

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Milenko Đurić  
Zoran Stojanović

# RELEJNA ZAŠTITA

AKADEMSKA MISAO  
Beograd, 2021.

Milenko Đurić  
Zoran Stojanović

## RELEJNA ZAŠTITA

*Recenzenti:*

Dr Miodrag Forcan, docent, Univerzitet u Istočnom Sarajevu  
-Elektrotehnički fakultet

Dr Jelisaveta Krstivojević, docent, Univerzitet u Beogradu  
-Elektrotehnički fakultet

Dr Tomislav Rajić, docent, Univerzitet u Beogradu  
- Elektrotehnički fakultet

*Izdavači*

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
AKADEMSKA MISAO Beograd

*Dizajn korice*  
Blažo Bojić

*Štampa*

PLANETA PRINT, Beograd

*Tiraž*

300 primeraka

ISBN 978-86-7466-893-1

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	<b>1</b>
1.1. Opasna radna stanja elemenata ES-a .....	1
1.2. Kvarovi u ES-u .....	1
1.3. Havarije u ES-u.....	2
1.4. Zadaci relejne zaštite .....	2
1.5. Vremenska mrtva zona relejne zaštite .....	3
1.6. Neophodne osobine relejne zaštite .....	3
1.7. Kriterijumi za rad relejne zaštite.....	6
1.8. Crtanje relejnih uređaja u šemama.....	6
1.9. Izvori pomoćnih ili komandnih napona .....	7
1.9.1. Izvori jednosmernih pomoćnih napona .....	7
1.9.2. Izvori naizmjeničnog pomoćnog napona.....	8
1.10. Načini vezivanja releja .....	9
<b>2. Elektromehanički releji</b> .....	<b>11</b>
2.1. Principi rada elektromehaničkih releja .....	11
2.2. Vrste releja prema broju ulaznih veličina .....	11
2.3. Strujni i naponski elektromagnetski, magnetoelektrični i elektrodinamički releji.....	12
2.4. Smanjenje vibracija elektromagnetskih releja za naizmjeničnu struju .....	14
2.5. Strujni i naponski indukcioni releji.....	15
2.6. Termički relej.....	16
2.7. Indukcioni frekvencijski relej.....	18
2.8. Vremenski releji.....	19
2.9. Indukcioni releji sa dve ulazne veličine.....	20
2.10. Indukcioni usmereni relej .....	21
2.11. Karakteristika usmerenosti u $S-\varphi$ ravni.....	23
2.12. Karakteristika reagovanja usmerenog releja.....	24
2.13. Karakteristika praga reagovanja usmerenog releja u $U-I$ ravni .....	24
2.14. Distantni releji .....	25
2.15. Indukcioni impedansni distantni relej.....	25

2.16. Elektromagnetski impedansni distantni relej .....	26
2.17. Indukcioni ugaono admitansni relej.....	27
2.18. Indukcioni ugaono impedansni relej.....	28
2.19. Distantni relej sa opštom kružnom karakteristikom .....	29
2.20. Elektromagnetski stabilizovani diferencijalni relej .....	30
2.21. Pomoćni releji.....	32
2.22. Logička kola sa elektromehaničkim relejima .....	33
2.23. Prednosti i nedostaci elektromehaničkih releja .....	33
<b>3. Statički (elektronski) releji.....</b>	<b>34</b>
3.1. Principi rada statičkih releja .....	34
3.2. Osnovne osobine statičkih releja .....	34
3.3. Statički prekostrujni relej sa definisanim vremenom reagovanja .....	35
3.4. Statički naponski relej sa definisanim vremenom reagovanja.....	36
3.5. Statički prekostrujni relej sa inverznom karakteristikom reagovanja.....	36
3.6. Statički termički relej.....	37
3.7. Statički frekvencijski relej .....	39
3.8. Statički vremenski relej .....	39
3.9. Statički releji sa amplitudskim komparatorima .....	41
3.10. Kola za amplitudsku komparaciju .....	41
3.11. Usmereni relej sa amplitudskim komparatorom.....	42
3.12. Ugaono impedansni distantni relej sa amplitudskim komparatorom.....	43
3.13. Distantni relej sa opštom kružnom karakteristikom sa amplitudskim komparatorom.....	44
3.14. Statički releji sa faznim komparatorima .....	44
3.15. Impulsni fazni komparator.....	45
3.16. Impulsni fazni komparator sa integratorom.....	46
3.17. Usmereni relej sa faznim komparatorom.....	47
3.18. Distantni relej sa opštom kružnom karakteristikom sa faznim komparatorom.....	48
3.19. Ugaono impedansni distantni relej sa faznim komparatorom.....	49
3.20. Distantni releji sa poligonalnim karakteristikama .....	50
3.21. Distantni relej na bazi detektovanja faznog redosleda.....	50

