

Proračun elektromagnetnih prelaznih procesa u elektroenergetskim mrežama

Nacrt verzija 1.2

Milan Savić i saradnici

Oktober 2025

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Katedra za Elektroenergetske sisteme

Autor: Milan Savić
Profesor Elektrotehničkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu penziji

Beograd 2025

Sadržaj

I	Teorijski opis metoda i modela	3
1	Proračuni prelaznih procesa	4
2	Mreže sa koncentrisanim parametrima	7
2.1	Definicije elemenata sa koncentrisanim parametrima	7
2.1.1	Pasivni elementi	7
2.1.2	Aktivni elementi	10
2.1.3	Nelinearni i nestacionarni elementi	11
2.2	Omov zakon u matričnom obliku	14
2.3	Definicije grafova električne mreže	15
2.4	Incidentne matrice	15
2.4.1	Matrica čvorova	15
2.4.2	Matrica snopova	16
2.4.3	Matrica kontura	16
2.5	Osnovne incidentne matrice	16
2.5.1	Matrica osnovnih snopova	16
2.5.2	Matrica osnovnih kontura	17

2.5.3	Primer proizvoljne mreže i odgovarajućih incidentnih matrica	17
2.5.4	Kirhofovi zakoni u matričnom obliku	19
2.5.5	Veze grana stabla i ko-stabla u incidentnim matricama	22
2.5.6	Normalno stablo	24
2.5.7	Primer određivanja normalnog stabla	24
2.6	Jednačine stanja	27
2.6.1	Definicija jednačine stanja	27
2.6.2	Diferencijalne jednačine stanja električne mreže	28
2.6.3	Opšti oblik trofaznog modela stanja	33
2.7	Rešavanje jednačina stanja	36
2.7.1	Trapezno pravilo	36
2.7.2	Metoda Runge-Kuta 4. reda	37
3	Mreže sa raspoređenim parametrima	39
3.1	Jednačine telegrafičara	39
3.1.1	Rešenje jednačina telegrafičara za idealan vod	43
3.1.2	Rešenje jednačina telegrafičara za vod na kome je ispunjen Hevisaj- dov uslov	47
3.1.3	Rešenje jednačina telegrafičara za realan vod	49
3.2	Putujući talasi	52
3.2.1	Definicija putujućih talasa	52
3.2.2	Koeficijenti prelamanja i odbijanja	54
3.2.3	Posebni slučajevi prelamanja i odbijanja talasa	56

3.3	Zamena koncentrisanog elementa vodom	66
3.3.1	Kondenzator vezan otočno prema zemlji	66
3.3.2	Kalem vezan redno između dva voda	68
3.3.3	Kalem vezan otočno prema zemlji	69
3.3.4	Otpornik vezan otočno prema zemlji	70
3.4	Modifikovani koeficijenti prelamanja	70
3.4.1	Modelovanje redno vezanog kondenzatora vodom	71
3.4.2	Modelovanje redno vezanog otpornika	73
3.5	Petersenovo pravilo	74
3.5.1	Kondenzator priključen na kraju voda	76
3.5.2	Redna veza induktivnosti	79
3.6	Metode proračuna talasnih procesa na vodovima	81
3.6.1	Metoda mrežnog dijagrama	82
3.6.2	Beržeronova grafoanalitička metoda	90
3.7	Numeričke metode	102
3.7.1	Diskretna metoda	103
3.7.2	Optimizacija diskretne metode	107
3.7.3	Obuhvatanje korone	112
3.8	Frekvencijski zavistan povratni put kroz zemlju	116
3.8.1	Jedinični odziv	116
3.8.2	Numeričko modelovanje izobličenja pri prostiranju	120

