**Nikola Rajaković**

# ANALIZA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA I

Drugo izdanje

AKADEMSKA MISAO
Beograd, 2025.

Nikola Rajaković

# ANALIZA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA I

## Drugo izdanje

Recenzenti

Dragan Tasić
Čedomir Zeljković
Nebojša Arsenijević
Ivica Nenčić
Dušan Nikolić

Izdaje i štampa

AKADEMSKA MISAO
Beograd

Tiraž

300 primeraka

ISBN 978-86-6200-048-4

*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.

# PREDGOVOR

Ponovljeno izdavanje ovog udžbenika, namenjenog za program predmeta Analiza elektroenergetskih sistema I, posle više od dve decenije od njegovog prvog izdanja, uslovljeno je potrebama za standardnim univerzitetskim udžbenicima, koji bez obzira na manju ili veću promenu tehnologija ostaju metodološki aktuelni. Saglasno planu nastave na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu u okviru ovog predmeta izučavaju se dva važna problema analize elektroenergetskih sistema: problem kompenzacije reaktivnih snaga i problem proračuna struja kratkih spojeva. Preostala dva problema analize proučavaju se u predmetu Analiza elektroenergetskih sistema II (proračuni tokova snaga i proračuni raznih tipova stabilnosti elektroenergetskih sistema).

I u ovom ponovljenom izdanju želim da naglasim da je analiza elektroenergetskih sistema temelj oblasti od koga polaze gotovo svi inženjerski poslovi planiranja i projektovanja, poslovi izgradnje i konačno, poslovi eksploatacije, odnosno poslovi upravljanja elektroenergetskim sistemima. Osnovni zadatak analize u metodološkom smislu je da model sistema i njegovih pojedinačnih komponenti bude primeren metodologiji proračuna. Školski kontraprimer ovakvom razumevanju analize je necelishodnost egzaktnih proračuna u numeričkom smislu (sa pouzdanošću od desetak cifara) u praktičnim zadacima u kojima se ulazni podaci znaju samo orijentataciono.

U ovom udžbeniku se i nadalje mora insistirati na osnovnim konceptualnim znanjima u analizi, bazičnim postavkama metodologije i fizičkom razumevanju pojava a što sve čini osnovu na koju se mogu nadograđivati složeni i zahtevni proračuni u analizi. Isto tako važno je u digitalizovanom okruženju u kome su inženjeri skloni da veliko poverenje pridaju gotovim softverskim paketima izgraditi prirodan osećaj za proveru dobijenih rezultata iz tih paketa. Naime, procena konačnih rezultata pomoću palca i jak osećaj za očekivani red veličine su inženjerske veštine koje se stiču iskustvom, ali koje se moraju negovati u predmetima kakav je i analiza elektroenergetskih sistema.

Zahtevi koji se postavljaju pred analizu u vezi sa tačnošću proračuna se razlikuju u zavisnosti od problema koji se proučava: manja tačnost se zahteva kod proračuna očekivanih (perspektivnih) struja kratkog spoja na vremenskom horizontu od 30 godina unapred, nego kod proračuna struja kratkog spoja za potrebe podešavanja relejne zaštite i uređaja automatike.

Iako je i u prvom izdanju najavljen talas novih tehnologija u oblasti korišćenja obnovljivih izvora energije ipak je razvoj ovih tehnologija učinio da se danas ukupan sektor energetike fokusira upravo na obnovljive izvore, delom zbog klimatskih promena a delom i zato što su neobnovljivim izvorima energije (ugalj, nafta i gas) vidi kraj.

U knjizi se dosledno koriste tradicije evropske škole elektroenergetike u pogledu notacije i stila (tako npr. Oznaka za napon je U kako to i IEC preporuke sugerišu, ali su u nekim delovima ipak preuzeti angloamerički pristupi u tretiranju složenih sistema.

Namera udžbenika ostaje nepromenjena. Pre svega pomoću nje studenti će lakše ovladati znanjima iz ove značajne oblasti i uz dodatnu zbirku rešenih zadataka (grupe autora) ima se jedna celina u edukativnom smislu. Pored ovoga knjiga je namenjena i kolegama inženjerima u praksi kojima može značajno pomoći kod rešavanja praktičnih planerskih i eksploatacionih zadataka.

