

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Spec. Sci. Stevan Čanović

**IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA
ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMNIM
VODOVIMA**

- Magistarski rad -

Podgorica, 2021. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: **Stevan Čanović**

Datum i mjesto rođenja: 17. 8.1991.g. , Nikšić, Crna Gora

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore

Smjer: Energetika i Automatika, 180 ECTS kredita, 2013. godine

Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore

Smjer: Elektroenergetski sistemi, 60 ECTS kredita, 2014.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Studijski program: Energetika i automatika – Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Izbor i optimalna raspodjela odvodnika prenapona na nadzemnim vodovima

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 7. 5.2018. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 11.12.2018. godine

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

1. Prof. dr Saša Mujović, ETF Podgorica
2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica
3. Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica

Mentor: prof. dr Vladan Radulović

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. dr Saša Mujović, ETF Podgorica
2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica
3. Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Saša Mujović, ETF Podgorica
2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica
3. Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica

Datum odbrane: 28.10.2021.

Datum promocije:

Predgovor

Usljed jako izraženog tehnološkog razvoja potrebe za električnom energijom postaju sve veće i veće. Takođe, treba se uzeti u obzir da živimo u vremenu energetske tranzicije gdje je sve veći broj električnih automobila a i veoma je izražena penetracija obnovljivih izvora energije koje je neophodno integrisati u postojeću mrežu izgradnjom novih vodova. Kako bi se sva energija mogla prenijeti od mjesta proizvodnje do centara potrošnje potrebno je imati poudzan elektroenergetski sistem koji će biti u stanju da ispuni sve zahtjeve korisnika. U cilju ispunjenja sve strožijih zahtjeva koji se postavljaju pred operatore prenosnog i distributivnog sistema moraju se implementirati mjere zaštite koje do sada nijesu često implementirane što zbog ekonomskih što zbog tehničkih ograničenja.

Motiv za rad na ovoj temi je doprinos problematice zaštite nadzemnih vodova prije svega od štetnih uticaja nastalih atmosferskim pražnjenjem kako u sam nadzemni vod ili njegovu blizinu a koja se ogleda kroz optimalnu primjenu linijskih odvodnika prenapona. Način odabira odvodnika prenapona i lokacija na kojima se odvodnici trebaju ugraditi je moguće primjeniti i u slučaju prenosne i distributivne mreže Crne Gore, što bi u krajnjem slučaju predstavljalo najveću korist od rezultata i analiza predstavljenih u ovom radu.

Autor posebnu zahvalnost duguje mentoru Prof. dr Vladanu Raduloviću na uloženom trudu i pomoći pri izradi rada.

Izvod rada

Od elektroenergetskih sistema (EES) se zahtjeva da u svim vremenskim uslovima funkcionišu jednako sigurno i sa visokim nivoom pouzdanosti rada. Najveći izazov za funkcionisanje EES-a predstavljaju dani sa jakom grmljavinskom aktivnošću kada se EES funkcioniše u veoma teškim uslovima. Imajući u vidu da je u takvim okolnostima gotovo nemoguće otkloniti kvar na bilo kom elementu sistema to je neophodno pronaći načine odgovarajuće zaštite naročito nadzemnih vodova koji u slučaju grmljavinskog dana predstavljaju isturene objekte na zemlji i u koje se često dešava pražnjenje. U uslovimaispada jednog ili više vodova sa mreže znatno se otežava rad EES-a pri čemu se znatno povećava mogućnost lančanog ispada elemenata u slučaju velikih opterećenja i potreba za energijom uslijed preopterećenja preostalih vodova. Ukoliko se pri izgradnji nadzemnih vodova postignu zahtjevi po pitanju vrijednosti rasprostiranja uzemljivača propisanih Pravilnicima iz te oblasti rijetko se može desiti ispad voda uslijed atmosferskog pražnjenja. Problem nastaje u situaciji kada je uslijed lošeg geološkog sastava tla propisane vrijednosti otpora uzemljivača nemoguće postići kada najčešće dolazi do isklapanja voda sa mreže u slučaju udara groma. Da li će doći do isklapanja voda sa mreže ili ne zavisi i od parametara samog pražnjenja (amplituda pražnjenja, oblik).

Da bi se preduprijedio problem funkcionisanja nadzemnog voda u otežanim uslovima u današnje vrijeme se koriste odvodnici prenapona u cilju zaštite izolacije voda. Napredak tehnologije je omogućio da se odvodnici ugrađuju i na dalekovodima uslijed znatnog smanjenja težine i mogućnosti paralelnog rada odvodnika.

Cilj rada je određivanje karakteristika odvodnika prenapona koji se ugrađuju na odabranom vodu kao i određivanje optimalnih lokacija za njihovu ugradnju imajući na umu sva ograničenja voda. Do karakteristika odvodnika prenapona i lokacija na kojima ih je potrebno ugraditi dolazi se primjenom odgovarajućeg modela nadzemnog voda i vršenjem većeg broja simulacija u kojima se simuliranjem udara groma u vrh stuba, zaštitno uže ili fazni provodnik dolazi do nivoa prenapona koji naprežu izolaciju i koji mogu dovesti do probroja izolacije. Nakon određivanja nivoa prenapona biraju se odgovarajući odvodnici prenapona. Prilikom odabira odvodnika prenapona naročito se mora voditi računa da ne dođe do njihovog preopterećenja u slučaju prorade a samim tim i uništenja.

Način odabira odvodnika prenapona kao i odabir lokacija na kojima ih je neophodno ugraditi je primjenjen i za slučaj nadzemnog voda u okviru elektroprenosnog sistema Crne Gore na kom je evidentiran veliki broj ispada uslijed pojačanje grmljavinske aktivnosti.

Ključne riječi: prenaponi, nadzemni vod, izolacija, linijski odvodnici prenapona, optimalan odabir.

Abstract

Power systems are required to operate equally safely and with a high level of operational reliability in all weather conditions. The biggest challenge for the operation of the power system is the days with strong thunderstorm activity when the power system operates in very difficult conditions. Having in mind that in such circumstances it is almost impossible to eliminate potential malfunctions on any element of the system, it is necessary to find ways to adequately protect especially overhead lines (OHL) which in case of thunderstorms are protecting objects on the ground and in which discharge often occurs. In the condition of failure of one or more lines from the network, the operation of the power system is significantly hindered, which increases the possibility of chain failure of elements in high loads and energy needs due to the overload of remaining lines. If during the construction of overhead lines the requirements regarding the values of the distribution of earthing conductors prescribed by the Regulations in this area are met, outages due to atmospheric discharge can rarely occur. The problem arises in a situation where due to the poor geological composition of the soil, the prescribed values of the resistance of the grounding system are impossible to achieve when the OHL is most often disconnected from the network in the event of lightning strike. Whether the OHL will be disconnected from the network or not depends on the parameters of the discharge itself (discharge amplitude, shape).

In order to prevent the problem of OHL functioning in difficult conditions, surge arresters are currently used in order to protect overhead line insulation. Advances in technology have made it possible for arresters to be installed on transmission lines as well, due to significant reduction in weight and possibility of the parallel operation of the arresters.

The aim of this paper is to determine the characteristics of surge arresters that are installed on the selected lines as well as to determine the optimal locations for their installation, keeping in mind all limitations of the lines. The characteristics of surge arresters and locations where they need to be installed are obtained by applying an appropriate model of overhead lines and performing a number of simulations in which by simulating lightning strikes at the top of the pole, protective rope or phase conductor leads to surge levels that strain the insulation to the insulation breakdown. After determining the overvoltage level, the appropriate surge arresters are selected. When choosing surge arresters, special care must be taken not to overload them in case of operation and thus suffering.

The method of selection of surge arresters as well as the selection of locations where they need to be installed was applied in case of overhead lines within the electricity transmission system of Montenegro where a large number of outages due to increased thunderstorm activity was recorded.

Key words: overvoltages, overhead line, insulation, line surge arresters, optimal choice

Sadržaj

Predgovor	
Izvod rada	
Abstract	
Sadržaj	
Sadržaj tabela	
Sadržaj slika	
1. Uvod.....	1
2. Prenaponi u elektroenergetskim sistemima	3
2.1 Mehanizam nastanka atmosferskog pražnjenja	4
2.2 Parametri groma	6
2.3 Uticaj atmosferskih pražnjenja na nadzemne vodove	10
3. Prenaponska zaštita nadzemnih vodova.....	17
3.1 Zaštitna užad na nadzemnim vodovima.....	18
3.2 Uzemljenje dalekovodnih stubova	20
3.2.1 Mjerenje specifičnog otpora tla	21
3.2.2 Udarni otpor rasprostiranja.....	22
3.2.3 Vrste uzemljivača.....	23
3.2.4 Dimenzionisanje uzemljivača	24
3.2.5 Tipska rješenja uzemljivača	27
3.3 Odvodnici prenapona	29
3.3.1 Razvoj odvodnika prenapona	29
3.3.2 Karakteristike MO odvodnika	31
3.3.3 Parametri odvodnika prenapona	33
3.3.4 Termička stabilnost odvodnika.....	35
3.4 Linijski odvodnici prenapona i njihova primjena.....	36

4.	Izbor tehničkih karakteristika linijskih odvodnika prenapona.....	42
4.1.	Modelovanje atmosferskog pražnjenja.....	42
4.1.1	Model kanala groma.....	46
4.2	Model stuba	47
4.3	Preskočna karakteristika izolacije.....	52
4.4	Modelovanje uzemljenja	54
5.	Optimizacija lokacija linijskih odvodnika prenapona.....	56
5.1	Procedura odabira optimalnih lokacija	57
6.	Parametarska analiza problema ugradnje linijskih odvodnika prenapona	60
7.	Primjeri primjene u EES Crne Gore	89
7.1	Dalekovodna mreža i učestalost ispada dalekovoda.....	89
7.2.	Predlog za implementaciju linijskih odvodnika prenapona u EES Crne Gore	118
8.	Zaključak.....	120
	Spisak korištene literature	122

Sadržaj tabela

Tabela 1. Vrijednosti standardnog podnosivog napona industrijske frekvencije i udarnog napona izolacije	17
Tabela 2. Vrijednost koeficijenta k	23
Tabela 3. Najmanji presjeci uzemljivača	24
Tabela 4. statistička vjerovatnoća udarne struje groma	26
Tabela 5. Nivoi zagađenosti sredine	35
Tabela 6. vrijednosti rasprostiranja otpora uzemljivača pretpostavljenih u modelu sa povišenim vrijednostima	73
Tabela 7. raspored ugrađenih odvodnika prenapona po stubnim mjestima i fazama.....	82
Tabela 8. broj ispada i vrijeme trajanja ispada dalekovoda za period od 2008. do 2012.....	90
Tabela 9. broj ispada i vrijeme trajanja ispada dalekovoda za period 2016. - 2017.	92
Tabela 10. Vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača.....	97
Tabela 11. Odvodnici prenapona koji su ugrađeni su cilju sprječavanja probroja izolacije u slučaju pražnjenja u vrh stuba ili zaštitni uže.....	107

Sadržaj slika

Slika 1. prikaz standardnog atmosferskog talasa oblika 1,2/50 μ s.....	4
Slika 2. Prikaz grmljavinskog oblaka sa raspodjelom naelektrisanja	4
Slika 3. Prostorno vremenski dijagram razvoja atmosferskog pražnjenja i vremenski oblik struje	6
Slika 4. Oblik talasa atmosferskog pražnjenja 10 μ s /350 μ s amplitude 100 kA.....	8
Slika 5. Keraunička mapa Crne Gore	9
Slika 6. Načini atmosferskog pražnjenja u vodove	11
Slika 7. Udar groma u fazni provodnik i dijeljenje struje groma na dva dijela	13
Slika 8. Uticaj trenutne vrijednosti faznog napona na ukupan napon, koji napreže izolaciju. a) istog polariteta atmosferski prenapon i trenutna vrijednost radnog napona, b) atmosferski prenapon i trenutna vrijednost radnog napona suprotnog polariteta	14
Slika 9. Zaštitni ugao i položaj zaštitnih užadi u odnosu na fazne provodnike	19
Slika 10. Neefikasno postavljeno zaštitno uže	28
Slika 11. Efikasno postavljeno zaštitno uže	19
Slika 12. Raspored sondi prema Venerovoj metodi	21
Slika 13. Položaj uzemljivača u tlu	25
Slika 14. Izgled standarnog uzemljivača jedne stope.....	36
Slika 15. Skica osnovnog uzemljivača (tip A1)	27
Slika 16. Skica uzemljivača tipa B1	28
Slika 17. Skica uzemljivača tipa C1.....	37
Slika 18. Skica uzemljivača tipa D.....	28
Slika 19. Skica uzemljivača tipa D1.....	28
Slika 20. naponi koji se naprežu opremu bez postavljanja odvodnika,sa postavljenim odvodnicima i podnosivi naponi izolacije.....	30
Slika 21a. Poprečni presjek MO odvodnika.....	40
Slika 21b. Poprečni presjek MO odvodnika.....	31
Slika 22. volt amperska karakteristika MO odvodnika prenapona	32
Slika 23. Sistemski i parametri odvodnika prenapona koji su bitni za opremu koja se štiti	34
Slika 24. termička stabilnost MO blokova	36
Slika 25. linijski odvodnik prenapona sa nabrojanim sastavnim djelovima	37

Slika 26. montiran linijski OP.....	47
Slika 27. prikaz voda štićenog odvodnicima prenapona	38
Slika 28. Mogućnost montaže linijskog odvodnika prenapona na dalekovodu	38
Slika 29. Pražnjenje u vod koji nije štićen LOP slika 30. Pražnjenje u vod koji je štićen sa LOP	39
Slika 31. Distribucija struje pražnjenja pri atmosferskom pražnjenju u zaštitno uže za slučaj voda sa ugrađenim linijskim odvodnicima (lijevo) i bez njih (desno)	39
Slika 32.zaštitna armatura (iskrište) na izolatorskom lancu.....	40
Slika 33. prikaz dalekovoda Ston Komolac sa ugrađenim odvodnicima	41
Slika 34. Dvostruko eksponencijalni oblik strujog talasa	43
Slika 35. -Talas eksponencijalnog čela i konstantnog začelja	44
Slika 36. Talas linearno rastućeg čela i linerano opadajućeg začelja.....	45
Slika 37. Talas linearno rastućeg čela i konstantnog začelja	45
Slika 39. Model stuba predstavljenog sa provodnicima u snopu	48
Slika 40. Model stuba sa provodnicima u snopu sa uključenim konzolama.....	48
Slika 41. Multistory model.....	49
Slika 42. Stub tipa jelka sa označenim dimenzijama	50
Slika 43. Portalni stub sa označenim dimenzijama	51
Slika 44. Stub tipa Y sa označenim dimenzijama	52
slika 45. Volt sekundna karakteristika izolatorskog lanca 400 kV	53
Slika 46. Algoritam optimizacije	58
Slika 47. dionica 110 kV dalekovoda korištena za parametarsku analizu problema ugradnje linijskih odvodnika prenapona	60
Slika 48a. Proračun električnih parametara voda.....	61
Slika 48b. Proračun električnih parametara voda.....	61
Slika 49. Blok korišten za modelovanje sistema izolacije	62
Slika 50. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1	63
Slika 51. Vremenska promjena napona na stubu br. 2 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1	63
Slika 52. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1	64

Slika 53. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1	64
Slika 54. Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1	65
Slika 55. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	65
Slika 56. . Vremenska promjena napona na stubu br. 4 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	66
Slika 57. Vremenska promjena napona na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	66
Slika 58 Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	67
Slika 59. Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 10	67
Slika 60. Vremenska promjena napona na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 10	68
Slika 61. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 10	68
Slika 62. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 5	69
Slika 63. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 5	70
Slika 64. Vremenska promjena napona na stubu br. 4 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 5	70
Slika 65. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 5	71
Slika 66. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 1	71
Slika 67. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 1	72
Slika 68. Vremenska promjena napona na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	74
Slika 69. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	74

Slika 70. Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6.....	75
Slika 71. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	75
Slika 72. Vremenska promjena napona na stubu br. 2 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	76
Slika 73. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	76
Slika 74. Vremenska promjena napona na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9	77
Slika 75. Vremenska promjena napona na stubu br. 8 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9	77
Slika 76. Vremenska promjena napona na stubu br. 2 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9	78
Slika 77. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9	78
Slika 78. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	79
Slika 79. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	79
Slika 80. Vremenska promjena napona na stubu br. 4 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 4	80
Slika 81. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 4	80
Slika 82. Vremenska promjena napona na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	82
Slika 83. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	83
Slika 84. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6	83
Slika 85. Vremenska promjena napona na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9	84
Slika 86. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9	84

Slika 87. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	.....	85
Slika 88. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5	.....	85
Slika 89. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6 .....	.....	86
Slika 90. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6 .....	.....	86
Slika 91. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9 .....	.....	87
Slika 92. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5 .....	.....	87
Slika 93. Prikaz grmljavinske aktivnosti, dobijen pomoću sistema za praćenje atmosferskih pražnjenja SCALAR .....	.....	90
Slika 94. Prikaz DV Trebinje- Herceg Novi 110 kV kmz. ....	.....	95
Slika 95. Teren po kom se prostire dalekovod. ....	.....	96
Slika 96. Dio trase DV Trebinje – Herceg Novi 110 kV od stuba 65 do stuba 78 .....	.....	96
Slika 97. Model nadzemnog voda korištenog u simulacijama – programski paket ATP/EMTP .....	.....	97
Slika 98. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71 .....	.....	98
Slika 99. Vremenska promjena napona na stubu br. 70 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71 .....	.....	99
Slika 100. Vremenska promjena napona na stubu br. 69 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71 .....	.....	99
Slika 101. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71 .....	.....	100
Slika 102. Vremenska promjena napona na stubu br. 78 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71 .....	.....	100
Slika 103. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71 .....	.....	101
Slika 104. Vremenska promjena napona na stubu br. 69 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71 .....	.....	102
Slika 105. Vremenska promjena napona na stubu br. 70 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71 .....	.....	102

Slika 106. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71	103
Slika 107. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	103
Slika 108. Vremenska promjena napona na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	104
Slika 109. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	104
Slika 110. Vremenska promjena napona na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	105
Slika 111. Vremenska promjena napona na stubu br. 77 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	105
Slika 112. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	106
Slika 113. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71	107
Slika 114. Vremenska promjena napona na stubu br. 69 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71	108
Slika 115. Vremenska promjena napona na stubu br. 70 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71	108
Slika 116. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71	109
Slika 117. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	109
Slika 118. Vremenska promjena napona na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	110
Slika 119. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	110
Slika 120. Vremenska promjena napona na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	111
Slika 121. Vremenska promjena napona na stubu br. 77 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	111
Slika 122. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	112

Slika 123. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71	113
Slika 124. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71	113
Slika 125. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	114
Slika 126. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	114
Slika 127. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 77 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78	115
Slika 128. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi C na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 66	115
Slika 129. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	116
Slika 130. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	116
Slika 131. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi C na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	117
Slika 132. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi C na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65	117

1. Uvod

Kako je potrošnja električne energije na sve većem nivou, to je potrebno obezbijediti pouzданo i sigurno napajanje svih potrošača. Da bi se velike količine električne energije mogle prenijeti od izvora proizvodnje do mjesta gdje je koncentrisana potrošnja u najvećoj mjeri (gradska naselja) potrebno je izgraditi nadzemne vodove visokih naponskih nivoa. Imajući u vidu da su ti nadzemni vodovi najčešće velike dužine i da najčešće idu koridorima sa veoma nepovoljnim terenom, to je potrebno obezbijediti njihovu zaštitu od kvarova i opasnih radnih stanja.

Nadzemne vodove je potrebno zaštiti prvenstveno od direktnih i indirektnih udara atmosferskih pražnjenja. Atmosferska pražnjenja predstavljaju najveću opasnost za izolacioni sistem nadzemnog voda, i često dovode do probaja izolatora, pri čemu dolazi do isključenja voda sa mreže. Neoperativnost nadzemnog voda, može u određenim situacijama prouzrokovati nestabilnost elektroenergetskog sistema. U svrhu zaštite nadzemnog voda se koriste zaštitna užad, koja imaju za cilj da na sebe preuzmu pražnjenje i na taj način zaštite fazne provodnike. Prilikom udara pražnjenja u stub i proticanja struje pražnjenja, koja ima najčešće velike vrijednosti, dolazi do porasta napona na stubu. Napon nastao pri proticanju struje pražnjenja kroz stub u najvećoj mjeri zavisi od vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača stuba. Prema tome je potrebno voditi računa o postizanju zadovoljavajuće otpornosti uzemljivača stubova nadzemnih vodova, kako bi se spriječila pojava nastanka povratnog preskoka na stubu.

Za slučajeve kada je zbog lošeg geološkog sastava tla veoma teško ili čak nemoguće dostići zahtjevani nivo otpornosti uzemljivača, nameće se pitanje kako zaštiti nadzemni vod od ispada uslijed prenapona, naročito u današnje vrijeme kada su potrebe za električnom energijom sve veće i gdje se pred operatore prenosnih sistema postavljaju sve strožiji zahtjevi u pogledu broja ispada nadzemnih vodova. Za tu svrhu se koriste linijski odvodnici prenapona (LOP) koji imaju za cilj rezanje prenaponskog talasa koji se kreće provodnicima nadzemnog voda i njegovo snižavanje na nivo koji izolacija može podnijeti. U svijetu je primjetan trend rasta ugradnje linijskih odvodnika na nadzemnim vodovima pogotovo u djelovima trasa koje se nalaze na izdignutom terenu, gdje je vod najizloženiji udaru atmosferskog pražnjenja. Da bi se mogli odabrati parametri linijskog odvodnika potrebno je izvršiti simulacije pomoću softverskih paketa koji su za to namjenjeni i na osnovu rezultata simulacije izvršiti specifikaciju tehničkih karakteristika odvodnika.

Usljed ekonomskih ograničenja nije moguće izvršiti instalaciju linijskih odvodnika prenapona na svakom stubnom mjestu, i u svakoj fazi, pa je iz tih razloga neophodno izvršiti potrebne analize, pomoću kojih će se doći do optimalnog broja odvodnika kao i tehničkih karakteristika koje odvodnik mora imati u cilju postizanja efikasne zaštite.

U cilju određivanja optimalnog broja i karakteristika odvodnika prenapona u radu je sproveden veliki broj analiza i proračuna na osnovu razvijenih simulacionih modela. Simulacije su sprovedene u programskim paketima EMTP i MATLAB/Simulink. Tačnost dobijenih

rezultata uslovljena je preciznim modelima uticajnih parametara. U tom smislu, fazni provodnici i zaštitna užad nadzemnih vodova su modelovani vodovima sa distribuiranim parametrima, dok su stubovi modelovani primjenom višestepenih modela.

Ilustracija primjene optimizacionog pristupa je primijenjena na slučaj nadzemnih vodova koji pripadaju prenosnom sistemu EES Crne Gore.

Rad je podjeljen u osam poglavlja. Prvo poglavlje je uvodno poglavlje u kome su date uvodne napomene o temi koja je obrađena u radu.

U drugom je opisan princip nastanka atmosferskog pražnjenja, sa bitnim karakteristikama atmosferskih pražnjenja, kao i njihov uticaj na nadzemne vodove.

U trećem poglavlju je razmatrana prenaponska zaštita nadzemnih vodova, gdje je opisana primjena zaštitnih užadi, uzemljivački sistem stubova nadzemnih vodova, čemu se pri projektovanju i izgradnji treba posvetiti naročita pažnja, jer otpor rasprostiranja uzemljivača predstavlja jedan od najuticajnijih faktora za mogućnost nastanka preskoka na izolaciji voda pri pojavi atmosferskog pražnjenja. U istom poglavlju su opisani i linijski odvodnici prenapona, čijom primjenom se mogu ostvariti najbolji rezultati u cilju štićenja vodova u problematičnim zonama, tj. zonama gdje nije moguće postići željene parametre uzemljivača. Prikazani su načini montaže linijskih odvodnika prenapona, kao i njihov način funkcionisanja.

U četvrtom poglavlju je razrađen odabir tehničkih karakteristika linijskih odvodnika prenapona i simulacije udara atmosferskog pražnjenja u stubna mjesta na odabranim ilustrativnim primjerima.

U petom poglavlju je prikazan način odabira voda na kojem je potrebno primjeniti linijske odvodnike prenapona.

Poglavlje broj šest opisuje način odabira karakteristika linijskih odvodnika prenapona kao i način odabira optimalnih lokacija za ugradnju uz poštovanje ekonomskih ograničenja. Takođe, u šestom poglavlju prikazan je i uticaj različitih vrijednosti parametara nadzemnog voda na nivo prenapona.

Poglavlje broj sedam prikazuje primjere primjene linijskih odvodnika prenapona u okviru elektroenergetskog sistema Crne Gore, gdje je prikazan optimalan odabir lokacija ugradnje kao i broj ugrađenih odvodnika prenapona zajedno sa efektima koje nosi ugradnja linijskih odvodnika prenapona na nadzemnim vodovima. Osvrt je dat i na sredstva neophodna za realizaciju ugradnje odvodnika prenapona.

U osmom poglavlju je dat zaključak, u kome su navedeni svi benefiti upotrebe linijskih odvodnika prenapona. Na kraju rada je dat spisak korišćene literature.

2. Prenaponi u elektroenergetskim sistemima

Svako povećanje napona iznad najvišeg napona opreme smatra se da izlazi iz domena normalnog pogona i naziva se prenaponom. Prenapon predstavlja napon između faznog provodnika i zemlje ili između faznih provodnika, čija vrijednost prelazi odgovarajuću vrijednost najvišeg napona opreme [1]. Prenaponi se prema uzorku nastanka mogu podjeliti na spoljašnje i unutrašnje prenapone.

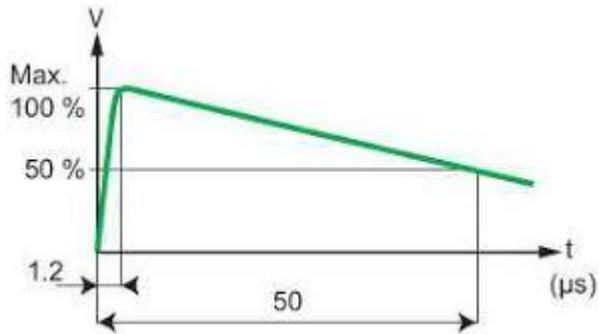
Prenaponi se klasificiraju prema obliku i njihovom trajanju, kako je to definisano standardom IEC 60071-1 pa su s toga podijeljeni u sljedeće klase: [1]

- Prenapon pogonske frekvencije: ima konstantnu efektivnu vrijednost i trajno je priključen na stezaljke opreme.
- Privremeni prenapon: je prenapon pogonske frekvencije relativno dugog trajanja. Može biti neprigušen ili slabo prigušen. U nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije.
- Prelazni prenapon je kratkotrajni prenapon trajanja nekoliko milisekundi ili kraći, oscilatoran ili neoscilatoran, obično jako prigušen. Prelazni prenaponi podijeljeni su na:
 - a) Prenapone sporog porasta čela: To su prelazni prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $20 \mu\text{s} < T_1 < 5000 \mu\text{s}$, i trajanjem začelja od $T_2 < 20 \text{ ms}$.
 - b) Prenapone brzog porasta čela: To su prelazni prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $0.1 \mu\text{s} < T_1 < 20 \mu\text{s}$, i trajanjem začelja od $T_2 < 300 \mu\text{s}$.
 - c) Prenapone vrlo brzog porasta čela: To su prelazni prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $T_1 < 0.1 \mu\text{s}$, ukupnog trajanja $< 3 \text{ ms}$. Oni su obično superponirani oscilacijama frekvencija $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$.
- Kombinovani (privremeni sporog porasta čela, brzog porasta čela, vrlo brzog porasta čela) prenaponi sastoje se od dvije ili više komponenti istovremeno, a opterećuju izolaciju opreme priključenu između zemlje i faze. Klasificiraju se prema komponenti više vršne vrijednosti.

Za ovaj rad su od interesa atmosferski prenaponi, način njihovog nastanka i zaštita od štetnih efekata.

Atmosferski prenaponi spadaju u red prenapona vrlo brzog porasta čela, zbog čega predstavljaju i najveću opasnost za izolacioni sistem nadzemnog voda. Standardni talasni impuls se modeluje

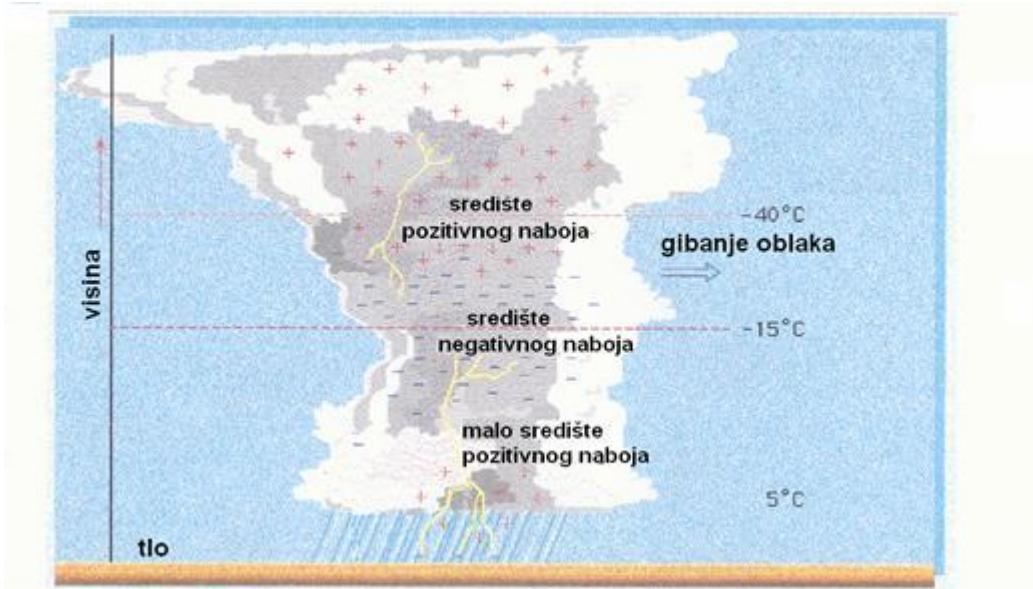
pomoću talasa oblika $1,2/50 \mu\text{s}$ (slika 1.), gdje 1,2 predstavlja vrijeme trajanja čela, dok je vrijeme od $50 \mu\text{s}$ vrijeme trajanja začelja talasa. Jasno je da su atmosferski prenaponi veoma kratkog trajanja, ali dostižu veoma visoke vrijednosti. Prema određenim statističkim podacima, 65 % ispada nadzemnih vodova sa mreže, jeste posljedica atmosferskog pražnjenja [2].



Slika 1. prikaz standardnog atmosferskog talasa oblika $1,2/50 \mu\text{s}$

2.1 Mehanizam nastanka atmosferskog pražnjenja

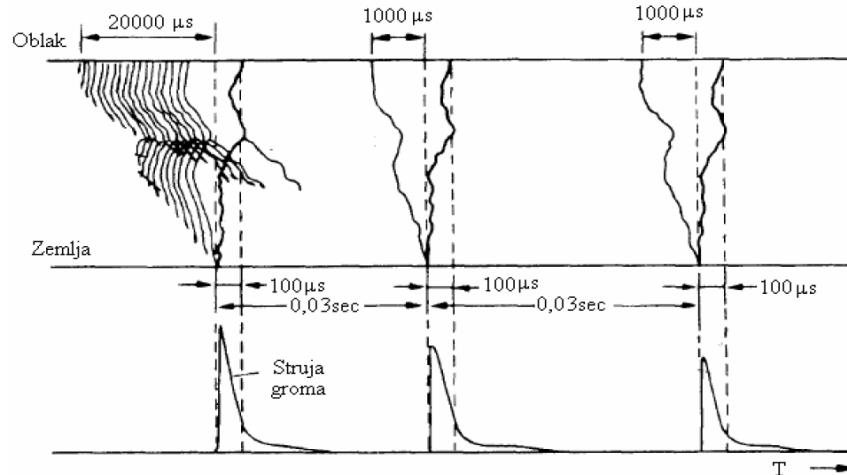
Prenaponi atmosferskog porijekla nastaju uslijed pražnjenja elektriciteta koje je nagomilano u oblacima, čiji se nastanak tumači na različite načine, pa samim tim postoji i niz teorija koje se bave nastajanjem nanelektrisanih čestica u oblacima [3]. U grmljavinskom oblaku veće čestice su obično negativne, dok su manje pozitivne. Zbog toga je donji dio oblaka uglavnom negativno nanelektrisan, a gornji dio pozitivno -slika 2 .Posmatran kao cjelina oblak je neutralan sa jednakim količinama pozitivnog i negativnog nanelektrisanja.



Slika 2. Prikaz grmljavinskog oblaka sa raspodjelom nanelektrisanja

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

Vazduh koji struji odnosi negativno nanelektrisane čestice na veća rastojanja obrazujući na taj način dominantno negativnu masu oblaka. Opterećenje u oblaku izaziva suprotno opterećenje na zemlji, pa se s toga može reći da sistem oblak zemlja čini kondenzator u kome jačina polja može imati značajne vrijednosti. Srednja vrijednost polja iznosi oko 10 kV/m a na nekim mjestima vrijednost polja dostiže i do 200 kV/m. Kada jačina električnog polja dostigne kritičnu vrijednost tada se stvaraju uslovi za atmosfersko pražnjenje. Pražnjenje se sastoji iz više faza [4]. Prvu fazu električnog pražnjenja predstavlja korona koja predstavlja proces tinjavog pražnjenja. Manifestuje se u vidu kratkotrajnih strujnih impulsa uslijed obrazovanja lavina koje se šire u prostor do mjesta gdje je polje slabije od kritičnog. Kada dužina lavine postane veća od kritične, a broj slobodnih elektrona prevaziđe neku kritičnu granicu, prostorna nanelektrisanja stvorena udarnom jonizacijom mogu da izazovu lokalna pojačanja polja koja stvaraju nove "sekundarne lavine". One se pružaju u pravcu linija najjačeg polja, obrazujući strimer. Drugu fazu pražnjenja karakteriše pojava skokovitog lidera koji nastaje uslijed razvoja strimera. Energija nastala proticanjem struje kroz kanale strimerovog pražnjenja pretvara se u toplotu. Toplotna energija vrši dalju termičku jonizaciju povećavajući provodljivost početka strimera. Ovaj dio kanala naziva se korijenom strimerovog pražnjenja. Dio tako obrazovanog jako ionizovanog kanala naziva se liderom. Da bi strimer prerastao u lidera potrebna je dovoljno velika struja strimerovog pražnjenja. Dužina lidera je od 5 do 50 m. Nakon pražnjenja kanala strimera i obrazovanja lidera proces se na trenutak zaustavlja da bi se nastavio sa novim skokom u istom ili različitom pravcu nakon vremena potrebnog za formiranje dovoljne koncentracije nanelektrisanja u vrhu lidera. To je trenutak kada nastaje skokoviti lider. Struja skokovitog lidera dostiže nekoliko stotina ampera. Kada se skokoviti lider dovoljno približi zemlji ili nekom uzemljenom objektu, pojavljuju se strimeri iz glave skokovitog lidera i sa tog objekta. U trenutku kada se ovi strimeri susretnu, nastaje faza glavnog pražnjenja. U ovoj fazi dolazi do postepene neutralizacije nanelektrisanja u kanalu groma iz zemlje prema oblaku. Karakteristika ove faze pražnjenja je velika struja koja dostiže vrijednosti od preko 100 kA. Manifestuje se i snažnim svjetlosnim i zvučnim efektom. Proces glavnog pražnjenja se gasi kada se potpuno neutrališe električni naboj u kanalu groma. Time je završeno trajanje jednog udara groma. Međutim udar groma se najčešće sastoji iz više uzastopnih pražnjenja, tri četvrtine pražnjenja ima takav karakter, jer često nije dovoljno jedno glavno pražnjenje da bi se neutralizovalo kompletno nanelektrisanje oblaka [3]. Atmosfersko pražnjenje koje ima višestruki karakter se sastoji od jednog glavnog i u prosjeku tri propratna pražnjenja, a zabilježeni su slučajevi sa 54 pražnjenja u toku jednog udara groma. Nakon prvog glavnog pražnjenja poslije pauze od nekoliko desetina ms od oblaka prema zemlji se razvija pražnjenje po prethodno ionizovanom kanalu, koji nazivamo strelovitim liderom, koji je znatno brži od skokovitog lidera. U trenutku kada streloviti lider dostigne zemlju nastaje drugo glavno pražnjenje. Proses se nastavlja do potpune neutralizacije oblakovog nanelektrisanja. Slika 3 prikazuje proces pražnjenja.



Slika 3. Prostorno vremenski dijagram razvoja atmosferskog pražnjenja i vremenski oblik struje

Objekti, koji su najizloženiji atmosferskim pražnjenjima jesu visoke zgrade, stubovi nadzemnih vodova kao i visoko drveće.

Granično rastojanje, na kojem će doći do susretanja lidera i strimera sa uzemljenog objekta može se odrediti pomoću empirijske formule [2]:

$$D = 6,7 I^{0,8} \quad (1)$$

gdje je: D – rastojanje na kojem dolazi do faze glavnog pražnjenja
I – struja pražnjenja u kA

Razlikuju se pražnjenja pozitivnog i negativnog polariteta. Pražnjenja sa negativnim polaritetom su znatno učestalija. U područjima sa umjerenom klimom, ona čine 80 % do 90 % pražnjenja [2]. Kod oba polariteta se razlikuju silazna i uzlazna pražnjenja. Kod silaznih se lider razvija u oblaku, dok je se kod uzlaznih razvitiak lidera vezuje za zemlju. Silazna pražnjenja su karakteristična za ravničarska područja, dok se slučajevi uzlaznog pražnjenja javljaju kod visokih objekata kao i stubova nadzemnih vodova koji se nalaze na uzdignutim mjestima (brda i sl.). Negativna pražnjenja se sastoje od nekoliko uzastopnih pražnjenja, dok se pražnjenje pozitivnog polariteta sastoje od samo jednog pražnjenja, i za njega se vezuju znatno veće amplitude struje, koje mogu dostignuti i preko 100 kA [4].