4.1	Objašnjenje trofazne transformacije	124
4.2	Najčešće korišćene transformacije	127
4.2.1	Simetrične komponente	127
4.2.2	Transformacija u α , β i o komponente	129
4.3	Modalna transformacija	131
4.3.1	Jednačine telegrafičara za trofazni vod	131
4.3.2	Sopstvene vrednosti matrica i sopstveni vektori	134
4.3.3	Primena modalne transformacije na simetričnu i cikličnu matricu	136
4.3.4	Primena modalne transformacije na horizontalni vod sa simetričnim rasporedom provodnika	138
4.3.5	Primer dvobrzinskog prostiranja talasa	140
5	Mešovite mreže	146
5.1	Kombinovana metoda rešavanja mešovitih mreža	146
5.2	Metoda kompenzacije	147
5.2.1	U zajedničkom čvoru sa strane koncentrisane mreže vezana je induktivna grana	147
5.2.2	U zajedničkom čvoru sa strane koncentrisane mreže priključena kapacitivna grana	150
5.3	Određivanje ustaljenog stanja	151
5.3.1	Zamena vodova koncentrisanim elementima	151
5.3.2	Simetrično ustaljeno stanje	153
5.3.3	Princip superpozicije pri analizi kratkih spojeva	154
5.3.4	Nesimetrični režimi za pojedine tipove kvarova	154

5.3.5	Početni uslovi	162
5.3.6	Usaglašavanja početnih uslova u mreži sa koncentrisanim i raspoređenim parametrima	165
5.3.7	Određivanje vremenskog koraka proračuna	167
6	Parametri atmosferskih pražnjenja	174
6.1	Tipovi atmosferskih pražnjenja	174
6.2	Osnovni parametri atmosferskih pražnjenja	175
6.2.1	Električni parametri	175
6.2.2	Meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja	186
7	Modelovanje elemenata	191
7.1	Modelovanje atmosferskog pražnjenja	191
7.1.1	Dvostruko eksponencijalni oblik strujnog i naponskog talasa	193
7.1.2	Određivanje vremenskih konstanti čela i začelja	194
7.1.3	Uprošćen eksponencijalni oblik	197
7.1.4	Talas linearnog čela i linearnog začelja	198
7.1.5	Talas linearnog čela i konstantnog začelja	199
7.1.6	Talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja	200
7.1.7	CIGRE talas sa konkavnim čelom	200
7.1.8	Haidlerova funkcija	202
7.1.9	Zaključna razmatranja	204
7.2	Modelovanje provodnika	206
7.2.1	Modelovanje zaštitnog užeta	206

7.2.2	Modelovanje faznog provodnika	207
7.3	Modelovanje dalekovodnog stuba	210
7.3.1	Određivanje karakteristične impedanse stuba	210
7.3.2	Modelovanje geometrije stuba	213
7.4	Model uzemljivača	220
7.4.1	Približne formule za otpornost rasprostiranja pri industrijskoj frekvenciji	220
7.4.2	Udarna impedansa uzemljenja	224
7.5	Model preskoka na vazdušnoj izolaciji	236
7.5.1	Metoda volt - sekundne krive izolacije (V-t karakteristika izolacije)	237
7.5.2	Metoda destruktivnog efekta	239
7.5.3	Metoda progresivnog lidera	241
7.5.4	Vrednosti napona razornog pražnjenja	244
7.5.5	Rizik kvara izolacije	248
7.5.6	Primer proračuna rizika	249
7.5.7	Sklopni preskočni napon	249
7.6	Model odvodnika prenapona	253
7.6.1	Modelovanje nelinearnog otpornika	253
7.6.2	Modelovanje iskrišta odvodnika prenapona	256
7.6.3	Modelovanje dinamičke karakteristike preostalog napona	257
7.6.4	Modelovanje odvodnika prenapona za postrojenja	259
7.6.5	Modelovanje odvodnika prenapona sa dva priključka	264
7.6.6	Opšti model odvodnika prenapona	268

7.6.7	Izbor ZnO odvodnika prenapona	270
7.6.8	Izbor karakteristika odvodnika prenapona	273
7.7	Model prekidača	275
7.7.1	Model prekidača u monofaznoj koncentrisanoj mreži	276
7.7.2	Modelovanje trofaznog prekidača u koncentrisanoj mreži	280
7.7.3	Modelovanje paljenja luka između kontakata prekidača	281
7.7.4	Kriterijum gašenja luka	283
7.7.5	Model prekidača u mreži sa raspoređenim parametrima	291
7.7.6	Modelovanje kvara	295
7.7.7	Rasipanje trenutaka uključenja kontakata	297
7.8	Računanje verovatnoće nastanka prenapona	300
7.8.1	Sistematsko variranje trenutaka uključenja	303
7.8.2	Monte Karlo simulacija	306
7.8.3	Primena Monte Karlo simulacije na određivanje raspodele prenapona	307
8	Rizik kvara usled atmosferskih prenapona	309
8.1	Metoda opasnih parametara	309
8.1.1	Metoda opasnih parametara sa variranjem strmine struje	309
8.1.2	Kriva opasnih parametara za postrojenje usled udara u vod bez zaštitnog užeta	310
8.1.3	Kriva opasnih parametara za postrojenje usled udara u vod sa zaštitnim užetom	312
8.1.4	Kriva opasnih parametara za vod bez zaštitnog užeta	315