Autor se zahvaljuje svima koji su doprineli finalizaciji ovog drugog izdanja, a posebna zahvalnost pripada firmi Prointer, koja je finansijski podržala štampanje ovog izdanja udžbenika.

Beograd, februara 2025. godine Prof. Nikola Rajaković

**Sadržaj**

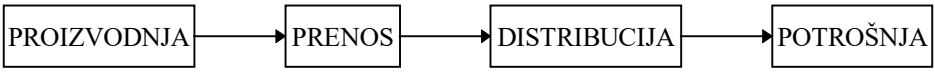
**1. Uvod u analizu elektroenergetskih sistema ..... 1**
1.1. Proizvodni podsistem ..... 2
1.2. Prenosni i distributivni podsistem ..... 6
1.3. Potrošački podsistem ..... 9
1.4. Istorijat elektroenergetskih sistema ..... 13
1.5. Razvoj elektrifikacije u našoj zemlji ..... 14
**2. Modeli elemenata elektroenergetskih sistema ..... 17**
2.1. Model generatora ..... 18
2.2. Model transformatora ..... 20
2.2.1. Model dvonamotajnog transformatora ..... 21
2.2.2. Model tronamotajnog transformatora ..... 28
2.2.3. Model regulacionog dvonamotajnog transformatora ..... 30
2.2.4. Model regulacionog tronamotajnog transformatora ..... 34
2.3. Model voda ..... 34
2.3.1. Podužna otpornost (rezistansa) voda ..... 35
2.3.2. Podužna induktivnost (reaktansa) voda ..... 36
2.3.3. Podužna kapacitivnost (susceptansa) voda ..... 45
2.3.4. Podužna odvodnost (konduktansa) voda ..... 52
2.3.5. Ekvivalentne šeme voda ..... 53
**3. Model potrošnje u analizi EES ..... 63**
3.1. Vrste prijemnika ..... 66
3.2. Statičke naponske karakteristike potrošnje ..... 66
3.3. Statičke frekventne karakteristike potrošnje ..... 74
**4. Osnovni proračuni u analizi trofaznih elektroenergetskih mreža ..... 77**
4.1. Pojam fazora u analizi EES-a ..... 77
4.2. Snaga u sinusoidalnim uslovima ..... 79
4.3. Metod jediničnih vrednosti (*per unit* metod) ..... 82
4.4. Proračuni pada napona ..... 86
4.5. Proračuni gubitaka snage i energije ..... 93
4.6. Analiza osnovnih sprega u trofaznim sistemima ..... 98
4.7. Proračuni voda ..... 103
4.7.1. Prazan hod voda ..... 103
4.7.2. Prenos prirodne snage ..... 107
4.7.3. Praktične mogućnosti opterećivanja voda ..... 110
4.7.4. Bilans snaga ..... 117
4.7.5. Ograničenja prenosnih mogućnosti voda ..... 118
4.8. Metod svedenih veličina ..... 120
**5. Kompenzacija reaktivnih snaga u EES ..... 123**
5.1. Uređaji za kompenzaciju reaktivnih snaga i za regulaciju napona ..... 123
5.2. Otočna kompenzacija ..... 125
5.3. Redna kompenzacija ..... 127
5.4. Poređenje karakteristika redne i otočne kompenzacije ..... 130
5.5. Baterije kondenzatora ..... 131
5.6. Smanjenje gubitaka aktivne snage ..... 135
5.7. Kompenzacija reaktivnih snaga u složenim distributivnim mrežama ..... 136