2.2 Parametri groma

Najvažnije karakteristike udara groma su [3]:

- struja groma
- napon koji se javlja prilikom udara
- oblik napona / struje
- polaritet struje

- opterećenje koje struja groma odnosno oblak imaju
- učestanost pojave struje groma

Struja groma koja se pojavljuje prilikom atmosferskog pražnjenja se kreće od nekoliko kA do preko 250 kA, s tim da su zabilježeni slučajevi gdje je struja dostigla vrijednost od oko 400 kA. Najveći procenat (preko 50 %) čine struje intenziteta do 20 kA, dok struje veće od 200 kA učestvuju sa procentom manjim od 1%. Vjerovatnoća pojave struje određenog iznosa se može odrediti pomoću izraza 2 [4].

$$P(I) = e^{-\frac{I_m}{\alpha}} \quad (2)$$

gdje je : I_m - struja pražnjenja

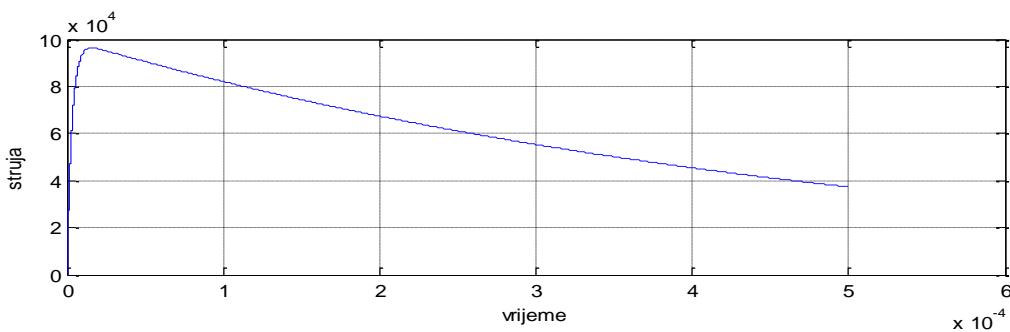
α – konstanta koja se određuje eksperimentalno na osnovu rezultata niza mjerena za posmatranu oblast ili teritoriju jedne države.

Kolika će biti amplituda struje, između ostalih faktora, zavisi od nadmorske visine i ona varira od regiona do regiona,

Napon koji se javlja prilikom atmosferskog pražnjenja je vrlo teško odrediti, znatno teže nego struju. Procijenjuje se da napon koji postoji prilikom pražnjenja između zemlje i oblaka iznosi nekoliko miliona volti, pa je samim tim jasno zbog čega se ne praktikuje njegovo mjerjenje. Način na koji je moguće određivanje napona je ekvivalentiranjem napona sa proizvodom struje udara groma i talasnog otpora kanala groma (Z_g).

$$U = Z_g \cdot I_m \quad (3)$$

Oblik strujnog talasa se definiše vremenom trajanja čela i vremenom trajanja začelja talasa (aperiodični talasi). Vrijeme trajanja čela je ono vrijeme koje je potrebno da struja naraste do maksimalne vrijednosti (period od 1 do 10 μ s), dok vrijeme začelja talasa predstavlja vrijeme koje je potrebno da bi talas dostigao svoju maksimalnu vrijednost i potom opao na polovinu svoje maksimalne vrijednosti. IEC standardom 62350-1 je za oblik talasa glavnog pražnjenja usvojen oblik talasa 10 μ s / 350 μ s (prikaz dat na slici 4), dok je isti standard za oblik talasa propратnih pražnjenja tj. pražnjenja koji se dešavaju nakon glavnog atmosferskog pražnjenja definisao talas oblika 0,25 μ s / 100 μ s . Kod oblika talasa najvažnija je brzina kojom se on uspostavlja, tj. strmina čela talasa koja se izražava u [kA / μ s] [5].

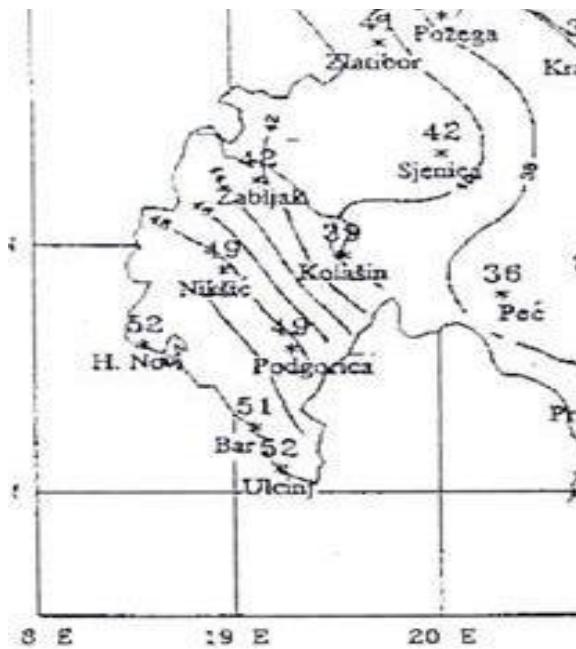


Slika 4. Oblik talasa atmosferskog pražnjenja $10 \mu s / 350 \mu s$ amplitude $100 kA$

Najveći broj pražnjenja 80 - 90 % ima negativno opterećenje koje iz oblaka silazi u zemlju. **Naelektrisanja** koja se nakupe u oblaku se kreću u intervalu od 0,05 do 200 kulona, sa prosječnom vrijednošću od 20 kulona, prilikom pražnjenja u zemlju se odvode naelektrisanja od 2 do 200 kulona sa prosjekom od 20 kulona ako su u pitanju jednostruka pražnjenja. U slučaju da pražnjenja imaju višestruki karakter pojedinačni udari imaju naelektrisanje od obično 8 do 10 kulona. Naelektrisanje koje se nalazi u oblaku i koje se prilikom udara groma spušta ka zemlji je odgovorno za termička i mehanička naprezanja na mjestu gdje atmosfersko pražnjenje dodirne zemlju ili neki uzemljeni objekat. Što je veće naelektrisanje veća su i naprezanja.

Učestanost pojave atmosferskih pražnjenja zavisi od geografskih i meteoroloških uslova. Jedan od najčešće korišćenih opštih meteoroloških parametara koji služi kao mjerilo grmljavinske aktivnosti na nekom području je keraunički nivo. Keraunički nivo se definiše kao prosječan broj dana sa grmljavinom u toku godine na određenom području, a određuje se posmatranjem. Da bi se mogla odrediti ugroženost od udara pri atmosferskim pražnjenjima potrebno je poznavati srednji broj udara po $1 km^2$ u toku jednog dana sa grmljavinom.. Keraunička mapa Crne Gore je prikazana na slici 5. Broj ispada nadzemnih vodova je u direktnoj vezi sa učestalošću pojave atmosferskih pražnjenja, s toga je ovaj podatak veoma bitan pri projektovanju nadzemnih vodova.

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMNIM VODOVIMA



Slika 5. Keraunička mapa Crne Gore [6]

Kako je rečeno da se broj grmljavinskih dana određuje za određenu oblast na osnovu posmatranja, za inženjerske proračune se preporučuje poznavanje gustine pražnjenja u površinu zemlje Ng . Za računanje gustine pražnjenja je razvijeno nekoliko empirijskih izraza, od kojih je najpoznatiji dat izrazom 4 [2].

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (\text{udara/km}^2 \text{ god}) \quad (4)$$

gdje T_d predstavlja broj grmljavinskih dana u toku godine koji je dobijen pomoću izokerauničke karte.

Kako je struja najpoznatiji parametar udara groma to se sam udar najčešće ekvivalentira pomoću strujnog izvora. Eksperimentalnim putem se došlo do zaključka da struja groma zavisi od otpora uzemljenja objekta koji je pogoden udarom. Za male vrijednosti otpora uzemljenja, što je obično i slučaj (uobičajene vrijednosti do 25Ω), ovaj uticaj ne dolazi do izražaja, već u tom slučaju struja atmosferskog pražnjenja zavisi od vrijednosti otpora kanala groma. Prilikom udara groma u uzemljeni objekat nastaje stруja I_1 koju je moguće izračunati priključenjem napona U na talasni otpor kanala groma i otpor uzemljenja R .

$$I_1 = \frac{U}{Z_g + R} \quad (5)$$

Ako u izrazu 3 se zamijeni vrijednost za U tada će se za struju I_1 dobiti sljedeći izraz

$$I_1 = \frac{Z_g \cdot I_m}{Z_g + R} \quad (6)$$

gdje R predstavlja otpor rasprostiranja uzemljenja objekta u koji se desilo pražnjenje.

2.3 Uticaj atmosferskih pražnjenja na nadzemne vodove

Kada se atmosfersko pražnjenje desi u nadzemni vod dolazi do pojave veoma štetnih pojava, koje često dovode do isključenja voda sa mreže. U zavisnosti od konstrukcije nadzemnog voda, zavisi i kakva dejstva na izolaciju voda pražnjenje može izazvati.

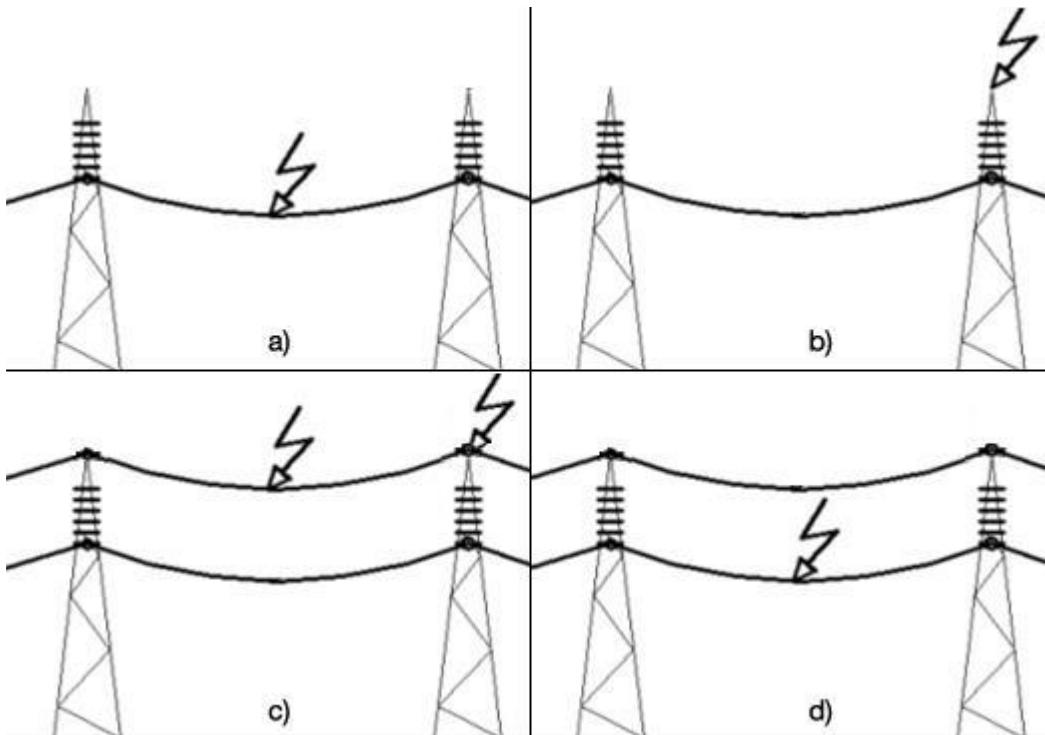
U elektroenergetskim sistema se sa stanovišta ponašanja pri atmosferskim pražnjenjima razlikuju sljedeće grupe nadzemnih vodova:

- vodovi sa čelično-rešetkastim ili armirano betonskim stubovima bez zaštitnog užeta
- vodovi sa čelično-rešetkastim ili armirano betonskim stubovima sa zaštitnim užetom
- vodovi sa drvenim stubovima bez zaštitnog užeta

Prilikom atmosferskog pražnjenja izolacija vodova sa čelično-rešetkastim stubovima, bez zaštitnog užeta može biti ugrožena na tri načina:

- direktnim pražnjenjem u fazni provodnik (slika 6 a)
- pražnjenjem u vrh stuba koje izaziva preskok ka faznom provodniku (slika 6 b)
- pražnjenjem u neposrednu blizinu voda, pri čemu se indukuju naponi na faznim provodnicima

Pri pražnjenju u vodove sa čelično rešetkastim stubovima , koji sadrže zaštitno uže, izolacija voda je ugrožena i u slučaju pražnjenja u zaštitno uže, pored pražnjenja u sami stub (slika 6 c). Takođe se, na vodovima koji su pokriveni zaštitnim užetom može desiti i pražnjenje u fazni provodnik (slika 6 d).



Slika 6. Načini atmosferskog pražnjenja u vodove

Najmanju prijetnju po nadzemne vodove, naročito vodove naponskog nivoa iznad 110 kV predstavljaju **indukovani prenaponi**, koji rijetko dostižu vrijednosti veće od 600 kV [2]. Izolacija nadzemnih vodova 110 kV i viših najčešće bez problema može izdržati naprezanja izazvana indukovanim prenaponima, nastalim uslijed atmosferskog pražnjenja u blizinu nadzemnog voda.

Kod vodova bez zaštitnih užadi, pojava direktnog **pražnjenja u fazni provodnik** je dosta česta. Po udaru groma u fazni provodnik, nastali prenaponski talas se prostire na obije strane u odnosu na mjesto udara. Kada prenaponski talas dođe do stuba, u zavisnosti od amplitude talasa može se javiti preskok sa faznog užeta na stub. Da li će do toga doći ili ne zavisi od izolacionog nivoa opreme (podnosivog napona izolacije) samog voda. U slučaju pojave većeg napona u odnosu na podnosivi napon izolacije, doći će do preskoka. Ako dođe do pojave preskoka, uslijed dejstva radnog napona voda, struja će nastaviti da teče kroz jonizovani kanal, koji se javlja kao posljedica preskoka. Da bi se prekinuo tok struje i električni luk koji se stvara, potrebna je dejonizacija prostora u kojem gori električni luk, zbog čega je neophodno isključiti vod sa mreže. Često je dovoljna prorada APU-a (automatskog ponovnog uključenja prekidača) da bi se prostor dejonizovao, čime bi se obnovila dielektrična čvrstoća vazdušne izolacije. Ukoliko je pak kvar trajan, potrebno je isključenje voda sa mreže do pronalaska i

njegovog otklanjanja. Beznaponsko stanje voda pri dejstvu APU-a je manje od 1s, i pri tome većina potrošača neće imati smetnje u radu. Ukoliko se električni luk javi i nakon odrade APU-a, takav APU se naziva neuspješnim. U mrežama viskog napona se razlikuje monofazni i trofazni APU. Manje poremećaje u sistemu izaziva monofazni APU jer su sklopni prenaponi u tom slučaju znatno niži, čime se smanjuje naprezanje elemenata elektroenergetskog sistema. Ono što je karakteristika rada monofaznog APU-a, kod mreža visokog napona, jeste pojava indukovanih napona na provodniku faze koja je pogodjena kvarom. Pri dejstvu, na takav način, indukovanih napona, može doći do održanja električnog luka, iako je provodnik isključen. Takva pojava se naziva sekundarnim lukom. Pri radu trofaznog APU-a, ta pojava nije moguća. Kada dođe do direktnog atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, struja pražnjenja, koja se prostire kanalom groma, se dijeli na dva dijela koji se prostiru ka dva kraja voda. Vrijednost naponskog talasa, koji se prostire po provodniku je data izrazom 7 [4].

$$U = Z_g \frac{I_g}{2} \quad (7)$$

Podatak koji je bitan za nadzemne vodove jeste očekivana struja groma u dobro uzemljeni objekat. Ona se dobija pri registraciji atmosferskih pražnjenja na uzemljenim stubovima, na kojima dolazi do atmosferskog pražnjenja.

Ukupna struja I_g (struja po kanalu groma) se može rastaviti na dvije komponente, i to upadnu i odbojnu komponentu. Upadna komponenta struje groma se u vidu putujućeg talasa kreće od oblaka ka zemlji, dok je druga komponenta struje groma, komponenta koja se odbija od uzemljivača i koja se kreće ka oblaku. Ukupnu struju groma čini zbir navedene dvije komponente. Za amplitudu struje groma u dobro uzemljeni objekat se može smatrati da važi sljedeći izraz:

$$I_m = I_{up} + I_{od} \quad (8)$$

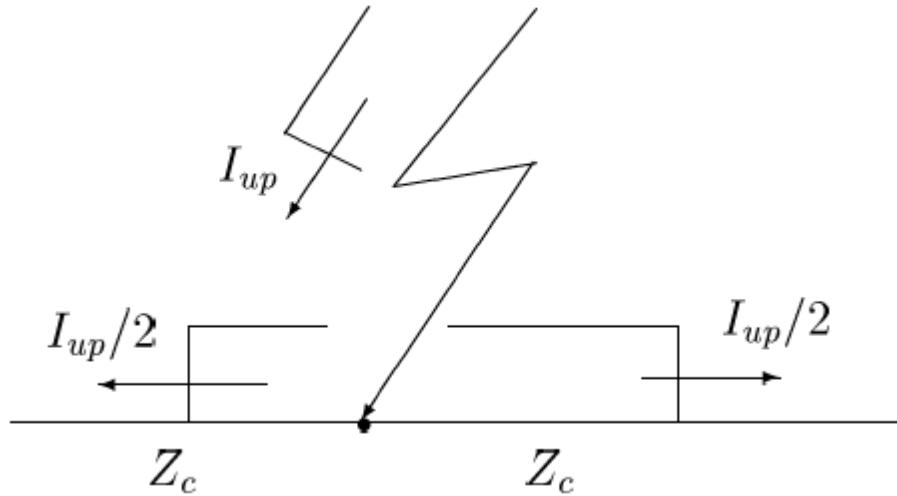
Za slučaj kada je vrijednost otpora uzemljivača mnogo niža od vrijednosti otpora stuba tada važi izraz 9.

$$I_m \approx 2I_{up} \quad (9)$$

Što znači da se upadni talas u potpunosti odbija od uzemljivača, jer se može smatrati da je karakteristična impedansa stuba po svojoj vrijednosti bliska karakterističnoj impedansi kanala groma [4]. Na osnovu navedenog se može zaključiti da ukoliko se poznaje vrijednost struje u dobro uzemljeni objekat, može se odrediti i vrijednost upadne komponente po kanalu struje groma. Vrijednost koja je data izrazom 9, važi za pražnjenje u vrh stuba. Na osnovu poznate vrijednosti struje, može se odrediti i vrijednost napona, koji dalje napreže izolaciju.

Za pražnjenja u fazni provodnik se može smatrati da je karakteristična impedansa kanala groma približno jednaka polovini karakteristične impedanse faznog provodnika [4]. Kako je već rečeno da se strujni talas pri udaru u fazni provodnik dijeli na dva dijela, koji se dalje kreću ka krajevima voda, može se smatrati da strujni talas nailazi na fazni provodnik sa ekvivalentnom

vrijednosti otpora, koja je jednaka polovini karakteristične impedanse faznog provodnika. Kako su karakteristične impedanse faznog provodnika i kanala groma približno jednake, neće doći do refleksije strujnog talasa (koeficijent odbijanja jednak nuli). Udar groma u fazni provodnik i dijeljenje struje groma na dva dijela je prikazano na slici 7.



Slika 7. Udar groma u fazni provodnik i dijeljenje struje groma na dva dijela

Vrijednost struje koja će se prostirati faznim provodnikom je data izrazom 10.

$$I_f = \frac{I_{up}}{2} = \frac{I_m}{4} \quad (10)$$

Na osnovu poznate vrijednosti struje, koja se prostire faznim provodnikom, može se odrediti i vrijednost prenaponskog talasa koji se širi faznim provodnikom.

$$U_f = Z_c I_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (11)$$

Ono što treba naglasiti jeste da će pri prostiranju prenaponskog talasa, doći do njegovog prigušenja i izobličenja uslijed gubitaka na vodu i na povratnom putu prema zemlji, kao i uslijed pojave korone. Da li će doći do preskoka prema konzoli stuba zavisi od vrijednosti podnosivog napona izolacije U_{iz} . Granična vrijednost struje, pri kojoj će doći do preskoka prema konzoli se dobija iz izraza:

$$I_m \geq \frac{4U_{iz}}{Z_c} \quad (12)$$

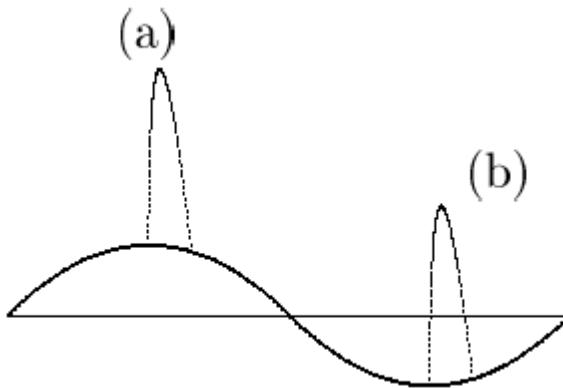
Da bi se dobila realnija vrijednost napona, koji ugrožava izolaciju, u obzir je potrebno uzeti i uticaj radnog napona. Uticaj radnog napona posebno dolazi do izražaja kod vodova nazivnog napona 110 kV i višeg. Tada se za vrijednost napona, koji napreže izolaciju dobija sljedeća vrijednost:

$$U_f = Z_c \frac{I_m}{4} + U_m \cos \Theta \quad (13)$$

gdje su: U_m – tjemena fazna vrijednost radnog napona voda

Θ – početna faza radnog napona u trenutnu pražnjenja, i uzima vrijednost od 0 do π

Ono što se može uočiti jeste da vrijednost radnog napona može doprinjeti kako povećanju, tako i smanjenju prenapona, u zavisnosti od vrijednosti ugla Θ . Uticaj radnog napona na vrijednost prenapona je prikazana na slici 8.



Slika 8. Uticaj trenutne vrijednosti faznog napona na ukupan napon, koji napreže izolaciju. a) istog polariteta atmosferski prenapon i trenutna vrijednost radnog napona, b) atmosferski prenapon i trenutna vrijednost radnog napona suprotnog polariteta

Za nadzemne vodove visokog napona je karakteristično da su najčešće pokriveni zaštitnim užetom. Najveća opasnost, sa najučestalijom pojmom, za izolaciju voda predstavlja udar u **sami stub ili zaštitno uže**. U slučajevima kada je vrijednost otpora uzemljivača velika, i pri pojavi pražnjenja koja karakterišu velike amplitude i strmine struje, može se desiti da potencijal konzole stuba u odnosu na fazni provodnik poraste iznad podnositivog udarnog napona izolacije. Ukoliko se ispunе navedeni uslovi doći će do pojave preskoka sa konzole stuba na fazni provodnik, što se naziva **povratnim preskokom**.

Da bi se procijenila visina prenapona pri povratnom preskoku potrebno je izvršiti modelovanje stuba. Stub je moguće modelovati na više načina. Modeli su dati u posebnom poglavlju ovog rada.

Pri proračunu vrijednosti napona, koji se pojavljuje na stubu u obzir je potrebno uzeti i međusobnu induktivnost između kanala groma i stuba:

$$M_s = m_s h_k \quad (14)$$

Gdje je: m_s – podužna međusobna induktivnost između kanala groma i stuba i za čiju se vrijednost može usvojiti vrijednost od $0,2 \mu\text{H}/\text{m}$ [4]

h_k – visina najvisočije konzole

Maksimalni prenaponi na faznoj izolaciji prilikom udara groma u stub ili zaštitno uže se pojavljuju za vrijeme uspostavljanja čela talasa. Ukoliko je vrijeme uspostavljanja čela talasa kraće od vremena potrebnog da prenaponski talas stigne do susjednog stuba i da se od njega reflektuje, tada se može reći da na visinu prenapona ne utiču susjedni stubovi [4].

Amplituda napona na konzoli stuba pogodenog atmosferskim pražnjenjem u odnosu na referentnu tačku (udaljena zemlja) se dobija pomoću izraza:

$$U_s = I_s R_{uz} + l_s h_k \frac{I_s}{T_c} + m_s h_k \frac{I_g}{T_c} \quad (15)$$

Gdje je: I_s – struja koja protiče kroz stub

R_{uz} – vrijednost otpora uzemljivača

l_s – podužna induktivnost stuba

T_c – vrijeme trajanja čela talasa

Iraz 15 važi za model stuba sa koncentrisanom induktivnošću, i u njemu se može smatrati da struja kroja protiče kroz stub ima vrijednost od 80 % u odnosu na struju groma. Preostalih 20 % struje otiče preko zemljovodnih užadi.

Da bi se mogla odrediti vrijednost napona, koji napreže izolaciju na vodu u obzir je potrebno uzeti i trenutnu vrijednost faznog radnog napona, što je napomenuto ranije, po relaciji.

$$U_{iz} = U_s - U_m \cos \theta \quad (16)$$

Jasno je da za izolaciju voda najkritičniji slučaj predstavlja udar u trenutku kada su napon na konzoli stuba i trenutna vrijednost faznog radnog napona suprotnog polariteta, pri čemu radni napon ima najveću vrijednost.

$$U_{izmax} = U_s + U_m \quad (17)$$

Ukoliko napon, koji napreže izolaciju stuba dostigne vrijednost veću od podnositivog napona izolacije, doći će do povratnog preskoka. Karakteristika povratnog preskoka jeste veoma velika strmina talasa. Prenaponi nastali na ovaj način predstavljaju veliku opasnost za opremu u elektroenergetskim postrojenjima, naročito ako do preskoka dođe na nekom od stubova koji su blizu transformatorske stanice. Najveća opasnost postoji za mjerne i energetske transformatore, jer strmi prenaponski talas najviše ugrožava međunavojnu izolaciju u transformatorima.

3. Prenaponska zaštita nadzemnih vodova

U prethodnom poglavlju su opisani štetni uticaji atmosferskog pražnjenja po nadzemne vodove i opremu u elektronergetskim postrojenjima. U cilju normalnog funkcionisanja sistema, potrebno je ispade nadzemnih vodova svesti na što je moguće manju mjeru. Sve su strožiji zahtjevi, koji se postavljaju pred elektroenergetske kompanije u pogledu pouzdanosti i kvaliteta snabdijevanja električnom energijom. Prema tome, djelove sistema koji su najosjetljiviji na efekte atmosferskog pražnjenja, što su svakako nadzemni vodovi, potrebno je zaštiti od štetnih uticaja. U cilju zaštite nadzemnih vodova koriste se prije svega zaštitna užad. Jedan od bitnijih faktora, koji u mnogome određuje da li će doći do povratnog preskoka na vodu jeste uzemljenje svakog stuba (otpor rasprostiranja), čemu je potrebno posvetiti naročitu pažnju. U posljednje vrijeme, naročito na stubnim mjestima gdje je povećana vrijednost otpora uzemljenja, kao i u područjima sa izraženom grmljavinskom aktivnošću u cilju zaštite voda primjenjuje se ugradnja odvodnika prenapona na stubu.

Zaštita vodova od uticaja atmosferskih pražnjenja u potpunoj mjeri nije moguća, prije svega iz ekonomskih razloga. Pravilnim odabirom podnosivih napona izolacije i zaštitnih mjera (koordinacijom izolacije) se može doprinijeti većoj izdržljivosti nadzemnih vodova pri pojavi atmosferskih pražnjenja u vod ili njegovu blizinu. Prije svega koordinacija izolacije se ogleda u određivanju neophodne i dovoljne izdržljivosti izolacionog sistema opreme. Neophodno je odrediti koji su to naponi koje oprema mora bez problema podnijeti. To je svakako napon industrijske frekvencije, koji naprežje opremu tokom čitavog eksploracionog vijeka. Naponi koji se pojavljuju pri atmosferskim ili sklopnim prenaponima u odnosu na napon industrijske frekvencije u znatno većoj mjeri naprežu sistem izolacije. S toga je potrebno da oprema ima takve karakteristike da može izdržati i određeni nivo prenapona, koji se mogu pojaviti a da ne izgubi svoja izolaciona svojstva. U tu svrhu se za opremu definišu podnosivi naponi, koje oprema mora podnijeti bez bojazni da dođe do probroja izolacije. Razlikuju se podnosivi jednominutni napon industrijske frekvencije, kao i podnosivi sklopni i udarni atmosferski naponi. U zavisnosti od naponskog nivoa se razlikuju i navedeni naponi. Za nadzemne vodove potrebno je odabrati zaštitne nivoe izolatorskih lanaca, u cilju što veće izdržljivosti voda pri pojavljivanju atmosferskih i sklopnih prenapona. U tabeli 1 su dati izolacioni nivoi opreme za naponske nivoe 110 kV i više.

Tabela 1. Vrijednosti standardnog podnosivog napona industrijske frekvencije i udarnog napona izolacije [7]

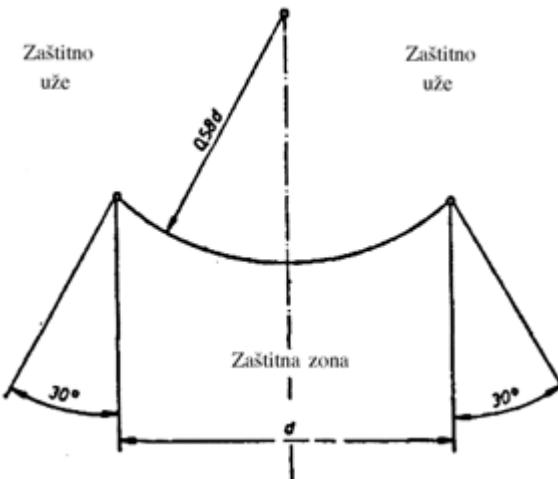
Najviši napon opreme Um kV (efektivna vrijednost)	Standardni podnosivi napon industrijske frekvencije kV (efektivna vrijednost)	Standardni podnosivi atmosferski udarni napon kV (efektivna vrijednost)
123	185	450
	230	550
245	275	650

	325	750
	360	850
	395	950
	490	1050
420	850	1050 1175
	959	1175 1300
	1050	1300 1425

3.1 Zaštitna užad na nadzemnim vodovima

Osnovni način zaštite nadzemnih vodova od direktnog udara jeste postavljanje zaštitnih užadi. Kod vodova sa zaštitnim užadima direktni udar groma se može desiti u vrh stuba i negdje na rasponu. Dokazano je da se preko 60% svih udara događa na stubu, a manje od 40% negdje na rasponu. Pri udaru u raspon kroz susjedni stub otiče struja jednaka polovini struje groma pa je manja vjerovatnoća pojave preskoka na stubu. [3]. Zaštitna užad utiču i na smanjenje indukovanih prenapona na faznim provodnicima pri udaru atmosferskog pražnjenja u blizinu nadzemnog voda [4].

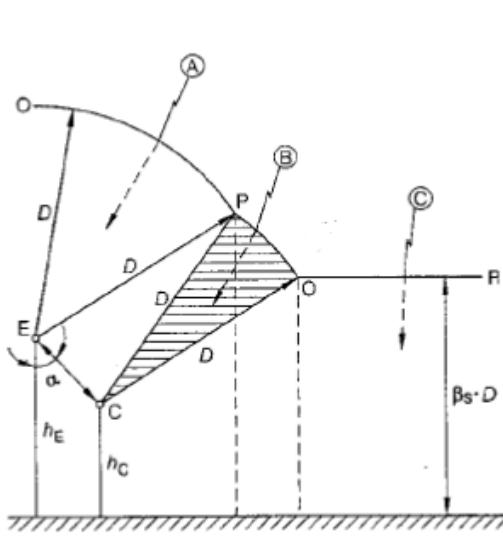
Primjena zaštitnog užeta je vezana za dispoziciju faznih provodnika. Propisima je definisano da zaštitno uže mora imati takav položaj da u odnosu na fazne provodnike ugao zaštite uzima vrijednosti od 10 do 35 stepeni, što zavisi od važnosti nadzemnog voda. Za naša područja se uzima ne veća vrijednost od 30° i to za temperturni opseg od 0°C do 40°C . Zaštitni ugao prikazan je na slici 9. U slučajevima kada zaštita sa jednim zaštitnim užetom nije dovoljna, naročito u oblastima sa veoma izraženom grmljavinskom aktivnošću, potrebno je razmotriti opciju dodavanja još jednog užeta i primjenu manjeg ugla zaštite u odnosu na pomenutih 30° .



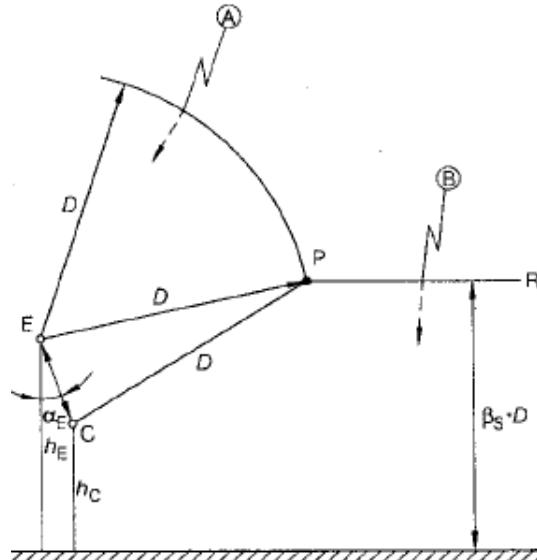
Slika 9. Zaštitni ugao i položaj zaštitnih užadi u odnosu na fazne provodnike

Da li je opravданo koristiti manji zaštitni ugao od 30° moguće je provjeriti primjenom elektrogeometrijskog modela. Model ima za cilj proračun rizika od direktnog pražnjenja u fazni provodnik, čime bi došlo do „proboja“ zaštitnog užeta.

U elektrogeometrijskom modelu od interesa jeste granično rastojanje, tj. rastojanje na kojem će doći do susreta lidera i strimera sa uzemljenog objekta, što je dato izrazom 1. Na slici 10 i slici 11 su prikazani elektrogeometrijski modeli za neefikasno postavljenzo zaštitno uže (mogućnost probaja zaštitnog užeta i direktnog pražnjenja u fazni provodnik – slika 10) kao i za efikasno postavljenzo zaštitno uže (ne postoji mogućnost pražnjenja u fazni provodnik – slika 11).



Slika 10. Neefikasno postavljenzo zaštitno uže



Slika 11. Efikasno postavljenzo zaštitno uže

Na osnovu elektrogeometrijskog modela i primjenom izraza 1, može se zaključiti da zaštitni ugao zaštitnog užeta, nije dobro odabran (slika 10). Šrafirani dio pokazuje zonu u kojoj će se za određenu vrijednost struje atmosferskog pražnjenja, desiti pražnjenje u fazni provodnik (pražnjenje B). Pražnjenje označeno sa oznakom A se može desiti samo u zaštitno uže, dok će se pražnjenje određeno sa oznakom C desiti u zemlju. U primjeru, koji je prikazan na slici 11 je ugao odabran tako da nije moguće pražnjenje u fazni provodnik. Jasno je iz izraza 1, da što je veća vrijednost struje atmosferskog pražnjenja, to je manja mogućnost direktnog pražnjenja u fazni provodnik (sa povećanjem struje, dolazi i do povećanja udarnog rastojanja).

Na slikama se vidi da manji zaštitni ugao, pruža veću sigurnost za fazne provodnike. Pored zaštitne funkcije, koja je primarna, zaštitno uže ima veliku funkciju u prenosu bitnih podataka za elektroenergetski sistem. Danas se umjesto klasičnih Al/Fe užadi, kao zaštitno uže postavlja optičko uže (OPWG), koje se koristi za prenos podataka do centara upravljanja.

Pri udaru groma u zaštitno uže, prenaponski talas se kreće ka susjednim stubovima, gdje će se nakon prolaska kroz stub, odvesti u zemlju. U zavisnosti od vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača, zavisi da li će prenaponi nastali na ovaj način ugroziti izolaciju na vodu, tj. da li će doći do povratnog preskoka.

3.2 Uzemljenje dalekovodnih stubova

Prilikom projektovanja uzemljenja potrebno je raspolagati sa velikim brojem podataka. Prije svega na valjan način je potrebno izmjeriti specifičnu otpornost tla u kojem se predviđa postavljanje dalekovoda tj. temelja dalekovodnog stuba.

Standardom EN 50 341 – 1 [2] su propisani zadaci i ciljevi koji se postavljaju pred sistem uzemljenja i koji moraju biti zadovoljeni prilikom izrade uzemljivača. Dalekovodi treba da imaju izvedeno uzemljenje koje će obezbijediti odvođenje struja atmosferskog pražnjenja u zemlju pri direktnom pražnjenju i omogućiti besprekidnost pogona. U cilju efikasnog izvođenja sistema uzemljenja između ostalog je potrebno poštovati propise koji su dati u tehničkoj preporuci koja se bavi problemima uzemljenja [8].

Prema namjeni uzemljenje se može podijeliti na zaštitno, pogonsko i gromobransko.

