

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

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 orijentaciono.

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.

Sadržaj

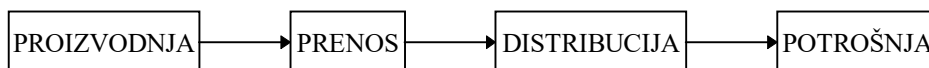
1. Uvod u analizu elektroenergetskih sistema.....	1
1.1. Proizvodni podsistem	2
1.2. Prenosni i distributivni podsistem	6
1.3. Potrošački podsistem	9
1.4. Istorijat elektroenergetskih sistema	13
1.5. Razvoj elektrifikacije u našoj zemlji	14
2. Modeli elemenata elektroenergetskih sistema	17
2.1. Model 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 (<i>per unit</i> 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 transformatora 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 sinhronne mašine.....	268
10.6. Interpretacija reaktansi sinhronne 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 naprežanja za vreme trajanja kratkog spoja	298
13.5. Uticaj energetske na telekomunikacione vodove	299
13.5.1. Mere za smanjenje uticaja energetske 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 energetske potreba. Ovo učešće varira od zemlje do zemlje u zavisnosti od strukture energetske 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 energetske smislu oslonjene na gas i naftu udeo električne energije u podmirenju ukupnih energetske 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 energetske sektora taj udeo treba da se smanji na nivo primeren

našim energetske 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 energetskeg 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 hidrogeneratorsa sastoji se u činjenici da su na svakom vodotoku zahtevi u pogledu performansi hidroturbina i hidrogeneratorsa 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 praznjenja 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 hidrogeneratorsa 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