8.1.5	Kriva opasnih parametara za vod sa zaštitnim užetom	316
8.1.6	Varijacija strmine i amplitude struje	317
8.1.7	Uprošćena metoda prema IEC standardu	319
8.2	Proračun verovatnoće pojave kritičnih parametara	321
8.3	Elektrogeometrijski model kod atmosferskog udara	325
8.4	Kriterijum preskoka na izolaciji voda	329
8.4.1	Verovatnoća prodora groma mimo užeta	333
8.4.2	Procena verovatnoće pražnjenja mimo zašitnog užeta	338
8.4.3	Uticaj mesta udara groma na rizik kvara izolacije	345
8.4.4	Proračun broja godina bez kvara transformatora	354
8.4.5	Verovatnoća pražnjenja mimo zašitnog užeta	356
8.4.6	Rizik kvara izolacije po uprošćenoj IEC metodi	357
8.4.7	Numerički postupak integraljenja gustine raspodele	357
8.4.8	Analiza uticaja mesta udara kod trofaznih vodova	359
8.4.9	Uticaj trenutne vrednosti radnog napona	361
8.4.10	Procena godišnjeg broja preskoka na izolaciji vazdušnog voda bez zašitnog užeta	363
8.4.11	Procena godišnjeg broja preskoka na izolaciji vazdušnog voda sa zašitnim užetom	365
8.5	Monte - Karlo simulacija	370
8.5.1	Teorijsko objašnjenje	370
8.5.2	Procena potrebnog broja simulacija	373

9.1	Nastanak indukovanih prenapona	375
9.2	Elektrostatička teorija indukovanih prenapona	376
9.3	Elektromagnetna teorija indukovanih prenapona	378
9.3.1	Analitičko računanje indukovanih prenapona	380
9.4	Numeričko računanje indukovanih napona na vodu	383
9.4.1	Procena visine indukovanih prenapona	388
9.4.2	Procena uticaja zaštinog užeta	388
9.5	Statistički proračun indukovanih prenapona	390
9.5.1	Metoda opasnih parametara	390
9.5.2	Proračun godišnjeg broja preskoka	391
10	Šeme za proračun atmosferskih prenapona	394
10.1	Proračun ugroženosti transformatorske stanice	394
10.1.1	Proračun ugroženosti visokonaponske transformatorske stanice . .	394
10.1.2	Analiza stubne transformatorske stanice	396
11	Analiza ugroženosti trofaznih vodova	399
11.1	Modelovanje trofaznog voda	399
11.2	Metoda opasnih parametra trofaznog voda	401
11.2.1	Primer proračuna struje koja izaziva preskok na pojedinim fazama kada je udar u sredinu raspona	403
11.2.2	Primer proračuna struje koja izaziva preskok na pojedinim fazama kada je udar u stub	405
12	Energija oslobođena u odvodniku prenapona	408

12.1	Energetska naprezanja pri radu odvodnika prenapona	408
12.2	Procena energije oslobođene u odvodniku	409
12.3	Verovatnoće premašenja energetske moći odvodnika	411
II	Primeri proračuna prelaznih procesa	415
A	Zaštitno uže na vodovima srednjeg napona	416
A.1	Analiza voda nazivnog napona 35 kV	417
A.2	Uticaj nazivnog napona voda na broj preskoka	420
B	Udar u gromobransku instalaciju objekta	422
B.1	Opis objekta i problema koji se pojavljivao	422
B.2	Deterministički proračun pre optimizacije zaštite	426
B.3	Rešenje problema ugroženosti transformatora.	427
B.3.1	Problem u radu starih tipova odvodnika prenapona u porculanskim kućištu	427
B.3.2	Odvodnici prenapona u kućištima od polimernih materijala	431
B.4	Rizika kvara izolacije usled udara groma	433
B.5	Određivanje atraktivne površine objekta	434
B.6	Godišnja gustina pražnjenja i broj udara u objekat	438
B.7	Minimalna struja pražnjenja koja izaziva kvar	439
B.8	Određivanje rizika proboja transformatora	440
C	Zaštita stubnih transformatorskih stanica	442
C.1	Prenaponska zaštita odvodnicima prenapona	442