5.7.1. Formulacija problema optimalne kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama ... 138
5.7.2. Postupak rešavanja optimalne kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama na bazi pretraživanja varijanti ... 141
5.7.3. Algoritam za optimalnu kompenzaciju reaktivnih snaga u distributivnim mrežama ... 145
5.7.4. Karakterističan ilustrativni primer kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama ... 152
5.7.5. Osnovi tehničko-ekonomske analize ... 153
5.7.6. Određivanje godišnjih troškova gubitaka i ekvivalentne cene gubitaka aktivne snage i energije ... 156
**6. Proračuni kratkih spojeva ... 161**
6.1. Značaj proračuna struja kratkih spojeva ... 161
6.2. Primena Thevenin-ove teoreme i principa superpozicije na proračune struja kratkih spojeva ... 163
6.3. Simetrične komponente ... 167
6.4. Sprege komponentnih sistema na mestu kvara sa osnovnim analitičkim jednačinama za razne vrste kvara ... 169
6.5. Pojednostavljenje blokova ... 181
6.6. Proračuni struja kratkog spoja sa uvažavanjem električnog luka ... 184
**7. Matrični proračuni kratkih spojeva ... 187**
7.1. Matrica impedansi čvorova ... 187
7.1.1. Formiranje matrice impedansi čvorova ... 187
7.1.2. Prvi tip modifikacije ... 189
7.1.3. Drugi tip modifikacije ... 190
7.1.4. Treći tip modifikacije ... 191
7.1.5. Četvrti tip modifikacije ... 193
7.1.6. Peti tip modifikacije ... 195
7.2. Proračuni kratkih spojeva matričnim postupkom ... 197
7.2.1. Proračuni trofaznih kratkih spojeva matričnim postupkom pomoću matrice impedansi čvorova ... 198
7.2.2. Proračuni nesimetričnih kratkih spojeva matričnim postupkom pomoću matrice impedansi čvorova ... 201
**8. Modelovanje nadzemnog voda za potrebe proračuna struja kratkih spojeva ... 207**
8.1. Redne impedanse nadzemnih vodova za nesimetrična radna stanja ... 207
8.2. Generalizacija izraza za redne impedanse direktnog, inverznog i nultog redosleda za nadzemne vodove ... 218
8.3. Generalizacija izraza za otočne admitanse direktnog, inverznog i nultog redosleda za nadzemne vodove ... 222
**9. Modelovanje transformatora za potrebe proračuna struja kratkih spojeva ... 231**
9.1. Uticaj vrste magnetnog kola na nulte šeme transformatora ... 231
9.2. Uticaj načina uzemljenja zvezdišta i sprega traansformatora na nulte šeme transformatora ... 234
**10. Modelovanje sinhronih generatora i ostalih elemenata sistema za potrebe proračuna struja kratkih spojeva ... 243**
10.1. Osnovne matrične jednačine sinhronog generatora sa Parkovom transformacijom ... 243
10.2. Parkova naponska jednačina ... 252
10.3. Primer proračuna simetričnog kratkog spoja na krajevima sinhronog generatora ... 254

10.4. Reaktanse sinhronih generatora ... 264
10.5. Vremenske konstante sinhrone mašine ... 268
10.6. Interpretacija reaktansi sinhrone mašine pri proračunu struja kratkog spoja preko Tevenenove teoreme i superpozicije stanja ... 270
10.7. Obrtno magnetno polje ... 272
10.8. Modelovanje asinhronih motora i potrošačkog područja kao elemenata EES za potrebe proračuna struja kratkih spojeva ... 274
10.9. Mreža u proračunima kratkih spojeva ... 276
**11. Modelovanje solarne elektrane za potrebe proračuna struja kratkih spojeva . 279**
**12. Modelovanje vetroelektrane za potrebe proračuna struja kratkih spojeva ..... 281**
**13. Tehničke implikacije struja kratkih spojeva ... 283**
13.1. Uzemljenje zvezdišta ... 283
13.1.1. Izolovano zvezdište ... 283
13.1.2. Zvezdište uzemljeno pomoću Petersenove prigušnice (kompenzovane mreže) ... 287
13.1.3. Uzemljenje preko male impedanse ... 289
13.1.4. Direktno uzemljenje zvezdišta ... 291
13.2. Faktor uzemljenja ... 293
13.3. Odnosi struja pri kratkim spojevima ... 296
13.4. Strujna i naponska naprezanja za vreme trajanja kratkog spoja ... 298
13.5. Uticaj energetskih na telekomunikacione vodove ... 299
13.5.1. Mere za smanjenje uticaja energetskih na paralelno vođene telekomunikacione vodove ... 301
13.6. Raspodela struje jednofaznog kratkog spoja u lancu: zaštitno uže - stubovi - zemlja ... 302
13.7. Ograničavanje struja kratkog spoja ... 308
13.7.1. Redna prigušnica za ograničavanje struje kratkog spoja ... 308
13.7.2. Sekcionisanje ... 309
**14. Redne nesimetrije u EES ... 311**
14.1. Analiza rednih kvarova ... 312
14.2. Primer nalaženja reaktanse merene redno sa mesta prekida ... 316
**Literatura ... 319**