Otpor svakog uzemljivača se sastoji od pet sastavnih otpora :

- Otpora spoja – kontakta između provodnika za uzemljenje i štićenog objekta
- Sopstvenog otpora provodnika za uzemljenje
- Otpora samog uzemljivača
- Prelaznog otpora sa uzemljivača na zemlju
- Otpora rasprostiranja

Svi od navedenih otpora koji sačinjavaju ukupan otpor uzemljivača se mogu zanemariti u odnosu na otpor rasprostiranja zemlje. Otpor spoja se može zanemariti u slučaju da je kontakt između štićenog objekta i provodnika za uzemljenje dobro izведен. Takođe ovo važi i za prelazni otpor na prelazu između uzemljivača i tla za slučaj uzemljivača koji je postavljen na propisan način. Sopstveni otpor provodnika za uzemljenje se zanemaruje zbog toga što se za

izradu uzemljivača koriste materijali koji imaju veoma mali specifični otpor koji je daleko manji od otpora zemlje. Zbog toga se posebna pažnja posvećuje otporu rasprostiranja tla.

3.2.1 Mjerenje specifičnog otpora tla

Struktura tla u koje se uzemljivač postavlja najčešće nije homogena već slojevita. Čak su i u relativno homogenoj strukturi moguće vrlo velike razlike u specifičnom otporu tla iz razloga različite količine vlage, količine otopljenih soli ili poroznosti.

U homogenom tlu otpor rasprostiranja uzemljivača R predstavlja linearu funkciju specifičnog otpora tla. Relacija je data izrazom 18.

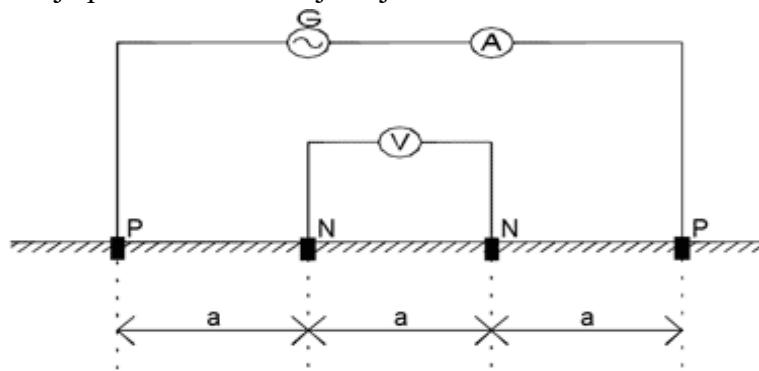
$$R = k \cdot \rho \cdot 10^{-2} \Omega \quad (18)$$

Gdje je: k – konstanta uzemljivača, koja predstavlja otpor rasprostiranja na $100 \Omega m$ specifičnog otpora tla i zavisi isključivo od dimenzija i geometrijskog oblika uzemljivača

ρ – specifični otpor tla koji se daje u Ωm

Kako trasa dalekovoda prolazi gotovo uvijek kroz različite geološke podloge nije pouzdano dimenzionisati uzemljenje na osnovu prosječnih vrijednosti specifičnog otpora pojedinih geoloških stijena.

U slučajevima kratkih vodova koji se postavljaju u relativno homogenom tlu moguće je koristiti podatke koji su dobijeni mjerenjem specifičnog otpora tla vodova koji se nalaze u blizini buduće trase novog dalekovoda. Ti podaci se tada mogu koristiti prilikom dimenzionisanja uzemljenja. Ovaj način projektovanja uzemljivača nije poželjan već je potrebno izvršiti mjerenja specifičnog otpora tla u samoj trasi voda i na stubnim mjestima novoprojektovanog voda. Ovim mjeranjima se ne utvrđuju samo specifične otpornosti tla već i dubina pojedinih slojeva ukoliko postoji horizontalna slojevitost tla. Za mjerenje specifičnog otpora tla se koristi više metoda od kojih je najpoznatija Venerova metoda ili metoda četiri tačke. Na slici 12 je prikazana šema mjerenja Venerovom metodom.



Slika 12. Raspored sondi prema Venerovoj metodi

U okviru ove metode se koriste četiri sonde koje se postavljaju kao što je prikazano na slici 12. Spoljne sonde koje su obilježene slovom P predstavljaju strujne sonde i one su priključene na strujni izvor kojim se stvara potencijalno polje. Unutrašnje sonde koje su obilježene slovom N jesu naponske sonde koje su priključene na galvanometar kojim se mjeri potencijalna razlika između tačaka na površini tla između kojih se nalaze naponske sonde. Međusobni razmak sondi je jednak što predstavlja bitnu karakteristiku ove metode mjerjenja. Primjenom Venerove metode se specifični otpor tla računa prema sljedećoj relaciji:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R (\Omega m) \quad (19)$$

Gdje je : a – razmak između sondi (m)
R – izmjereni otpor rasprostiranja (Ω)

Prilikom ispitivanja zemljišta preporučljivo je da se razmak između sondi mijenja. Preporučljiva kombinacija predstavlja niz mjerjenja sa razmakom sondi od 1, 2, 3, 5, 8, 10 m. Rastojanje između sondi može biti i veće ali u slučajevima da rezultati koji su dobiveni pri razmacima sondi koji su navedeni upućuju na to da je zemljište koje se ispituje izrazito nehomogene strukture. Takođe se rastojanje povećava i u slučajevima u kojima nije jedina namjena ispitivanja zemljišta u svrhu dimenzionisanja uzemljivača.

Prilikom ispitivanja zemljišta za potrebe uzemljivača potrebno je ustanoviti da li je potrebno mjerjenje izvršiti na svim stubnim mjestima ili na takozvanim reprezentativnim mjestima koja će sa velikom tačnošću odrediti specifični otpor tla trase kojom dalekovod treba da prođe.

Interpretacija rezultata mjerjenja specifičnog otpora tla sastoji se u analitičkom postupku određivanja broja, debljine i specifičnog otpora tla pojedinih slojeva.

3.2.2 Udarni otpor rasprostiranja

Efektivni otpor rasprostiranja pri proticanju struja za koje je karakteristična velika učestanost je veći od otpora koji je izmjerен pri proticanju struje industrijske frekvencije. Pri proticanju struja atmosferskog pražnjenja kroz uzemljivač do uticaja dolazi induktivnost uzemljivača. Na iznos otpora u ovom slučaju u mnogome utiče i prostorna dimenzija uzemljivača. Induktivni poduzni otpor se računa prema relaciji 20.

$$X_l = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (20)$$

Kod industrijskih struja pri induktivnosti uzemljivača od $1,7 \mu\text{H}/\text{m}$ induktivni otpor iznosi $0,00053 \Omega/\text{m}$ dok pri strujama atmosferskog pražnjenja ova vrijednost može dostići i $1,71 \Omega/\text{m}$ [9].

Ovo je jasan pokazatelj da na konačnu vrijednost udarnog otpora rasprostiranja veliki uticaj ima induktivitet. Jedan od načina za smanjenje udarnog otpora u ovim situacijama jeste da se pravolinijski uzemljivači zamjene uzemljivačima u obliku zvijezde.

Vrijednost udarnog otpora nije stalna i ona zavisi od sljedećih faktora:

- Strmine struje
- Gustine struje u blizini samog uzemljivača
- Jačine električnog polja na kraju uzemljivača

Udarni otpor rasprostiranja R_{ud} se u praksi određuje zavisno od dimenzija uzemljivača i otpora rasprostiranja i to prema sljedećoj relaciji:

$$R_{ud} = k \cdot R_r \quad [\Omega] \quad (21)$$

Gdje je: k – koeficijent koji zavisi od dužine kraka uzemljivača i specifičnog otpora tla

R_r – stacionarni otpor rasprostiranja uzemljivača

Tabela 2 prikazuje vrijednost koeficijenta k za različite vrijednosti specifičnog otpora tla i dužine kraka [9].

Tabela 2. Vrijednost koeficijenta k

Dužina kraka (uzemljivača)	Specifični otpor tla (Ωm)				
	50	100	150	200	250 i više
Do 20 m	2	1	-	-	-
Od 20 do 30 m	3	1,5	1	-	-
Od 30 do 40 m	4	2	1,3	1	-
Od 40 do 50 m	5	2,5	1,7	1,3	1

Oznaka “-” u tabeli 2 govori da je u tom slučaju naznačena dužina uzemljivača nedovoljna za efikasno izvođenje uzemljenja. Iz tabele je jasno da što je manji specifični otpor tla da je potrebna manja dužina uzemljivača.

Udarni otpor uzemljenja je vremenski promjenljiv, u početku vrlo veliki da bi nakon kratkog perioda opao na vrijednost koja odgovara vrijednosti stacionarnog otpora.

Za grube procjene ugroženosti vodova od atmosferskog pražnjenja dovoljno je uzemljivač modelovati otpornošću koja je izmjerena pri proticanju struje industrijske učestanosti.

3.2.3 Vrste uzemljivača

Osnovne vrste uzemljivača koje se danas primjenjuju za stubove dalekovoda se mogu podijeliti prema načinu polaganja i prema obliku.

Prema načinu polaganja uzemljivači se mogu podijeliti na horizontalne i vertikalne uzemljivače, dok se prema obliku podjela vrši na prstenaste i uzemljivače u obliku zvijezde ili zrakaste uzemljivače.

U praksi se pokazalo da je za najčešće geološke uslove koji se srijeću najprihvatljivije koristiti horizontalno položene uzemljivače. Vertikalni uzemljivači u obliku sondi se koriste jedino u rijetkim situacijama kada je potrebno dobiti propisanu vrijednost otpora. Uzemljivači se prave od poinčane čelične trake ili bakarnog užeta koje je u obliku prstena.

U zavisnosti od toga koji se materijal koristi prilikom izrade uzemljivača propisani su minimalni poprečni presjeci uzemljivača. Ova ograničenja se postavljaju da bi se uzemljivač štitio od termičkih preopterećenja koja se pojavljuju prilikom proticanja struje kratkog spoja kao i od korozije tokom eksploatacije. U tabeli 3 su dati minimalni presjeci uzemljivača u zavisnosti od materijala koji se primjenjuje za izradu istog [9].

Tabela 3. Najmanji presjeci uzemljivača

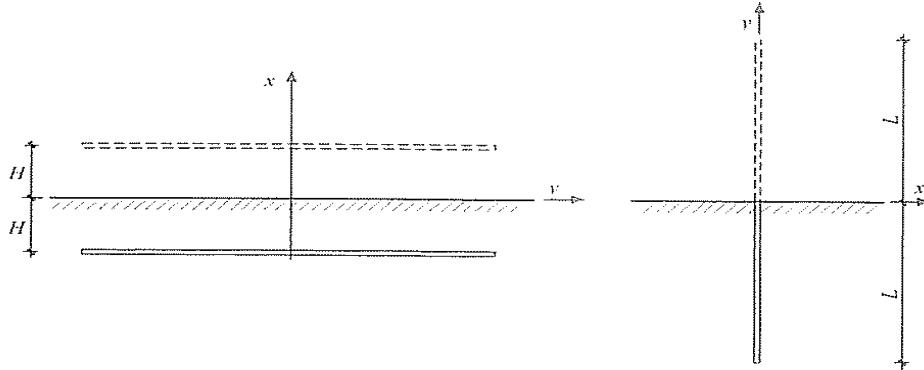
Poinčani čelik	Bakar
Traka $100mm^2$, ne tanja od 3,5 mm	Traka $50 mm^2$, ne tanja od 2mm
Okrugli čelik $\Phi 10mm$	Uže presjeka $35 mm^2$
Cijev 38 mm, ne tanja od 3,5 mm	Cijev $\emptyset 30 mm$, ne tanja od 2,5 mm

U onim uslovima u kojima je moguća pojava jače korozije ili se za izradu uzemljivača koristi nepoinčani čelik propisi ne određuju posebne kriterijume izuzev preporuke da se vrijednosti minimalnih presjeka iz tabele 3 uzmu za 50 % veće u odnosu na one date u tabeli.

Za zemljišta koja su karakteristična po maloj vrijednosti specifičnog otpora i visokoj vlažnosti tla preporučljivo je koristiti bakar za izradu uzemljivača. To se preporučuje iz razloga manje osjetljivosti bakra na koroziju u odnosu na poinčani čelik. Vijek poinčane čelične trake u slučaju njenog korištenja za izradu uzemljivača najviše zavisi od kvaliteta cinčenja same trake. Ukoliko je taj postupak izведен nepropisno ili u slučaju lošeg spajanja trake vijek trajanja uzemljivača znatno opada što može dovesti do situacije da ona traje svega nekoliko godina.

3.2.4 Dimenzioniranje uzemljivača

Prema načinu polaganja razlikuju se vertikalni i horizontalni uzemljivač. Shodno tome se razlikuju i izrazi koji se koriste prilikom računanja otpora rasprostiranja uzemljivača. Na slici 13. je prikazan uzemljivač koji je položen horizontalno i uzemljivač koji je postavljen vertikalno.



Slika 13. Položaj uzemljivača u tlu

Izraz pomoću kojeg se računa otpor rasprostiranja horizontalno postavljenog uzemljivača je [9]:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{d} + \ln \frac{\sqrt{4 \cdot H^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} + \frac{L}{2}}{\sqrt{4 \cdot H^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \frac{L}{2}} \right) \quad (22)$$

Za vertikalni uzemljivač otpor rasprostiranja se dobija korištenjem sljedećeg izraza [9]:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \ln \frac{4 \cdot L}{d} \quad (23)$$

Gdje je: ρ – specifični otpor tla ($\Omega \cdot m$)

L – ukupna dužina jediničnog uzemljivača

d – poprečni presjek provodnika

Prepostavke koje su postavljenje prilikom izvođenja izraza 22 i 23 jesu da je tlo homogeno i da je vlastiti otpor uzemljivača zanemarljiv.

Složenije konfiguracije uzemljivača se mogu posmatrati kao kombinacija prostorno odvojenih pravolinijskih elemenata. Proračuni se u slučajevima složenijih konfiguracija najčešće vrše pomoću računara, mada postoje i određeni empirijski izrazi.

Prilikom izbora veličine i oblika uzemljivača veličine koje u veoma maloj mjeri utiču na vrijednost otpora jesu presjek uzemljivača i dubina ukopavanja. Dubina na kojoj će se uzemljivač postaviti zavisi od dubine smrzavanja površinskog dijela tla i o tome treba voditi računa. Ono na šta treba obratiti pažnju jeste slučaj kada se kao uzemljivač koristi krakasti uzemljivač. U tim slučajevima nije racionalno koristiti više od četiri kraka, a za dužinu

pojedinačnog kraka ne preporučuju se dužine veće od 30 ili 40 m. Ograničenje dužine uzemljivača se vrši iz razloga udarne otpornosti uzemljivača.

Vrijednost otpornosti uzemljivača treba ograničiti ukoliko za to postoji mogućnost na vrijednost koja neće dozvoliti pojavu povratnog preskoka na izolaciji.

Naši propisi propisuju da povratni preskok na provodnike nije moguć ukoliko je za otpornost uzemljenja ispunjen sljedeći uslov [8]:

$$R_{uz} \leq \frac{U_i}{I_u} \quad [\Omega] \quad (24)$$

Gdje je : R_{uz} – otpornost uzemljenja posmatranog stuba, bez veze sa zaštitnim užadima

U_i – podnosivi udarni napon [kV] izolacije posmatranog stuba

I_u – tjemena udarna vrijednost struje atmosferskog pražnjenja za posmatrani stub izražena u [kA]

Da bi se mogla odrediti vrijednost minimalnog otpora uzemljivača potrebno je izvršiti procjenu udarne vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja koja neće biti premašena sa određenom vjerovatnoćom svih udara groma. Podaci koji su potrebni za procjenu vrijednosti udarne struje atmosferskog pražnjenja jesu podaci o broju grmljavinskih dana u godini za posmatrano područje ili broj udara po jedinici površine, zatim distribucija tjemene vrijednosti struje u stazi groma kao i željeni nivo sigurnosti s obzirom na vjerovatni broj povratnih preskoka. Na ovaj način određena vrijednost otpora uzemljenja treba da predstavlja gornju granicu vrijednosti otpora uzemljivača. U zavisnosti od toga koliku je vrijednost otpora potrebno dostići primjenjuju se različiti tipovi uzemljivača koji su opisani dalje u radu. Ukoliko se primjenom tehničkih mjera koje je potrebno uskladiti i optimizovati i sa ekonomski strane ne može postići propisana vrijednost otpora na određenom stubnom mjestu dalje mјere ne treba primjenjivati. Na mjestima gdje je nemoguće postići traženi otpor uzemljivač se ne postavlja. U tabeli 4 su dati podaci koji se primjenjuju za određivanje potrebnog otpora uzemljivača, a odnose na vrijednost udarne struje.

Tabela 4. statistička vjerovatnoća udarne struje groma[2]

Prepostavljena udarna struja I _u (kA)	Statistička vjerovatnoća pojave struje	Komentar o uzemljenju
30	90%	Za teške uslove uzemljenja ili za vodove manje pogonske sigurnosti
40	95%	Za prosječne uslove uzemljenja
50	98%	Za vrlo dobre uslove uzemljenja i/ili za vodove dobre pogonske sigurnosti

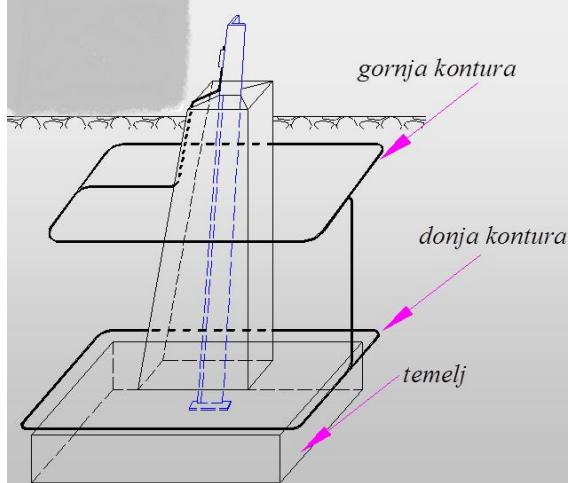
Kao jedna od mjera kojom se može smanjiti vrijednost specifičnog opora tla a samim tim i poboljšati karakteristike samog sistema uzemljenja jeste primjena bentonita kao pokrivke samog uzemljivača ili nekog drugog materijala koji ima mali specifični otpor. Pored bentonita se koriste i crveni mulj ili se na licu mjesta dovozi zemlja čiji je specifični otpor manji od one koja je iskopana prilikom izgradnje dalekovodnog stuba.

Nakon što se izvrši odabir uzemljivača potrebno je izmjeriti vrijednost otpora dalekovodnih stubova. Ukoliko vrijednost otpora pojedinih stubova nije u granicama koje su propisane izrazom 24 to ne znači da je uzemljenje loše izvedeno i da može doći do pojave povratnog preskoka na stubu. Sami proces mjerjenja otpora stuba treba izvršiti sa povezanim zaštitnim užetom i bez njega da bi se moglo utvrditi da li postoji galvanska veza (slučaj kada je sa sistemom uzemljenja povezano zaštitno uže) i da li je dobijena željena vrijednost otpora (slučaj kada je zaštitno uže odvojeno od sistema uzemljenja).

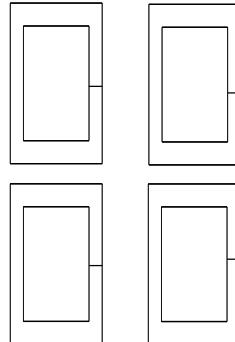
3.2.5 Tipska rješenja uzemljivača

Kao što je već rečeno u zavisnosti od toga koliki je specifični otpor tla i kolika se vrijednost otpora uzemljivača želi postići razlikuju se različiti tipovi uzemljivača kod čelično rešetkastih stubova sa raščlanjenim temeljima, koji se primjenjuju kod vodova visokog napona.

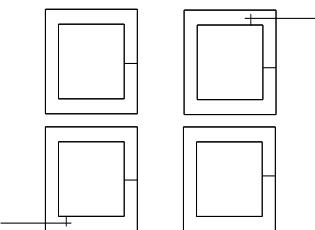
Osnovni uzemljivač (tip A1) se sastoji od dva prstena oko stope pri čemu je jedan prsten na dubini stope temelja, a drugi na dubini 0,5 do 0,8 m. Prsteni se postavljaju oko svake stope pojedinačno. Gornji i donji prsten su galvanski povezani. Slika 14 prikazuje izgled osnovnog uzemljivača koji se koristi kod nazivnih napona 110 kV i viših, dok je slikom 15 prikazana skica uzemljivača tipa A1. Ovaj tip uzemljivača se koristi u onim sredinama koje imaju mali specifični otpor zemlje. Ukoliko je specifični otpor veći primjeniče se neki drugi tip uzemljivača.



Slika 14. Izgled standarnog uzemljivača jedne stope

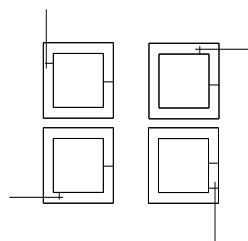


slika 15. Skica osnovnog uzemljivača (tip A1)

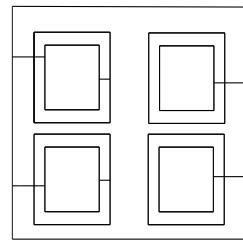


Slika 16. Skica uzemljivača tipa B1

Uzemljivač tipa B1 ima isto kao i osnovni tip uzemljivača dva prstena ali pored toga ima i dva kraka koja idu u smjeru trase dalekovoda. Kraci su galvanski povezani sa gornjim prstenom uzemljivača. Skica uzemljivača tipa B1 je prikazana slikom 16.



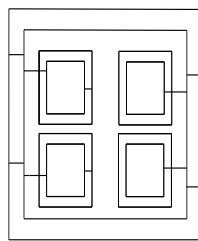
Slika 17. Skica uzemljivača tipa C1



Slika 18. Skica uzemljivača tipa D

Slika 18 prikazuje skicu **uzemljivača tipa D**. Sastoje se od dva prstena oko svake stope kao i od dodatnog prstena koji je zajednički za sve četiri stope stuba koji je udaljen 1 m u odnosu na osnovni uzemljivač.

Tipski uzemljivač koji se koristi za uzemljenje dalekovodnih stubova jeste i **uzemljivač tipa D1** koji se sastoje od dva prstena oko svake stope i dva dodatna prstena oko sve četiri stope. Svi su prstenovi galvanski povezani. Slika 19 prikazuje skicu uzemljivača tipa D1.



Slika 19. Skica uzemljivača tipa D1

Uzemljivač tipa D2 sadrži sve elemente koje posjeduje i uzemljivač D1 i dodatna dva kraka koja idu u smjeru trase dalekovoda.

Na stubnim mjestima sa slobodnim i čestim pristupom ljudi osnovni uzemljivač je potrebno pojačati sa dodatnim prstenom.

Uzemljivači sa dodatnim kracima koji idu u smjeru trase dalekovoda se koriste u situacijama gdje je specifični otpor tla najveći.

3.3 Odvodnici prenapona

U slučaju kada se usled velike specifične otpornosti tla, ne može postići dovoljno niska vrijednost otpora uzemljivača stuba i kada pri udaru atmosferskog pražnjenja u stub postoji velika mogućnost pojave povratnog preskoka, potrebno je razmatrati druge metode zaštite voda. Kako je ranije rečeno da se 60 % udara dešava u stub, a uslijed velike specifične otpornosti tla se ne može postići zahtjevana otpornost uzemljivača, mogućnost povratnog preskoka značajno raste. Pojavom povratnog preskoka dolazi i do isklapanja voda sa mreže, pa samim tim i do smanjenja pouzdanosti rada elektroenergetskog sistema, dok u slučajevima radikalno napajanih djelova mreže dolazi do beznaponskog stanja konzuma. U cilju spriječavanja ispada voda zbog pojave preskoka na vodu u svijetu je sve češća upotreba linijskih odvodnika prenapona, koji se postavljaju duž čitave trase ili u najkritičnijim rasponima. U cilju uspješnog štićenja opreme odvodnik mora da zadovolji sljedeće uslove:

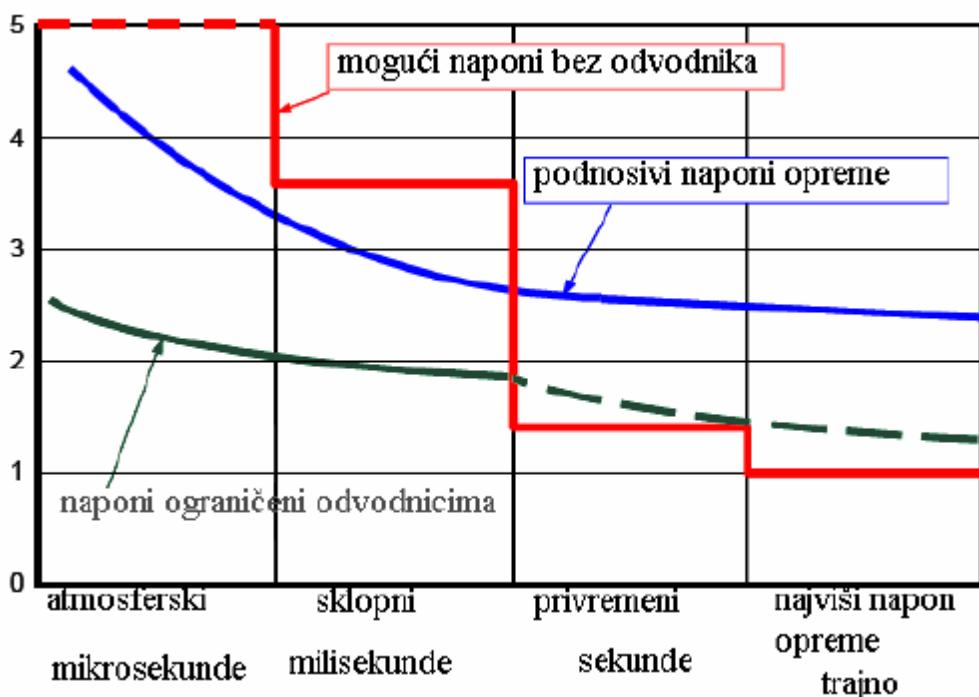
- Za vrijeme porasta prenaponskog talasa treba da djeluje vrlo brzo kao sklopni aparat i da uključujući malu vrijednost otpora prema zemlji odvede najveći dio energije talasa u zemlju
- Nakon nestanka opasnog prenapona odvodnik treba da isključi vezu sa zemljom što prije, a najkasnije pri prvom prolasku struje kroz nulu

3.3.1 Razvoj odvodnika prenapona

Odvodnici prenapona kakvi su poznati danas, ušli su u upotrebu početkom 30 tih godina 20. vijeka. Od nastanka do danas se razlikuju cijevni odvodnici prenapona, silicijum-karbidi (SiC) odvodnici prenapona i metal-oksidni (MO) odvodnici. Značajnija upotreba odvodnika prenapona je počela sa otkrivanjem nelinearnih karakteristika silicijum-karbida i konstrukcijom ventilskih odvodnika prenapona. Ventilski odvodnici su se sastojali od pločastih projekcija razmaknutih izolacionim prstenovima sa serijskim nelinearnim SiC otpornicima. Uloga nelinearnih otpornika je bila ograničavanje struje odvođenja, dok se na iskrištimi vršilo prekidanje strujnog luka, koji je nastao uslijed reagovanja odvodnika prenapona. U početnoj fazi razvoja karakteristično je bilo da su za mreže visokog i veoma visokog napona ovakvi odvodnici bili veoma dugačiji, zbog potrebe za postojanjem velikog broja članaka. Nakon nestanka prenapona, uslijed djelovanja radnog napona kroz odvodnik je tekla propratna struja, koja je

ograničena SiC otpornicima. Luk bi se gasio u trenutku prolaska propratne struje kroz nulu. Značajno unaprijeđenje SiC odvodnika je predstavljalo uvođenje aktivnih iskrišta, tj. iskrišta sa kalemima koji bi pri prolasku struje pražnjenja kroz njih proizvodili jako magnetno polje, čime bi se luk u procjepima izduživao, pri čemu dolazi do većeg pada napona na odvodniku. Na taj način se omogućilo prekidanje strujnog luka, prije trenutka prolaska radnog napona kroz nulu. Ovakva tehnologija izgradnje je napuštena i SiC odvodnici prenapona su zamijenjeni sa metal-oksidnim odvodnicima prenapona, koji imaju znatno bolje karakteristike.

Upotreboom metal-oksidnih odvodnika prenapona se eliminisala potreba za upotrebotom iskrišta. Značajno su praktičniji za ugradnju i imaju bolju volt-ampersku karakteristiku u odnosu na odvodnike koji su bili u upotrebni ranije. Metal oksidni odvodnici prenapona predstavljaju najbolju zaštitu od atmosferskih prenapona. Na slici 20 su prikazani naponi koji mogu naprezati VN opremu i izolaciju nadzemnih vodova pri djelovanju atmosferskog prenapona, nivo napona kada se oprema štiti sa odvodnicima prenapona, kao i napone koje oprema može izdržati bez probroja. Sa slike se može uočiti koji su benefiti odvodnika prenapona, gdje se jasno uočava da su naponi ograničeni upotrebotom odvodnika prenapona na nivo koji je niži od podnosivog napona opreme.

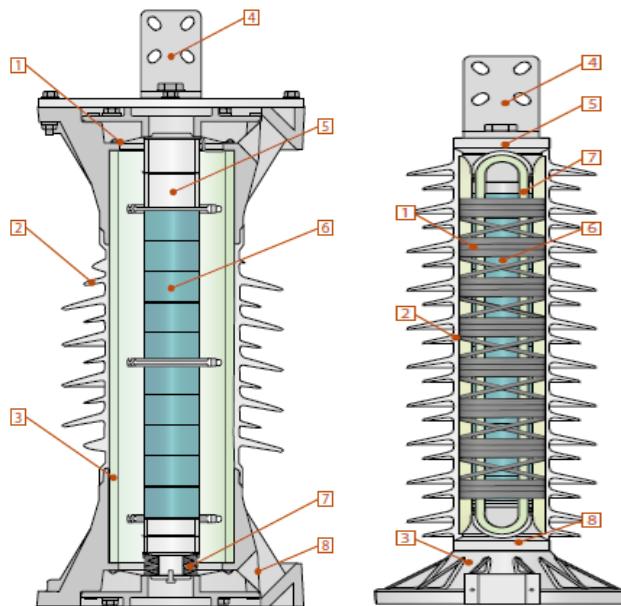


Slika 20. naponi koji se naprežu opremu bez postavljanja odvodnika,sa postavljenim odvodnicima i podnosivi naponi izolacije

3.3.2 Karakteristike MO odvodnika

U normalnom pogonu, kada je oprema napregnuta samo naponom industrijske frekvencije, odvodnici prenapona treba da predstavljaju gotovo beskonačnu otpornost. U slučaju pojave prenapona, uslijed atmosferskog pražnjenja ili sklopnih operacija stvaraju se uslovi za njihovo djelovanje. Pred odvodnike se postavljaju dva zadatka koja su navedena ranije.

Uslove koji su navedeni, moderni odvodnici prenapona ispunjavaju zahvaljujući izrazito nelinearnom otporu metal oksidnih blokova, od kojih se sastoje aktivni dio odvodnika. Odvodnici se sastoje od dva dijela, od kojih se kako je već rečeno, aktivni dio sastoji od niza nelinearnih otpornika, dok drugi dio čini izolaciono kućište, koje odvodniku treba da pruži odgovarajuću mehaničku čvrstoću. Danas su u najčešćoj upotrebi odvodnici sa kućištem napravljenim od silikonske mase. Korištenjem takvog kućišta značajno se smanjuje težina u poređenju sa kućištem izrađenim od porculana. Na slikama 21 a i 21 b su prikazani poprečni presjeci odvodnika prenapona, koji su jedan u odnosu na drugi napravljeni na različite načine .



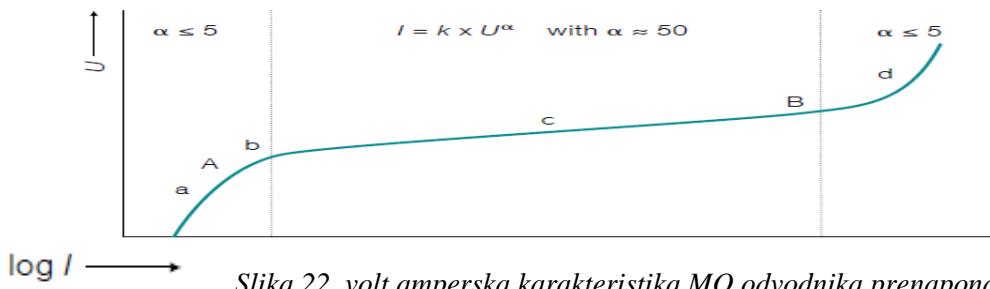
Slika 21a. Poprečni presjek MO odvodnika

Slika 21b. Poprečni presjek MO odvodnika

Na slici 21a su označeni sljedeći djelovi: 1 - kućište, 2 – izolator napravljen od silikonske mase, 3 – cijev od fibreglasa, 4 – linijski priključak (može biti i bolci), 5 – odstojnici, 6 – metal-oksidni otpornici, 7 – opruga, 8 – nadpritisni ventil.

Na slici 21b se razlikuju sljedeći djelovi: 1 – zaštitni namotaj, 2 - izolator napravljen od silikonske mase, 3 – postolje, 4 – linijski priključak, 5 – gornji jaram, 6 – metal-oksidni otpornici, 7 – petlja napravljena od fiberglasa, 8 – donji jaram

Pri nailasku prenaponskog talasa otpornost metal oksidnih blokova je izrazito mala, pa se na taj način energija talasa odvodi u zemlju, pri čemu se snižava vrijednost preostalog napona. Preostali napon je napon koji se pojavljuje na krajevima odvodnika, pri prolasku struje pražnjenja kroz njega [10]. Ta vrijednost napona napreže izolaciju elementa koji se štiti, te je s toga cilj da se preostali napon svede na nivo koji izolacija može da izdrži, da ne bi došlo do preskoka. Na slici 22 je prikazana volt-amperска karakteristika MO odvodnika, na kojoj se vidi izrazita nelinearnost otpora, za slučaj u kojem odvodnik provodi struju pražnjenja do zemlje.



Slika 22. volt amperska karakteristika MO odvodnika prenapona

Karakteristika se opisuje relacijom:

$$I = k \cdot U^\alpha \quad (25)$$

Gdje α predstavlja koeficijent nelinearnosti koji uzima vrijednosti iz opsega $\alpha \leq 5$ i $\alpha \approx 50$. Od vrijednosti koeficijenta α zavisi efikasnost prenaponske zaštite MO odvodnika prenapona, što je veći koeficijent nelinearnosti to je manji preostali napon na odvodniku. Tačna vrijednost koeficijenta α se može odrediti za samo ograničenu oblast struje na volt amperskoj karakteristici, tj. koeficijent nelinearnosti se mijenja i može se u određenoj radnoj tački odrediti izrazom.

$$\alpha(U) = \frac{d(\ln I)}{d(\ln U)} \quad (26)$$

Na slici 22 se razlikuju sljedeće oblasti:

- a – linearna oblast sa malim kapacitivnim strujama ≤ 1 mA
- b – koljeno krive , predstavlja prelaz iz oblasti gdje odvodnik ima karakteristike izolatora u oblasti kada odvodnikom uslijed prenapona teče struja
- c – nelinearna oblast , reagovanje odvodnika
- d – omska linearna oblast, oblast velikih struja
- A – oblast stalnog radnog napona
- B – preostali napon

Oblast A sa slike 22 predstavlja oblast gdje je na odvodnik primjenjen stalni radni napon , pri čemu kroz provodnik prolazi tkz. struja curenja, koja je dominantno kapacitivnog karaktera. Pored kapacitivne komponente, postoji i rezistivna komponenta struje curenja. Na osnovu praćenja vrijednosti ovih struja (naročito rezistivne komponente i struje trećeg harmonika) se može zaključiti u kakvom stanju se nalazi odvodnik prenapona. Danas se u te svrhe zajedno sa odvodnikom ugrađuje i brojač prorada, koji pored broja reagovanja mjeri i navedene parametre, koji se kasnije mogu analizirati pomoću softverskih programa napravljenih za tu svrhu. Za slučaj da izmjerene struje curenja prevazilaze granice propisane od strane proizvođača odvodnika, potrebno je preventivno reagovati i ugraditi novi odvodnik.

Prednost MO odvodnika prenapona u odnosu na SiC odvodnike, koji su ranije bili u upotrebi se ogleda i u nepostojanju propratne struje nakon prestanka djelovanja prenapona. Odvodnik se trenutno vraća u stanje velike otpornosti, kada kroz njega teče jedino struja curenja. Kako ne sadrže iskrišta, u cilju povećanja energetskih sposobnosti, mogu se vezivati paralelno, što ranije nije bio moguć slučaj.

Kako bi se mogućnosti prenaponske zaštite primjenom odvodnika prenapona što bolje iskoristile, potrebno je odvodnike postaviti što bliže štićenom elementu. Vrijednost napona (preostali napon na odvodniku) može biti veća u odnosu na napon nakon djelovanja odvodnika, uslijed pojave refleksije prenaponskog talasa, kada dolazi do superponiranja napona, čime se mogu prekoračiti vrijednosti podnositivog napona izolacije [11].

3.3.3 Parametri odvodnika prenapona

Pri odabiru odvodnika prenapona potrebno je znati nazivnu struju odvođenja, stalni radni napon kao i naznačeni napon odvodnika.

Nazivna struja odvođenja predstavlja struju atmosferskog pražnjenja koja se koristi za klasifikaciju odvodnika (IEC 60099-4). Za talasni oblik nazivne struje odvođenja se uzima talas oblika 8/20 μ s. Nazivna struja odvođenja po IEC standardu 60099-4 može uzimati pet standardizovanih vrijednosti u rasponu od 1,5 kA do 20 kA (1,5 kA, 2,5 kA, 5 kA, 10 kA i 20 kA)[10]. U mrežama nazivnog napona 110 kV i višeg u upotrebi su samo klase rasterećenja sa strujama 10 kA i 20 kA. Sama nazivna struja odvođenja ne može mnogo reći o karakteristikama odvodnika. Zbog toga se mora u obzir uzeti i klasa rasterećenja voda da bi se mogle odrediti karakteristike odvodnika i njegova sposobnost odvođenja struja pražnjenja. Klasom rasterećenja se definiše sposobnost absorpcije energije, pomoću koje se može odrediti koliku energiju pražnjenja odvodnik može izdržati a da pri tome ostane termički stabilan.