3.22. Statički stabilizovani diferencijalni relej .....	53
3.23. Logička "I" i "ILI" kola sa diodama .....	54
3.24. Prednosti i mane statičkih releja .....	54
<b>4. Digitalni releji .....</b>	<b>55</b>
4.1. Opšti blok dijagram digitalnog releja .....	55
4.2. Prednosti digitalnih releja .....	56
4.3. Odabiranje signala i analogno digitalna konverzija.....	57
4.3.1. Asinhrono odabiranje .....	57
4.3.2. Sinhrono odabiranje.....	57
4.4. Broj bita i tačnost kvantizacije A/D konverzije.....	58
4.5. Procena parametara analognih signala i električnih kola.....	59
4.6. Metode sa malim brojem odbiraka .....	60
4.6.1. Metoda jednog odbirka.....	60
4.6.2. Metoda dva odbirka .....	60
4.6.3. Metoda tri odbirka .....	61
4.6.4. Metoda četiri odbirka.....	61
4.6.5. Metoda Mana i Morisona .....	62
4.6.6. Procena parametara voda pomoću dva odbirka napona i četiri odbirka struje .....	63
4.6.7. Osobine metoda za obradu signala sa malim brojem odbiraka .....	64
4.7. Neoptimizacione metode sa većim brojem odbiraka .....	64
4.7.1. Metoda integracije .....	64
4.7.2. Metoda srednje vrednosti.....	66
4.7.3. Furijeova metoda .....	67
4.7.3.1. Furijeov red .....	68
4.7.3.2. Veza između fazora i koeficijenata Furijeovog reda.....	70
4.7.3.3. Broj odbiraka i red najvišeg harmonika Furijeovog reda .....	73
4.7.3.4. Praktično tumačenje teoreme o odabiranju .....	74
4.7.3.5. Pojam alijas (aliasing) efekta .....	74
4.7.3.6. Najviša i najniža frekvencija koju Furijeova metoda može detektovati .....	75
4.7.3.7. Rekurzivno izračunavanje fazora Furijeovom metodom.....	76

---

4.8. Optimizacione metode sa većim brojem odbiraka.....	78
4.8.1. Estimacija parametara jednofaznog voda metodom najmanjih kvadrata ...	78
4.8.2. Estimacija parametara signala metodom najmanjih kvadrata.....	80
4.8.3. Estimacija frekvencije metodom najmanjih kvadrata.....	82
4.8.4. Procena parametara signala Njutn-Rapsonovom metodom.....	86
4.9. Određivanje simetričnih komponenti trofaznih signala.....	89
4.10. Određivanje smera i impedanse metodama koje daju fazore električnih veličina.....	91
<b>5. Zaštita vodova.....</b>	<b>93</b>
5.1. Fazna prekostrujna zaštita.....	93
5.1.1. Neusmerena fazna prekostrujna zaštita .....	93
5.1.2. Fazna prekostrujna zaštita sa definisanim vremenom reagovanja.....	93
5.1.3. Fazna prekostrujna zaštita sa inverznom karakteristikom reagovanja.....	95
5.1.4. Dvofazna prekostrujna zaštita .....	95
5.1.4.1. Ponašanje dvofazne prekostrujne zaštite pri dvostrukim zemljospojima .....	96
5.1.4.2. Ponašanje dvofazne prekostruje zaštite pri dvofaznom kvaru iza transformatora sprege $Y_d$ ili $D_y$ .....	97
5.1.4.3. Dvofazna prekostrujna zaštita sa jednim monofaznim relejom.....	99
5.1.5. Strujno podešavanje neusmerene fazne prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja.....	100
5.1.6. Vremensko podešavanje neusmerene prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja .....	102
5.1.7. Strujno podešavanje fazne prekostrujne zaštite sa inverznom karakteristikom .....	103
5.1.8. Fazna prekostrujna zaštita blokirana naponskim relejom.....	105
5.1.9. Prednosti i nedostaci neusmerene fazne prekostrujne zaštite .....	106
5.1.10. Brza ili kratkospojna neusmerena fazna prekostrujna zaštita.....	106
5.1.11. Trostepena fazna prekostrujna zaštita.....	108
5.2. Usmerena fazna prekostrujna zaštita .....	108
5.2.1. Vezivanje usmerenih releja .....	111
5.2.2. Ponašanje usmerenih releja u fazama bez kvara.....	112
5.2.3. Strujno podešavanje usmerene fazne prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja .....	114