C.2	Uticaj mesta ugradnje odvodnika na stubnoj TS	444
C.3	Proračun prenapona na transformatorima na stubu	445
C.3.1	Osnovni podaci o sistemu	446
C.3.2	Izbor odvodnika prenapona	446
C.3.3	Rezultati proračuna	448
C.3.4	Uticaj otpora uzemljenja stuba transformatorske stanice	449
D	Zaštita transformatora pri HE	454
D.1	Opis sistema	454
D.2	Deterministički proračun	458
D.3	Statistički proračun	459
E	Prenaponi pri intermitentnom zemljospoju	462
E.1	Uvodna razmatranja	462
E.2	Opis eksperimenata	462
E.3	Numeričke simulacije prenapona pri zemljospoju sa lukom	470
E.4	Maksimalni prenapon pri uspostavljanju prenapona	472
E.5	Zaključci	473
F	Prenaponska zaštita objekata niskog napona	475
F.1	Osnovni podaci o analiziranom objektu	475
F.2	Proračun prenapona	476
F.3	Ispitivanje osetljivosti rezultata na parametre šeme	477
F.3.1	Karakterististične impedanse prihvatnih i spusnih provodnika	477

F.3.2	Uticaj karakterististične impedanse kanala groma	479
F.3.3	Uticaj mesta udara na prihvatnom sistemu	480
F.3.4	Redukovanje ekvivalentne šeme	482
F.4	Statistički proračun	483
F.4.1	Prihvatna površina objekta	483
F.4.2	Godišnja gustina pražnjenja	484
F.4.3	Kritična struja koja izaziva preskok	484
F.5	Određivanje rizika preskoka u KPK	484
F.6	Primena zaštitnih mera	485
F.6.1	Opis zaštitnih mera	485
F.6.2	Analiza sistema bez prenaponske zaštite pod pretpostavkom da ne dolaze do preskoka u KPK	489
F.6.3	Modelovanje sistema sa preskokom u KPK bez prenaponske zaštite	490
F.6.4	Analiza sistema sa prenaponskom zaštitom na ulazu u objekat . . .	491
F.6.5	Analiza sistema sa 2 nivoa prenaponske zaštite	492
F.7	Zaključak	493
G	Kvarovi usled upotrebe Is Limitera	496
G.1	Razlog uvođenja Is Limitera	496
G.2	Opis sistema	500
G.3	Merno-akvizicioni sistem	501
G.4	Modelovanje Is limitera	504
G.5	Zaštita od prenapona	506

G.5.1	Analiza primene odvodnika prenapona	506
G.5.2	Komentar o Is Limiteru	508
G.6	Zaključak	508
H	Požar usled indukovanih prenapona	509
H.1	Kratak opis događaja i opis sistema	509
H.2	Hipoteza o nastanku požara	510
H.3	Primena zaštitnih mera	513
I	Uticaj jonizacije tla	517
I.1	Uvodne napomene i numerički proračun	517
I.2	Primenjeni modeli	518
I.2.1	Model stuba	518
I.2.2	Model uzemljivača stubova	519
I.2.3	Preskočni napon	520
I.2.4	Parametri analiziranog voda	521
I.3	Rezultati proračuna	522
I.3.1	Opis proračuna prenapona	522
I.3.2	Deterministički proračun	523
I.3.3	Primene excel tabele za statistički proračun	525
I.3.4	Uticaj uzemljenja stubova na broj preskoka	527
J	Analiza proboja u postrojenju elektrofiltra	530
J.1	Princip rada elektrofiltra	530

