

PREDRAG STEFANOV • KRISTINA DŽODIĆ  
ĐORĐE LAZOVIĆ

REGULACIJA  
ELEKTROENERGETSKIH  
SISTEMA SA OBNOVLJIVIM  
IZVORIMA ENERGIJE

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
AKADEMSKA MISAO  
Beograd, 2023.

**Predrag Stefanov, Kristina Džodić i Đorđe Lazović**  
REGULACIJA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA  
SA OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE

**Recenzenti**

Salamon Dragutin  
Leposava Ristić  
Goran Dobrić

**Izdavači**

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
AKADEMSKA MISAO, Beograd

**Tehnički urednik**

Željko Hrček

**Likovno rešenje korica**

Boris Popović

**Tiraž**

300 primeraka

**Štampa**

Akademski misao, Beograd

ISBN: 978-86-7466-980-8

---

**Napomena.** Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige – u celini ili u delovima – nije dozvoljeno bez prethodne izričite saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača.

## 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 strukturiran u 9 poglavlja. Prvo poglavlje je ujedno i uvod u koje su predstavljene osnovne karakteristike regulacije elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije i njene specifičnosti u odnosu na regulaciju u sistemima sa konvencionalnim energetske resursima. Data su uvodna razmatranja u pogledu integracije obnovljivih izvora električne energije u elektroenergetski sistem sa aspekta upotrebe energetske 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, asinhrona 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 energetske 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 energetske 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         |
| <b>1 Osnovne karakteristike regulacije elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije</b> | <b>13</b> |
| <b>2 Modelovanje uređaja energetske elektronike u elektroenergetskim sistemima</b>                     | <b>23</b> |
| 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 energetske 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        |
| <b>3 Koncepti modelovanja elektroenergetskih sistema i njihovih komponenti</b>                         | <b>55</b> |
| 3.1. Transformacije frekvencijskog spektra . . . . .   | 58        |
| 3.1.1. Klasični fazorski modeli . . . . .  | 60        |
| 3.1.2. Dinamički fazori . . . . .  | 61        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.1.3.   | <i>dq0</i> transformacija . . . . .   | 64         |
| 3.1.4.   | Poređenje primenljivosti predloženih koncepcija . . . . .                         | 64         |
| 3.2.     | Razvoj <i>dq0</i> komponentnog sistema . . . . .                                  | 66         |
| 3.3.     | Izrazi za snagu trofaznog sistema . . . . .                                       | 72         |
| <b>4</b> | <b>Modelovanje komponenti elektroenergetskog sistema u <i>dq</i> koordinatama</b> | <b>75</b>  |
| 4.1.     | Modelovanje otpornika, induktivnosti i kapacitivnosti . . . . .                   | 76         |
| 4.2.     | Generalizovani model linearnih mreža . . . . .                                    | 78         |
| 4.3.     | Model sinhronog generatora . . . . .  | 79         |
| 4.4.     | Model asinhronne mašine . . . . .   | 87         |
| 4.5.     | Model VSC priključenog na mrežu . . . . .   | 92         |
| 4.6.     | Odabir referentnog koordinatnog sistema . . . . .                                 | 96         |
| <b>5</b> | <b>Osnovne regulacione konture VSC</b>  | <b>101</b> |
| 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        |
| <b>6</b> | <b>Fotonaponski sistemi</b>   | <b>137</b> |
| 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.   | <i>Perturb and Observe</i> (P&O) . . . . .  | 156        |
| 6.3.2.   | Metoda inkrementalne konduktanse . . . . .  | 157        |
| 6.3.3.   | Konstantan ideo napona praznog hoda ( <i>Fractional Voc</i> ) . . . . .           | 160        |
| 6.3.4.   | Deo struje kratkog spoja, $I_{sc}$ . . . . .                                      | 161        |
| 6.3.5.   | MPPT upravljanje <i>fuzzy</i> logikom . . . . .                                   | 162        |
| 6.3.6.   | Neuralne mreže . . . . .  | 163        |
| 6.3.7.   | <i>Ripple Correlation Control</i> . . . . .                                       | 163        |
| 6.3.8.   | <i>Current Sweep</i> . . . . .  | 164        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.3.9.   | Regulacija jednosmernog napona kondenzatora pomoću <i>dro-</i><br><i>op</i> 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        |
| <b>7</b> | <b>Vetrogeneratori</b> . . . . .  | <b>185</b> |
| 7.1.     | Komponente vetrogeneratorskih sistema . . . . .   | 185        |
| 7.2.     | Klasifikacija vetrogeneratora . . . . .   | 187        |
| 7.2.1.   | Tip 1 – Vetrogeneratori sa fiksnom brzinom obrtanja ( <i>Fixed</i><br><i>Speed Wind Turbine</i> ) . . . . . | 188        |
| 7.2.2.   | Tip 2 – Vetrogeneratori sa delimično promenljivom brzinom<br>obrtanja . . . . .                             | 189        |
| 7.2.3.   | Tip 3 – Vetrogeneratori sa promenljivom brzinom obrtanja sa<br>pretvaračem smanjene snage . . . . .         | 189        |
| 7.2.4.   | Tip 4 – Vetrogeneratori promenljive brzine sa punim opse-<br>gom 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 –<br>PMSM . . . . .                                | 221        |
| <b>8</b> | <b>Mrežna pravila za rad obnovljivih izvora energije</b> . . . . .  | <b>227</b> |
| 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 re-aktivne snage . . . . . | 241        |
| 8.2.3.   | Zahtevi regulacije pri velikim poremećajima . . . . .                               | 248        |
| <b>9</b> | <b>Fleksibilna regulacija obnovljivih izvora energije</b>                           | <b>255</b> |
| 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        |