5.2.4. Vremensko podešavane usmerene fazne prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja.....	114
5.2.5. Mrtva zona usmerenog releja .....	115
5.2.6. Usmerena brza ili kratkospojna fazna prekostrujna zaštita .....	115
5.2.7. Prednosti i nedostaci usmerene fazne prekostrujne zaštite.....	116
5.2.8. Komentar u vezi sa određivanjem smera struje.....	116
5.3. Nulta prekostrujna zaštita .....	117
5.3.1. Osobine strujnih transformatora .....	118
5.3.2. Struja debalansa filtra nulte komponente struje.....	120
5.3.3. Strujno podešavanje nulte prekostrujne zaštite.....	120
5.3.4. Vremensko podešavanje nulte prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja .....	121
5.4. Usmerena nulta prekostrujna zaštita .....	122
5.4.1. Uslovi rada nultog usmerenog releja .....	123
5.4.2. Napajanje nultog usmerenog releja samo iz strujnih transformatora .....	126
5.4.3. Podešavanje usmerene nulte prekostrujne zaštite.....	127
5.4.4. Prednosti i mane nulte prekostrujne zaštite .....	127
5.5. Zemljospojna zaštita .....	127
5.5.1. Potrebne osobine zemljospojne zaštite .....	129
5.5.2. Neselektivni alarmi zemljospoja .....	131
5.5.3. Selektivne zemljospojne zaštite.....	132
5.5.3.1. Zemljospojna zaštita zasnovana na merenju jačine nulte struje .....	132
5.5.3.2. Usmerena zemljospojna zaštita .....	133
5.5.4. Selektivna zemljospojna zaštita u kompenzovanim mrežama.....	134
5.5.4.1. Zemljospojna zaštita zasnovana na usmerenom kosinusnom releju .	134
5.5.4.2. Zemljospojna zaštita zasnovana na trećem harmoniku struje .....	135
5.6. Diferencijalna zaštita vodova .....	136
5.6.1. Podužna analogna diferencijalna zaštita.....	136
5.6.1.1. Osnovni principi podužne diferencijalne zaštite .....	137
5.6.1.2. Osobine analogne podužne diferencijalne zaštite.....	139
5.6.1.3. Podužna digitalna diferencijalna zaštita .....	140
5.6.2. Poprečna diferencijalna zaštita vodova .....	140

---

5.6.2.1. Poprečna diferencijalna zaštita vodova sa jednim prekidačem .....	140
5.6.2.2. Zona neosetljivosti poprečne diferencijalne zaštite.....	141
5.6.2.3. Osobine poprečne diferencijalne zaštite.....	142
5.6.2.4. Usmerena poprečna diferencijalna zaštita vodova .....	142
5.6.2.5. Kaskadni rad usmerene poprečne diferencijalne zaštite.....	143
5.6.2.6. Usmerena nulta poprečna diferencijalna zaštita .....	145
5.6.2.7. Podešavanje poprečne diferencijalne zaštite .....	145
5.6.2.8. Osobine usmerene poprečne diferencijalne zaštite.....	146
5.7. Distantna zaštita vodova .....	146
5.7.1. Karakteristika vreme-impedansa distantnog releja.....	147
5.7.2. Funkcije elemenata elektromehaničke i statičke distantne zaštite.....	148
5.7.3. Funkcije elemenata digitalne distantne zaštite .....	149
5.7.4. Ulazne veličine distantnih releja.....	149
5.7.4.1. Trofazni kratak spoj.....	150
5.7.4.2. Dvofazni kratak spoj bez zemljospoja.....	151
5.7.4.3. Jednofazni kratak spoj .....	151
5.7.4.4. Dvofazni kratak spoj sa zemljospojem.....	152
5.7.5. Prikaz ulaznih veličina distantnih releja .....	153
5.7.6. Otpornost električnog luka .....	153
5.7.7. Uticaj električnog luka na merenu impedansu distantnog releja .....	155
5.7.7.1. Trofazni kratak spoj.....	156
5.7.7.2. Dvofazni kratak spoj sa zemljospojem.....	158
5.7.7.3. Dvofazni kratak spoj bez zemljospoja.....	159
5.7.7.4. Jednofazni kratak spoj .....	159
5.7.8. Impedansa luka u $Z$ ravni.....	160
5.7.9. Neosetljivost usmerenih i distantnih releja pri bliskim kvarovima .....	161
5.7.10. Blokiranje distantnih zaštita pri oscilovanju sinhronih mašina u ES-u ..	162
5.7.10.1. Analiza oscilovanja sinhronih mašina u dvomašinskom sistemu....	162
5.7.10.2. Trajektorija merene impedanse u $Z$ ravni pri oscilovanju mašina u ES-u.....	165
5.7.10.3. Načini blokiranja distantnih releja pri oscilovanju generator.....	168
5.7.11. Sistematske greške distantnog releja .....	170