J.2	Opis sistema	531
J.3	Rezultati merenja	533
J.4	Računska simulacija prelaznih procesa u elektrofiltu	534
J.4.1	Prelazni procesi pri uspostavljanju iskre	535
J.4.2	Prelazni procesi pri prekidanju iskre	536
J.5	Mogućnost prigušenja prelaznih procesa u elektrofiltu	537
J.5.1	Uspostavljanje iskre	537
J.5.2	Prekid iskre	539
J.6	Zaključak	540
K	Zaštita instalacija u tunelima	541
K.1	Cilj analize	541
K.2	Gromobranska zaštita pogonske stanice	542
K.2.1	Atraktivna zona pogonske stanice	542
K.2.2	Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja	543
K.2.3	Broj opasnih događaja za objekat	544
K.2.4	Usvajanje nivoa zaštite od atmosferskog pražnjenja objekta	545
K.2.5	Određivanje otpornosti uzemljenja objekta TS 10/0.4 kV	545
K.2.6	Ekvivalentna šema spoljašnjeg gromobranskog sistema	546
K.2.7	Proračun prenapona na kućištu transformatora bez prenaponske zaštite	548
K.2.8	Zaštita visokonaponske strane energetskog transformatora od prenapona	550
K.2.9	Karakteristike izabranog odvodnika prenapona	550

K.2.10	Proračun prenapona na transformatoru sa ugrađenim odvodnikom prenapona na 10 kV strani	554
K.3	Prenaponska zaštita niskog napona transformatora	557
K.3.1	Postavljanje niskonaponskog odvodnika prenapona	557
K.3.2	Karakteristike niskonaponskog odvodnika prenapona za transformator sa strane 0.4 kV	558
K.3.3	Karakteristike prenaponskih zaštitnih uređaja (SPD) u razvodu 0.4 kV	559
K.4	Proračun prenapona u NN mreži	561
K.4.1	Analiza potrebe za prenaponskom zaštitom transformatora sa NN strane	564
K.4.2	Zaštita razvodnih ormana u tunelckim cevima koji se napajaju iz ormana ND4, odnosno direktno iz mreže 0.4 kV	566
K.5	Zaključak	571
L	Primena linijskih odvodnika	572
L.1	Odvodnici bez eksternih iskrišta	574
L.2	Linijski odvodnici sa serijskim iskrištem - EGLA	575
L.3	Konstrukcija serijskih eksternih iskrišta	576
L.4	Zaštita vodova sa prekrivenim provodnicima	577
L.5	Analiza vodova sa linijskim odvodnicima prenapona	580
L.6	Analiza broja ispada sa i bez linijskih odvodnika	582
L.6.1	Uticaj otpornosti uzemljenja stubova	582
L.6.2	Uticaj dužine raspona na broj preskoka	583
M	Modelovanje udarnog naponskog generatora	585

M.1	Proračun talasnog oblika izlaznog napona	587
M.2	Termički proračun otpornika za struju punjenja	589
M.3	Izbor otpornika za pražnjenje kondenzatora	593
N	Razvoj delila za udarne napone	597
N.1	Omsko delilo napona	597
N.2	Visokonaponski generator pravougaonih talasa	601
N.3	Rezultati testiranja step generatora	602
N.3.1	Testiranje bez priključenog delila	602
N.3.2	Testiranja step generatora sa priključenim delilom	603
N.3.3	Numerička simulacija testiranja	604
N.3.4	Eksperimentalna određivanje dodatnog otpornika	605
N.4	Detaljna šema delila napona	606
N.5	Odziv meren duž omskog delila	607
N.6	Mešovito delilo napona	607
N.6.1	Koaksijalni kabl završen prilagodnim otpornikom ispred mernog in- strumenta	609
N.6.2	Delilo sa otvorenim kablom na mernom kraju	613
N.6.3	Numeričko modelovanje odziva mešovitog delila za različite dužine koaksijalnog kabla	614
N.7	Uvođenje dodatnog delila u NN granu delila	617
N.8	Rezultati snimanja odziva sa dodatnim delilom	618

Predgovor

Ovaj rukopis nastao je na osnovu predavanja na redovnim studijama iz predmeta Tehnika visokog napona 1 (prenaponi i koordinacija izolacije u elektroenergetskim mrežama), manjim delom Tehnika visokog napona 2 (izolacija u tehnici visokog napona, visokonaponski ispitni uređaji za laboratorije za visoki napon i visokonaponska merenja), predmeta Visokonaponska oprema (fizika sklopnih operacija u elektroenergetskim mrežama), predavanja na magistarskim, kasnije master studijama i predavanja na doktorskim studijama iz predmeta Prelazni procesi u elektroenergetskim sistemima.