Koliki je iznos energije koja se može apsorbovati bez posljedica određuje se tokom fabričkih ispitivanja samog odvodnika, kada se odvodnik podvrgava testiranju. Količina energije koju odvodnik može da apsorbuje razlikuje se od tipa do tipa odvodnika. Ranije verzije standarda nijesu jasno definisale energetsku sposobnost odvodnika, pa su se s toga novije verzije standarda više posvetile tome. Za odvodnike prenapona, koji se koriste za mreže visokog i

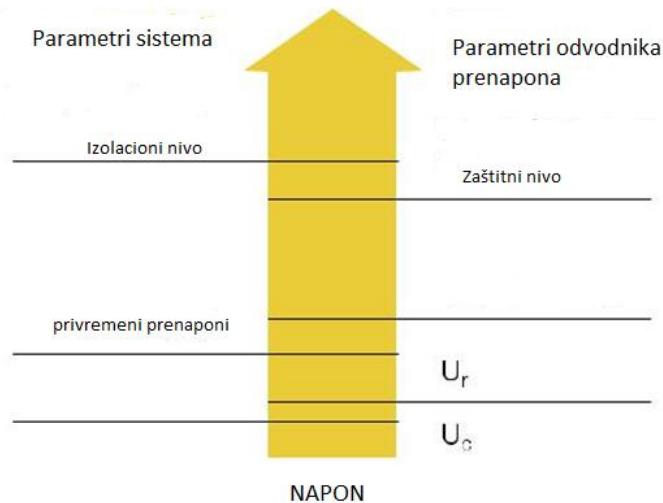
veoma visokog napona energija pražnjenja koju odvodnik može da apsorbuje se izražava u kJ/kV naznačenog napona odvodnika i definiše se kao energija koja može biti injektirana u odvodnik prenapona u roku od 3 minuta u toku testa termičkog oporavka bez pojave termalnog pobjega [12].

Stalni radni napon U_c predstavlja maksimalnu vrijednost napona industrijske frekvencije koja može biti primjenjena na odvodnik bez bilo kakvih posljedica [10]. IEC standard daje slobodu proizvođačima da sami odrede vrijednost napona U_c , dok standard IEEE propisuje maksimalne vrijednosti stalnog radnog napona [12]. Kako su prenosne mreže napona 110 kV i višeg uvijek direktno uzemljene, to se za vrijednost napona U_c uzima vrijednost maksimalnog faznog napona mreže ili vrijednost veća za 5 %, da bi se u obzir uzeli svi faktori koji mogu uticati na povećanje napona (viši harmonici).

Naznačeni napon odvodnika U_r predstavlja napon, koji odvodnik mora da izdrži 10 s, kada se prije toga zagrije do temperature od 60°C , da ne pretrpi nikakva oštećenja [10]. Neki proizvođači dozvoljavaju i period od 100 s, umjesto naznačenih 10. Za određivanje napona U_r postoje dva načina. Prvi je računanjem napona pomoću izraza koji su navedeni od strane proizvođača, pri čega proračun zavisi od načina uzemljenja mreže. Drugi način odabira napona U_r jest putem TOV dijagrama (dijagram privremenih prenapona).

Preostali napon odvodnika predstavlja zaštitini nivo odvodnika. On se definiše za nazivnu struju odvođenja, koja je standardne strmine. Za talase koji imaju brži rast (veću strminu) može doći do povećanja preostalog napona u odnosu na definisani. Zbog toga proizvođači MO odvodnika daju relativni porast preostalog napona pri primjeni talasa koji ima veću strminu u odnosu na talas standardne strmine.

Na slici 23 su prikazani naponi sistema, kao i naponi odvodnika, koji su od interesa za opremu koja se štiti. Uočava se na koji način je potrebno odabrati parametre odvodnika da bi se zadovoljili kriterijumi sigurnosti opreme u odnosu na štetna dejstva atmosferskih i sklopnih prenapona.



Slika 23. Sistemski i parametri odvodnika prenapona koji su bitni za opremu koja se štiti

Naznačeni napon odvodnika, stalni radni napon kao i nazivna struja odvođenja su električni parametri kojima se definiše aktivni dio. Kućište se bira na osnovu dužine puzne staze, koja zavisi od nivoa zagađenja sredine, kao i od nivoa zaštite od natpritiska i mehaničkog opterećenja. IEC standard 60815 definiše 5 nivoa zagađenja [12], a u zavisnosti od toga i minimalnu dužinu puzne staze. U tabeli 5 su prikazani nivoi kao i minimalne zahtjevane dužine puzne staze.

Tabela 5. Nivoi zagađenosti sredine

Nivo zagađenja	Specifična dužina puzne staze (mm/kV)
I (veoma lako zagađenje)	12.7
II (lako zagađenje)	16
III (srednje zagađenje)	20
IV (teško zagađenje)	25
V (vrlo teško zagađenje)	31

Takođe se u zavisnosti od nivoa seizmičke aktivnosti, mogu odabrati odvodnici sa različitim nivoima mehaničke čvrstoće.

3.3.4 Termička stabilnost odvodnika

Kako odvodnikom u svakom trenutku teče određena struja, to se gubici koji se pri tome stvaraju pretvaraju u toplotu. U normalnom pogonu struja je veoma mala, pa su samim tim mali gubici, koji se pretvoreni u toplotu predaju okolini. Problemi sa odvođenjem stvorene količine toplote nastaju u trenutku provođenja velikih struja pražnjenja. Tada se uslijed proticanja struja koje su reda kA stvara velika količina toplote, koja je posljedica proticanja velike struje pražnjenja, uprkos veoma maloj vrijednosti otpora. Da bi odvodnik bio termički stabilan potrebno je uspostavljanje ravnoteže između toplote koja se stvara i toplote koja se odvodi. U slučaju da generisana toplota bude veća od odvedene dolazi do zagrijavanja blokova što se manifestuje smanjivanjem njihove otpornosti i povećanjem struje. Dalji rast struje doprinosi dodatnom rastu temperature na odvodniku pri čemu može doći do trajnog oštećenja odvodnika. Mjesta koja su najslabija jesu mjesta nehomogenosti u metal-oksidnim blokovima. Izrazom 27 je data relacija koja opisuje proces odvođenja toplote sa odvodnika.

$$Q = K \cdot S \cdot (T - T_0) \quad (27)$$

Gdje je : Q – količina toplote koja je odvedena hlađenjem (J)

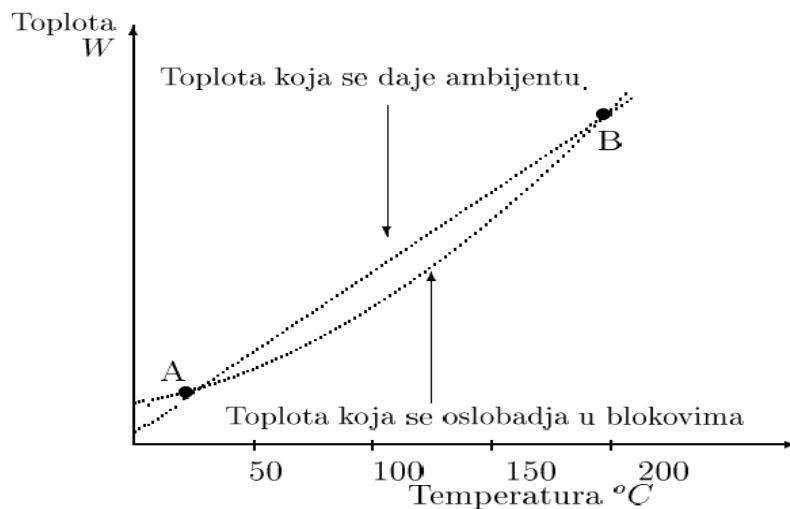
K – koeficijent odvođenja toplote ($J/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

S – površina hlađenja (m^2)

T – temperatura odvodnika ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 – temperatura ambijenta ($^{\circ}\text{C}$)

Na slici 24 je prikazan grafik, koji pokazuje termičku stabilnost MO blokova.



Slika 24. termička stabilnost MO blokova

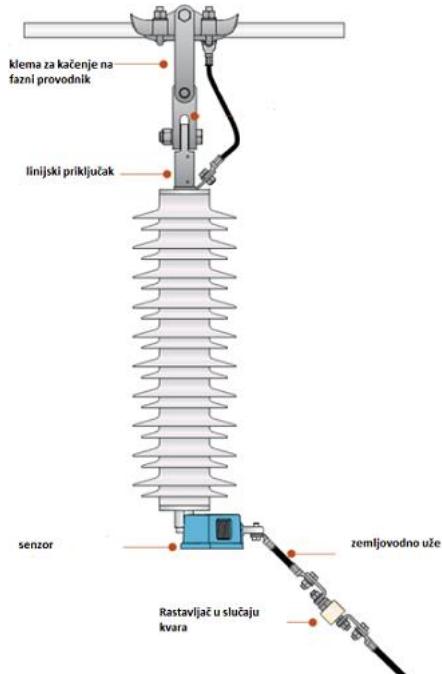
Na grafiku se razlikuju dvije karakteristične tačke. Tačka A predstavlja tačku stabilnog rada. Dok je količina toplove koja se generiše na odvodniku manja od količine topote koja se predaje okolini odvodnik ostaje termički stabilan. U slučaju da radna tačka pređe tačku B, koja se naziva tačkom termičke stabilnosti, toplova koja je generisana u odvodniku je veća od topote koja se predaje okolini, pri čemu nastupa termičko uništenje odvodnika. Tačka termičke stabilnosti, zavisi od načina izrade odvodnika i obično ima vrijednost u opsegu od $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4 Linijski odvodnici prenapona i njihova primjena

Svaki odvodnik koji se postavi na stubu sa ciljem zaštite izolatorskih članaka se naziva linijskim odvodnikom. Mogućnosti i pozitivni efekti upotrebe linijskih odvodnika prenapona su odavno prepoznati. S toga je širom svijeta sve veći broj nadzemnih vodova, koji se na ovaj način štite od isklapanja sa mreže zbog posljedica atmosferskog pražnjenja. Razlikuju se linijski odvodnici bez zaštitnog iskrišta ('non gaped line arrester') i odvodnici sa zaštitnim iskrištem. U upotrebni su mnogo češći odvodnici bez zaštitnog iskrišta. Ugradnji linijskih odvodnika prenapona prethodi analiza svih parametara voda, kao i ekonomski isplativost njihove ugradnje. Na slikama 25 i 26 je prikazan linijski odvodnik prenapona (koji je iz jednog dijela tkz. 'non gaped line arrester'), dok slika 27 prikazuje vod koji je štićen na ovaj način, gdje se vidi i način montiranja odvodnika na stub. Bitna razlika između linijskih odvodnika prenapona i odvodnika koji se ugrađuju u sklop transformatorskih stanica jeste postojanje rastavljača. Rastavljač

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

predstavlja dio koji se nalazi na dijelu odvodnika koji se povezuje sa uzemljenim dijelom stuba i služi za odvajanje odvodnika od faznog provodnika u slučaju njegovog kvara tj. proboja, čime se izbjegava kratak spoj na dalekovodu, a takođe služi za vizuelnu detekciju odvodnika koji nije više funkcionalan i koji je potrebno zamijeniti. U slučaju kvara odvodnika, brzina reagovanja rastavljača zavisi od amplitude struje (veća struja, brže reagovanje rastavljača). U zavisnosti od konstrukcije stubova, zavisiće i način montaže odvodnika na dalekovod. Ranije, kada su odvodnici prenapona imali kućište izrađeno od porculana teško ih je bilo montirati duž voda zbog težine samog odvodnika, čime bi se stubovi nadzemnog voda dodatno opterećivali. Danas je način izrade odvodnika prenapona izmjenjen i zahvaljujući kućištima izrađenim od silikonskih masa, njihova težina je znatno smanjena, a samim tim je i olakšana njihova montaža na stubovima nadzemnih vodova. Na slici 28 su prikazani mogući načini montaže linijskih odvodnika.



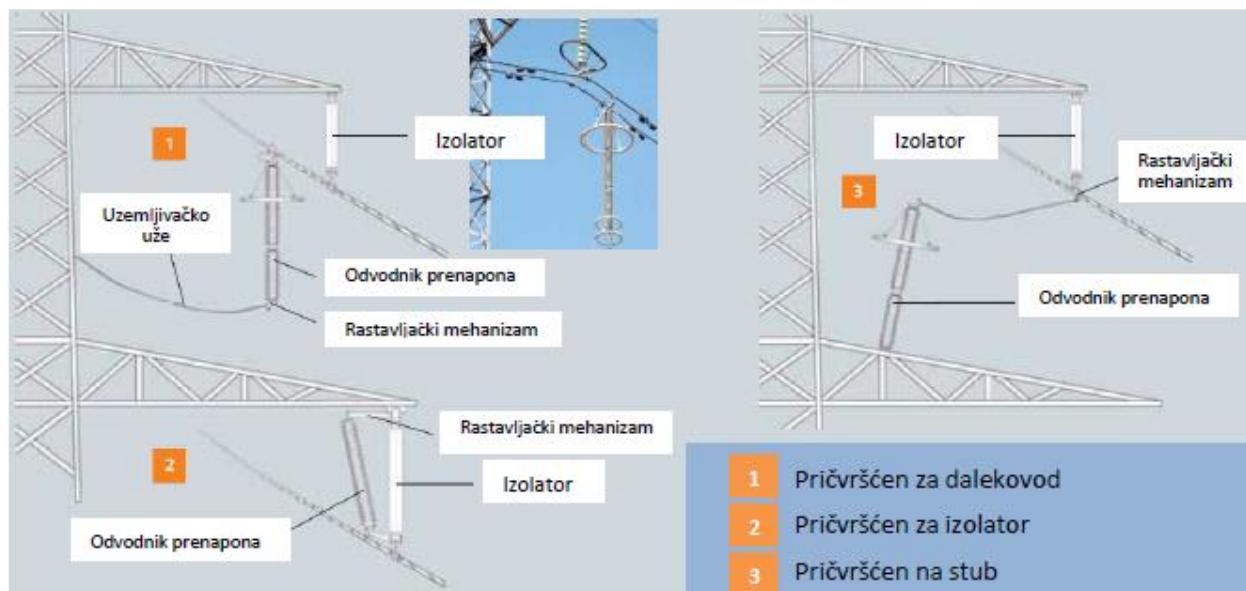
Slika 25. linijski odvodnik prenapona sa nabrojanim sastavnim djelovima



Slika 26. montiran linijski OP



Slika 27. prikaz voda štićenog odvodnicima prenapona



Slika 28. Mogućnost montaže linijskog odvodnika prenapona na dalekovodu

Koliki je doprinos linijskih odvodnika štićenju nadzemnog voda se može vidjeti i na slikama 29 i 30, gdje je prikazan vod na kojem nijesu ugrađeni odvodnici i vod koji je zaštićen odvodnicima ugrađenim u svakoj fazi na jednom sistemu provodnika, pri udaru groma u njih. Na slici 31 je prikazana distribucija struje pražnjenja prilikom atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže za slučaj voda štićenog sa linijskim odvodnicima prenapona i za slučaj kada odvodnici ne postoje.

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMNIM VODOVIMA



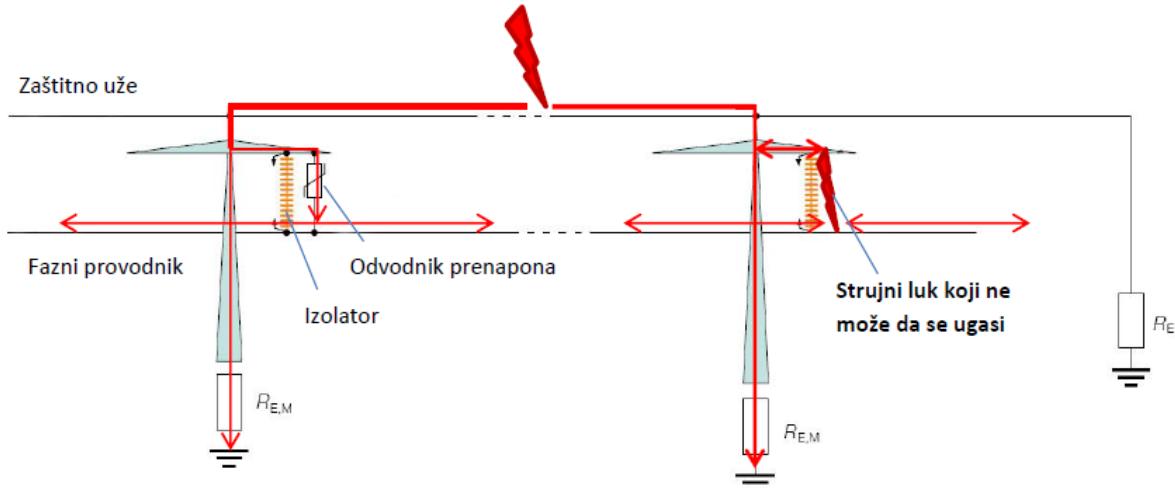
Photo courtesy of National Grid

Slika 29. Pražnjenje u vod koji nije štićen LOP



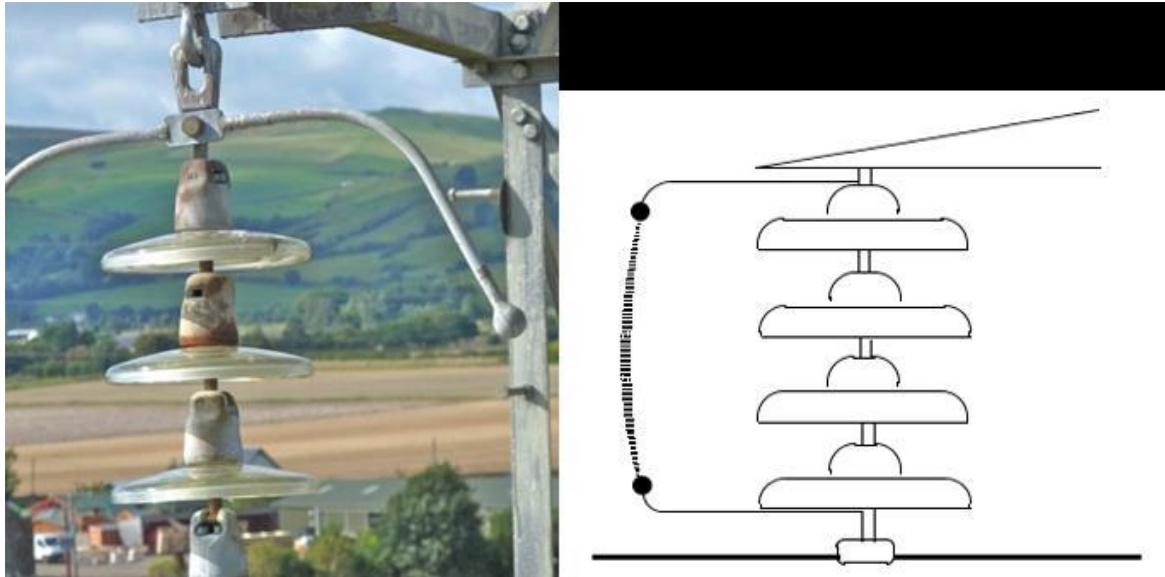
Photo courtesy of National Grid

Slika 30. Pražnjenje u vod koji je štićen sa LOP



Slika 31. Distribucija struje pražnjenja pri atmosferskom pražnjenju u zaštitno uže za slučaj voda sa ugrađenim linijskim odvodnicima (lijevo) i bez njih (desno)

Postavljanjem linijskih odvodnika prenapona, spriječava se razaranje izolatorskog lanca, pri pojavi preskoka na stubu. Izolatorski članci se najčešće, štite zaštitnom armaturom (iskrište), koja se sastoji od dvije elektrode (prikazana na slici 32). Zaštitna armatura je najčešće u obliku rogova, kružnog ili elipsastog prstena, mada može imati i druge oblike. Njena pozitivna dejstva se ogledaju u kontroli preskočnog napona izolatora, kao i u činjenici da se njenim korištenjem dobija ravnomjernija raspodjela potencijala duž izolatorskog članka. Takođe ima ulogu da pri pojavi povratnog preskoka, odvodi električni luk od površine samog izolatora, čime se značajno smanjuje naprezanje izolatorskog članka.



Slika 32.zaštitna armatura (iskrište) na izolatorskom lancu

Mane štićenja izolatorskih članaka na ovaj način su:

- Sječenje atmosferskog prenapona, prilikom prorade, pri čemu se stvaraju talasi vrlo velike strmine na čelu. Talasi nastali na ovakav način predstavljaju veliku opasnost za međunavojnu izolaciju mjernih i energetskih transformatora.
- Prilikom reagovanja dolazi do pojave kratkog spoja, koji se mora otkloniti djelovanjem zaštite na vodu. Samim tim mora doći do odrade prekidača snage, čime se skraćuje životni vijek opreme.

Upotrebom linijskih odvodnika prenapona, neće doći do pojave kratkog spoja, samim tim neće doći do reagovanja prekidača snage. Vod štićen na taj način ostaje u pogonu.

Mnogi elektroprenosni sistemi širom svijeta su se opredjelili na ovakav način štićenja nadzemnih vodova. Dominantno su štićene dionice koje su se protezale duž terena koji su vrlo lošeg geološkog sastava tla ili su štićene trase koje se nalaze u dijelu izrazito izražene grmljavinske aktivnosti. Bitan uticaj na odluku da li je potrebno zaštiti nadzemni vod na ovakav način ima i važnost voda za rad elektroenergetskog sistema.

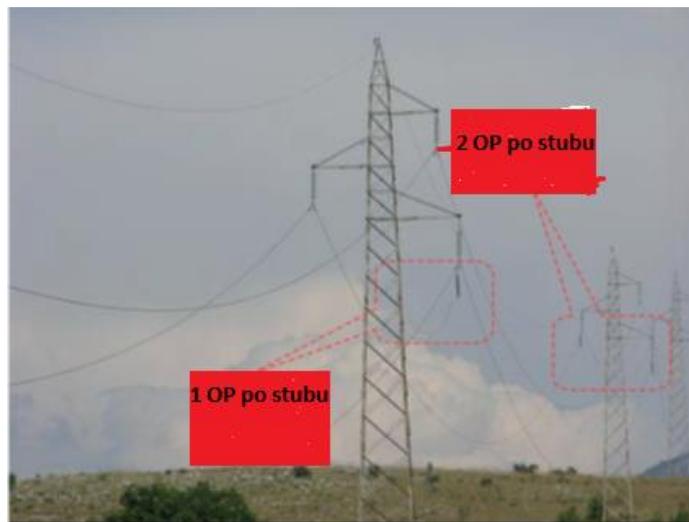
Sprječavanjem pojave povratnog preskoka, štite se izolatorski članci od trajnog uništenja, a neće ni doći do ispada voda sa mreže, čime se čuva stabilnost sistema. Za linijske odvodnike prenapona je karakterističan i visok nivo apsorpcije energije pražnjenja, koji je najčešće znatno veći u odnosu na odvodnike koji se koriste za štićenje elemenata koji se nalaze u sklopu transformatorskih stanica. Velika mogućnost apsorpcije energije je potrebna iz razloga naprezanja linijskih odvodnika prenapona, pred koje se postavlja zadatak da sprovedu do zemlje najveći nivo energije pražnjenja (dio se odvodi dozemnim užadima), a da pri tome sačuvaju svoju termičku stabilnost. Visoki zahtjevi za energetsku moć se postavljaju u slučaju ugradnje manjeg broja odvodnika prenapona, koji su zaduženi za štićenje voda. Dobar efekat se može postići i sa većim brojem ugrađenih odvodnika prenapona, koji su manje energetske moći. Veći

broj odvodnika manje energetske moći se može instalirati jer se odvodnici postavljaju u paraleli. Na taj način se ne opterećuje samo odvodnik na stubu koji je pogoden atmosferskim pražnjenjem, već i odvodnici na susjednim stubovima imaju ulogu u odvođenju prenaponskog talasa u zemlju.

Linijski odvodnici prenapona se koriste i kod kompaktnih vodova (vodovi kod kojih je smanjeno električno rastojanje), kao i na vodovima gdje ne postoji dozemno uže, kada odvodnici preuzimaju njegovu ulogu.

Mnogi elektroenergetski sistemi širom svijeta su se odlučili na štićenje pojedinih, problematičnih dionica voda upotreboom linijskih odvodnika prenapona. Na te korake se odlučuju u slučajevima dotrajalosti zaštitnog užeta, zatim pri štićenju djelova voda gdje nadzemno uže ne postoji, kao i u onim djelovima trase, gdje je procijenjeno da nije isplativo vršiti dodatna ulaganja u poboljšanje sistema uzemljenja. Za ugradnju odvodnika prenapona se biraju oni stubovi, koji su kroz eksploracioni vijek imali najveći broj zabilježenih pražnjenja, tj. stubovi na kojima je najčešće stradao izolatorski članak. Zabilježeni su slučajevi gdje je broj ispada voda sa mreže, nakon ugradnje odvodnika prenapona u kritičnoj dionici, koja se protezala uglavnom kroz kameniti predio smanjen oko sedam puta [13].

Kao najbolje rješenje za štićene nadzemnih vodova, koji se protežu trasama sa izrazito velikom nadmorskom visinom, gdje je učestaliji broj atmosferskih pražnjenja, takođe se pokazala ugradnja linijskih odvodnika prenapona. Na slici 33. je prikazan i nadzemni vod u Hrvatskoj, koji je od negativnih uticaja atmosferskih pražnjenja, zaštićen ugradnjom linijskih odvodnika prenapona [14]. U cilju štićenja ovog voda, koji se nalazi u zoni izrazito izražene grmljavinske aktivnosti ugrađeno je 110 linijskih odvodnika prenapona.



Slika 33. prikaz dalekovoda Ston Komolac sa ugrađenim odvodnicima

4. Izbor tehničkih karakteristika linijskih odvodnika prenapona

Kako bi se mogle odrediti tehničke karakteristike linijskih odvodnika prenapona, potrebno je u obzir uzeti mnogo parametara. Prije svega potrebno je poznavati grmljavinsku aktivnost u području trase nadzemnog voda na kome se planira izvršiti ugradnja, kao i vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača. Takođe su od interesa i visina nadzemnog voda (visina ovješenja fazne užadi), električni parametri (otpornost i induktivnost) tijela stubova, kao i karakteristike izolatorskih članaka, gdje je od interesa 50 % preskočni napon.

U cilju određivanja trajnog radnog, kao i naznačenog napona linijskog odvodnika prenapona, potrebno je analizirati uslove rada kojima će odvodnik prenapona biti izložen.

Procedura odabira parametara odvodnika (trajni i naznačeni napon), koji se primjenjuju u okviru transformatorskih stanica je poznata i data je od strane proizvođača. Kod odabira tehničkih karakteristika odvodnika prenapona, koji se primjenjuju na nadzemnim vodovima ne može se definisati tačno određena procedura, već se u zavisnosti od voda koji se štiti rade posebne studije.

Kako se linijski odvodnici postavljaju paralelno sa izolatorskim lancima, to je potrebno modelovati udar atmosferskog pražnjenja u nadzemni vod da bi se mogle odrediti visine nastalih prenapona. U ovom slučaju od interesa je preostali napon odvodnika, tj. napon koji će naprezati izolaciju voda. Potrebno je da visina ovog napona bude niža od podnosivog napona izolatorskog lanca, čime bi se spriječila mogućnost pojave preskoka sa stuba na fazno uže, pri udaru atmosferskog pražnjenja u vrh stuba ili zaštitno uže, ili pak pojave preskoka sa faznog užeta prema stubu u slučaju direktnog udara u fazni provodnik. Preostali napon predstavlja napon koji se dobija na krajevima odvodnika prenapona, kada je kroz njega propuštena nominalna (nazivna) struja oblika $8/20 \mu s$.

Napone bitne za izbor odvodnika prenapona koji se planiraju ugraditi u cilju zaštite voda je moguće odrediti na način da se odredi vrijednost preostalog napona pri kojoj neće doći do pojave preskoka, a na osnovu te vrijednosti se određuju vrijednosti naznačenog i trajnog radnog napona koji i definišu sam odvodnik.

Simulacije sa realnim parametrima voda je bitno odraditi kako bi se moglo procijeniti da li može doći do energetske prenapregnutosti odvodnika prenapona kada kroz odvodnik protiče struja znato veća od nominalne struje, što se može desiti ukoliko se instalira manji broj odvodnika prenapona nedovoljne energetske sposobnosti. Ukoliko dođe do te pojave, odvodnik se dalje ne može koristiti. Simulacije su bitne i sa aspekta optimalne raspodjele odvodnika na vodu.

4.1. Modelovanje atmosferskog pražnjenja

Modelovanje atmosferskog pražnjenja za proračune potrebne za elektroenergetski sistem se vrši pomoću strujnog talasa, koji nailazi po kanalu groma, koji se zamjenjuje vodom konstantne karakteristične impedanse [4]. Modelovanje strujnog talasa se može izvršiti pomoću dvostrukе eksponencijalne funkcije, mada se mogu koristiti i drugi oblici (uproštenije

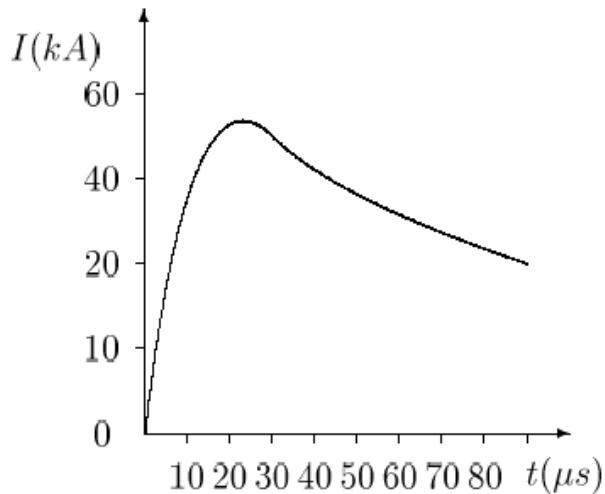
forme), u zavisnosti kakva se tačnost želi postići. Strujni talas modelovan dvostrukom eksponencijalnom funkcijom, dat je izrazom 28.

$$I(t) = I_m \cdot (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (28)$$

Maksimalna vrijednost struja dostiže u trenutku:

$$t_m = \frac{\ln a - \ln b}{a - b} \quad (29)$$

Tipičan oblik strujnog talasa, koji je modelovan pomoću dvostrukog eksponencijalne funkcije je prikazan na slici 34.



Slika 34. Dvostruko eksponencijalni oblik strujog talasa

Parametri a i b, koji figurišu u izrazu 29 se približno mogu odrediti iz sljedećih relacija:

$$a = \frac{0,69}{T_2} \quad (30)$$

$$b = \frac{3,24}{T_1} \quad (31)$$

Gdje T1 i T2 predstavljaju vremena trajanja čela i začelja talasa.

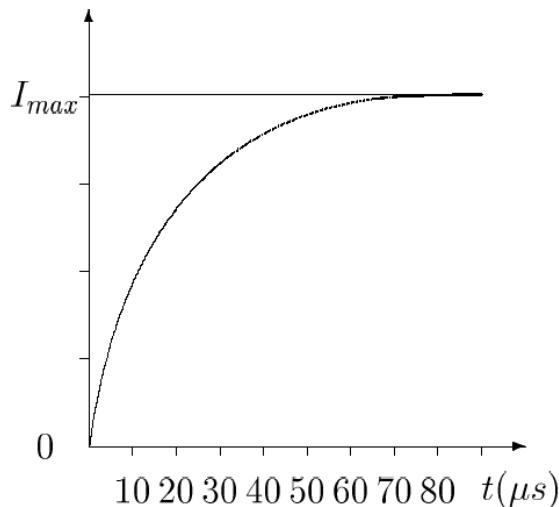
Za simulacije u ovom radu će se koristiti strujni talas obilka 10/350 μs , koji se prema IEC 62350-1 koristiti za modelovanje prvog talasa [5].

Pored navedenog za proračune se može koristiti i uprošćeni eksponencijalni oblik, kao i talas linearног čela i linearног začelja, talas linearног čela i konstantnog začelja kao i talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja.

Uprošćeni eksponencijalni oblik, kao i ostali navedeni modeli se koriste u slučajevima kada se žele predstaviti kritičniji slučajevi. Kritičniji rezultati se dobijaju korištenjem uprošćenog eksponencijalnog oblika u odnosu na slučaj kada se strujni talas modeluje dvostrukom eksponencijalnom funkcijom jer se u uproštenom obliku ne modeluje opadanje talasa. Uprošćeni eksponencijalni oblik se predstavlja pomoću izraza:

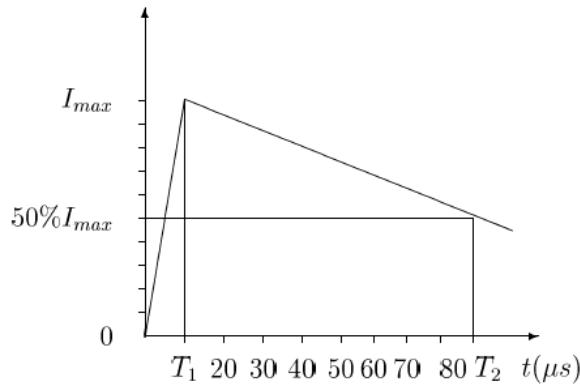
$$I(t) = I_{max} \cdot (1 - e^{-bt}) \quad (32)$$

Zadovoljavajuća tačnost u proračunima se dobija iz razloga, što se najčešće dešava da u toku trajanja čela strujnog talasa, dolazi do opadanja naponskog odziva uslijed pojave preskoka kao i zbog djelovanja prenaponske zaštite, što dovodi do toga da se začelje talasa često može zanemariti u proračunima. Jedan talas modelovan pomoću izraza 32 je prikazan na slici 35.

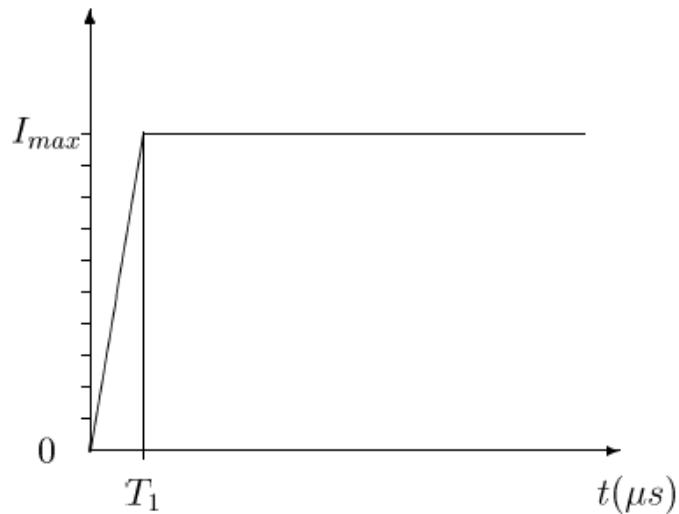


Slika 35. -Talas eksponencijalnog čela i konstantnog začelja

Slični rezultati se dobijaju i u slučaju da se umjesto uprošćenog eksponencijalnog talasa koristi talas lineranog čela i linearног začelja, kao i prilikom korištenja talasa lineranog čela i konstantnog začelja. Talasi linearног čela i lineranog začelja, kao i talasi lineranog čela i konstantnog začelja su prikazani na slikama 36 i 37. Tada se takvi talasu opisuju korištenjem jedinične odskočne funkcije (Hevisajdova funkcija).



Slika 36. Talas linearno rastućeg čela i linerano opadajućeg začelja



Slika 37. Talas linearno rastućeg čela i konstantnog začelja

Model koji se koristi kada se žele zaobići problemi sa diskontinuitetom koji su primjetni prilikom analize ponašanja elektroenergetskih elemenata pri pojavi atmosferskih pražnjenja (studije prenaponske zaštite na vodovima) jeste Hajdlerov model. Standard IEC 62350-1 predviđa Hajdlerovu funkciju kao standardnu funkciju za modelovanje strujnog talasa atmosferskog pražnjenja [15]. Problem kod Hajdlerove funkcije predstavlja činjenica da izraz nema mogućnost analitičkog rješavanja integrala, pa se zbog toga uvode dodatne aproksimacije. Hajdlerova funkcija je data izrazom 33:

$$I(t) = \frac{I_{max}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{nh}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{nh}} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (33)$$

Gdje je: I_{max} – maksimalna vrijednost struje

η - korekciona faktor

τ_1 - vrijeme trajanja čela talasa

τ_2 - vrijeme trajanja začelja talasa

nh - Hajdlerova faktor rasta

Korekciona faktor se može izračunati pomoću sljedećeg izraza:

$$\eta = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{nh\tau_1}{\tau_2} \right) \frac{1}{nh}} \quad (34)$$

Standard IEC 62350-1 definiše formu Hajdlerove funkcije gdje je Hajdlerov faktor rasta uzima vrijednost 10 [15].

U cilju lakšeg korištenja navedene funkcije mnogi istraživači širom svijeta su razvili mnoge aproksimativne forme, čime se prevazilaze problemi sa analitičkim rješavanjem izvorne Hajdlerove funkcije.

