pravila za integraciju obnovljivih izvora energije . . . 238
8.2.1. Operativni zahtevi koji se odnose na regulaciju frekvencije . . . 239

8.2.2. Operativni zahtevi koji se odnose na regulaciju napona i reaktivne snage 241
8.2.3. Zahtevi regulacije pri velikim poremećajima 248

9 **Fleksibilna regulacija obnovljivih izvora energije** 255
9.1. Fleksibilna regulacija vetrogeneratora 261
9.1.1. Skrivena inercija 261
9.1.2. Emulacija brze rezerve snage 262
9.1.3. Turbinska regulacija vetrogeneratora 263
9.2. Fleksibilna regulacija fotonaponskih sistema 268
9.2.1. Ograničavanje maksimalne proizvedene snage 272
9.2.2. Regulacija rezerve snage 274
9.2.3. Ograničenje brzine promene snage 276

Spisak skraćenica 277

Literatura 281