Rukopis je takođe rezultat sopstvenog razvoja računarskih programa za proračun sklopnih i atmosferskih prenapona od 1974, kao specijalizovanih softvera, u doba kada su ovakvi proračuni bili na početku razvoja. U međuvremenu su razvijani u svetu različiti akademski i komercijalni programi za rešavanje prelaznih režima u različitim oblastima elektrotehnike. Neki od tih programa su korišćeni za rešavanje problema iz prakse koji su opisani u ovom rukopisu. Program "Grom" za proračun atmosferskih prenapona i procenu rizika kvara izolacije u statističkom pristupu koordinacije izolacije i "Komut" za proračun sklopnih prenapona su razvijani na Fakultetu i korišćeni za sopstvene potrebe i edukaciju studenata.

Za rešavanje praktičnih problema i studija koji su opisani u primerima, pored sopstvenih programa razvijenih na Fakultetu, korišćeni su programi "AtpDraw" kao grafički predprocesor programa EMTP-atp (Elektromagnetic Transient Program -Alternative Transient Program) [26], zatim "MatLab" [29] sa alatom "SimPowerSystems" i drugim alatima, kao i program "DigSilent PowerFactory" (Digital Simulation and Network Calculation), [114]. Za rad sa ovim programima se danas studenti Energetskog odseka obučavaju na računarskim vežbama paralelno sa laboratorijskim vežbama.

Rukopis je podeljen na dva dela. Prvi deo čine teorijska objašnjenja modelovanja pojedinih elemenata elektroenergetskih sistema, parametri atmosferskih pražnjenja i njihovo modelovanje, kao i objašnjenja primenjenih računskih metoda za simulaciju prelaznih režima. Drugi deo čine odabrani primeri iz prakse u kojima su rešavani problemi za različite naručioce.

Zahvaljujući primeni računarskih programa, kao i eksperimentalnim istraživanjima,

urađen je veći broj studija, projekata i ekspertiza za domaće i inostrane naručioce. Istraživanja su rađena najviše u oblasti koordinacije izolacije i izboru prenaponske zaštite. Pored toga, rađena su istraživanja u razvojne svrhe, kao i ekspertize u slučajevima havarija.

Namena ovoga rukopisa je da pomogne studentima i inženjerima da sagledaju načine rešavanja konkretnih inženjerskih problema korišćenjem numeričkih simulacija prelaznih režima. Osim toga, rukopis može da pomogne razumevanju nekih principa modelovanja koji se koriste kod savremenih programa za modelovanje prelaznih procesa.

Doprinos u ovoj oblasti dao je veći broj diplomaca, studenata magistarskih studija, kasnije master studija i doktoranata.

Ovom prilikom želim da zahvalim svima koji su pomogli razvoju ove oblasti kroz svoje studentske ili završne radove, kao i kolegama sa kojima sam sarađivao na rešavanju različitih praktičnih problema.

Doprinos praktičnim rezultatima u realizaciji projekata i studija koji su navedeni u primerima, kao i naučnim istraživanjima čiji su rezultati opisani u rukopisu i citirani u referencama, dale su sledeće kolege:

- Dr. Tomislav Rajić, docent na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Jovan Mikulović, redovni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Mladen Banjanin, vanredni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Istočnom Sarajevu.
- Dr. Mileta Žarković, vanredni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Zlatan Stojković redovni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Eksperimentalna istraživanja koja su opisana, izvršena su zahvaljujući velikom znanju i veštini Ratka Kovačića, dipl. ing, spoljašnjeg saradnika.

Posebno zahvaljujem kolegama Tomislavu Rajiću, docentu na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu i Mladenu Banjaninu, vanrednom prof. na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, na veoma korisnim savetima i primedbama.

Molim čitaoce koji imaju pitanja ili sugestije da se obrate autoru na email adresu: savic_ms@eunet.rs ili savic_ms@etf.rs.

Autor, Beograd 2025

Deo I

Teorijski opis metoda i modela

Poglavlje 1

Proračuni prelaznih procesa

Danas je razvijen veliki broj različitih programa za proračune brzih elektromagnetnih prelaznih procesa u električnim mrežama, a neki su specijalizovani za elektroenergetske mreže.

