| Sadržaj | Str. |
|---|---|
| PREDGOVOR | VII |
| **1 ELEKTRODISTRIBUCIJA U REGULISANOJ I DEREGULISANOJ ELEKTROPRIVREDI** | 1 |
| UVOD | 3 |
| **1.1** Kratak istorijat razvoja elektrodistribucije Srbije | 3 |
| **1.2** Funkcije i organizacija tradicionalno vertikalno integrisane elektroprivrede | 8 |
| **1.3** Razlozi za deregulaciju tradicionalno vertikalno integrisane elektroprivrede | 10 |
| **1.4** Fukcije i organizacioni oblici deregulisane elektroprivrede | 11 |
| **1.5** Osnovni tehnički zahtevi za zajednički rad proizvodno prenosnog i elektrodistributivnog sistema | 15 |
| *Literatura* | 22 |
| | |
| **2 STRUJE KRATKIH SPOJEVA I UZEMLJENJA** | 23 |
| UVOD | 25 |
| **2.1** Proračun trofazne simetrične struje (snage) kratkog spoja | 25 |
| **2.2** Kriterijumi za dimenzionisanje sistema uzemljenja distributivnih transformatorskih stanica | 28 |
| **2.3** Proračun struje kroz uzemljivač TS SN/NN i TS VN (SN)/SN za vreme zemljospoja u uzemljenoj distributivnoj mreži | 33 |
| **2.4** Granični potencijal i dimenzionisanje uzemljivača TS SN/NN u uzemljenoj distributivnoj mreži | 35 |
| **2.5** Uzemljivači distributivnih transformatorskih stanica | 38 |
| **2.6** Redukcioni faktor voda | 43 |
| **2.6.1** Redukcioni faktor kablovskog voda sa izolovanim plaštom (XHE kabl) | 43 |
| **2.6.2** Redukcioni faktor kablovskog voda sa provodnim plaštom (NPO kabl) | 44 |
| **2.6.3** Redukcioni faktor nadzemnog voda | 44 |
| **2.7** Vodovi kao uzemljivači | 48 |
| **2.7.1** Matrice elementarnih Γ, Π i T četvoropola | 48 |
| **2.7.2** Sopstvene vrednosti matrica elementarnih Γ, Π i T četvoropola | 49 |
| **2.7.3** Ekvivalentne matrice serijske veze Γ, Π i T četvoropola | 50 |
| **2.7.4** Ulazna impedansa serijski vezanih Γ, Π i T četvoropola | 51 |
| **2.7.5** Impedanse uzemljenja vodova | 53 |
| **2.7.6** Impedansa uzemljenja SN kablovskog voda sa izolovanim plaštom | 55 |
| **2.7.7** Impedansa uzemljenja SN kablovskog voda sa provodnim plaštom | 59 |
| **2.7.8** Impedansa uzemljenja nadzemnog voda sa zaštitnim provodnikom | 63 |
| **2.8** Iznošenje potencijala iz TS VN/SN u mrežu srednjeg i niskog napona | 65 |
| **2.8.1** Kablovski vod sa izolovanim plaštom | 66 |
| **2.8.2** Kablovski vod sa provodnim plaštom | 67 |
| **2.8.3** Nadzemni vod sa zaštitnim provodnikom | 68 |
| **2.9** Dimenzionisanje električne zaštite jednožilnih kablova u 110 kV distributivnoj mreži | 71 |
| **2.10** Uzemljenje stubova nadzemnih vodova srednjeg napona | 73 |
| *Literatura* | 76 |