4.1.1 Model kanala groma

Kako bi se mogla odrediti vrijednost napona pri pojavi atmosferskog pražnjenja, potrebno je poznavati i vrijednost otpora kanala groma po kome nailazi upadni naponski talas. Kanal groma se modeluje beskonačno dugačkim vodom, koji ima karakterističnu impedansu Z_g .

Upadna komponenta napona po kanalu groma se dobija pomoću izraza [4]:

$$U_{up}(t) = \frac{Z_g I(t)}{2} \quad (35)$$

Gdje je $I(t)$ ukupna struja groma u dobro uzemljeni objekat

U izrazu 35 figuriše polovina ukupne struje groma u dobro uzemljeni objekat jer ta struja predstavlja polovinu ukupne struje uslijed totalne refleksije struje od impedanse uzemljivača. Vrijednosti struja pražnjenja se dobijaju mjeranjem tokom niza godina.

Vrijednost karakteristične impedanse groma se može procijeniti. Procjena je takva da karakteristična impedansa groma uzima vrijednosti iz opsega od 100 do 500 Ω za velike vrijednosti struje, dok je za male vrijednosti struje pražnjenja ta vrijednost veća. Kada se razmatra udar u uzemljene djelove vodova, što će biti slučaj i ovdje, može se usvojiti vrijednost otpora Z_g od 300 Ω [4]. Direktne udare u fazno uže, mogu prouzrokovati samo struje male amplitude, što je i pokazano prilikom opisivanja elektrogeometrijskog modela (koristi se za proračun zone zaštite zaštitnim užadima), i tada se za vrijednost otpora kanala groma uzimaju znatno veće vrijednosti, najčešće 3000 Ω .

4.2 Model stuba

Da bi se mogle odraditi simulacije u kojima bi se mogle sagledati štetne posljedice udara atmosferskog pražnjenja u nadzemni vod (simulacije korisne za odabir parametara linijskih odvodnika prenapona), potrebno je modelovati stub nadzemnog voda. Visina napona koja će naprezati izolaciju voda zavisi od visine samog stuba (visočiji stub, veći pad napona na stubu).

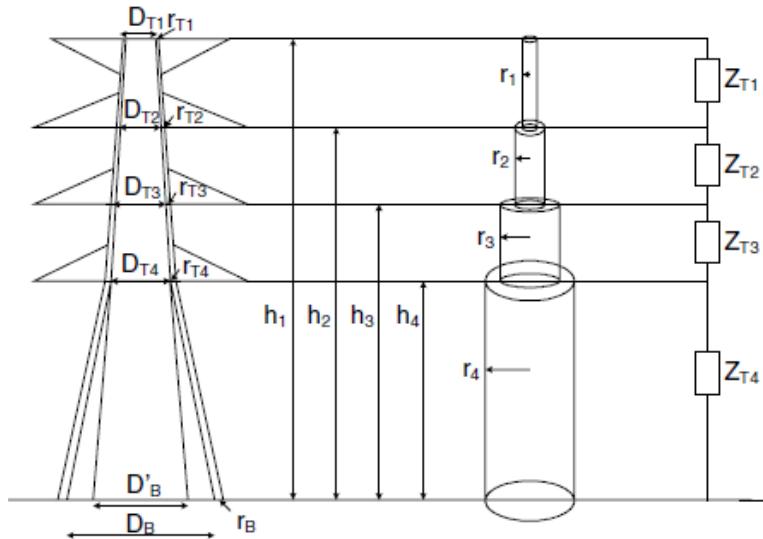
Tokom godina su se razvili različiti teorijski pristupi za modelovanje stuba, kao i modeli zasnovani na eksperimentalnim radovima. Stub se najčešće modeluje kao kratak vod sa konstantnom karakterističnom impedansom, na čijem se kraju nalazi otpor uzemljenja [4].

Modeli stuba se razlikuju za slučaj horizontalnog udara (udar u zaštitno uže, negdje u sredini raspona) i za slučaj vertikalnog udara (udar u vrh stuba). U različitim modelima se i stub može različito modelovati, pa se prema tome razlikuju modeli u kojima se stub modeluje pomoću cilindara, konusa, snopa provodnika, kao i modela u kojima se redno vezuju otpornost i paralelna veza induktiviteta i otpornosti stuba (eng. multistory model). U svakom od modela se stub dijeli na četiri dijela, gdje je prvi dio od vrha stuba do najvisočije konzole, drugi dio od najvisočije konzole do srednje konzole, treći dio od srednje do donje konzole i četvrti dio od donje konzole do zemlje [16]. Na taj način se u obzir uzima visina stuba i njen uticaj na visinu prenapona koja se pojavljuje na stubu. Nedostatak ovog modela je komplikovan proračun parametara, u poređenju sa drugim modelima, kao i činjenica da dio parametara koji figurišu u modelu ne zavisi od geometrije stuba, što komplikuje zamjensku šemu. Na slikama 38, 39 i 40 su prikazani različiti modeli stuba. Karakteristična impedansa stuba se može izračunati pomoću izraza 36, koji predstavlja empirijski izraz za karakterističnu impedansu cilindra, koja je dobijena na osnovu eksperimentalnih istraživanja [16].

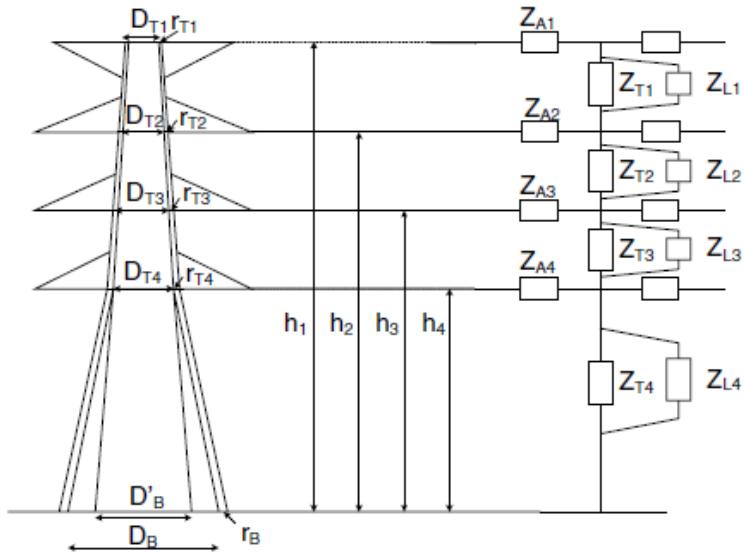
$$Z_s = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H}}{R} - 2 \right] \quad (36)$$

Gdje je : H – visina cilindra

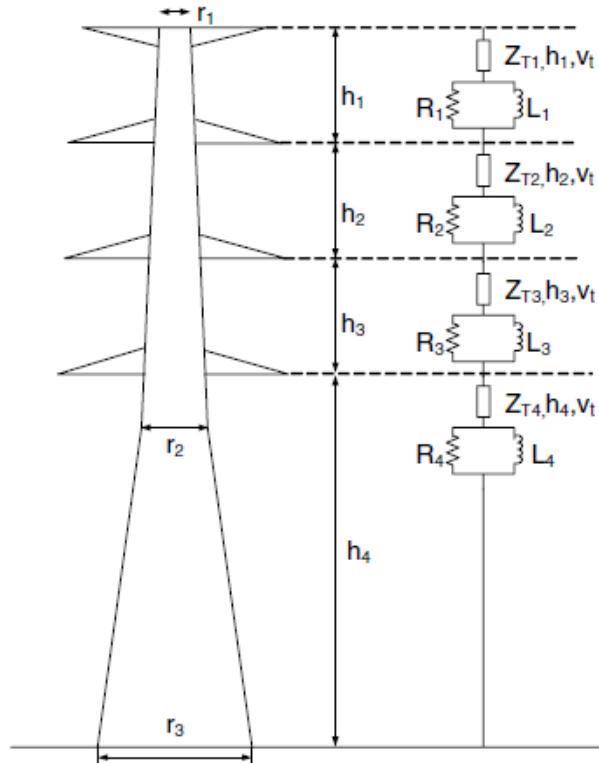
R – poluprečnik cilindra



Slika 39. Model stuba predstavljenog sa provodnicima u snopu



Slika 40. Model stuba sa provodnicima u snopu sa uključenim konzolama



Slika 41. Multistory model

Parametri sa slike 39 – model sa provodnicima u snopu, se računaju pomoću sljedećeg izraza:

$$Z_s = 60 \left(\ln\left(2\sqrt{2} \frac{H}{R} - 2 \right) \right) \quad (37)$$

Gdje je: H – visina odgovarajućeg cilindra

R- poluprečnik odgovarajućeg cilindra sa slike 39

Karakteristična impedansa djelova u modelu sa slike 41 – multistory model, se dobija korištenjem izraza 37, dok se parametri R_i i L_i određuju primjenom izraza:

$$R_i = \frac{-2 Z_{s1} \ln \sqrt{\gamma}}{H_1 + H_2 + H_3} \quad H_i \quad , i = 1,2,3 \quad (38)$$

$$R_4 = -2 Z_{s2} \ln \sqrt{\gamma} \quad (39)$$

$$L_i = \alpha R_i \frac{2h}{c} \quad (40)$$

Gdje je: Zs1 – karakteristična impedansa gornje tri sekcije

Zs2 – karakteristična impedansa najniže sekcije

Hi – visina sekcija prikazanih na slici 41

γ - koeficijent izobličenja

α - koeficijent prigušenja

Koeficijent izobličenja γ uzima vrijednosti u rasponu između 0.8-0.9, dok se za vrijednost koeficijenta prigušenja uzima vrijednost 0 [17].

Model kojim se stub ekvivalentira sa snopom provodnika kao i multistory model u obzir uzimaju različite visine faznih provodnika, samim tim se njihovim korištenjem dobijaju i tačniji rezultati.

Kako se za različite naponske nivoe koriste različiti tipovi stubova, u cilju njihovog modelovanja u praktične svrhe koriste se različiti izrazi (koji zavise od geometrije samog stuba). [4]

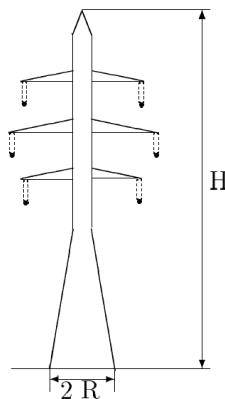
Za stub tip jelka je najpogodnije koristiti sljedeći izraz:

$$Z_s = 30 \ln \left[\frac{2(H^2 + R^2)}{R^2} \right] \quad (41)$$

Gdje je: H – visina stuba izražena u m

R- poluprečnik osnove stuba izražen u m

Slika stuba tipa jelka sa označenim dimenzijama je prikazana na slici 42.



Slika 42. Stub tipa jelka sa označenim dimenzijama

Za modelovanje portalnog stuba, najbolje je koristiti sljedeći izraz:

$$Z_s = \frac{1}{2} [Z_1 + Z_m] \quad (42)$$

Gdje Z_1 i Z_m uzimaju sljedeće vrijednosti:

$$Z_1 = 60 \ln \frac{H}{R} + 90 \frac{R}{H} - 60 \quad (43)$$

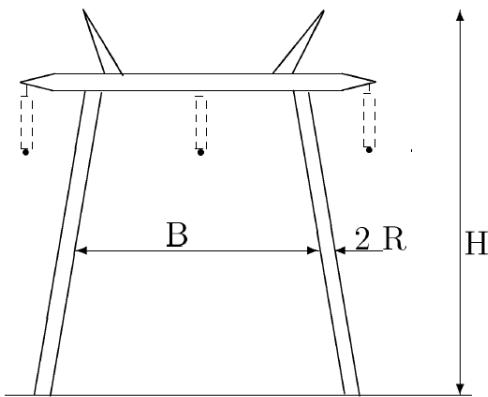
$$Z_m = 60 \ln \frac{H}{B} + 90 \frac{B}{H} - 60 \quad (44)$$

Gdje je: H - visina stuba

R – ekvivalentni poluprečnik kraka stuba

B – razmak između krakova

Portalni stub sa svim oznaka je prikazan na slici 43.



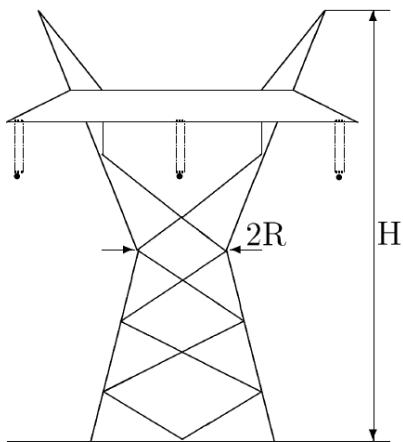
Slika 43. Portalni stub sa označenim dimenzijama

Za veoma visoke napone, veoma je česta upotreba Y stuba. Vrijednost karakteristične impedanse stuba tipa Y se dobija primjenom izraza:

$$Z_s = 60 \left[\ln \frac{2H\sqrt{2}}{R} - 1 \right] \quad (45)$$

R predstavlja ekvivalentni poluprečnik stuba na nazužem mjestu.

Stub tipa Y sa označenim dimenzijama je prikazan na slici 44.



Slika 44. Stub tipa Y sa označenim dimenzijama

4.3 Preskočna karakteristika izolacije

Prilikom udara atmosferskog pražnjenja, do pojave prenapona na vodu može doći ili u slučaju proboja mimo zaštitnog užeta (ako je vod štićen zaštitnim užetom) kada se pražnjenje dešava direktno u fazni provodnik ili u slučaju pojave povratnog preskoka.

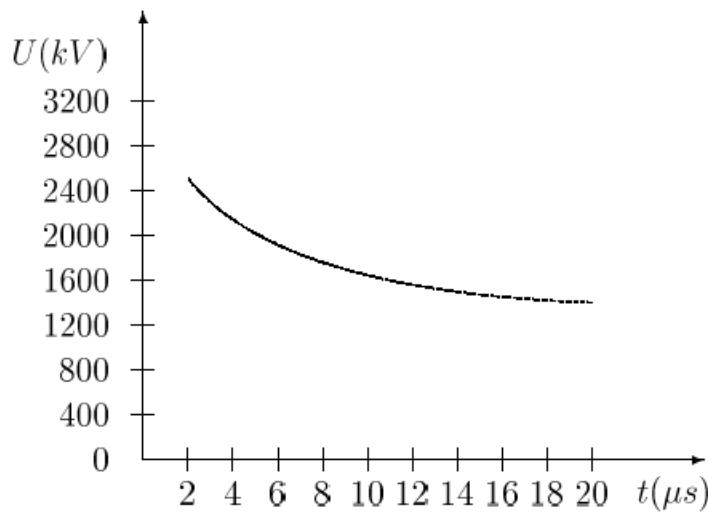
Do pojave povratnog preskoka će doći u slučaju kada je pad napona, koji je posljedica udara atmosferskog pražnjenja u vrh stuba, veći od podnosivog napona izolacije. Da bi se moglo odrediti da li će pri udaru atmosferskog pražnjenja doći do pojave povratnog preskoka ili ne, potrebno je poznavati karakteristiku izolacije.

Preskočna karakteristika izolacije se može modelovati korištenjem V-t karakteristike kao i korištenjem metode površine ili destruktivnog lidera.

Korištenje volt sekundne karakteristike izolacije koja se dobija eksperimentalnim putem, u laboratorijskim uslovima predstavlja najjednostavniji način za modelovanje preskočnog napona. Volt sekundna karakteristika (V-t kriva) predstavlja zavisnost 50 % preskočnog napona u zavisnosti od vremena do preskoka za standardni oblik naponskog talasa 1.2/50 μ s [4]. U laboratorijskim uslovima se ona određuje za navedeni oblik talasa, čime se dobijaju dobri rezultati za pojavu pražnjenja sa talasom oblika 1.2/50 μ s, dok se ista vrijednost preskočnog napona ne može očekivati u slučajevima pojave talasa različitih talasnih oblika.

Napon koji će u 50 % slučajeva izazvati preskok na izolaciji, pri primjeni više ponovljenih udara, pri čemu konfiguracija elektroda ostaje nepromijenjena naziva se 50 % preskočnim naponom.

Ukoliko se poznaju eksperimentalni rezultati, koji se dobijaju u laboratorijskim uslovima podizanjem napona i snimanjem trenutaka kada se desi prekok na izolaciji, tada se za proračune može koristiti karakteristika u linearno-segmentom obliku. Ona se dobija povezivanjem tačaka u kojima je došlo do preskoka, koje su dobijene pri ispitivanju, sa pravim linijama. Dovoljno je koristiti šest tačaka u cilju vjerne reprezentacije volt sekundne karakteristike izolacije. Jedna takva karakteristika za 400 kV jednostruki lanac je prikazana na slici 45.



slika 45. Volt sekundna karakteristika izolacijskog lanca 400 kV

Sa karakteristikom koja je prikazana na slici 45 se jasno može uočiti da 50 % preskočni napon dobija veoma visoke vrijednosti pri primjeni strmih talasa, gdje je vrijeme do preskoka veoma kratko. U slučaju primjene talasa čije je čelo manje strmine, tj. talasa koji se sporije uspostavljaju V-t karakteristika se mijenja vrlo malo u zavisnosti od vremena do preskoka.

U slučaju da se numeričkim putem želi proračunati da li će doći do pojave povratnog preskoka, tada se u svakom trenutku ispituje da li je razlika napona koja postoji na krajevima izolatora veća od volt- sekundne karakteristike izolacije u posmatranom trenutku.

Kada je napon koji napreže krajeve izolatora veći od 50 % preskočnog napona, tada će doći do pojave povratnog preskoka.

Volt -sekundna karakteristika se prema IEEE može predstaviti jednostavnom hiperbolom oblika[18]:

$$U_t = 400 \frac{kV}{m} d + 710 \frac{kV}{m} d \left(\frac{t}{1\mu s} \right)^{-0.75} \quad (46)$$

Gdje d predstavlja vazdušni zazor između zaštitne armature izolatora izraženo u m

Karakteristika prikazana u ovom obliku ne uzima u obzir slučajno rasipanje preskočnog napona i tačna je samo za standardni oblik talasa.

Metoda površine ili metoda destruktivnog efekta (DE) se koristi kada se želi izvršiti modelovanje preskoka na vazdušnoj izolaciji kada se ona napreže djelovanjem prenapona koji nije standardnog oblika. Metoda površine ne uzima u obzir samo visinu nastalog prenapona što je slučaj kada se izolacije modeluje korištenjem V-t krive, već i trajanje izloženosti izolacije prenaponom određene amplitude. Prilikom korištenja ove metode potrebno je definisati baznu površinu iliti bazni destruktivni efekat. Ukoliko je vrijednost destruktivnog efekta nastalog djelovanjem prenapona na sistem izolacije veća od vrijednosti baznog destruktivnog efekta doći će do preskoka na izolaciji.

Metod površine se definiše izrazom:

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} [e(t) - V_0]^{k_d} dt \quad (47)$$

Za vrijednost koeficijenta k_d se može uzeti vrijednost 1 [19]. Način računanja baznog destruktivnog efekta ili kritične površine kao i modifikacije izraza 47 se mogu naći u literaturi [19].

Metoda destruktivnog lidera se neće koristiti u radu pa nije ni opisivana.

4.4 Modelovanje uzemljenja

Pri proticanju udarne struje atmosferskog pražnjenja uslijed različitih nelinearnih efekata, koji se pojavljuju na uzemljivaču, modelovanje impedanse uzemljenja dalekovodnog stuba, predstavlja složen problem. Do promjene otpora uzemljenja u odnosu na vrijednost izmjerenu pri injektiranju struje industrijske frekvencije dolazi uslijed uticaja jonizacije, uticaja induktivnosti uzemljivača, kao i zbog uticaja prostiranja talasa kod dužih trakastih uzemljivača.

Do pojave jonizacije tla dolazi pri proticanju struja veoma velikih amplituda, i dešava se na mjestima gdje je velika specifična otpornost tla. Otpornost u slučaju pojave efekta jonizacije se računa pomoću izraza 48 [16].

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

$$R_j = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (\frac{I}{I_g})}} \quad (48)$$

Gdje je: R_0 - vrijednost rasprostiranja uzemljivača pri maloj struji i industrijskog frekvenciji u Ω

I - struja groma kroz uzemljivač u kA

I_g – granična struja za nastanak jonizacije u tlu u kA

Otpor rasprostiranja uzemljivača dalekovodnog stuba će biti jednak vrijednosti izmjerenoj pri malim strujama za slučaj kada je $I_g \gg I$.

Struja I_g se određuje pomoću sljedećeg izraza:

$$I_g = \frac{\rho E_0}{2\pi R_0^2} \quad (49)$$

Gdje je : ρ - specifična otpornost tla

E_0 – gradijent ionizacije tla, gdje se za preporučenu vrijednost uzima vrijednost od 400 kV/m

Efekat ionizacije tla ima pozitivan efekat koji se ogleda kroz smanjenje udarne otpornosti, jer se efektom ionizacije tla prividno povećava poprečni presjek provodnika, od kojeg je napravljen uzemljivač. S druge strane uticaj induktivnosti uzemljivača pri pojavi strujnih talasa velike strmine, doprinosi porastu napona na uzemljivaču za vrijeme trajanja čela talasa.

Uzimajući u obzir rezultate grupe autora u okviru međunarodne radne grupe za procjenu ugroženosti vodova od atmosferskog pražnjenja dovoljno je uzemljivač modelovati otpornošću izmjerrenom malom strujom industrijske učestanosti [4], što predstavlja pojednostavljen model. To upravo predstavlja i najčešći pristup pri modelovanju pojave vezanih za atmosferska pražnjenja i njihov uticaj na nadzemne vodove, naročito za slučajeve niske stacionarne vrijednosti otpora rasprostiranja.

5. Optimizacija lokacija linijskih odvodnika prenapona

Nesumnjivo je da se ugradnjom odvodnika prenapona na nadzemnim vodovima, značajno smanjuje uticaj atmosferskog pražnjenja na pouzdanost rada voda, tj. smanjuje se njegova osjetljivost na prenapone nastale atmosferskim pražnjenjem u sam vod ili njegovu blizinu. Problem je što je ekonomski neprihvatljiva ugradnja odvodnika prenapona u svakoj fazi i na svakom stubu, čime bi sa tehničke strane postigli gotovo potpunu zaštitu voda. S toga je potrebno odrediti najkritičnija mjesta na vodu, gdje je potrebno ugraditi linijske odvodnike prenapona, kako bi se postigla maksimalna zaštita voda, uz najmanje moguće troškove.

Da bi se mogle odrediti optimalne lokacije za ugradnju odvodnika na nadzemnim vodovima, potrebno je u obzir uzeti niz faktora (gustina atmosferskih pražnjenja, otpor rasprostiranja uzemljivača stuba, podnosive atmosferske napone izolatora ugrađenih na vodu, pogonske izvještaje, važnost voda za rad EES itd.). Cilj je određivanje funkcije rizika, koja će pokazati koji vodovi su najranjiviji pri pojavi atmosferskih prenapona. Tačnije, odrediće se parametri koji imaju najveći uticaj na ponašanje voda pri pojavi atmosferskih pražnjenja.

Značajan doprinos u određivanju najpovoljnijih lokacija za ugradnju odvodnika, donosi sistem za praćenje atmosferskih prenapona. Ukoliko na određenoj teritoriji, na kojoj se proteže vod, koji je od interesa za analizu ugradnje linijskih odvodnika prenapona, postoji instaliran jedan takav sistem, umnogome se olakšava procedura u vezi odabira najpovoljnijih lokacija. Naravno, veoma je značajno da sistem za praćenje atmosferskih prenapona ima zadovoljavajuću preciznost, kada je u pitanju tačna lokacija atmosferskog pražnjenja, a takođe je od interesa struja pražnjenja detektovana takvim sistemom.

U ovom radu se za određivanje optimalnih lokacija za ugradnju odvodnika prenapona koristi deterministički pristup. Na taj način se dobijaju najrealniji i najtačniji rezultati.

Kako se specifična otpornost tla mijenja duž trase protezanja voda, jasno je da se tako mijenja i vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača, kao i visina terena.

Podaci koje je poželjno imati pri proceduri odabira najboljih lokacija za ugradnju linijskih odvodnika prenapona jesu podaci o broju ispada voda sa lokacijama stubnih mjesta na kojima je evidentiran najveći broj ispada (proboj izolatora), čime bi se na veoma jednostavan način mogla odrediti najkritičnija mjesta u trasi. Takvi podaci se dobijaju sakupljanjem podataka u dužem vremenskom periodu,

Broj ugrađenih odvodnika prenapona je ograničen ekonomskim faktorima. Cilj je postizanje što boljeg efekta sa što manjim brojem odvodnika prenapona.

Kako bi se uzimajući u obzir sve potrebne podatke sa sigurnošću mogle odrediti optimalna mjesta za ugradnju odvodnika prenapona neophodno je izvršiti simuliranje udara groma u nadzemni vod koji se želi zaštiti. Na osnovu rezultata simulacija se određuju stubna mjesta na kojim bi se ugradnjom odvodnika prenapona dobila najbolja prenaponska zaštita.

Kako bi se moglo utvrditi da li su odabrane najbolje lokacije za ugradnju odvodnika prenapona, potrebno je nakon ugradnje vršiti detaljan monitoring nadzemnog voda u godinama

nakon ugradnje kako bi se donijeli valjani zaključci i eventualno ugradili odvodnici na nekom drugom mjestu u zavisnosti od potreba.

5.1 Procedura odabira optimalnih lokacija

Kako bi se odredila funkcija rizika i samim tim odabrao vod koji je potrebno zaštiti sa odvodnicima prenapona, neophodno je odrediti kriterijume za određivanje funkcije rizika. Faktori koji su najvažniji za određivanje funkcije rizika jesu važnost voda za funkcionisanje EES-a, kao i broj ispada voda u određenom vremenskom periodu. Vod koji ima najveći broj ispada na godišnjem nivou za koeficijent ispada voda sa mreže uzima vrijednost 1, dok se za ostale vodove taj broj dobija u odnosu na broj ispada voda sa najčešćim ispadima. Važnost voda za rad EES-a se dobija na osnovu sagledavanja stanja sistema i mogućnosti ispunjenja kriterijuma sigurnosti N-1. Na taj način se za vodove, čijim ispadom bi se određeno konzumno područje ostalo bez napajanja ili bi se više konzumnih područja napajalo vodom male propusne moći, sa velikom mogućnošću preopterećenja uzela vrijednost 1. Vodovi sa provodnicima veće prenosne moći bi uzeli vrijednost 0,75 i tako dalje, dok se ne dođe do slučaja da ispad voda sa mreže ne donosi poteškoće za funkcionisanje sistema, kada se uzima faktor 0. Pomenuti vodovi se ne bi razmatrali u tom slučaju. Funkcija rizika je data izrazom 50.

$$f(R) = f1(v) * g1(i) \quad (50)$$

Gdje je $f(R)$ – funkcija rizika voda

$f1(v)$ – faktor važnosti voda

$g1(i)$ – faktor ispada voda sa mreže

Faktorom ispada su pokriveni svi uticaji koji dovode do broja ispada voda, a to su svakako grmljavinska aktivnost na određenom području, kao i vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača stubova voda koji je od interesa. Kada se primjenjujući na ovaj način određenu funkciju rizika, odredi vod na kom se treba primjeniti ugradnja odvodnika prenapona, pristupa se procesu optimalne ugradnje odvodnika prenapona.

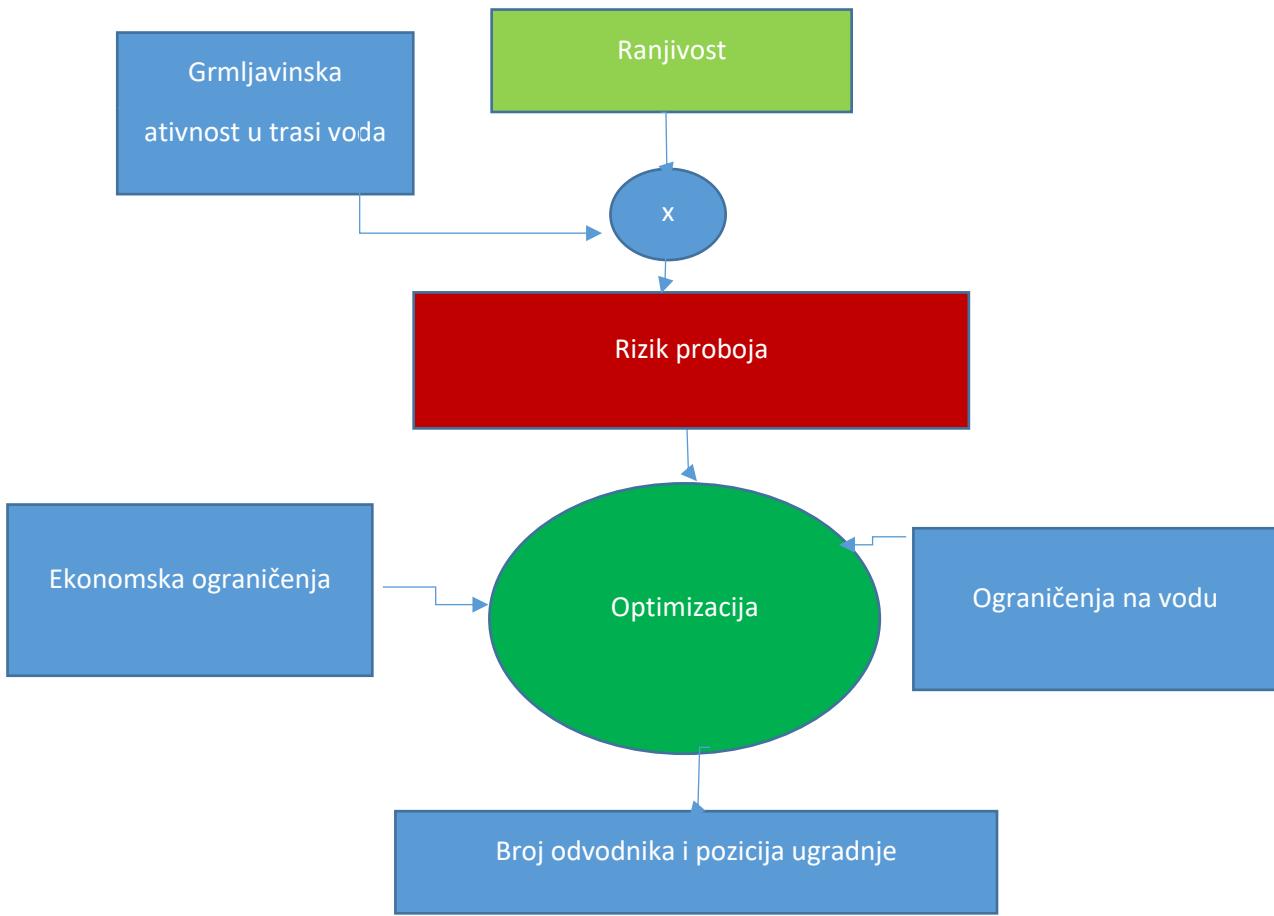
Da bi se odredile lokacije za optimalnu ugradnju odvodnika prenapona prvi faktor koji je potrebno uzeti u obzir jeste postojanje zaštitnog užeta duž čitave trase voda, tj. potrebno je provjeriti da li postoje dionice koje nijesu štićene zaštitnim užetom.

Najbitniji činilac u odabiru lokacija jeste vrijednost otpora uzemljenja, kao i pogonski izvještaji u kojima se može naći podatak o broju zamijenjenih izolatorskih članaka, koji su stradali uslijed udara groma u vod. U izrazu 15 je jasno da na visinu napona koji napreže izolaciju voda pri udaru pražnjenja u stub ili zaštitno uže, veliki uticaj ima vrijednost otpora uzemljivača.

Kako tlo nije istog geološkog sastava, u obzir se uzimaju samo stubovi čija vrijednost otpora uzemljivača prelazi vrijednosti preporučene izrazom 24.

U slučajevima veoma dugih vodova, koji prolaze kroz područja sa različitim brojem grmljavinskih dana, potrebno je označiti djelove voda koji prolaze kroz zone sa najizraženijom grmljavinskom aktivnošću.

Na slici 46 je prikazan algoritam po kome će se vršiti odabir lokacija za ugradnju odvodnika prenapona.



Slika 46. Algoritam optimizacije

Procedura odabira optimalnih lokacija za ugradnju linijskih odvodnika prenapona se sastoji od prikupljanja podataka o grmljavinskoj aktivnosti u trasi voda, za šta se koriste podaci dobijeni sa izokerauničkim mapama i sa sistema detekcije grmljavinskog pražnjenja, što predstavlja pouzdaniji podatak. Sljedeći korak jeste procjena ranjivosti stubnih mesta, tj. mesta na kojima može doći do probaja izolatorskog lanca, a samim tim i do ispada voda sa mreže.

Navedeno je ranije da visina prenapona nastala atmosferskim pražnjenjem u zaštitno uže ili stub najviše zavisi od otpora rasprostiranja uzemljivača, kao i od geometrije stuba (visina stuba, raspored provodnika itd.), pa je stoga neophodno izdvojiti stubna mjesta sa najvećom vrijednošću otpora rasprostiranja, jer su ta mjesta najranjivija pri udaru groma u nadzemni vod. Procjena se dobija putem simulacija, gdje se za različite amplitude struje pražnjenja dobijaju i različiti rezultati. Najrizičnija mjesta su one pozicije stubova, na kojima se u simulacijama procijeni da visina napona na konzoli (ujedno vrijednost napona, koji napreže izolaciju na vodu), prelazi vrijednost podnosivog napona izolacije. Takva procjena se dobija uz poznavanje karakteristike izolacije. U cilju uspješnog dobijanja što tačnijih rezultata, vodove je potrebno modelovati sa što vjernijim podacima (vrijednost otpora rasprostiranja svakog stuba, podaci o zaštitnom užetu i faznim provodnicima, gdje je od interesa imati precizne električne parametre voda, koji utiču na rezultat simulacije).

Da bi se postigla optimalna zaštita voda sa instalacijom linijskih odvodnika prenapona, značajan faktor predstavljaju ekomska ograničenja. S toga je potrebno odabrati broj odvodnika na način da se ne probije dozvoljeni budžet, a da efekat zaštite bude najveći. Ekonomski kriterijum se opisuje relacijom datom izrazom 51:

$$\sum_{n=1}^N F_n C_n \leq PC \quad (51)$$

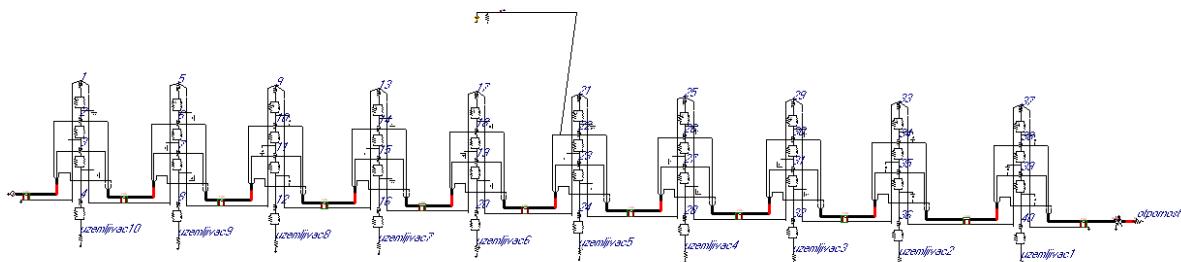
Gdje N predstavlja ukupan broj stubnih mjesta, Fn uzima vrijednost 1 u slučaju da su ugrađeni odvodnici i 0 za slučaj da odvodnici nijesu ugrađeni, Cn predstavlja cijenu ugradnje po stubnom mjestu, dok PC predstavlja Projektovanu cijenu (troškovi koji su dozvoljeni). Ekonomski faktor najčešće predstavlja i najveće ograničenje u pogledu instalacije linijskih odvodnika prenapona na nadzemnim vodovima.

6. Parametarska analiza problema ugradnje linijskih odvodnika prenapona

U cilju određivanja parametara odvodnika prenapona, kao i broja potrebnih odvodnika neophodno je sprovesti niz simulacija u kojima bi se za rezultat dobili naznačeni napon prorade kao i energetska sposobnost odvodnika prenapona. Za sprovodenje simulacija neophodno je izvršiti modelovanje nadzemnog voda.

Radi ilustracije, u ovom slučaju se modeluje dionica nadzemnog voda sa jedanaest raspona. Pretpostavka je da su rasponi iste dužine i sa istom vrijednošću otpora rasprostiranja uzemljivača u početnoj simulaciji. Mijenjajući dužine raspona kao i vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača uz modelovanje udara atmosferskog pražnjenja u vrh stuba, zaštitno uže ili fazni provodnik dobija se informacija o mogućim nivoima prenapona koji naprežu izolaciju. Dobijanjem tih vrijednosti određuju se i energetski parametri odvodnika prenapona sa ciljem dobijanja efikasne zaštite nadzemnog voda, kao i situacije u kojima je potrebno primijeniti njihovu ugradnju.

Na slici 47 je prikazana dionica 110 kV nadzemnog voda sa 11 raspona i 10 stubova na čijem kraju je priključen potrošač preko transformatora prenosnog odnosa 110/35 kV modelovana u programskom paketu ATP/EMTP.



Slika 47. dionica 110 kV dalekovoda korištena za parametarsku analizu problema ugradnje linijskih odvodnika prenapona

Kako bi se postigla zadovoljavajuća tačnost korištenjem simulacija, neophodno je izvršiti što je preciznije moguće modelovanje svakog elementa nadzemnog voda. U simulaciji su korišteni parametri realnog 110 kV dalekovoda.