Svi prelazni procesi u elektroenergetskim mrežama se mogu podeliti na tri grupe:

1. Veoma brzi elektromagnetni prelazni režimi usled atmosferskih pražnjenja,
2. Prelazni režimi nastali radom sklopnih aparata, koji se mogu po frekvencijama podeliti na dve podgrupe:
 - Ultra brzi prelazni režimi u oklopljenim i gasom SF₆ izolovanim postrojenjima (GIS) usled operacija rastavljača, sa frekvencijama i preko 100 MHz,
 - Sklopni prenaponi u mrežama usled rada prekidača, sa frekvencijama od nekoliko stotina do 10 MHz.
3. Spori elektromehanički prelazni režimi, koji neće biti predmet ovog rukopisa.

Po načinu modelovanja svi elementi se mogu podeliti u dve grupe:

- Elementi predstavljeni raspoređenim parametrima,
- Elementi predstavljeni koncentrisanim parametrima.

Pri rešavanju prelaznih procesa usled atmosferskih prenapona se se mogu svi elementi predstaviti sa raspoređenim parametrima, stim što se neki elementi koji su po

svojoj prirodi sa koncentrisanim parametrima ekvivalentiraju kratkim vodovima. Takav je slučaj sa indukivitetima i kapacitetima. Koncentrisani omski otpori se ekvivalentiraju beskonačno dugim vodovima.

Pri proračunu sklopnih prenapona se mogu elementi koji su po svojoj prirodi sa raspoređenim parametrima ekvivalentirati koncentrisanim parametrima. Na primer vodovi se mogu ekvivalentirati sa više Π ili Γ četvorokrajnika, mada se time gubi na tačnosti. Stoga je dobro koristiti modele vodova kao elemente sa raspoređenim parametrima, a ostale elemente sa koncentrisanim parametrima.

Prilikom modelovanja prelaznih procesa u elektroenergetskim mrežama nailazi se na problem nelinearnih elemenata. Postoje dve vrste nelinearnosti, ilustrovane sa tipičnim primerima:

- Amplitudno nelinearni elementi
 1. nelinearni otpornici odvodnika prenapona.
 2. Pojava korone na vodovima.
 3. Nelinearna karakteristika magnećenja transformatora,
- Frekvencijski zavisni nelinearni elementi (kod nadzemnih vodova frekvencijski zavistan povratni put kroz zemlju, kao i površinski efekat kod faznih provodnika nadzemnih vodova i kablova).

Pored nelinearnosti bitna je nestacionarnost elemenata. Pod nestacionarnošću se podrazumeva promena karakteristika nekog elementa u toku vremena. Jedan od elemenata koji je nestacionaran je prekidač, koji u toku vremena menja položaj svojih kontakata.

U ovom rukopisu će biti date osnovne koncepcije proračuna atmosferskih prenapona, sa posebnim naglaskom na statistički prilaz koordinaciji izolacije vodova i postrojenja.

U slučaju proračuna atmosferskih prenapona se po pravilu koriste jednopolne šeme. Kod modelovanja nadzemnih vodova se modeluje najviši fazni provodnik i zaštitno uže iznad njega. Na primer, ako razmatramo slučaj udara groma u zaštitno uže ispred postrojenja, tada povratni preskok nastaje prema najvišem faznom provodniku, a u slučaju horizontalnog rasporeda provodnika preskok nastaje na fazi koja je najbliža metalnoj konstrukciji stuba. U slučaju srednjenaponskih ili niskonaponskih vodova može se pretpostaviti da dolazi do preskoka na mestu udara između faza. Nadalje se prostiranje talasa događa po toj fazi ka objektu koji se analizira. To znači da nema potrebe da se analiziraju procesi na drugim fazama.

Jedini izuzetak je statistička analiza broja preskoka na visokonaponskim vodovima kod koje želimo da napravimo razliku između broja jednopolnih kvarova koje isključuje

sistem brzog automatskom ponovnog uključenja (APU) i višefaznih kvarova koje prekidač isključuje trolejno i čeka naredbu za ponovno uključenje.

Takođe će biti dati osnovni principi proračuna sklopnih prenapona, koji su zajednički za većinu programa koji se danas koriste. U rukopisu su dati generalni principi metoda proračuna, koji olakšavaju razumevanje rada pojedinih programa.