| | |
|---|---|
| **3 DISTRIBUTIVNE TRANSFORMATORSKE STANICE** | 77 |
| UVOD | 79 |
| **3.1** Osnovna koncepcijska rešenja za izgradnju distributivnih TS | 79 |
| **3.1.1** Izbor broja sabirnica u TS | 80 |
| **3.1.2** Osnovni zahtevi za izbor lokacije za distributivnu TS | 83 |
| **3.2** Prenaponi, uzemljenja neutralnih tačaka elektrodistributivnih mreža, koordinacija izolacije | 83 |
| **3.2.1** Vrste prenapona u distributivnoj mreži | 83 |
| **3.2.2** Osnovni kriterijumi za uzemljenje neutralne tačke | 84 |
| **3.2.3** Izvođenje i karakteristike opreme za uzemljenje neutralne tačke | 89 |
| **3.2.4** Priključenje opreme za uzemljenje neutralne tačke | 90 |
| **3.2.5** Formiranje "veštačke" neutralne tačke | 91 |
| **3.2.6** Zaštita od atmosferskih prenapona, primena odvodnika prenapona, koordinacija izolacije | 95 |
| **3.3** Primena relejne zaštite u distributivnim TS 110/X kV i TS 35/10 kV | 108 |
| **3.3.1** Osnovni zahtevi za izbor i ispitivanje sistema zaštite | 108 |
| **3.3.2** Zaštita u funkciji sprečavanja teških havarija u postrojenjima | 111 |
| **3.3.3** Zaštita energetskih transformatora u TS 110/X kV | 115 |
| **3.3.4** Zaštita energetskih transformatora u TS 35/10 kV | 120 |
| **3.3.5** Zaštita vodova 110 kV u distributivnim TS 110/X kV | 122 |
| **3.3.6** Zaštita vodova 35 kV | 129 |
| **3.3.7** Zaštita vodova 10 kV i 20 kV | 131 |
| **3.4** Energetski transformatori u elektrodistributivnim mrežama | 136 |
| **3.4.1** Energetski transformatori 110/X kV | 136 |
| **3.4.2** Energetski transformatori 35/10,5 kV | 140 |
| **3.4.3** Energetski transformatori X/0,42 kV | 140 |
| **3.4.4** Opteretljivost distributivnih ET-a | 141 |
| **3.5** Distributivne transformatorske stanice 110/X kV | 147 |
| **3.5.1** Razvodno postrojenje 110 kV | 147 |
| **3.5.2** Razvodno postrojenje 10 kV, 20 kV i 35 kV | 149 |
| **3.5.3** Merenje u TS | 151 |
| **3.5.4** Lokalno upravljanje u TS | 152 |
| **3.5.5** Daljinsko upravljanje i merenje | 152 |
| **3.5.6** Blokade u TS 110/X kV | 153 |
| **3.5.7** Sopstvena potrošnja i električne instalacije u TS 110/X kV | 153 |
| **3.5.8** Sistem uzemljenja i gromobranske instalacije | 154 |
| **3.5.9** Telekomunikacije u TS | 154 |
| **3.5.10** Zaštita od požara u TS 110/X kV | 155 |
| **3.5.11** Tehnički zahtevi građevinskog dela TS 110/X kV | 156 |
| **3.5.12** Jednopolna šema TS 110/X kV | 156 |
| **3.6** Distributivne transformatorske stanice 35/10 kV | 160 |
| **3.6.1** Pogonski uslovi | 160 |
| **3.6.2** Karakteristike opreme, merenje, blokade, upravljanje | 160 |
| **3.6.3** Sopstvena potrošnja i električne instalacije u TS 35/10 kV | 161 |
| **3.6.4** Sistem uzemljenja i gromobranske instalacije u TS 35/10 kV | 162 |
| **3.6.5** Zaštita od požara u TS 35/10 kV | 164 |
| **3.6.6** Jednopolna šema TS 35/10 kV | 164 |