5.7.12. Uticaj međunapajanja na merenje viših stepena distantnog releja .....	170
5.7.13. Uticaj paralelnih vodova na merenje distantnog releja.....	171
5.7.14. Uticaj energetskog transformatora na merenje distantnog releja.....	172
5.7.14.1. Jednofazni kratak spoj .....	173
5.7.14.2. Dvofazni kratak spoj sa zemljospojem.....	175
5.7.14.3. Dvofazni kratak spoj bez zemljospoja.....	177
5.7.14.4. Trofazni kratak spoj.....	178
5.7.15. Uticaj međutransformatora sprege Dy na merenje distantnog releja.....	178
5.7.15.1. Jednofazni kratak spoj .....	179
5.7.15.2. Dvofazni kratak spoj sa zemljospojem.....	180
5.7.15.3. Dvofazni kratak spoj bez zemljospoja.....	182
5.7.15.4. Trofazni kratak spoj.....	183
5.7.16. Osobine distantnih zaštita .....	183
5.7.17. Povezivanje distantnih zaštita telekomunikacionim vezama .....	184
5.7.18. Telekomunikacioni kanali za povezivanje distantnih zaštita.....	185
5.8. Zaštita vodova od preopterećenja .....	187
5.9. Automatsko ponovno uključenje vodova .....	188
5.10. Primena zemljospojnog prekidača u sredjenaponskim mrežama .....	191
<b>6. Zaštita sinhronih generatora .....</b>	<b>193</b>
6.1. Vrste kvarova sinhronog generatora .....	193
6.2. Opasni radni režimi sinhronog generatora.....	193
6.3. Zaštita generatora od međufaznih kratkih spojeva .....	193
6.4. Potrebne osobine diferencijalne zaštite generatora.....	197
6.5. Zaštita od kratkih spojeva unutar faznog namotaja .....	197
6.6. Zaštita statorskog namotaja od zemljospoja .....	199
6.7. Zemljospojne zaštite bloka generator-transformator .....	200
6.8. 100% zemljospojna zaštita bloka generator-transformator zasnovana na 3. harmoniku napona .....	202
6.9. 100% zemljospojna zaštita bloka generator-transformator sa injektiranim signalom.....	204
6.10. Zemljospojna zaštita generatora koji direktno napajaju mrežu .....	205
6.11. Zaštita pobudnog namotaja od zemljospoja.....	206