# 1. Uvod u analizu elektroenergetskih sistema

Elektroenergetski sistem (EES) se opisuje kao složeni, dinamički sistem velike dimenzionalnosti, čija je prevashodna funkcija da sigurno, pouzdano i ekonomično snabdeva potrošače sa dovoljnim količinama kvalitetne električne energije. Sa aspekta osnovne tehnološke funkcije EES se deli na sledeće podsisteme: proizvodni, prenosni, distributivni i potrošački podsistem. Ovaj funkcionalni lanac je ilustrovan na sl. 1.1




**Sl. 1.1** Funkcionalna veza podsistema u EES

Imajući u vidu polaznu definiciju EES, kao i metodološku osetljivost njegovog proučavanja, indirektno se zaključuje da se u njemu istovremeno sadrže i principi bazičnosti (kroz potrebe za energijom) i principi savremenosti (kroz stalne potrebe za unapređenjem tehnologija), i kroz njihovu komplementarnu primenu uspešno se mogu rešavati složeni zadaci analize EES koji su posledica potreba pri planiranju i eksploataciji sistema. Atraktivnost proučavanja EES proizilazi upravo iz njegove čvrste oslonjenosti na realne životne potrebe (bazičnost) i na potrebu za primenom modernih naučnih i tehnoloških dostignuća (savremenost) u cilju uspešnog funkcionisanja ovog kompleksnog sistema.

EES je objektivno jedan od najsloženijih, ako ne i najsloženiji, tehnološki sistem koji poznaje današnja civilizacija. Ovi sistemi sa rastom interkonekcija prelaze granice pojedinih država i prerastaju u moćne kontinentalne sisteme. EES se dimenzioniše kako prema potrebama u energiji tako i prema potrebama u snazi i, s obzirom na velika kapitalna ulaganja koja zahteva izgradnja i eksploatacija elektroenergetskih kapaciteta, optimalnom dimenzionisanju i održavanju EES pridaje se veliki značaj.

Prvi i jedini razlog postojanja EES je podmirenje potreba potrošača za električnom energijom. Ove potrebe su široke i raznovrsne jer je električna energija najplemenitiji vid energije u prirodi. Argumenti koji idu u prilog ovoj konstataciji su njena fleksibilnost (u smislu lakog prilagođenja zahtevima konzuma), čistoća (u formi finalnog proizvoda), kontrolabilnost, jednostavnost i efikasnost konverzije u druge forme energije, ekološka prihvatljivost (ceo proces, kada ne bi bilo proizvodnje, bi bio sasvim ekološki prihvatljiv) i praktična nezamenljivost u mnogim visokim tehnologijama. S druge strane, električna energija ima i određene slabosti koje se manifestuju preko relativno skupe proizvodnje i preko teškoća prilikom njenog akumulisanja.

Električna energija učestvuje u značajnoj meri u podmirenju ukupnih energetskih potreba. Ovo učešće varira od zemlje do zemlje u zavisnosti od strukture energetskih resursa, i kreće se negde do 1/3 ukupnih potreba. Ako se električna energija koristi za grejanje prostorija tada je ovo učešće ovako visoko (primeri Norveške i Švedske). Kod zemalja koje su u energetskom smislu oslonjene na gas i naftu udeo električne energije u podmirenju ukupnih energetskih potreba je ispod 10%.

U našoj zemlji taj udeo je iznosio oko 20% do 1990. godine, da bi već u 1995. godini usled uticaja sankcija na uvoz nafte i gasa i usled veoma niske cene električne energije (i u apsolutnom smislu i relativno prema drugim energentima) narastao na preko 35%. Optimalnim razvojem energetskog sektora taj udeo treba da se smanji na nivo primeren

našim energetskim bogatstvima i našim potrebama, uz respektovanje energetske efikasnosti i realističnog razvoja privrede.