| | |
|---|---|
| **3.7** Distributivne TS 10(20)/0,4 kV sa kablovskim izvodima snage 630 kVA | 166 |
| **3.7.1** Osnovne karakteristike opreme u DTS | 166 |
| **3.7.2** Dispozicija DTS snage 630 kVA | 167 |
| **3.7.3** Merenja u DTS snage 630 kVA | 167 |
| **3.7.4** Relejna zaštita u DTS snage 630 kVA | 168 |
| **3.7.5** Zaštita od požara u DTS snage 630 kVA | 169 |
| **3.7.6** Zaštita od buke u DTS snage 630 kVA | 169 |
| **3.7.7** Izvođenje uzemljenja DTS snage 630 kVA i zaštita od napona dodira | 171 |
| **3.7.8** Zaštita od atmosferskih pražnjenja | 174 |
| **3.7.9** Kompenzacija reaktivne snage u DTS | 174 |
| **3.7.10** Jednopolna šema DTS-630 kVA | 174 |
| **3.8** Stubne TS 10(20)/0,4 kV snage do 400 kVA | 176 |
| **3.8.1** Osnovne karakteristike opreme STS | 176 |
| **3.8.2** Podaci za stub i prostorni raspored opreme | 177 |
| **3.8.3** Relejna zaštita u STS | 177 |
| **3.8.4** Kompenzacija reaktivne snage u STS | 177 |
| **3.8.5** Uzemljenje STS | 177 |
| **3.8.6** Jednopolne šeme STS | 179 |
| *Literatura* | 181 |
| | |
| **4 DISTRIBUTIVNI KABLOVSKI VODOVI** | 183 |
| UVOD | 185 |
| **4.1** Kablovi niskog napona 0,6/1 kV | 186 |
| **4.2** Kablovi srednjeg napona 6/10 kV, 12/20 kV i 20/35 kV | 187 |
| **4.3** Poređenje NPO i UPE kablova | 190 |
| **4.4** Polaganje energetskih kablova | 190 |
| **4.5** Polaganje energetskih kablova u zemlju i u kablovsku kanalizaciju | 193 |
| **4.6** Približavanje i ukrštanje energetskih kablova sa železničkom i tramvajskom prugom i putem | 195 |
| **4.7** Približavanje i ukrštanje energetskih kablova sa telekomunikacionim kablom i sa cevima vodovoda i kanalizacije | 196 |
| **4.8** Približavanje i ukrštanje energetskih kablova sa toplovodom i gasovodom | 197 |
| **4.9** Ukrštanje energetskog kabla sa vodotokom i polaganje preko mosta | 198 |
| **4.10** Toplotni procesi u kablu | 199 |
| **4.10.1** Toplotni otpori slojeva kabla | 200 |
| **4.10.2** Strujno opterećenje energetskih kablova položenih u zemlju | 201 |
| **4.10.3** Strujno opterećenje energetskog kabla postavljenog u vazduhu | 208 |
| **4.10.4** Zagrevanje kabla pri kratkom spoju | 212 |
| **4.11** Struje u električnim zaštitama za vreme redovnog pogona trofaznih kablovskih vodova izvedenih sa jednožilnim kablovima | 214 |
| **4.12** Kablovski pribor | 221 |
| **4.13** Ispitivanje energetskih kablova i kablovskog pribora | 223 |
| *Literatura* | 225 |
| | |

| | |
|---|---|
| **5 DISTRIBUTIVNI NADZEMNI VODOVI** | 227 |
| UVOD | 229 |
| **5.1** Osnovni zahtevi za izgradnju nadzemnih vodova | 231 |
| **5.1.1** Tipovi nadzemnih vodova | 231 |
| **5.1.2** Elementi nadzemnog voda | 234 |
| **5.2** Projektovanje nadzemnog voda - mehanički proračun | 248 |
| **5.2.1** Opšte o projektovanju nadzemnog voda | 248 |
| **5.2.2** Dodatno opterećenje (obled) | 253 |
| **5.2.3** Opterećenje od vetra | 255 |
| **5.2.4** Kriva provodnika - lančanica, proračun ugiba i naprezanje provodnika | 257 |
| **5.2.5** Razmaci Al/č provodnika i SIP-a u rasponu | 264 |
| **5.2.6** Proračun opterećenja (sila) | 267 |
| **5.2.7** Izbor temelja stuba | 276 |
| **5.3** Gradnja nadzemnog voda | 278 |
| **5.3.1** Postavljanje i fundiranje stubova | 278 |
| **5.3.2** Montaža provodnika | 278 |
| **5.3.3** Prihvatanje i vezivanje (učvršćenje) Al/č provodnika, SIP-a i SKS-a | 281 |
| **5.3.4** Nastavljanje Al/č provodnika, SIP-a i SKS-a | 283 |
| **5.3.5** Ukrštanje nadzemnog SN voda sa drugim objektima | 286 |
| **5.3.6** Opšti zahtevi za montažu, uređaji i alati | 288 |
| **5.4** Toplotni proračun nadzemnog voda | 290 |
| **5.4.1** Dozvoljeno strujno opterećenje u normalnom pogonu | 290 |
| **5.4.2** Zagrevanje provodnika nadzemnog voda u kratkom spoju | 297 |
| **5.5** Ispitivanje nadzemnog voda | 302 |
| *Literatura* | 304 |
| | |
| **6 POTROŠAČI, PRIKLJUČCI I MERENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE** | 305 |
| UVOD | 307 |
| **6.1** Kategorije potrošnje i grupe potrošača | 307 |
| **6.1.1** Kategorije potrošača | 307 |
| **6.1.2** Grupe potrošača široke potrošnje | 308 |
| **6.2** Kategorije elektrifikacije, vršna snaga potrošača | 309 |
| **6.2.1** Kategorije elektrifikacije domaćinstava | 309 |
| **6.2.2** Vršna snaga potrošača za ostale vrste potrošnje | 312 |
| **6.2.3** Jednovremeno opterećenje više grupa različitih kategorija potrošača | 312 |
| **6.2.4** Maksimalno jednovremeno opterećenje na nivou kućnog priključka | 313 |
| **6.3** Priključenje potrošača na elektrodistributivnu mrežu | 316 |
| **6.3.1** Izvođenje nadzemnog priključka | 317 |
| **6.3.2** Izvođenje kablovskog priključka | 318 |
| **6.3.3** Merno razvodni orman (MRO) | 321 |
| **6.3.4** Upravljanje tarifama i opterećenjem | 322 |
| **6.3.5** Zaštita priključaka i električnih instalacija stambenih objekata | 326 |
| **6.4** Merenje električne energije kod potrošača | 337 |
| *Literatura* | 341 |