Električni parametri voda (vrijednost R,L,C faznih užadi i zaštitnog užeta) su izračunati na osnovu geometrije samih stubova, kao i na osnovu vrijednosti specifičnog otpora tla, za šta je korištena opcija programskega paketa ATP/EMTP koja je prikazana na slikama 48a i 48b. Za potrebe simulacija korišten je J. Marti model voda, koji se koristi kada se u simulacijama pojavljuju frekventno zavisni elementi.

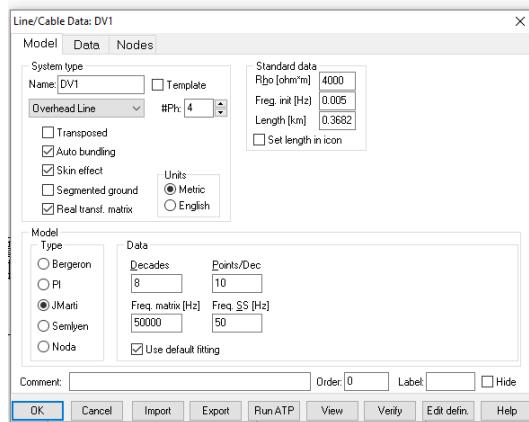
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

Atmosfersko pražnjenje modelovano je pomoću kontrolisanog strujnog izvora. Za amplitudu struje su korištene različite vrijednosti, sa maksimalnim iznosom od 60 kA. Vjerovatnoća prekoračenja navedene vrijednosti je veoma mala, manja od 1% svih slučajeva [8].

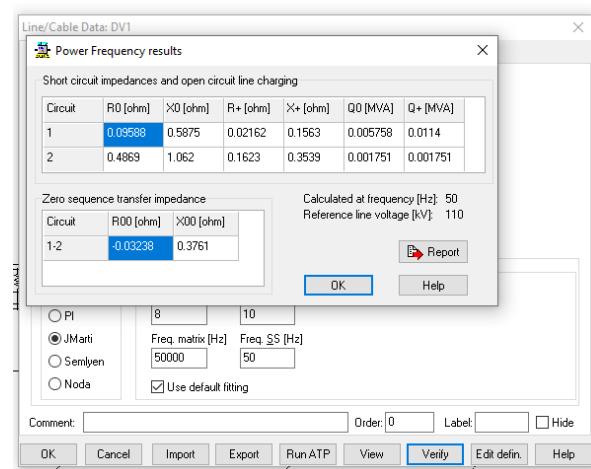
Strujni talas je modelovan pomoću Hajdlerove funkcije opisane izrazom 33:

$$I(t) = \frac{I_{max}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{nh}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{nh}} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (33)$$

Gdje se za strujni talas uzima oblik 10/350 μs.



Slika 48a. Proračun električnih parametara voda

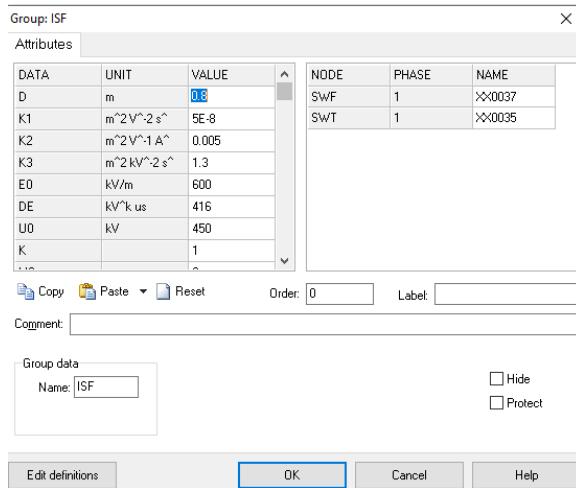


Slika 48b. Proračun električnih parametara voda

U simulacijama je od interesa visina prenapona, koji je nastao kao posljedica atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže i vrh stuba, kao i prenaponi nastali direktnim pražnjenjem u provodnik. Izolacija se modeluje metodom površine koja je opisana relacijom 47:

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} [e(t) - V_0]^{k_d} dt \quad (47)$$

Za modelovanje izolacije je korišten isprogramiran blok koji je napravljen u svrhu modelovanja izolacije, a ima mogućnost odabira načina modelovanja [19]. Blok sa parametrima je prikazan na slici 49.



Slika 49. Blok korišten za modelovanje sistema izolacije

Svi parametri potrebni za modelovanje izolacije su uzeti na način da zadovoljavaju modelovanje izolatora 110 kV (realni parametri jednog 110 kV izolatorskog lanca) nadzemnog voda uz primjenu izraza potrebnih za računanje kritične površine [19].

Prilikom izvršenja svake simulacije provjerava se da li dolazi do probroja na čitavoj modelovanoj dionici.

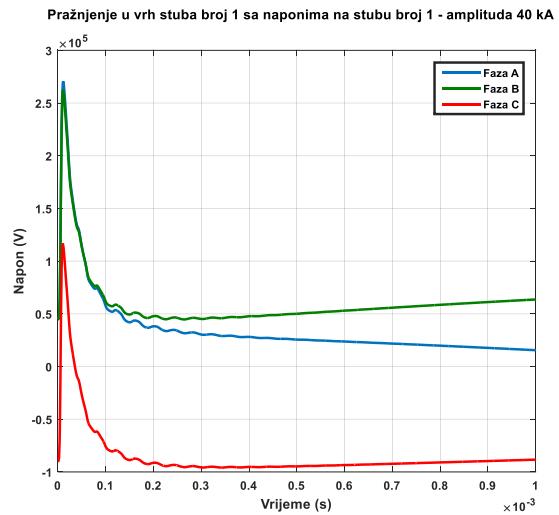
U zavisnosti od toga da li i na kojem stubu dolazi do pojave prenapona, koji prevazilaze podnosivi napon izolacije, što je u ovom slučaju 550 kV, primjeniče se linijski odvodnici prenapona, nakon čega se simulacija ponavlja. Njihova ugradnja ima za cilj snižavanje preostalog napona na nivo koji izolacija može podnijeti. Koliko odvodnika je potrebno ugraditi kao i na kojim mjestima zaključuje se nakon izvršavanja dovoljnog broja simulacija. Preostali napon na odvodniku mora imati vrijednost nižu od podnosivog napona izolacije.

Odvodnici se modeluju korištenjem pripremljenih blokova u koje se unose karakteristične vrijednosti napona i struje. Procjena je da se na taj način dobija najvjernija reprezentacija realnog odvodnika prenapona. Parametri odvodnika koji se primjenjuju u simulacijama su uzeti iz kataloga jednog od proizvođača odvodnika prenapona.

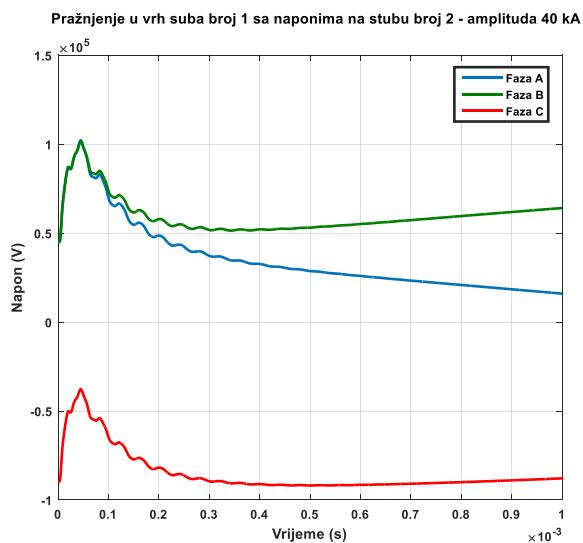
Stubovi su modelovani primjenom multistory modela, opisanog u radu.

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

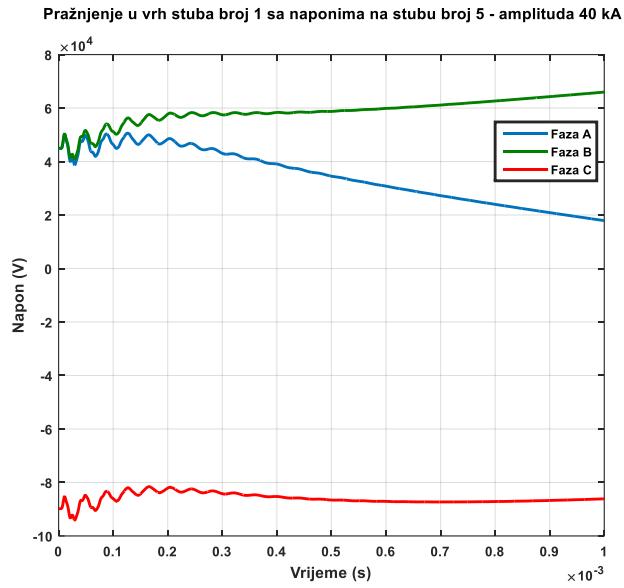
U početnoj simulaciji, u modelu je uzeta niska specifična otpornost tla pri čemu je moguće postići otpornost rasprostiranja uzemljivača od 10Ω . Prepostavljeni rasponi su iste dužine i iznose 240 m. Svi stubovi su identične visine i geometrije. Na slikama broj 50 do 62 su prikazani grafici sa nivoima prenapona dobijenim pri udaru atmosferskog pražnjenja sa amplitudom od 40 kA u vrh stuba.



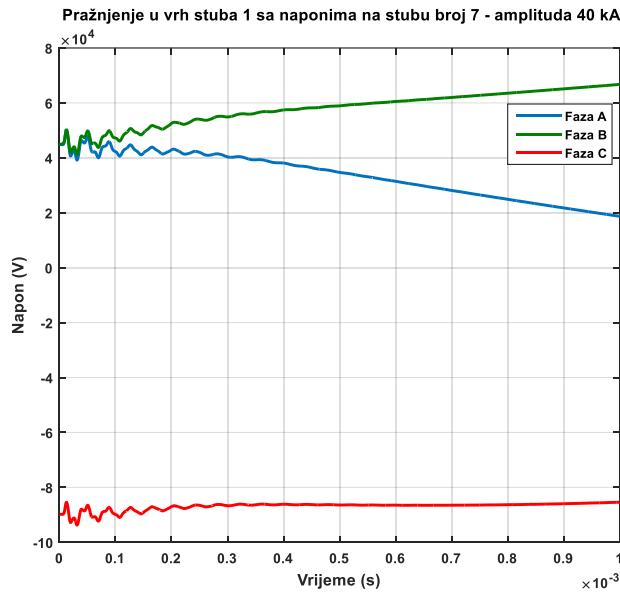
Slika 50. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1



Slika 51. Vremenska promjena napona na stubu br. 2 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1

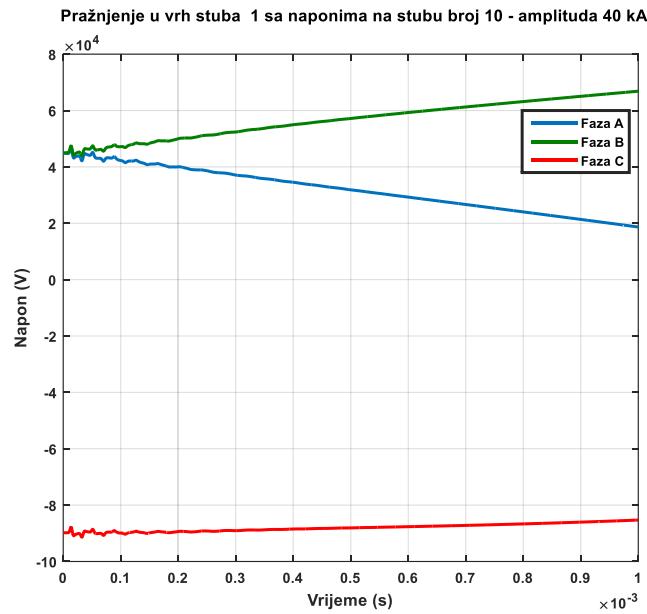


Slika 52. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1

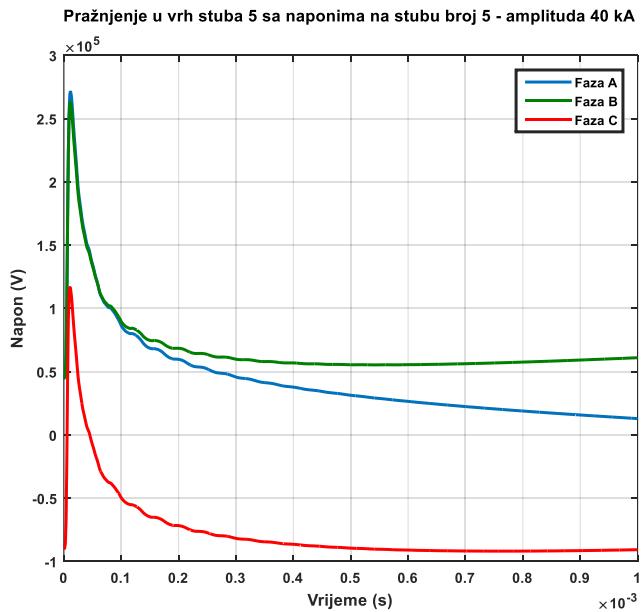


Slika 53. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1

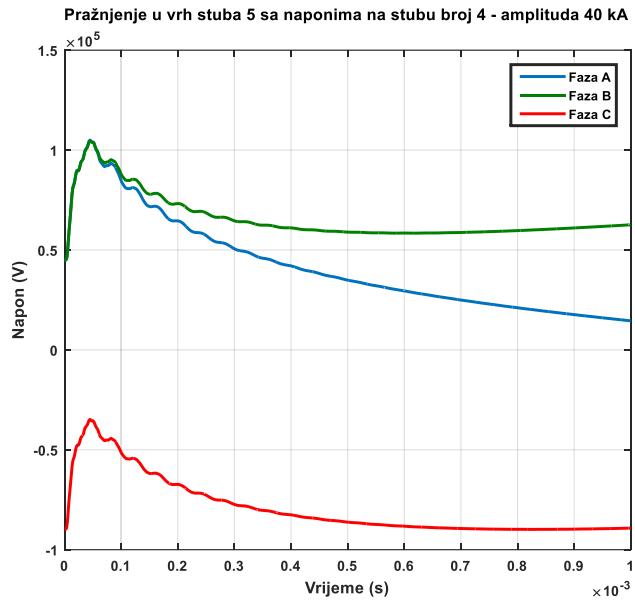
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



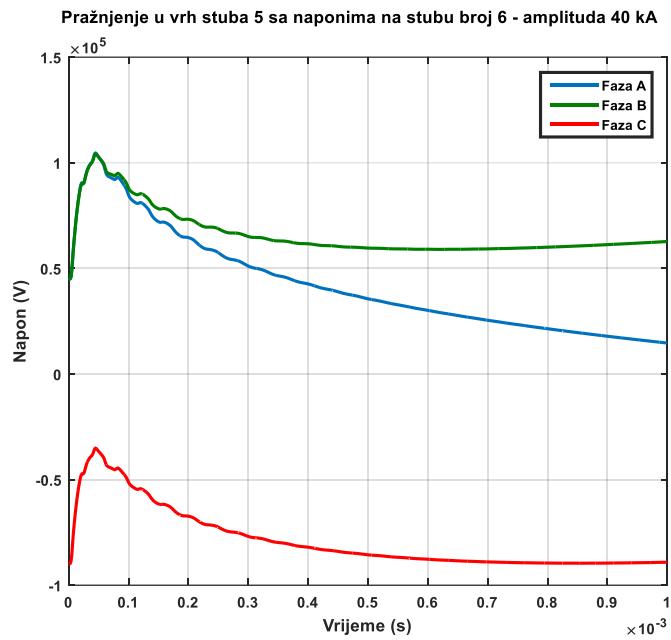
Slika 54. Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 1



Slika 55. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5

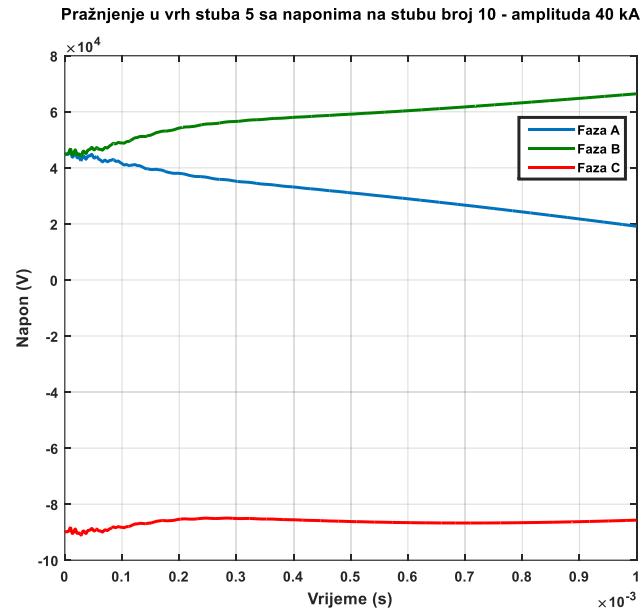


Slika 56. . Vremenska promjena napona na stubu br. 4 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5

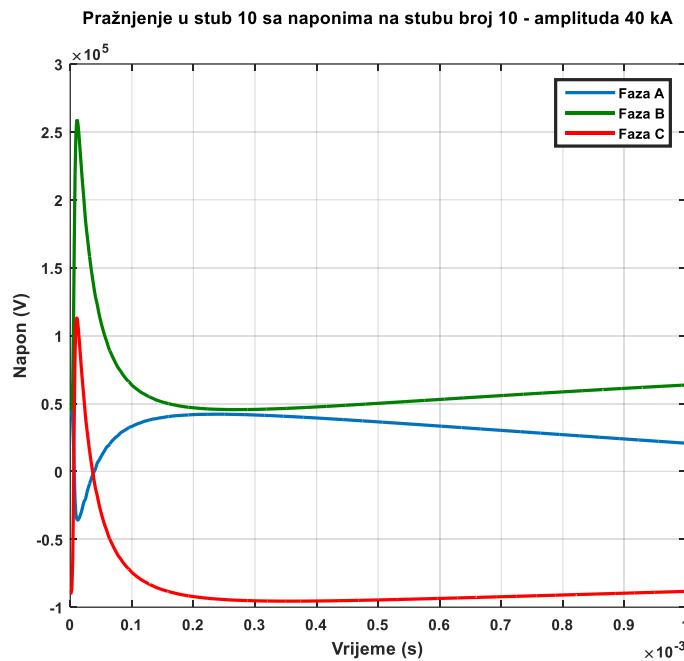


Slika 57. Vremenska promjena napona na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5

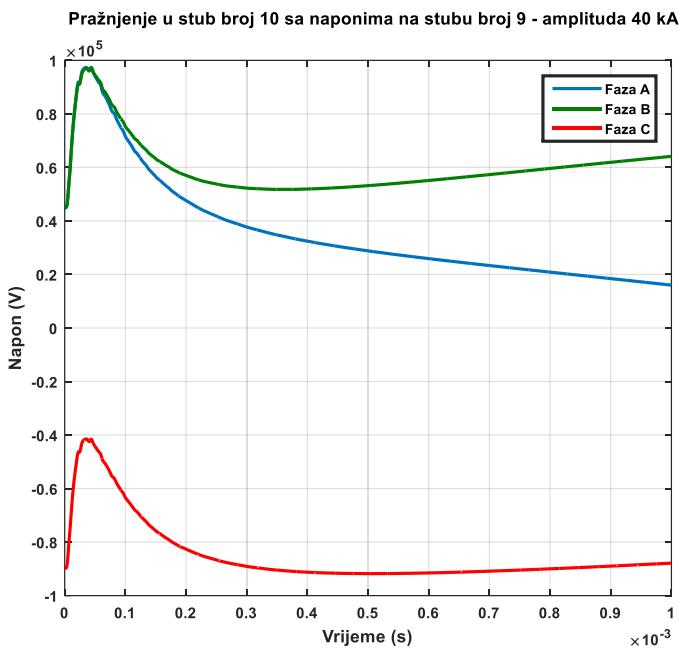
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



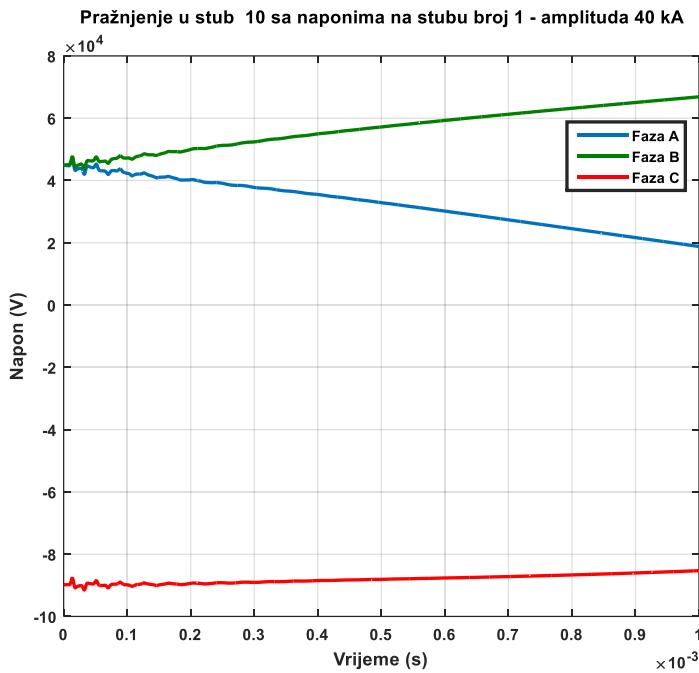
Slika 58 Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5



Slika 59. Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 10



Slika 60. Vremenska promjena napona na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 10



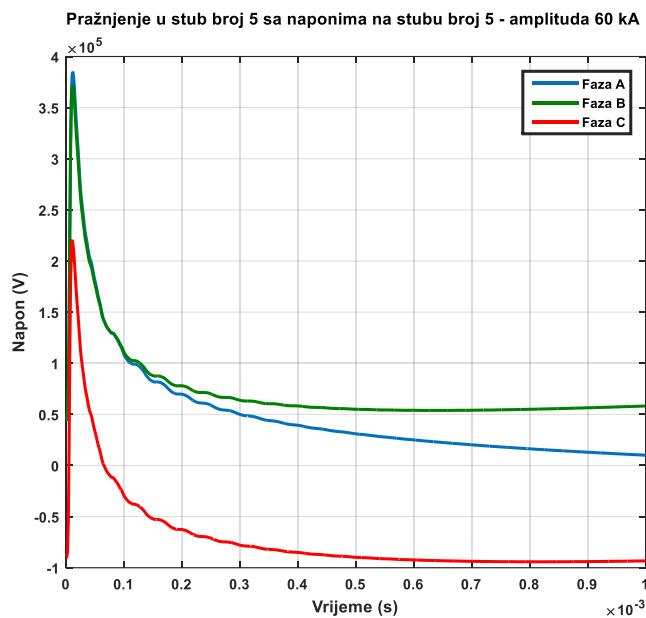
Slika 61. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 10

Kada se analiziraju rezultati simulacija korištenog modela zaključuje se da nema veće razlike u visinama nastalih prenapona i obliku napona pri pražnjenju u bilo koji raspon zaštitnog užeta ili stub. Sa grafika je jasno da je amplituda napona gotovo ista. Jedina razlika se uočava u

naponima na najnižoj fazi pri udaru u stub broj 10, gdje na višu vrijednost napona utiče blizina izvora.

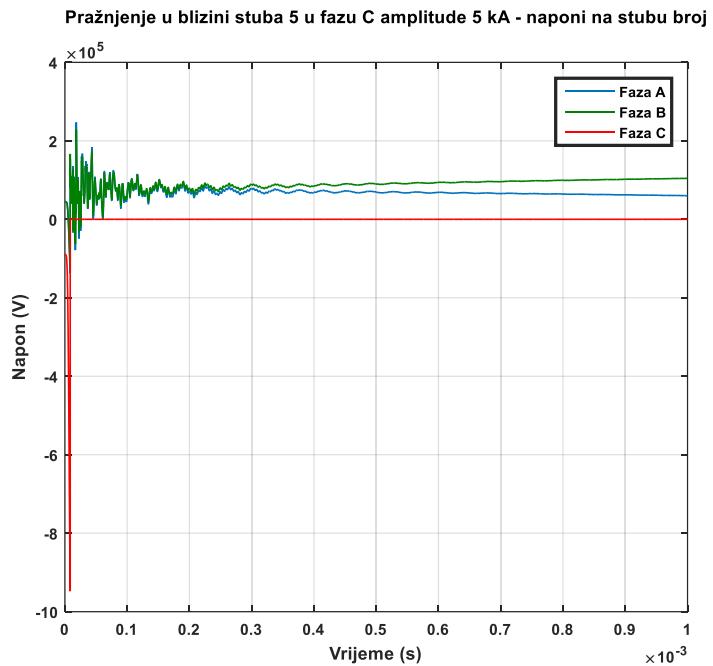
Pri modelovanju pražnjenja u zaštitno uže, dobijaju se gotovo identični rezultati, što je i za očekivati s obzirom da se radi o kratkim rasponima. Pokazalo se da pri udaru u vrh stuba ili zaštitno uže ne dolazi do pojave povratnog preskoka. Takav rezultat se i očekivao, jer je sa postizanjem takvih parametara dobijen veoma dobro uzemljen sistem sa efikasnim odvođenjem struje pražnjenja u zemlju.

Ukoliko bi pražnjenje imalo veću amplitudu, naponi koji naprežu izolaciju voda dobijaju veću vrijednost, pri čemu oblik ostaje isti. Na slici 62 je prikazan grafik napona koji se dobijaju kada je amplituda pražnjenja 60 kA. Pražnjenje je modelovano u stub broj 5.

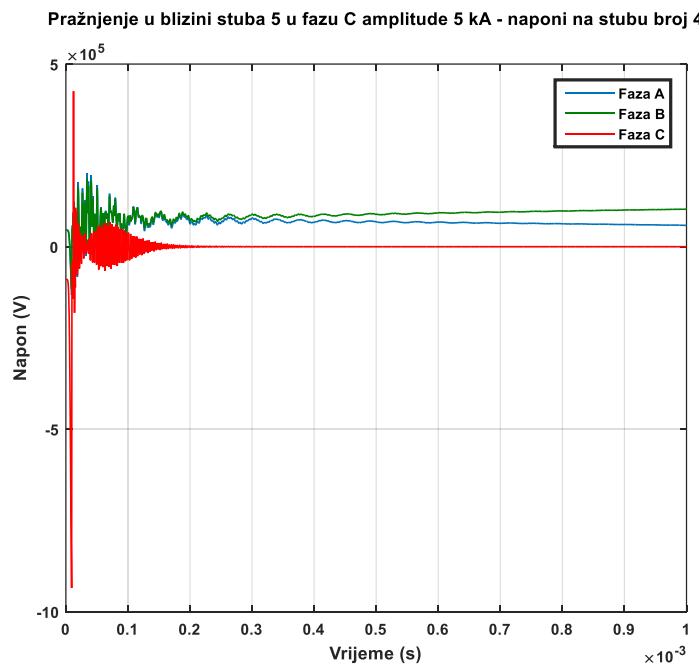


Slika 62. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 5

Sa grafika prikazanog na slici 62 se uočava da prenaponi dobijaju veću vrijednost ali i dalje nijesu dovoljno visoki da prouzrokuju proboj izolacije. Situacija je ista i u slučaju pražnjenja u vrhove preostalih stubova iz posmatrane dionice voda kao i u slučaju pražnjenja u zaštitno uže. U ovom modelu preskoci na izolaciji su mogući jedino u slučaju direktnog pražnjenja u fazni provodnik. Prema elektrogeometrijskom modelu pražnjenje veće amplitude koje bi završilo direktno u fazni provodnik je veoma malo moguće, pa je u simulacijama korištena vrijednost od maksimalnih 5 kA. Na slikama 63 do 67 su prikazani grafici sa visinama prenapona koje se dešavaju u takvom slučaju, pri čemu je razmatrano pražnjenje u vršnu fazu koje je najvjerojatnije.

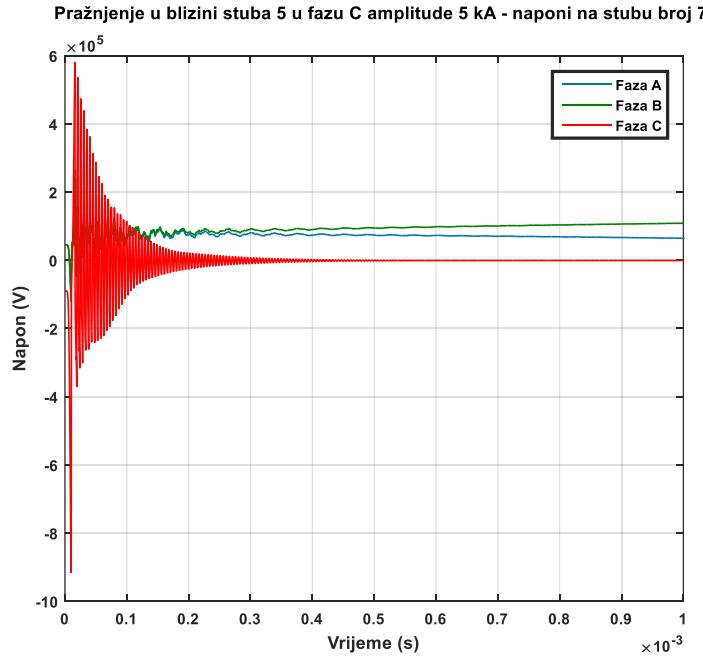


Slika 63. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 5

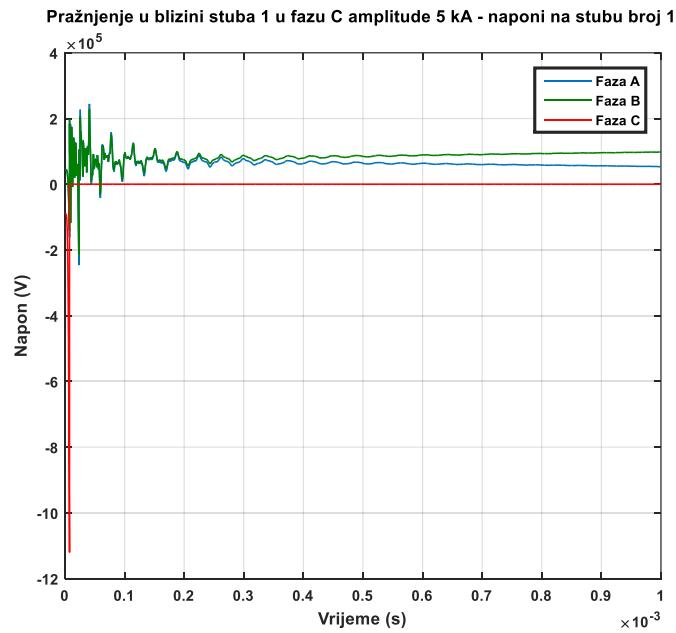


Slika 64. Vremenska promjena napona na stubu br. 4 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 5

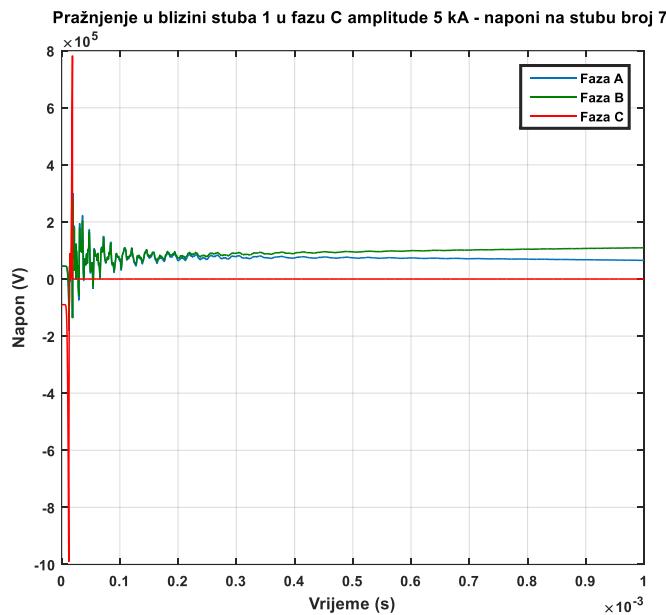
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



Slika 65. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 5



Slika 66. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 1



Slika 67. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 5 kA u fazni provodnik u blizini stuba broj 1

Sa prikazanih grafika se jasno uočava da dolazi do proboja izolacije u fazi u kojoj se desilo pražnjenje u fazni provodnik. Proboj se ne dešava samo na izolatoru u fazi pogodenoj pražnjenjem na stubu najbližem mjestu udara, već se uticaj nastalog prenapona osjeća i do 5 susjednih raspona, što se može vidjeti sa grafika. Za slučaj pražnjenja u najvisočiju fazu u blizini stuba broj 1, proboj se događa i na stubovima broj 3 i 5 kao i na stubu broj 7 u fazi pogodenoj pražnjenjem.

Obzirom da su slučajevi direktnog pražnjenja u fazno uže veoma rijetki, to se u ovom slučaju ne preporučuje ugradnja linijskih odvodnika prenapona. Njihov uticaj na nivo nastalih prenapona u slučaju direktnog pražnjenja u fazni provodnik je prikazan kasnije u radu.

Model korišten u simulaciji je u realnosti rijedak imajući u vidu da se nadzemni vodovi protežu kroz različite vrste terena, koje iziskuju i veće raspone a teško je, često i nemoguće postići vrijednost otpora rasprostiranja definisanu pravilnicima o izgradnji nadzemnih vodova. U narednom modelu je zadržana identična vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača a korišteni su veće dužine raspona. Na osnovu izvršenih simulacija da se zaključiti da prenaponi nastali pri udaru atmosferskog pražnjenja u vrh stuba ili zaštitno uže dobijaju veće vrijednosti, ali ipak nedovoljne za proboj izolacije. Za slučaj raspona od 300 m dobija se na stubu najbližem mjestu udara neznatno veći prenapon do 3 kV u odnosu na stanje sa rasponima dužine 240 m, dok je ta razlika za slučaj raspona od 450 m i do 15 kV. Prenaponi su identičnog oblika kao oni prikazani za raspone dužine 240 m. Pražnjenje u fazni provodnik u slučajevima dužih raspona je sa sličnim scenarijom u odnosu na situaciju sa osnovnim slučajem gdje su korišteni rasponi dužine 240 m.

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

Na osnovu izvršenih simulacija se može zaključiti da uticaj dužine raspona nije presudan za pojavu proboga izolacije pri pražnjenju bilo u vrh stuba, zaštitno uže ili fazni provodnik.

Mijenjajući vrijednost rasprostiranja uzemljivača i korištenjem većih vrijednosti dolazi do proboga na izolaciji prilikom pražnjenja u vrh stuba kao i pri pražnjenju u zaštitno uže. Time se i jasno zaključuje i potvrđuje da najveći uticaj na visinu prenapona dobijenu atmosferskim pražnjenjem ima otpor rasprostiranja uzemljivača. Na slikama dalje u radu prikazani su grafici napona pri pražnjenju u pretpostavljenu dionicu voda pri udaru atmosferskog pražnjenja amplitude 40 kA.

U tabeli broj 6. su date vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača koji su pretpostavljeni u modelu sa povišenim vrijednostima otpora rasprostiranja u odnosu na vrijednosti iz ranije korištenih modela.

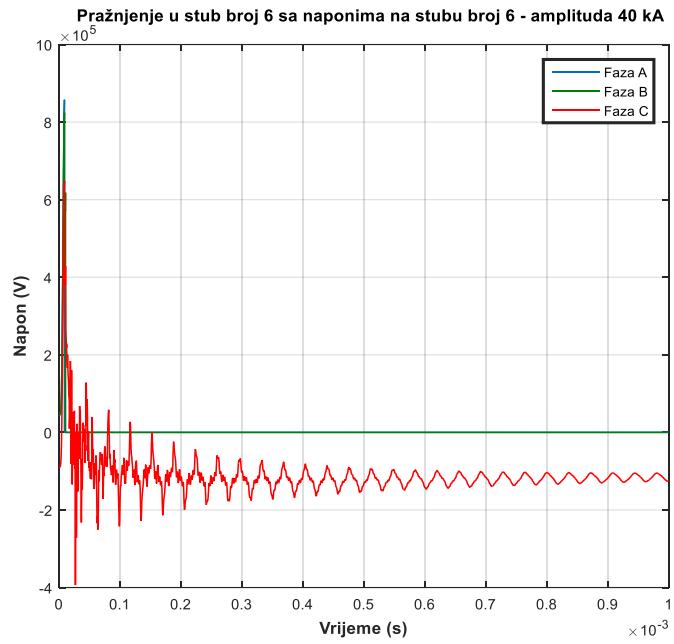
Tabela 6. vrijednosti rasprostiranja otpora uzemljivača pretpostavljenih u modelu sa povišenim vrijednostima

Vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača									
Stub 1	Stub 2	Stub 3	Stub 4	Stub 5	Stub 6	Stub 7	Stub 8	Stub 9	Stub 10
10	30	30	40	45	60	35	45	45	35

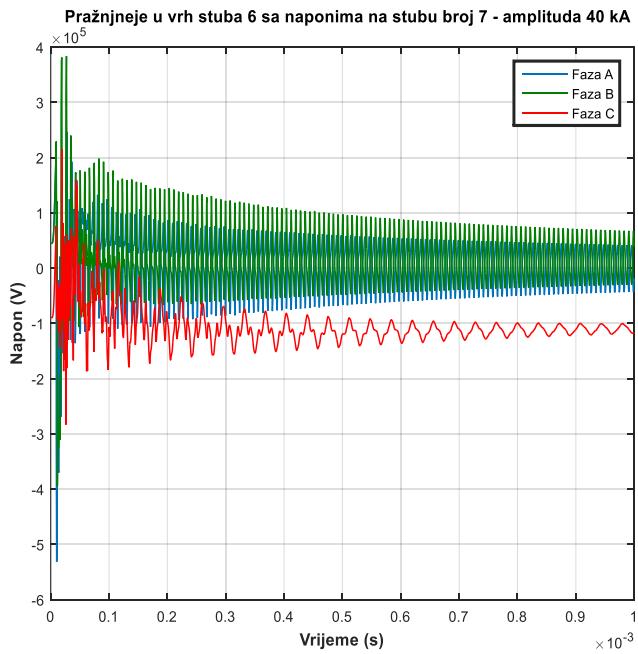
Korištenjem modela sa vrijednostima rasprostiranja uzemljivača prikazanim u tabeli 6. i simuliranjem atmosferskog pražnjenja u vrh stuba i zaštitno uže dolazi do pojave proboga izolacije u zavisnosti od mesta pražnjenja. Primjenjene dužine raspona u modelu su 240 m. Iste dužine su zadržane kako bi rezultati sa različitim vrijednostima otpora rasprostiranja uzemljivača bili uporedivi. Pri izvršenju simulacija došlo se do zaključka da je najveći porast napona u odnosu na ustaljeno stanje, pri pražnjenju u vrh stuba ili zaštitno uže na najnižoj fazi – faza A, zatim na fazi B i najniži porast je uočen za fazu C. Evidentirane razlike u porastu nijesu velike i iznose do 50 kV u odnosu na fazu A i C. U zavisnosti od amplitude faznog napona u trenutku pražnjenja zavisi i gdje će doći do proboga, tj. da li je fazni napon u poziciji ili opoziciji sa prenaponskim talasom. U slučajevima gdje je fazni napon u opoziciji sa prenaponskim talasom dobijaju se niže vrijednosti prenapona što u konačnom rezultira često da izolacija izdrži prenapon i sprječava nastanak proboga i isklapanje voda sa mreže.