Do 1973. godine, svet je živeo u uverenju o jeftinoj energiji, pa i o jeftinoj električnoj energiji. Po izbijanju naftne krize tih godina menja se odnos prema energiji u razvijenom svetu i započinju procesi štednje i racionalizacije u oblasti kompleksne energetike.

## 1.1. Proizvodni podsistem

Prvi u lancu podsistema je proizvodni podsistem (elektrana ili električna centrala). U elektranama se nalazi "srce" EES - sinhroni generator - u kome se mehanička energija transformiše u električnu. Elektrane (izvori električne energije) imaju zadatak da u svakom trenutku zadovolje potrebe potrošača za električnom energijom i da obezbede neophodan nivo rezerve za slučaj ispada pojedinih kapaciteta ili za slučaj nepredviđenih zahteva od strane potrošača. U osnovi postoje tri dominantna načina proizvodnje električne energije: proizvodnja u hidroelektranama, u termoelektranama i u nuklearnim elektranama. Suštinska razlika između njih je u formi primarne energije iz koje se proizvodi mehanička energija koja se kasnije transformiše u električnu.

Proizvodnja električne energije u hidroelektranama (HE) predstavlja klasičan način produkcije u kome se potencijalna energija primarnog energetskog resursa (vode) pretvara pomoću hidroturbine u mehaničku energiju, a zatim hidrogenerator mehaničku energiju konvertuje u finalni proizvod na izlazu, tj. u električnu energiju. Hidrogeneratori se odlikuju relativno malim brzinama obrtanja (tako npr. u HE "Đerdap" I broj obrtaja hidroagregata je 71,50 o/min koji daju učestanost od 50 Hz sa 42 para polova) što je posledica većeg broja pari polova. S druge strane male brzine obrtanja uslovljavaju velike obrtne momente pa su hidrogeneratori mašine visoke tehnološke složenosti. Hidrogeneratori su mašine sa istaknutim polovima koje se proizvode u veoma širokom opsegu snaga, od nekoliko desetina kW do nekoliko stotina MW. Specifičnost hidrogeneratora sastoji se u činjenici da su na svakom vodotoku zahtevi u pogledu performansi hidroturbina i hidrogeneratora drugačiji tako da se praktično ne može govoriti o serijskoj proizvodnji ovih mašina. Performanse hidroelektrana zavise od protoka vode, od ukupne raspoložive količine vode na godišnjem horizontu (moguća godišnja proizvodnja hidroelektrana), od raspoloživog pada i od raspodele vode tokom godine. Hidroelektrane se prema vremenu pražnjenja akumulacionog bazena dele na protočne i na akumulacione (sa sedmičnom, sezonskom, godišnjom i višegodišnjom akumulacijom). Glavni tipovi hidroturbina su Francisove (za srednje padove), Kaplanove (za relativno male padove) i propelerne (takođe za male padove, ali za vodotoke sa konstantnim padom). Ova tri tipa su predstavnici reakcionih turbina kod kojih se potencijalna energija vode pod pritiskom samo delimično pretvara u kinetičku. Peltonove turbine su predstavnici akcionih hidroturbina kod kojih se sva potencijalna energija vode pretvara u kinetičku (prilagođene su vodotocima sa velikim padom). Dve ključne fizičke veličine koje opredeljuju rad hidrauličkih postrojenja su pad i protok i u cilju njihovog optimalnog iskorišćenja pažljivo se mora vršiti projektovanje i eksploatacija hidroelektrana. Hidrogeneratori se proizvode sa vratilima postavljenim vertikalno i horizontalno i naravno, sa odgovarajućim hidroturbinama. Poseban tip hidrogeneratora su tzv. kapsulni hidrogeneratori kod kojih se u kapsuli potopljenoj u vodi nalaze i hidroturbina i generator. Ovakve se konstrukcije koriste na manjim padovima i obično za snage agregata do 50 MW, npr. HE "Đerdap" II. Lokacija hidroelektrana diktirana je raspoloživošću vodnih potencijala i vrlo je česta pojava da su hidroelektrane udaljene od glavnih centara potrošnje, a što za posledicu ima povećane zahteve u odnosu na prenosnu mrežu. U EES Srbije iz