| | |
|---|---|
| **7 KVALITET DISTRIBUCIJE ELEKTRIČNE ENERGIJE** | 343 |
| UVOD | 345 |
| **7.1** Kvalitet usluga potrošačima | 346 |
| **7.2** Pouzdanost distributivnih sistema | 346 |
| **7.2.1** Pokazatelji pouzdanosti distributivnih sistema | 346 |
| **7.2.2** Štete usled prekida napajanja električnom energijom | 350 |
| **7.2.3** Proračun pouzdanosti napajanja potrošača električnom energijom | 358 |
| **7.3** Kvalitet električne energije | 372 |
| *Literatura* | 377 |
| | |
| **8 PLANIRANJE ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE** | 379 |
| UVOD | 381 |
| **8.1** Vrste planova razvoja elektrodistributivne mreže | 381 |
| **8.2** Podaci i podloge za studije razvoja elektrodistributivne mreže | 383 |
| **8.3** Tehnički i ekonomski kriterijumi za koncipiranje distributivne mreže | 385 |
| **8.3.1** Kriterijum dozvoljenog odstupanja napona | 388 |
| **8.3.2** Kriterijum dozvoljenog strujnog opterećenja elemenata mreže | 388 |
| **8.3.3** Kriterijum dozvoljenih struja kratkih spojeva | 389 |
| **8.4** Prognoza potreba za električnom energijom i vršnom snagom | 390 |
| **8.4.1** Prognoza potreba za električnom energijom | 390 |
| **8.4.2** Prognoza potreba za vršnom snagom | 398 |
| **8.4.3** Određivanje vršnih snaga postojećih i novih TS VN/SN u vreme maksimalnog opterećenja konzuma | 404 |
| **8.5** Principi oblikovanja elektrodistributivne mreže | 405 |
| **8.5.1** Principi oblikovanja elektrodistributivne mreže 110 kV | 405 |
| **8.5.2** Principi oblikovanja elektrodistributivne mreže 35 kV | 406 |
| **8.5.3** Principi oblikovanja elektrodistributivne mreže 10(20) kV | 407 |
| **8.5.4** Principi oblikovanja elektrodistributivne mreže 0,4 kV | 411 |
| **8.6** Metodologija za proračun tokova snaga | 415 |
| **8.7** Metoda ekonomskog vrednovanja varijantnih rešenja | 417 |
| **8.7.1** Stope dobiti, amortizacije i održavanja | 419 |
| **8.7.2** Troškovi gubitaka | 419 |
| **8.7.3** Troškovi neisporučene električne energije | 421 |
| **8.7.4** Troškovi investicija | 423 |
| *Literatura* | 425 |
| | |
| **9 MALE ELEKTRANE U ELEKTRODISTRIBUTIVNOJ MREŽI** | 427 |
| UVOD | 429 |
| **9.1** Obnovljivi izvori električne energije | 431 |
| **9.1.1** Solarne elektrane | 433 |
| **9.1.2** Vetrovne elektrane - VE | 436 |
| **9.1.3** Male elektrane na biomase ili smeće | 440 |
| **9.1.4** Male hidroelektrane - MHE | 441 |