Kako je najveći prirast napona uočen na najnižoj fazi, to je u simulacijama postavljen fazni stav faze A koji će doprinjeti najbržem proboru na navedenoj fazi, što predstavlja najkritičniji slučaj. Kroz praksu se potvrdilo da je pojava povratnog preskoka najizraženija na najnižoj fazi.

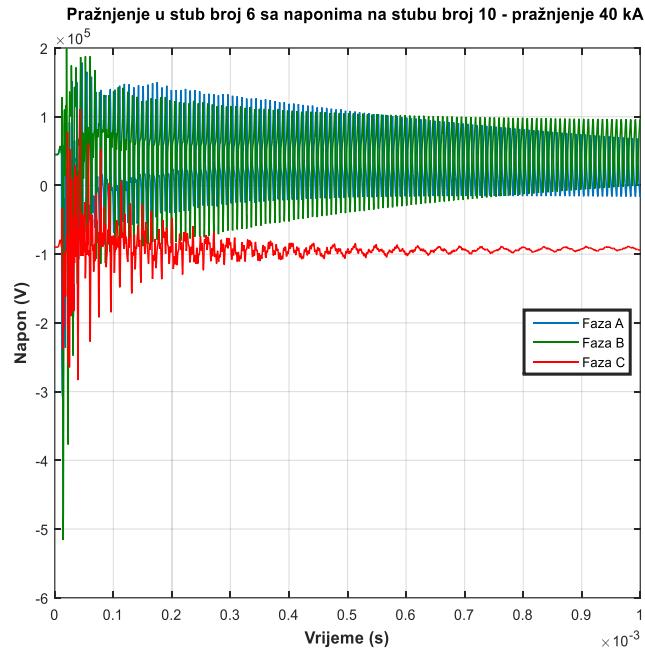
Na slikama 68 do 73 prikazani su grafici sa prenaponima nastalim pri pražnjenju u vrh stuba broj 6, pri čemu dolazi do proboga izolacije na više stubova. Na graficima su prikazani naponi samo u onim slučajevima gdje je vršenjem simulacija došlo do proboga.



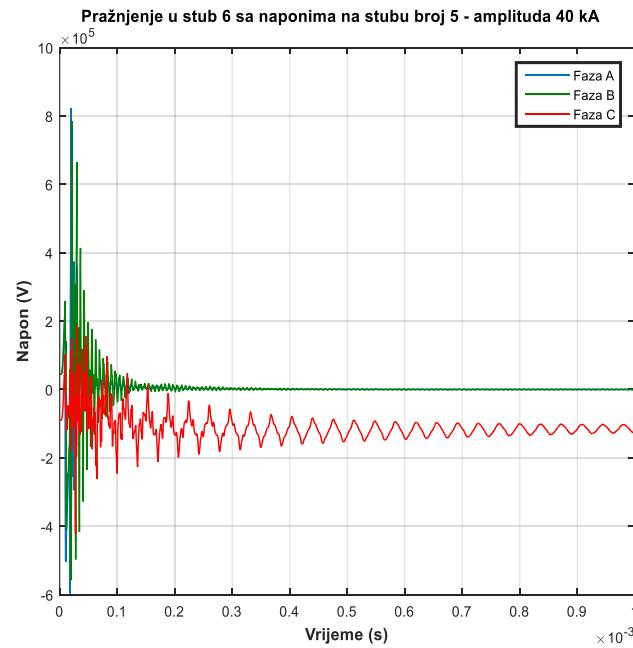
Slika 68. Vremenska promjena napona na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6



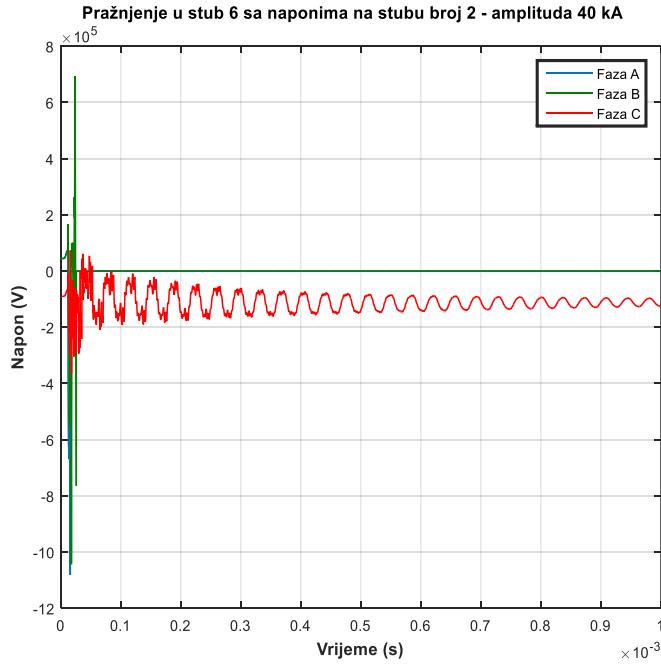
Slika 69. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6



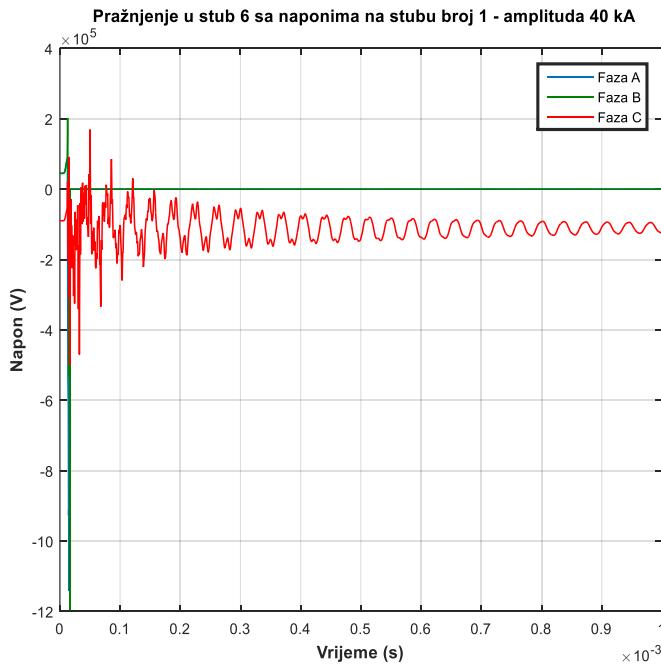
Slika 70. Vremenska promjena napona na stubu br. 10 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6



Slika 71. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6



Slika 72. Vremenska promjena napona na stubu br. 2 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6

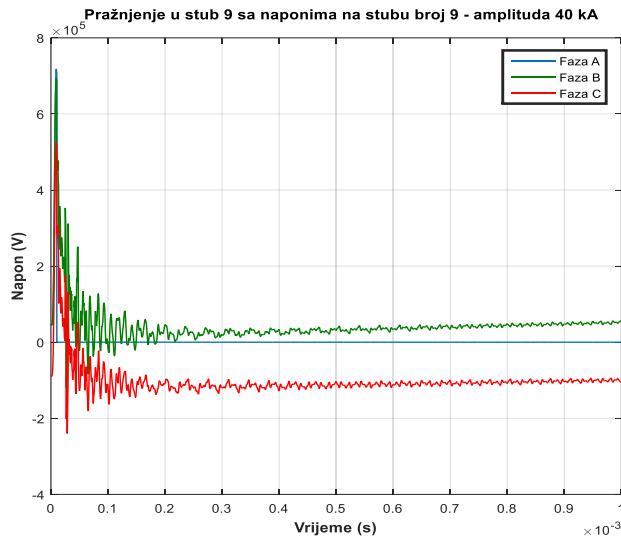


Slika 73. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6

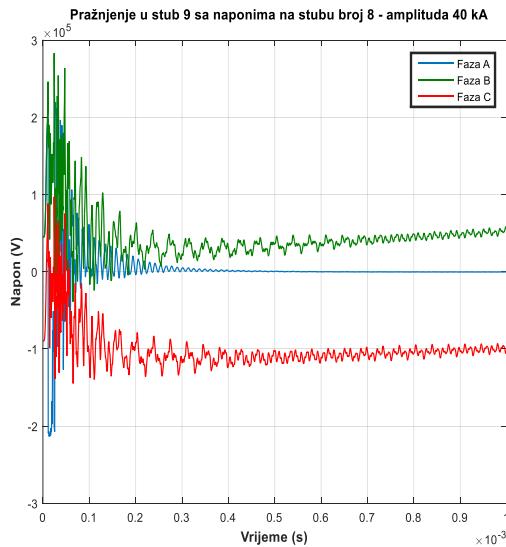
Na graficima 68 do 73 se jasno uočava da pri udaru atmosferskog pražnjenja amplitude 40 kA u stub sa najvećom vrijednošću otpora rasprostiranja dolazi do proboja izolacije ne samo na stubu 6 (proboj u fazama A i B) već i do proboja izolacije u fazama na drugim stubovima. Ono

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

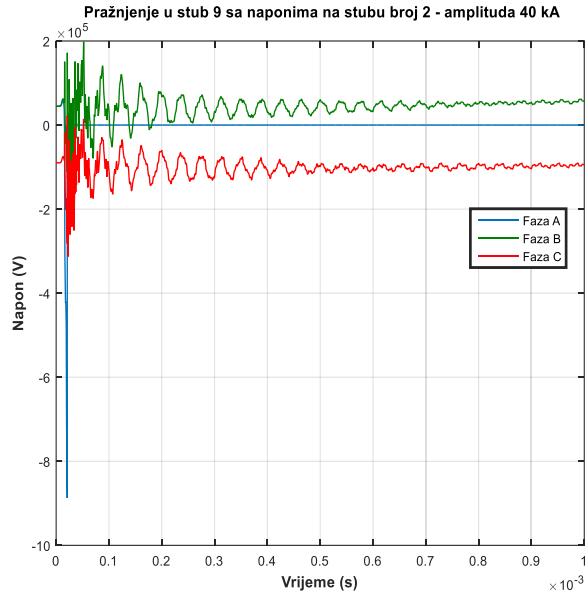
što je interesantno jest da do probaja u fazama A i B dolazi i na stubnim mjestima 1 i 2 koji su najbliži energetskom transformatoru. Ta se pojava objašnjava modelom transformatora i superoniranjem napona uslijed refleksije prenaponskog talasa nastalog zbog promjene vrijednosti karakteristične impedanse. Dodatno rasponi su kratki pa sve to utiče na povećanje napona na stubovima najbližim energetskom transformatoru. Ova pojava je zabilježena i u slučajevima pražnjenja u druge stubove. Na graficima datim na slikama od 74 do 76 su prikazani naponi pri udaru atmosferskog pražnjenja u vrh stub 9, gdje takođe dolazi do probaja.



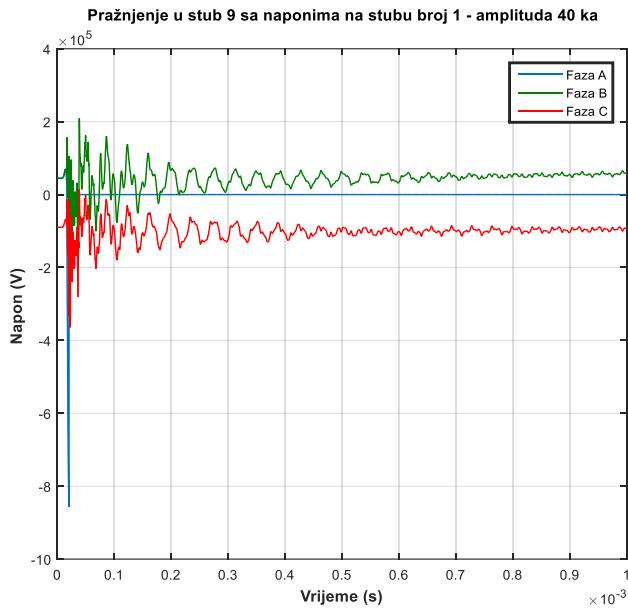
Slika 74. Vremenska promjena napona na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9



Slika 75. Vremenska promjena napona na stubu br. 8 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9



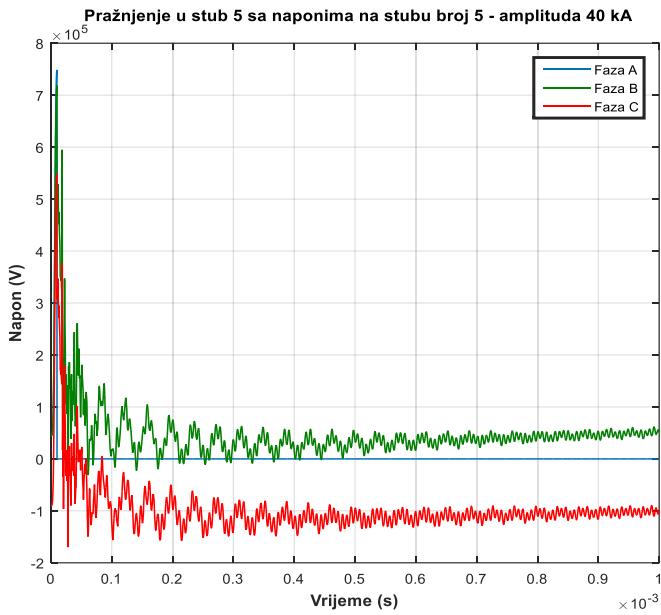
Slika 76. Vremenska promjena napona na stubu br. 2 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9



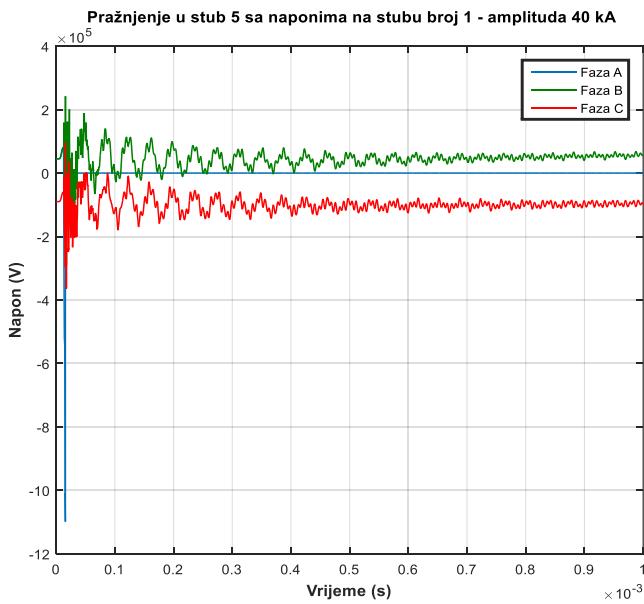
Slika 77. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9

Pri udaru atmosferskog pražnjenja u stub broj 9 sa vrijednošću otpora rasprostiranja uzemljivača od 45Ω do probaja dolazi u fazi A (najniža faza) na stubu 9 kao i do probaja na stubovima 1 i 2 u istoj fazi uslijed pojave koja je objašnjena za slučaj pražnjenja u stub 6. Do probaja takođe dolazi i pri udaru pražnjenja u vrh stuba 8 i to u fazi A kao i pri pojavi udara u vrhove stubova 5 i to u fazi A na stubovima 5 i 1 kao i pri pražnjenju u vrh stuba 4 u fazi A na istom stubu i u fazi A na stubu broj 1. Na graficima prikazanim na slikama 78, 79 , 80 i 81 su prikazane karakteristične naponske prilike pri udaru u stubove 5 i 4.

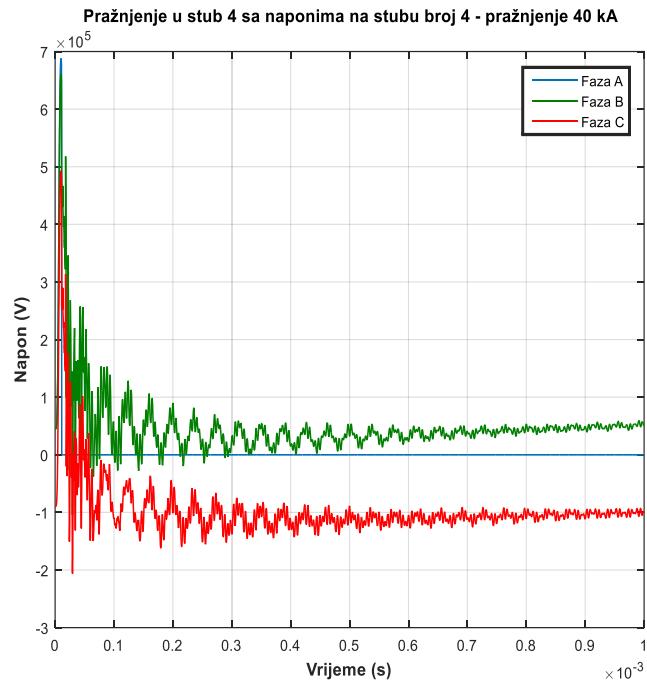
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



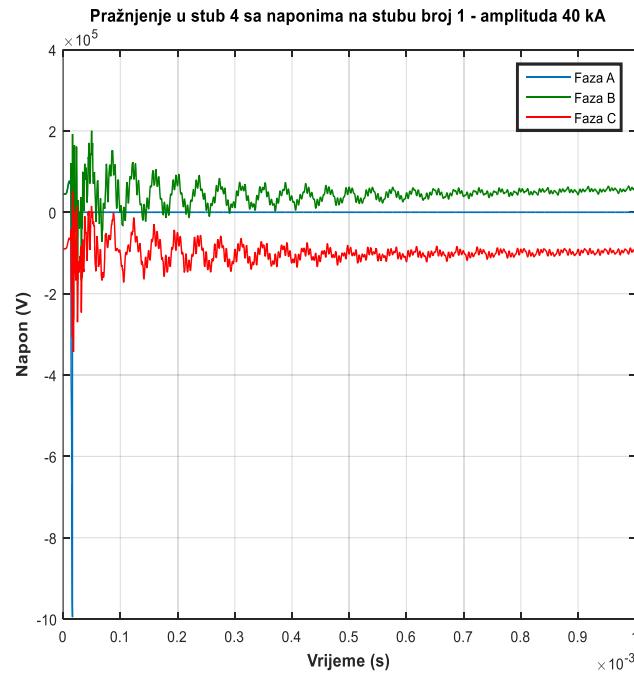
Slika 78. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5



Slika 79. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5



Slika 80. Vremenska promjena napona na stubu br. 4 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 4



Slika 81. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 4

Modelovanjem udara u vrhove ostalih stubova (najkritičniji slučaj) nije došlo do pojave probaja izolacije. Situacija sa pražnjenjem u zaštitnu užad je slična kao pri pražnjenju u vrh stuba.

Kako je evidentan velik otpor rasprostiranja koji dovodi do probaja izolacije pri atmosferskim pražnjenjima primjenjuje se ugradnja linijskih odvodnika prenapona u cilju sprječavanja preskoka izolacije.

Problematika ugradnje linijskih odvodnika prenapona je izražena u pogledu optimalne pozicije ugradnje kao i neophodnog broja odvodnika prenapona. Izložena problematika se može riješiti definisanjem granica vrijednosti rasprostiranja otpora uzemljivača za koje će se ugrađivati jedan, dva ili tri odvodnika prenapona, što predstavlja najčešće korišten pristup, ili primjenom odvodnika prenapona na stubovima i fazama koje su u ranijim simulacijama prepoznati kao kritična mjesta nakon čega se vrše dodatne simulacije i analizira se stanje. U radu je odabran drugi pristup jer se želi postići maksimalna zaštita nadzemnog voda.

Do lokacije za optimalnu ugradnju se dolazi na osnovu simulacija koje su izvršene na dionici koja nije štićena odvodnicima. Generalni zaključak koji se mogao izvesti jeste da je do probaja dolazi na onim stubovima koji imaju veoma visoku vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača. Do pojave probaja dolazi i na onim stubnim mjestima sa nižom vrijednošću otpora rasprostiranja ali se ona dešava pri udaru u neki od stubnih mesta sa velikom vrijednošću otpora uzemljivača.

Kod parametarske analize odvodnika prenapona neophodno je odrediti vrijednosti proradnog napona, preostali napon kao i energetsku sposobnost samog odvodnika gdje se sa pravilnim odabirom ovog parametra sprječava njegovo uništenje pri odvođenju većih struja.

Da bi se linijski odvodnik pravilno odabrao potrebno je prije svega poznavati karakteristike voda na kojem se odvodnici žele ugraditi, te će se na osnovu toga dobiti neophodni parametri. Mjesto na kojem se žele ugraditi odvodnici prenapona, tj karakteristike voda umnogome diktiraju energetsku sposobnost odvođenja. Ono o čemu se mora voditi računa jeste da se zadovolje parametri u pogledu AC napona obzirom da odvodnik često može biti izložen nekom od sklopnih prenapona, kad odvodnik može doći u stanje provođenja i zagrijavanja, čime se skraćuje radni vijek odvodnika prenapona. Parametar koji je takođe potrebno imati u vidu jeste preostali napon odvodnika prenapona i odabir margine sigurnosti u odnosu na podnosivi napon izolacije. Standardi koji se tiču odvodnika prenapona daju preporuke u tom pogledu da preostali napon odvodnika prenapona ne bude veći od 80 – 85 % u odnosu na podnosivi napon izolacije [10].

Princip za odabir parametara odvodnika u radu je da se odabere iz kataloga proizvođača, imajući u vidu prethodno navedeno. Odvodnik prenapona koji ima preostali napon niži od napona koji izolacija može izdržati i koji ima odgovarajuću energetsku sposobnost apsorpcije energije. Dalje se kroz simulacije potvrđuje da li su odabrani parametri zadovoljavajući ili je nešto potrebno izmijeniti, tj. da li je odabrana energetska sposobnost odvodnika zadovoljavajuća, da li se može odabrati manja ili je pak neophodno ići sa jačom klasom.

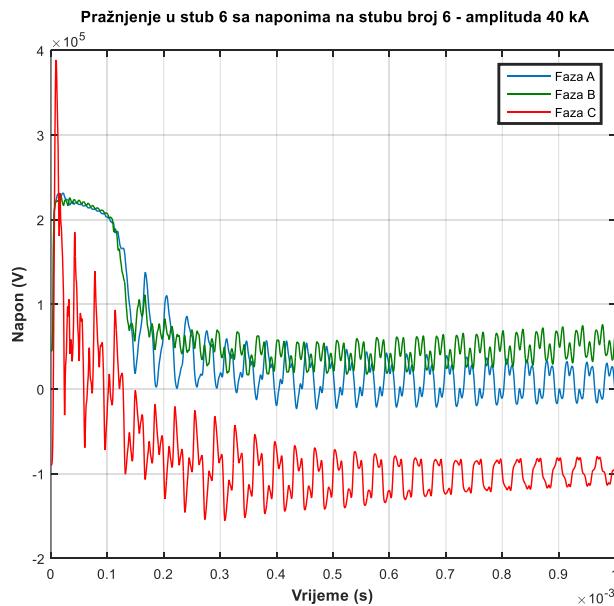
Za ovaj slučaj je na osnovu kataloga jednog proizvođača odabran odvodnik prenapona bez iskrišta sa preostalim naponom 254 kV, što je znatno niže u odnosu na preporučene margine, proradnim naponom 108 kV, nominalnom strujom pražnjenja 10 kA i energetskom sposobnošću od 8 kJ/kV nazančenog (proradnog) napona. Obzirom da se odvodnici ugrađuju

na dalekovodu koji je opremljen zaštitnim užetom odabrana energetska sposobnost bi trebala biti dovoljna. Odabrane karakteristike se kroz odradene simulacije pokazuju kao zadovoljavajuće ili ne. Na osnovu izvršenog niza simulacija potpuna zaštita odabrane dionice se može postići sa ugradnjom 8 odvodnika prenapona. Odvodnici se ugrađuju na onim stubnim mjestima i u fazama gdje je evidentiran probaj izolacije. Dva odvodnika su naknadno dodata kako bi se spriječila pojava probaja izolacije na stubu najbližem energetskom transformatoru (stub 3 faza A, stub 4 faza B). U tabeli 7 je dat prikaz faza po stubnim mjestima gdje je izvršena ugradnja odvodnika prenapona.

Tabela 7. raspored ugrađenih odvodnika prenapona po stubnim mjestima i fazama

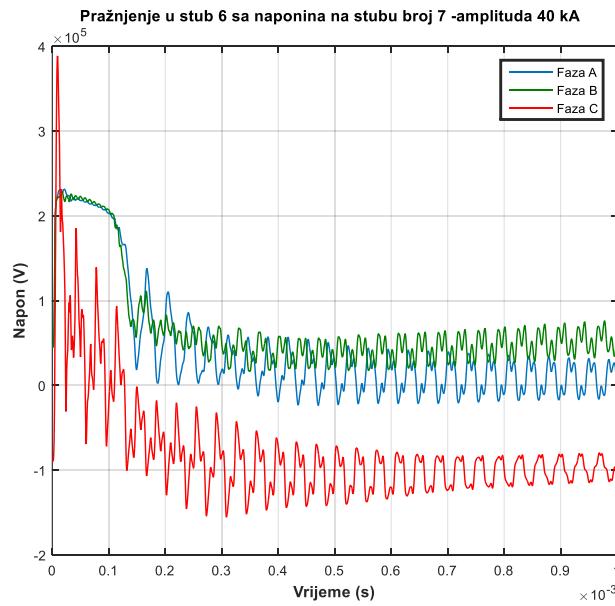
Stub 1	Stub 2	Stub 3	Stub 4	Stub 5	Stub 6	Stub 7	Stub 8	Stub 9	Stub 10
/	/	Faza A	Faza A Faza B	Faza A	Faza A Faza B	/	Faza A	Faza A	/

Kakav uticaj ima ugradnja odvodnika prenapona na sprječavanje probaja izolacije prikazuju grafici dati na slikama 82-87, a koji su prikazani za slučaj identičnih pražnjenja kao i u simulacijama kada predmetna dionica nije štićena odvodnicima.

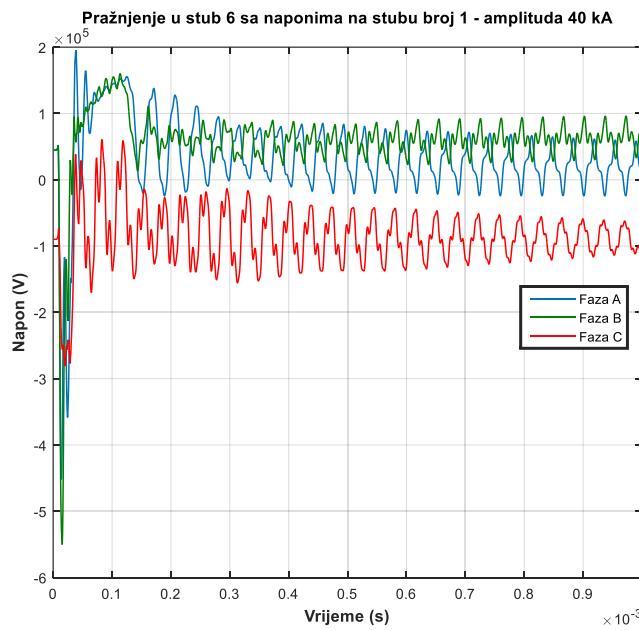


Slika 82. Vremenska promjena napona na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6

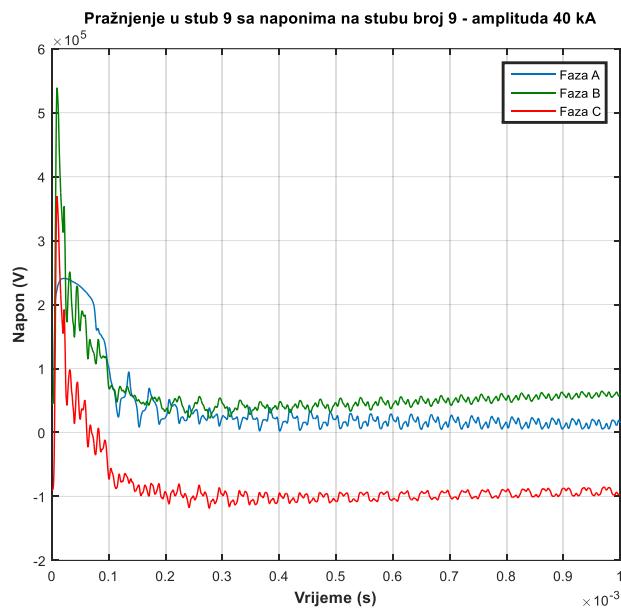
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



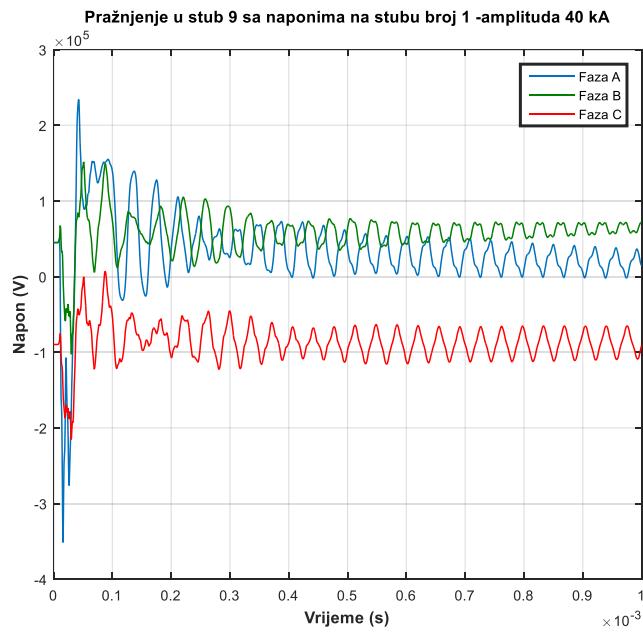
Slika 83. Vremenska promjena napona na stubu br. 7 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6



Slika 84. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6

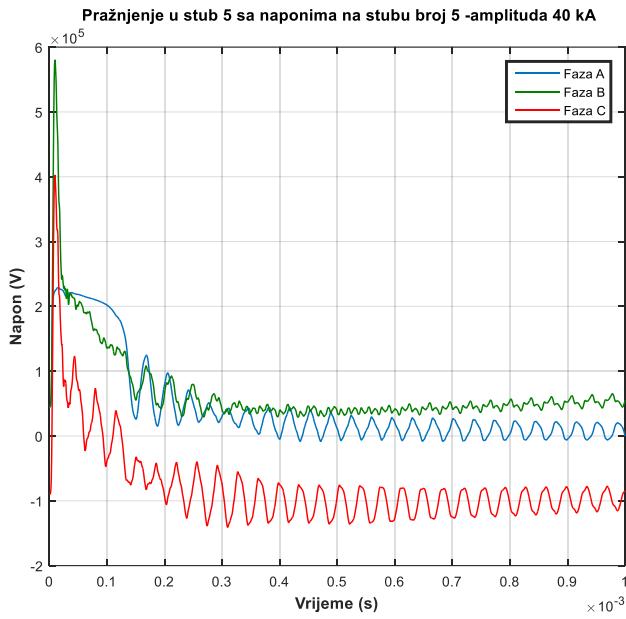


Slika 85. Vremenska promjena napona na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9

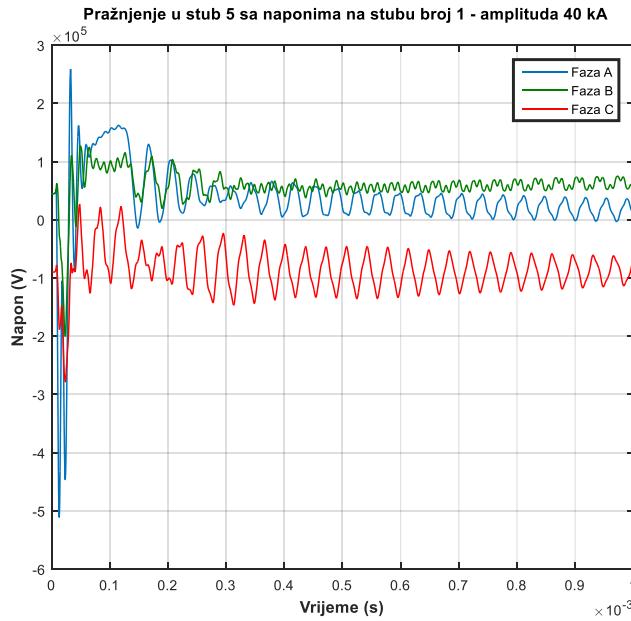


Slika 86. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



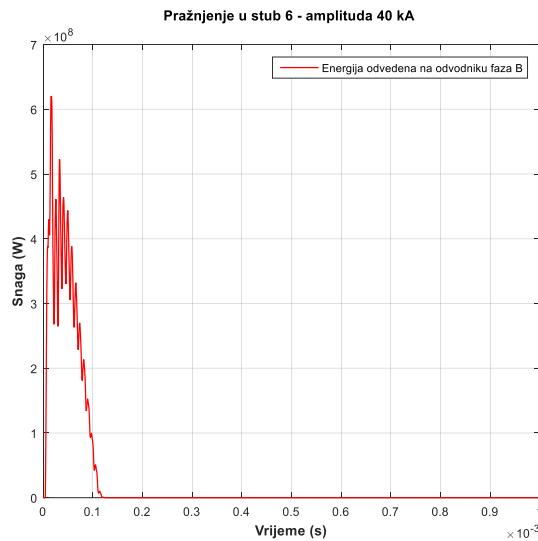
Slika 87. Vremenska promjena napona na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5



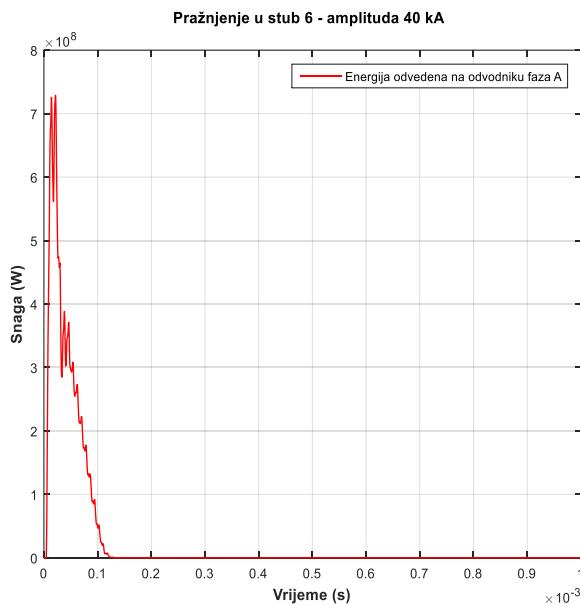
Slika 88. Vremenska promjena napona na stubu br. 1 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5

Grafici pri pražnjenju u stub broj 4 su gotovo identičnog oblika kao grafici napona pri pražnjenju u stub broj 5. Generalni zaključak je da su odvodnici prenapona sprječili pojavu probroja izolacije. Ono što je u ovom slučaju neophodno ispitati jeste da li je pri proticanju struje pražnjenja kroz odvodnik prenapona došlo do njegovog razaranja koje nastaje u slučaju kada

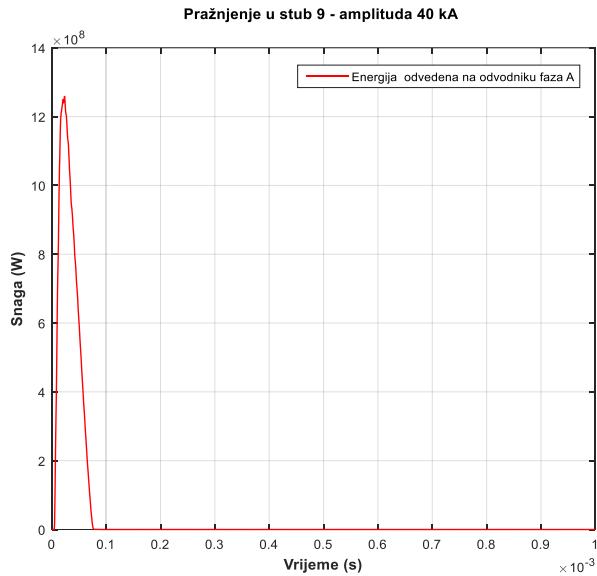
toplota koja se odvodi sa odvodnika pri njegovoj proradi manja od one koja se generiše u njemu. Grafici sa snagom koja se generiše na odvodnicima su prikazani na slikama 88- 91 i to za pražnjenja u vrh stuba 9, 6 i 5.