---

6.12. Zaštita generatpra od simetričnog preopterećenja .....	207
6.13. Zaštita generatora od previsokog 50 Hz napona.....	208
6.14. Zaštita generatora od ulaska u motorni režim.....	208
6.15. Zaštita generatora od gubitka pobude.....	209
6.16. Zaštita generatora od asimetričnog opterećenja.....	212
6.17. Zaštita sinhronih generatora od kratkih spojeva u mreži .....	215
6.18. Zaštita generatora od tranzijentne nestabilnosti.....	216
6.19. Frekvencijska zaštita generatora .....	218
6.20. Zaštita bloka generator-transformator od fluksne prepobude.....	218
6.21. Zaštita od preopterećenja pobudnog namotaja generatora.....	220
6.22. Preporuke za izbor generatorskih zaštita .....	220
6.23. Usmeravanje izvršnih signala generatorskih zaštita .....	221
<b>7. Zaštita energetskih transformatora .....</b>	<b>222</b>
7.1. Fazna diferencijalna zaštita.....	222
7.2. Analogna fazna diferencijalna zaštita transformatora.....	222
7.3. Strujni međutransformatori analogne FDZ.....	222
7.4. Određivanje sprege i koeficijenta transformacije SMT-a.....	224
7.5. Digitalna FDZ transformatora .....	226
7.6. Podešavanje FDZ transformatora .....	228
7.7. Zemljospojna zaštita transformatora.....	229
7.8. Zaštita malih transformatora od unutrašnjih kratkih spojeva .....	231
7.8.1. Kratkospojna zaštita transformatora .....	231
7.8.2. Kućišna zaštita transformatora .....	231
7.9. Gasna ili Buholc zaštita transformatora.....	232
7.10. Zaštita transformatora od kratkih spojeva u mreži .....	233
7.11. Zaštita transformatora od preopterećenja .....	234
7.12. Termička "slika" transformatora.....	236
7.13. Kontaktni termometar i termostat za zaštitu malih transformatora .....	237
<b>8. Zaštita sabirnica .....</b>	<b>238</b>
8.1. Zaštita sabirnica bez posebnih sabirničkih zaštita .....	238
8.2. Prekostrujna zaštita sabirnica .....	238

8.3. Zaštita sabirnica distantnim relejima iz susednih čvorova .....	240
8.4. Zaštita sabirnica distantnim relejima iz istog čvora.....	240
8.5. Zaštita jednostrukih sabirnica posebnim sabirničkim zaštitama.....	241
8.6. Visokoomska diferencijalna zaštita sabirnica.....	242
8.7. Nisko ili srednjeomska stabilizovana diferencijalna zaštita sabirnica.....	242
8.8. Statička diferencijalna zaštita sabirnica.....	243
8.9. Zaštita podužno sekcionisanih jednostrukih sabirnica.....	244
8.10. Zaštita višestrukih sabirnica .....	245
<b>9. Zaštite od otkaza prekidača i osnovnih zaštita .....</b>	<b>247</b>
9.1. Udaljene rezervne zaštite .....	247
9.2. Lokalne rezervne zaštite od otkaza prekidača .....	248
<b>10. Zaštita električnih motora .....</b>	<b>250</b>
10.1. Zaštita asinhronih motora .....	250
10.2. Kvarovi asinhronih motora.....	250
10.3. Opasna radna stanja asinhronog motora .....	250
10.4. Ponašanje asinhronih motora pri startu.....	251
10.5. Statorski i rotorski kritični asinhroni motori.....	252
10.6. Zaštita asinhronih motora od unutrašnjih kratkih spojeva.....	252
10.7. Zemljospojna zaštita statora asinhronih motora .....	256
10.8. Zaštita asinhronih motora od preopterećenja.....	256
10.9. Zaštita asinhronih motora od preopterećenja pomoću termistora.....	260
10.10. Zaštita asinhronih motora od predugog starta.....	261
10.11. Zaštita asinhronih motora od čestih uzastopnih startovanja .....	262
10.12. Zaštita asinhronih motora od asimetričnog ili jednofaznog napajanja .....	263
10.13. Podnaponska zaštita asinhronih motora.....	263
10.14. Zaštita sinhronih motora .....	263
10.15. Kvarovi i opasni radni režimi sinhronih motora .....	264
10.16. Zaštita sinhronih motora od ispada iz sinhronizma .....	264
<b>11. Zaštita kondenzatorskih baterija .....</b>	<b>268</b>
11.1. Zaštita kondenzatorskih baterija od kratkih spojeva.....	268
11.2. Zaštita od zemljospojeva u kondenzatorskoj bateriji.....	268

11.3. Zaštita kondenzatorske baterije od unutrašnjih proboja .....	269
11.4. Zaštita prekidača kondenzatorske baterije od udarnih struja uključenja .....	271
11.5. Zaštita kondenzatorskih baterija od strujnog preopterećenja.....	271
<b>12. Standardno označavanje zaštitnih funkcija .....</b>	<b>273</b>
<b>13. Literatura .....</b>	<b>277</b>