| | |
|---|---|
| **9.2** Alternativni izvori električne energije na fosilna goriva | 444 |
| **9.2.1** Gorivne ćelije | 444 |
| **9.2.2** Mikro gasne elektrane | 445 |
| **9.2.3** Mogućnosti primene alternativnih i obnovljivih izvora el. energije u Srbiji | 446 |
| **9.3** Distribuirana i disperziona proizvodnja električne energije | 447 |
| **9.3.1** Distribuirana proizvodnja električne energije | 447 |
| **9.3.2** Disperziona proizvodnja električne energije | 448 |
| **9.4** Tehnički zahtevi za priključenje male elektrane na distributivnu mrežu | 449 |
| **9.4.1** Osnovni tehnički podaci o maloj elektrani | 449 |
| **9.4.2** Tehnički kriterijumi za priključenje male elektrane na distributivnu mrežu | 451 |
| **9.4.3** Izvođenje priključka male elektrane | 459 |
| **9.4.4** Merno mesto male elektrane | 459 |
| **9.4.5** Zaštita generatora i priključnog voda male elektrane | 460 |
| **9.4.6** Kompenzacija reaktivne snage (energije) u maloj elektrani | 461 |
| **9.4.7** Jednopolna šema priključenja male elektrane na SN mrežu ED | 462 |
| *Literatura* | 464 |
| | |

## PREDGOVOR

Distribucija električne energije i u regulisanoj i u deregulisanoj elektroprivredi predstavlja poseban tehnički i organizacioni segment u lancu između proizvođača i potrošača električne energije. Specifičnost elektrodistributivnih preduzeća, u odnosu na druge delove elektroprivrede, sastoji se u neposrednom ugovornom odnosu sa kvalifikovanim i tarifnim kupcima i u neophodnosti uvažavanja zakona velikih brojeva pri donošenju odluka o tehničkim rešenjima i karakteristikama za elemente elektrodistributivne mreže.

Osnovni koncept knjige su teorijska objašnjenja za konkretna tehnička rešenja iz svih oblasti distribucije električne energije, koja su u najvećoj meri zasnovana na višedecenijskom pozitivnom iskustvu iz eksploatacije distributivnih mreža u Srbiji. Zato je knjiga namenjena inženjerima koji se na različitim poslovima bave distribucijom električne energije i studentima elektrotehnike.

Autori su problematiku distribucije električne energije razvrstali u devet poglavlja.

**Prvo poglavlje** prikazuje istorijski razvoj i položaj elektrodistribucije u tradicionalno regulisanoj elektroprivredi, neke bitne aspekte tehnološkog razvoja, funkcije i organizacione oblike deregulisane elektroprivrede, kao i osnovne tehničke zahteve za zajednički rad proizvodno prenosnog i elektrodistributivnog sistema.

**Drugo poglavlje** obrađuje simetrične i nesimetrične kratke spojeve u distributivnoj mreži, kriterijume za dimenzionisanje sistema uzemljenja distributivnih transformatorskih stanica (TS) i ispunjenje uslova bezbednosti unutar i izvan TS, uzemljenje stubova nadzemnih vodova, kao i specifičnu problematiku doprinosa kablovskih i nadzemnih vodova sistemu uzemljenja TS.

**Treće poglavlje** obrađuje koncepcijska rešenja za sve vrste distributivnih TS sa naglaskom na uzemljenje neutralne tačke, zaštitu od atmosferskih i pogonskih prenapona, kao i koordinaciju izolacije. U ovom poglavlju posebno mesto zauzima: tipizacija osnovnih karakteristika distributivnih energetskih transformatora (ET-a) svih odnosa transformacije, kao i relejna zaštita vodova i ET-a. Na kraju se detaljno opisuju postrojenja - TS 110/X kV, TS 35/10 kV i TS X/0,4 kV koja su tipizirana u ED Srbije.

**Četvrto poglavlje** daje izbor energetskih kablova koji se koriste u distributivnim mrežama 1 kV, 10 kV, 20 kV i 35 kV, tehnička rešenja za polaganje kablova, uključujući i približavanje i ukrštanje kablova sa drugim objektima. Posebno se obrađuje: problematika toplotnih procesa u kablu u normalnom pogonu i pri kratkom spoju, ispitivanje kablova i pribora, kao i pojava cirkulacionih struja u električnim zaštitama jednožilnih kablova u normalnom pogonu.

**Peto poglavlje** se bavi problematikom projektovanja i gradnje nadzemnih vodova izvedenih Al/č provodnicima, slaboizolovanim provodnicima (SIP) ili SKS-om, s tim što se razmatra i problem polaganja telekomunikacionih (TK) kablova po stubovima nadzemnog voda. Posebna pažnja posvećuje se mehaničkom proračunu nadzemnog voda: proračun ugiba, dozvoljenih razmaka provodnika i sigurnosnih visina, sila,

izbor temelja betonskih stubova - za te proračune su razvijeni i posebni korisnički programi. Daju se praktična uputstva za fundiranje stubova i montažu (zatezanje) provodnika, kao i zahtevi za približavanje i prelazak nadzemnog voda preko drugih objekata. Posebno se obrađuje toplotni proračun nadzemnog voda u normalnom pogonu i pri kratkom spoju, kao i ispitivanje elemenata nadzemnog voda.

**Šesto poglavlje** prikazuje kategorije potrošnje i grupe potrošača, bavi se proračunom vršne snage potrošača, posebno u kategoriji domaćinstva. Detaljnije se prikazuje problematika priključenja potrošača na distributivnu mrežu (izvođenje priključaka, tipizacija merno razvodnih ormana, merenje električne energije, upravljanje opterećenjem). Zbog izuzetnog značaja, u ovom poglavlju je detaljno obrađena zaštita priključaka i električnih instalacija stambenih objekata od nedozvoljenih opterećenja, indirektnog dodira i atmosferskih prenapona.

**Sedmo poglavlje** se bavi kvalitetom usluga potrošačima, kvalitetom isporuke i kvalitetom isporučene električne energije (frekvencija, visina i talasni oblik napona). U okviru razmatranja problematike pouzdanosti distributivnih sistema prikazuju se pokazatelji pouzdanosti i štete usled prekida napajanja električnom energijom.

**Osmo poglavlje** obrađuje planiranje razvoja elektrodistributivne mreže. Vrši se razvrstavanje planova razvoja, utvrđuju se neophodni podaci i podloge za izradu studija i planova razvoja, daju se tehnički i ekonomski kriterijumi za koncipiranje distributivne mreže i prikazuju konkretne metode za prognozu potreba za električnom snagom i energijom, kao i principi oblikovanja distributivne mreže.

**Deveto poglavlje** daje koncepcijska rešenja i tehničke zahteve za priključenje malih elektrana na distributivnu mrežu, sa posebnim akcentom na primeni obnovljivih izvora električne energije (Sunce, vetar, voda i biomase). Detaljno se prikazuju tehnički kriterijumi koji moraju da se ispune (najveća dozvoljena snaga, flikeri, viši harmonici) za priključenje male elektrane na distributivnu mrežu.

Poglavlja **2, 4 i 8** obradio je Miladin Tanasković, a poglavlja **3, 5 i 9** Tomislav Bojković. Isti autori su zajednički obradili poglavlja **1 i 6**. Dragoslav Perić je obradio poglavlje **7**.

Zbog uloženog napora kod izrade mnogobrojnih proračuna za poglavlje 2, autor Miladin Tanasković se zahvaljuje gospodinu Vladimiru Balkovoju. Takođe, autori Tomislav Bojković i Miladin Tanasković se zahvaljuju gospodinu Draganu Tasiću zbog numeričkog određivanja koeficijenata za proračun strujnog opterećenja nadzemnih vodova izvedenih Al/č provodnicima, SIP-om i SKS-om.

Autori se i ovom prilikom zahvaljuju recenzentima Prof. dr Jovanu Nahmanu i Prof. dr Draganu Tasiću na uloženom trudu i korisnim sugestijama.

Autori će sve primedbe i sugestije čitalaca primati sa zahvalnošću na e-mail-ove: *tanasfam@yubc.net, tomaboj@eunet.yu i dmperic@gmail.com*.

Beograd, mart 2007. Autori