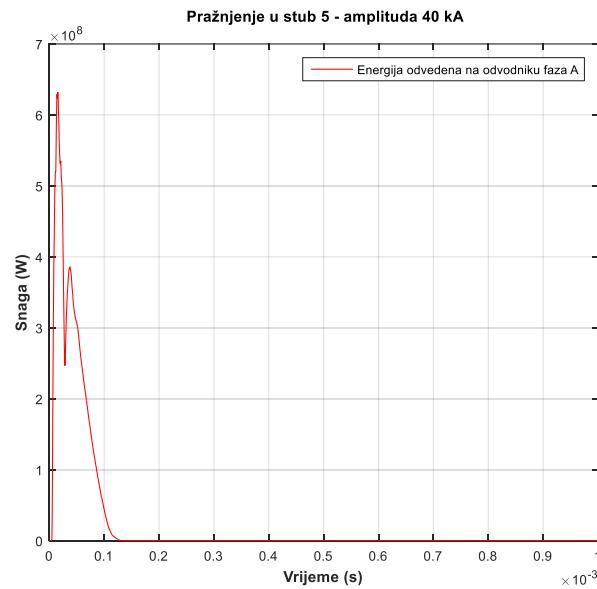
Slika 89. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6



Slika 90. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 6 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 6



Slika 91. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 9 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 9



Slika 92. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 5 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 5

Najveća energija pražnjenja je zabilježena na stubu broj 9 na odvodniku ugrađenom u fazi A. Grubom procjenom, posmatrajući snagu pražnjenja i vrijeme trajanja odvođenja može

se izračunati da je energija pražnjenja na instaliranom odvodniku manja od 130 kJ (računica uzeta na način da je talas pravougaonog oblika amplitude 1300 MW i sa trajanjem od 0,1 ms) što je znatno niže od maksimalne energije odvodnika koja iznosi 864 kJ. Energija odvedena na odvodniku instaliranom na stubu 9 je uzeta u razmatranje kao najveća energija koja je dobijena prilikom simulacije. Ovo je bilo i za očekivati ako se uzme u obzir da je na tom stubnom mjestu instaliran samo jedan odvodnik prenapona. Ono što je potrebno naglasiti da su i odvodnici instalirani na drugim stubnim mjestima takođe odregovali i samim tim rasteretili odvodnik na stubu pogodjenim pražnjenjem. To je jedan od najvažnijih razloga odabira odvodnika bez iskršta jer se opterećenje dijeli između instaliranih odvodnika. Na stubu 6 su odvodnici instalirani u fazama A i B pa su samim tim i gotovo podijelili pražnjenje, s tim da je veća energija pražnjenja zabilježena na odvodniku instaliranom na najnižoj fazi.

U posmatranom slučaju bi se mogao odabrati odvodnik sa nižom energetskom sposobnošću odvođenja što je i bilo za očekivati obzirom da je u ovom slučaju korišten model dalekovoda sa ugrađenim zaštitnim užetom, pa se dobar dio energije pražnjenja odvodi njime.

Veća energetska sposobnost odvodnika je neophodna u slučajevima nadzemnog voda na kom nije postavljeno zaštitno uže, pa do pražnjenja dolazi u fazne provodnike. U tom slučaju se najveći dio energije pražnjenja odvodi putem odvodnika prenapona, koji u tom slučaju preuzimaju na sebe i ulogu zaštitnog užeta. Instaliranje odvodnika na nadzemnim vodovima bez ugrađenog zaštitnog užeta ili na kompaktnim vodovima (vodovi sa znatno smanjenim električnim razmacima) je veoma često, gotovo i obavezujuće.

Slučaj pražnjenja u fazni provodnik koji je takođe obrađen bi se mogao posmatrati kao slučaj pražnjenja u nadzemni vod bez zaštitnog užeta ali sa jednom bitnom razlikom. Razlika se ogleda u tome što do pražnjenja u fazni provodnik u nadzemni vod sa postavljenim zaštitnim užetom dolazi u slučajevima neefikasno postavljenog zaštitnog užeta i to je moguće samo pri nižim amplitudama pražnjenja što je opisano u radu (elektrogeometrijski model), pa samim tim su i odvodnici mnogo manje opterećeni. Za slučaj nadzemnog voda koji nije štićen zaštitnim užetom mnogo su veće struje pražnjenja.

Kakav je uticaj odvodnika prenapona na naponske prilike na vodu pri direktnom pražnjenju u fazni provodnik je razmatrano i u ovom slučaju. Pri pražnjenju u fazu C, najvisočiju fazu, koje je i najrealnije ne bi bilo razlika obzirom da u fazi C nije postavljen nijedan odvodnik prenapona. Kako je najveći broj odvodnika prenapona instaliran u fazi A to se posmatrao njihov uticaj na prilike na vodu pri pojavi direktnog pražnjenja. U simulacijama je za vrijednost amplitude pražnjenja uzeta vrijednost od 5 kA i posmatrane su naponske prilike na vodu bez i sa ugrađenim odvodnicima, na pozicijama datim u tabeli 7. Na vodu koji nije štićen odvodnicima prenapona do probaja izolacije u fazi A dolazi na stubnim mjestima 1,2,5,6 i 7 u slučaju da se pražnjenje javi u rasponu između stubova 5 i 6. Sa instaliranim odvodnicima prenapona na pozicijama iz tabele 7 probaj je eliminisan u potpunosti. Mijenjanjem tačke pražnjenja zaključuje se da se dešava probaj izolacije u pogodenoj fazi na stubovim najbližim mjestu pražnjenja ako na njima nema instaliranih odvodnika prenapona. Kako je amplituda pražnjenja mala, jasno je i zašto je spriječena pojava probaja sa instaliranjem odvodnika prenapona. Usljed niske amplitude pražnjenja ne može doći ni do razaranja odvodnika prenapona, obzirom da se instaliraju odvodnici naznačene struje odvođenja 10 kA najmanje za sve vodove 110 kV i višeg napona. Za slučaj nepostojanja zaštitnog užeta ovi rezultati bi bili znatno drugačiji, a broj instaliranih odvodnika prenapona bi bio znatno veći.

7. Primjeri primjene u EES Crne Gore

Elektroprenosna mreža Crne Gore se sastoji od transformatorskih stanica naponskog nivoa 110 kV i višeg, međusobno povezanim nadzemnim vodovima naponskih nivoa 110 kV, 220 kV i 400 kV. U cilju štićenja opreme, instalirane u dalekovodnim poljima ugrađeni su odvodnici prenapona u okviru transformatorskih stanica, čime se pored već ugrađenih odvodnika u trafo poljima postiže efikasnija prenaponska zaštita. Instalacija odvodnika prenapona ima za cilj zaštitu elemenata od prenapona nastalih udarom atmosferskih pražnjenja u vod, koji se prenose do transformatorskih stanica.

Trenutno u elektroprenosnoj mreži Crne Gore, a što je takođe slučaj i sa distributivnom mrežom, ni na jednom vodu nijesu ugrađeni linijski odvodnici prenapona. Analizom broja ispada može se zaključiti da bi se određeni vodovi ili djelovi trasa određenih vodova trebali zaštititi ugradnjom linijskih odvodnika prenapona. Na taj način bi se povećala pouzdanost rada mreže, tj. rezultat ugradnje za cilj ima smanjenje broja ispada nadzemnih vodova. Posebno je potrebno razmotriti ona mesta sistema gdje bi ispad napojnog voda, doveo do prestanka napajanja određenog konzuma (radijalno napajani potrošači).

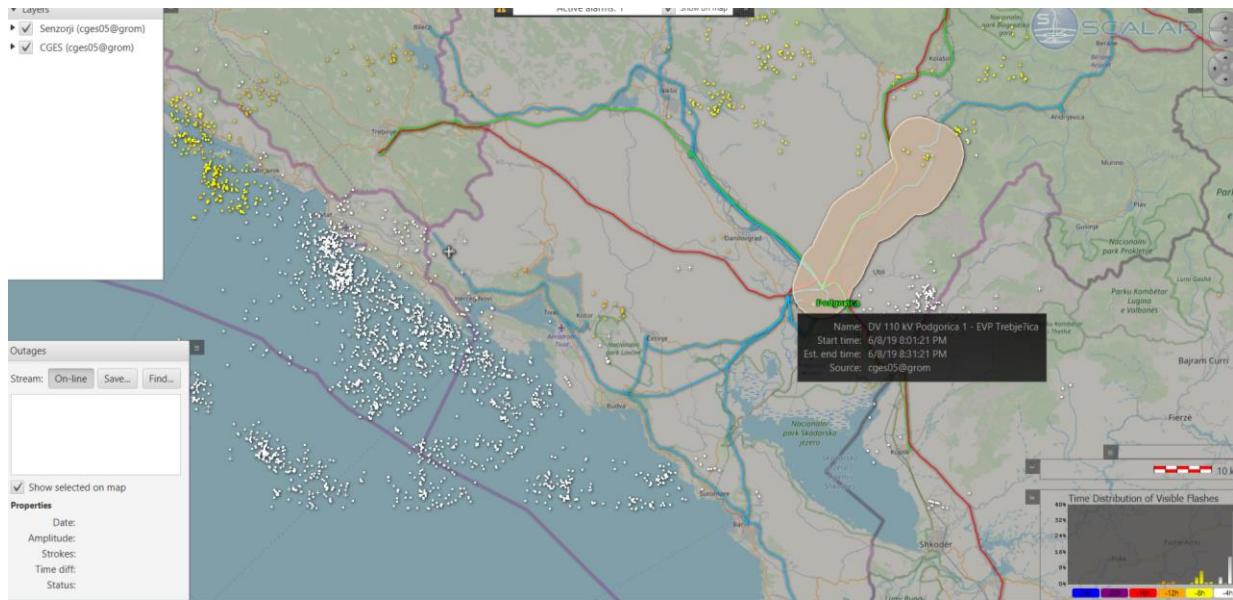
U ovom poglavlju su odradene simulacije, čime je prikazan pozitivan uticaj postavljanja linijskih odvodnika prenapona, što bi moglo činiti osnovu za ugradnju na odabranim vodovima u prenosnoj mreži.

7.1 Dalekovodna mreža i učestalost ispada dalekovoda

Ukupna dužina prenosnih vodova (vodova naponskih nivoa 110 kV, 220 kV i 400 kV) u Crnoj Gori iznosi 1239,58 km [20]. Od navedene dužine 580 km su vodovi naponskog nivoa 110 kV, 310 km vodovi 220 kV i oko 280 km vodovi 400 kV nivoa. Mnogi vodovi se protežu trasama u kojima je tlo veoma lošeg geološkog sastava, što za posljedicu ima nezadovoljavajuću otpornost rasprostiranja uzemljivača na određenim stubnim mjestima, a samim tim i veću mogućnost proboga izolacije, uslijed udara atmosferskog pražnjenja u nadzemni vod. Svi vodovi su štićeni postavljanjem zaštitnog užeta.

Na slici 5 je prikazana izokeraunička mapa Crne Gore, sa koje se jasno vidi da broj dana sa grmljavinskom aktivnošću na čitavoj teritoriji dosta visok, a naročito u primorskom dijelu Crne Gore.

Korištenjem sistema za detekciju atmosferskog pražnjenja, SCALAR na slici 93 je prikazan jedan dan sa grmljavinskom aktivnošću na teritoriji koja je pokrivena ovim sistemom, kada je za 24 časa zabilježeno 4833 pražnjenja, a zabilježeni su dani sa brojem pražnjenja većim od 35000. Veliki broj pražnjenja se dogodio i u primorskom dijelu Crne Gore, gdje je grmljavinska aktivnost najizraženija.



Slika 93. Prikaz grmljavinske aktivnosti, dobijen pomoću sistema za praćenje atmosferskih pražnjenja SCALAR

Analizom pogonskih događaja za period od 2008.-2012., kao i za period od 2016.-2017. dobijen je broj ispada vodova, kao i ukupno trajanje ispada vodova sa mreže, koji su posljedica atmosferskih pražnjenja u najvećoj mjeri. Podaci su prikazani u tabeli 8 [6] za period od 2008.-2012. i tabeli 9 za period 2016.-2017. [21]

Tabela 8. broj ispada i vrijeme trajanja ispada dalekovoda za period od 2008. do 2012.

Br. – broj ispada	2008		2009		2010		2011		2012		projek	
	Br.	Σ min	Br.	Σ Min	Br.	$\Sigma$ min	Br.	$\Sigma$ min	Br.	$\Sigma$ min	Br.	$\Sigma$ Min
Dalekovodi												
Nikšić – Bileća	25	19	16	13	12	17						
	804	5287	225	337	2987	1928						
Herceg Novi – Trebinje	13	21	13	14	10	14.2						
	2782	2429	1808	2754	132	1981						
HE Perućica – Trebinje	21	11	9	8	15	12.8						
	677	2501	93	731	3854	1571.2						
HE Perućica – Podgorica1, vod 2 i vod 3	22	9	7	6	20	12.8						
	1271	79	1446	260	490	709.2						
Podgorica 1 – Pljevlja 2	6	6	10	11	14	9.4						
	140	2091	68	78	362	547.8						

**IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim
VODOVIMA**

HE Perućica – Nikšić, vod 1 i vod 2	12 126	9 651	4 119	6 36	8 1510	7.8 488.4
Podgorica 1 – EVP Trebjesica	11 2539	9 107	6 70	8 404	5 285	7.8 681
Podgorica 2 – Cetinje	9 129	7 29	7 1730	7 101	9 526	7.8 503
Tivat – Herceg Novi	7 39	4 196	9 522	7 861	9 101	7.2 345.8
Ribarevine – Kosovo	10 133	3 32	3 37	7 444	8 694	6.2 268
Podgorica 2 – Budva	9 1208	3 38	3 11	8 429	4 96	5.4 356.4
Podgorica 2 – Trebinje	5 66	4 36	5 33	5 35784	5 424	4.8 7268.6
Bar – Budva	1 2	8 3878	8 185	2 541	4 161	4.6 953.4
EVP Trebješica – Berane	9 340	7 48	2 15	3 15	2 8	4.6 85.2
Podgorica 2 – Ribarevine	6 59	2 32	5 619	4 573	4 95	4.2 275.6
Podgorica 1 – Albanija	5 131	8 96	2 19	0 19	5 394	4 128
Budva – Cetinje	5 33	9 56	4 80	2 8	0 8	4 35.4
Podgorica 1 – HE Perućica	0 23	5 42	8 42	3 9	2 21	3.6 19
Podgorica 2 – Albanija	0 Albanija	0 131	0 96	6 394	10 424	3.2 275.6
HE Piva – Pljevlja 2, vod 264	1 15	3 185	7 149	2 3	3 9	3.2 72.2
Podgorica 2 – Bar	5 27	7 1831	4 162	0 0	0 0	3.2 404
Piva – Sarajevo	4 97	6 2142	2 31	1 8	2 51	3 465.8
Podgorica 1 – Danilovgrad	3 2536	5 338	2 6	3 1005	2 102	3 797.4
Budva – Tivat	3 9	3 40	6 318	0 0	3 3554	3 784.2
Ribarevine – Mojkovac	6 89	0 89	2 18	4 86	3 21	3 42.8

Pljevlja 1 – Potpeć	2 120	4 92	2 74	2 22	2 4	2.4 62.4
Berane –	3	2	2	1	3	2.2
Ribarevine	8	29	24	4	13	15.6
Ribarevine –	2	2	2 5	2 11	2 20	2 46.4
Pljevlja 2	3	193				
Podgorica 1 –	4	0	2	1	3	2
Podgorica 2, vod 1	34		1189	8	135	273.2
Podgorica 1 –	4	0	4	0	2	2
Podgorica 2, vod 2	3072		33		82	637.4
Danilovgrad – HE	1	2	3	1	2	1.8
Perućica	15	10	336	3	146	102
Pljevlja 2 – Bajina Bašta	4 39	3 29	1 2	0	0	1.6 14
Bar – Ulcinj	2 6	4 12	1 3	0	0	1.4 4.2
Pljevlja 2 - Požega	2 45	1 8	1 21	1 31	0	1 15.4
Virpazar – Bar	0	2 6	2 36	0	1 4	1 9.2
Podgorica 2 –	1	2	0	1	0	0.8
KAP, vod 1	406	88		6		100
Podgorica 2 –	0	3	0	1	0	0.8
KAP, vod 2		559		6		113
Pljevlja 1 –	0	2	2 5	0	0	0.8
Pljevlja 2		8				2.6
Mojkovac –	0	0	1 7	2 22	0	0.6 5.8
HE Perućica –	0	0	0	1 7	1 12	0.4 3.8
Nikšić, vod 3						
Podgorica 1 –	0	0	0	0	1 4	0.2 0.8
Mojkovac						
Podgorica 1 –	0	0	1 2	0	0	0.2 0.4
Podgorica 3						
Podgorica 1 –	0	0	1 6	0	0	0.2 1.2
Podgorica 4						

Tabela 9. broj ispada i vrijeme trajanja ispada dalekovoda za period 2016. - 2017.

Br. – broj ispada	2016		2017		
	Br.	min	Σ	Br.	Σ min
Dalekovodi					

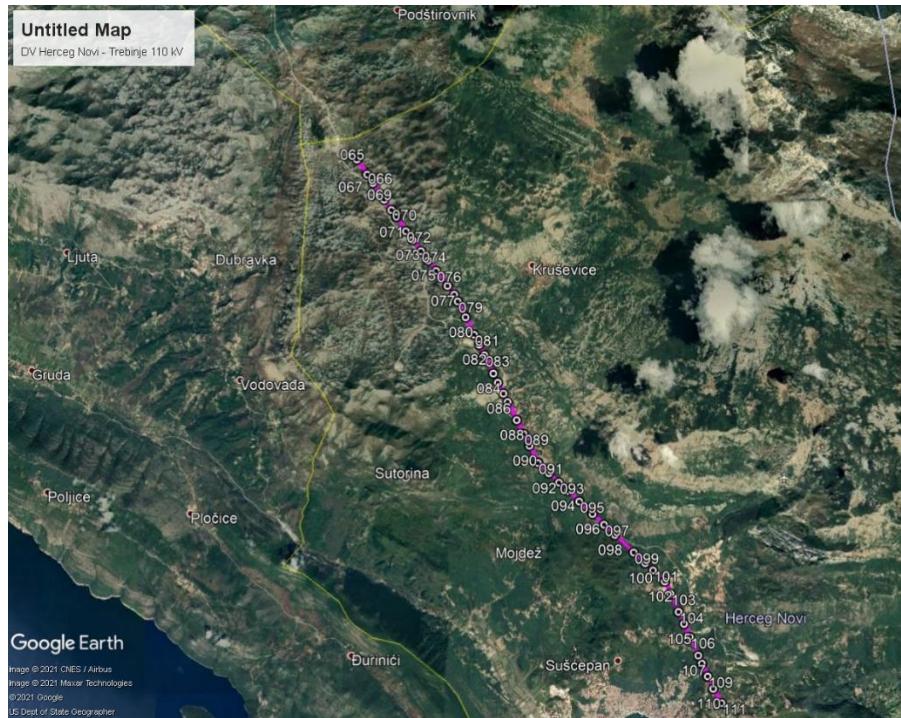
**IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim
VODOVIMA**

Nikšić – Bileća	28 1506	3 48
Herceg Novi - Trebinje	13 1740	12 33
HE Perućica - Trebinje	3 660	4 540
HE Perućica – Podgorica1, vod 2 i vod 3	5 1302/892	3/4 15/19
HE Perućica – Nikšić, vod 1 i vod 2	3/2 251/15	0/1 0/26
Podgorica 1 – EVP Trebješica	9 116	15 236
Podgorica 2 - Cetinje	12 69	5 42
Tivat – Herceg Novi	5 307	1 9
Ribarevine - Kosovo	0	6 1437
Podgorica 2 - Budva	2 663	3 29
Podgorica 2 - Trebinje	6 1216	7 375
Bar – Budva	8 2062	1 4
EVP Trebješica - Berane	1 8	0
Podgorica 2 - Ribarevine	5 34	12 191
Podgorica 1 - Albanija	4 19	15 207
Budva – Cetinje	2 24	4 526
Podgorica 1 – HE Perućica	6 243	3 311
Podgorica 2 - Albanija	2 16	3 35
HE Piva – Pljevlja 2, vod 264	1 14	0
HE Piva – Pljevlja 2, vod 265	3 46	0
Podgorica 2 - Virpazar	8 386	1 9

Piva – Sarajevo	0	0
Podgorica 1 - Danilovgrad	2 14	1 77
Budva – Tivat	5 327	2 5
Ribarevine - Mojkovac	7 51	2 18
Pljevlja 1 – Potpeć	1 33	0
Berane - Ribarevine	4 54	3 33
Ribarevine – Pljevlja 2	1 8	2 516
Podgorica 1 – Podgorica 2, vod 1	1 3	0
Podgorica 1 – Podgorica 2, vod 2	3 30	2 8
Danilovgrad – HE Perućica	1 27	1 9
Pljevlja 2 – Bajina Bašta	0	1 1711
Bar – Ulcinj	0	0
Pljevlja 2 - Požega	1 463	1 7
Virpazar – Bar	4 24	0
Podgorica 2 – KAP, vod 1	1 1800	0
Podgorica 2 – KAP, vod 2	2 27	1 5
Podgorica 2 – KAP, vod 3	2 32	1 5
Pljevlja 1 – Pljevlja 2	3 426	0
Mojkovac – Pljevlja 2	5 1995	5 82
HE Perućica – Nikšić, vod 3	2 256	0
Podgorica 1 - Mojkovac	7 210	5 81
Podgorica 1 – Podgorica 3	1 1	2 117
Podgorica 1 – Podgorica 4	1 32	2 161

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

Na osnovu prikazanih tabela, za analizu i primjer ugradnje linijskih odvodnika prenapona je odabran vod 110 kV Trebinje- Herceg Novi. Trasa dalekovoda prikazana na slici 94.



Slika 94. Prikaz DV Trebinje- Herceg Novi 110 kV kmz.

Vod je odabran na osnovu računanja funkcije rizika koja u ovom slučaju ima vrijednost oko 1. Vod sa najvećim brojem ispada jeste vod 110 kV Nikšić Bileća, ali se on nije razmatrao jer nema veliku ulogu za stabilnost sistema a takođe se ne koristi za napajanje većeg konzumnog područja (od njega zavisi područje Vilusa, sa malim brojem potrošača). Ispadanjem voda Herceg Novi Trebinje 110 kV, koji je sljedeći na listi po broju ispada, kompletno područje Boke Kotorske se oslanja na dalekovod poprečnog presjeka 150/25 mm², sa velikom mogućnošću preopterećenja u ljetnjim mjesecima kada su potrebe za električnom energijom najveće.

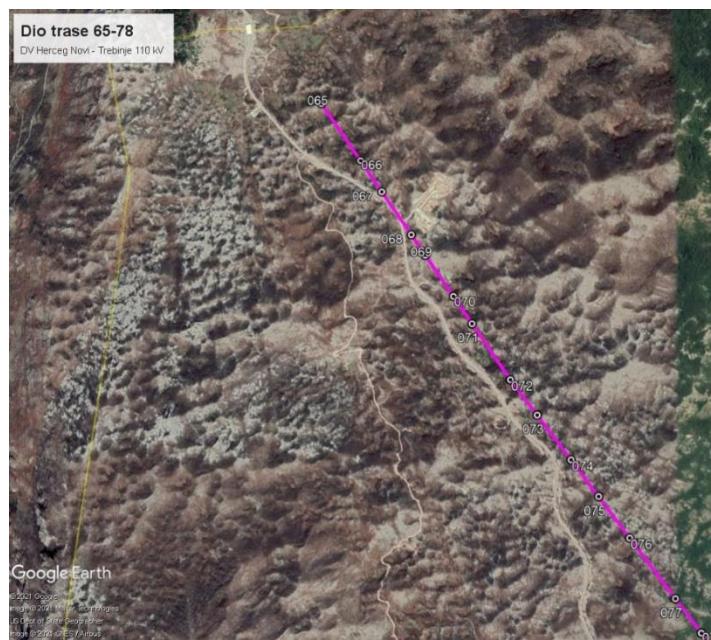
Vod je odabran i iz razloga izmjerenoj povećanog statickog pada napona na kontaktima prekidača, koji se nalazi u tom dalekovodnom polju, a koji je posljedica povećanog broja manipulacija uzrokovanih udarima groma u vod. Česta je odrada APU-a.

Uvidom u trasu prostiranja dalekovoda jasno se može vidjeti da veliki broj stubova ima veoma visok otpor rasprostiranja, što je prije svega posljedica lošeg geološkog sastava tla. Trasa u dobrom dijelu prolazi kroz tlo koje čini stijena ili kamenjar za koje je karakteristični otpor tla iznad 4000 Ωm. Problem visoke vrijednosti otpora rasprostiranja je naročito izražen u pograničnom dijelu. Iz tog razloga je za potrebe simulacije uzeto 14 stubova koji se nalaze na potezu od granice sa BiH prema TS Poda 110/35 kV. Procijenjeno je da su ti stubovi najranjiviji,

a čine dva zatezna polja. Odabrani su stubovi od rednog broja 65 do rednog broja 78, kao stubovi sa najvećom vrijednošću otpora rasprostiranja uzemljivača. Razlog za veliku vrijednost otpora rasprostiranja se može vidjeti na slikama 95 i 96, gdje se vidi sastav terena u tom dijelu.



Slika 95. Teren po kom se prostire dalekovod.



Slika 96. Dio trase DV Trebinje – Herceg Novi 110 kV od stuba 65 do stuba 78

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

U tabeli 10 je data izmjerena vrijednost otpora rasprostiranja za navedene stubove.

Tabela 10. Vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača

Vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača														
Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub	Stub
65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	
65Ω	55Ω	60Ω	70Ω	95Ω	80Ω	120Ω	59Ω	105Ω	90Ω	95Ω	82Ω	35,5Ω	45Ω	

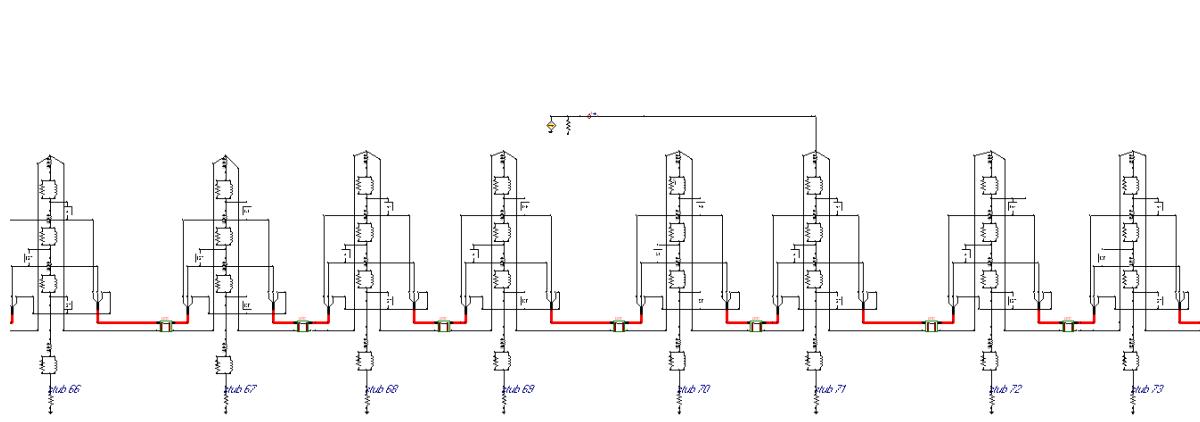
Pored navedene dionice, evidentirano je još par stubova sa povećanim otporom rasprostiranja uzemljivača. Projektom je u cilju zaštite od atmosferskog pražnjenja definisana vrijednost otpora od 10Ω . Jasno je da su vrijednosti prikazane u tabeli 10 znatno iznad preporučene vrijednosti. Da je ovo dionica sa najvećim brojem evidentiranih kvarova , koji su posljedica atmosferskog pražnjenja , potvrđeno je uvidom u pogonsku istoriju dalekovoda.

Električni parametri voda (vrijednost R,L,C faznih užadi i zaštitnog užeta) su izračunati na osnovu geometrije samih stubova, kao i na osnovu vrijednosti specifičnog otpora tla, na način prikazan u poglavlju 6.

Svi parametri neophodni za stvaranje modela dobijeni su korištenjem Glavnog projekta i primjenom realnih parametara. Načini modelovanja atmosferskog pražnjenja, sistema izolacije i samog stuba isti su kao u prethodnom poglavlju.

U zavisnosti od toga da li i na kojem stubu dolazi do pojave prenapona, koji prevazilaze podnosivi napon izolacije, primjeniće se linijski odvodnici prenapona. Njihova ugradnja ima za cilj snižavanje preostalog napona na nivo koji izolacija može podnijeti. Koliko odvodnika je potrebno ugraditi , kao i na kojim mjestima zaključeno je nakon izvršenih simulacija.

Prikaz modelovanog voda je prikazan na slici 97.



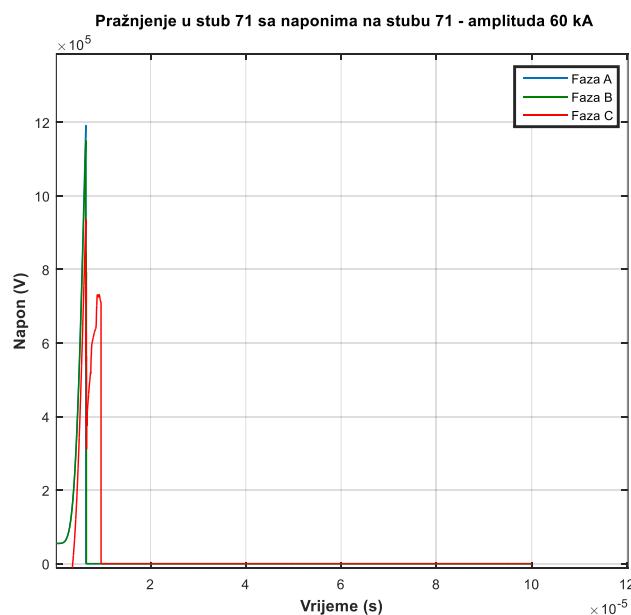
Slika 97. Model nadzemnog voda korištenog u simulacijama – programski paket ATP/EMTP

Postupak odabira mesta ugradnje i broja potrebnih odvodnika prenapona je identičan postupku opisanom u poglavlju broj 6. Prije svega je neophodno sagledati naponske prilike pri udaru atmosferskog pražnjenja u vod koji je štićen samo zaštitnim užetom i da li pri udaru u neki od stubova ili u zaštitno uže dolazi do proboga izolacije. Simulacije su sprovedene sa strujama pražnjenja od 60 kA koje su moguće ali sa malom vjerovatnoćom kao i sa strujom pražnjenja od 40 kA. Na osnovu izvršenih simulacija dobijeni su rezultati koji pokazuju da pri udaru ovako velikih amplituda pražnjenja dolazi do proboga fazne izolacije na mnogim stubovima, što je rezultat koji se očekivao s obzirom na visoke vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača.

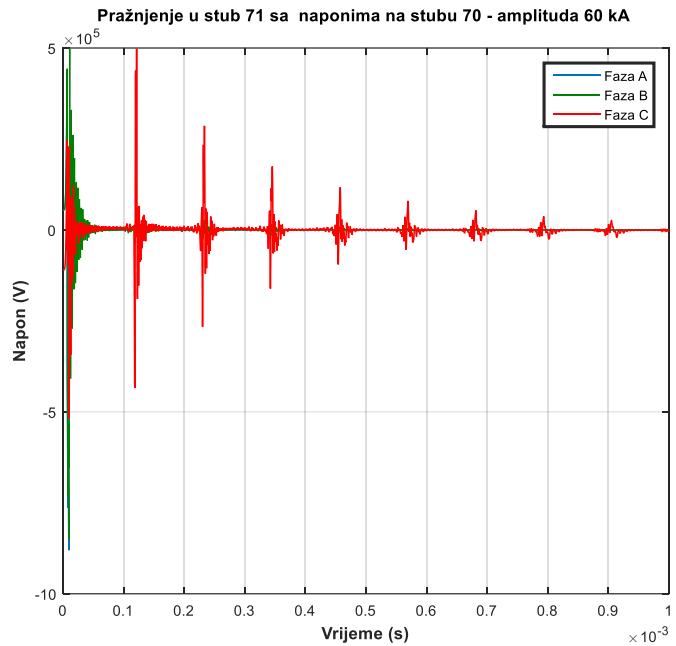
Proces udara je simuliran na svakom od stubova iz predmetne dionice i rezultati simulacija su zapisivani kako bi se na osnovu istih mogli odrediti lokacije za optimalnu ugradnju odvodnika prenapona. Prilikom vršenja simulacija ustanovljeno je da amplituda pražnjenja iako je visoka u oba slučaja ne dovodi do proboga izolacije na istim mjestima.

Grafici sa naponima su prikazani za slučajeve pražnjenja u stub 71 koji je stub sa najvećom vrijednošću otpora rasprostiranja kao i za stubove 65 i 78 koji predstavljaju krajnje stubove posmatrane dionice. Do proboga izolacije na stubnom mjestu koje je najbliže mjestu udara kao i na susjednim stubovima dolazi i slučaju pražnjenja u vrh ostalih stubova iz posmatrane dionice kao i slučaju pražnjenja u zaštitno uže i svi rezultati su zapisani. Generalan je zaključak, što je i realan rezultat da je simuliranjem udara od 60 kA zabilježeno znatno više proboga izolatora u odnosu na slučaj od 40 kA.

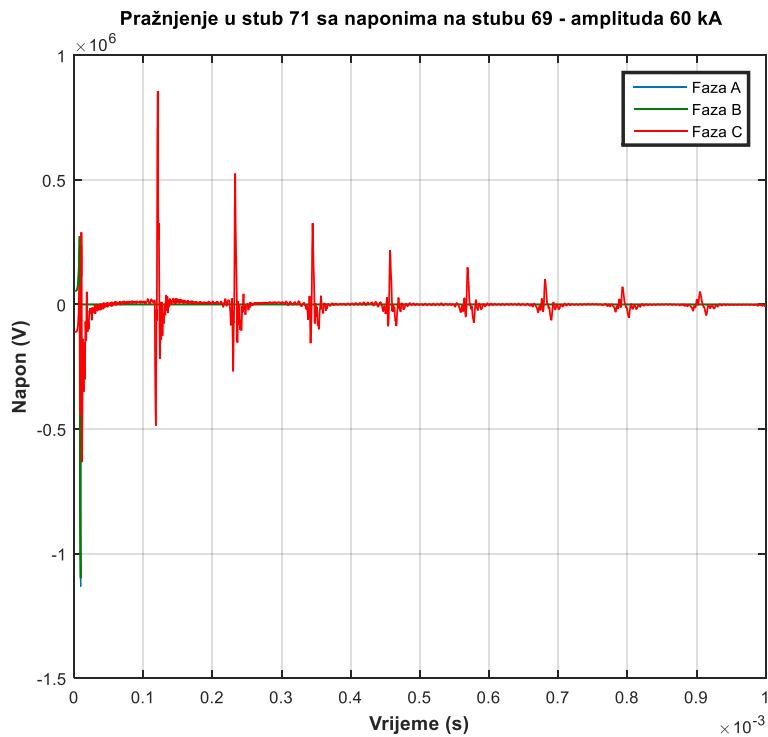
Na slikama 98 - 102 su prikazani grafici napona u slučaju udara atmosferskog pražnjenja amplitude 60 kA.



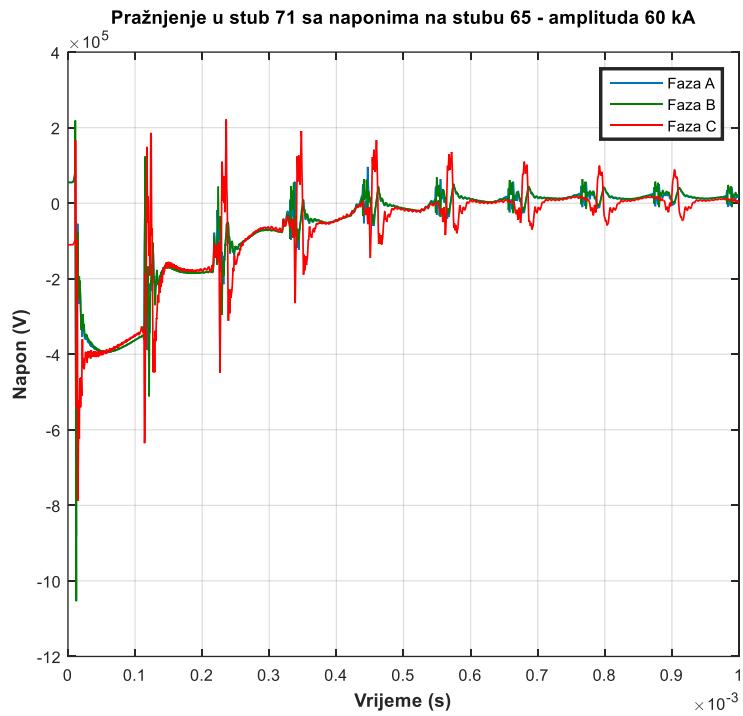
Slika 98. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71



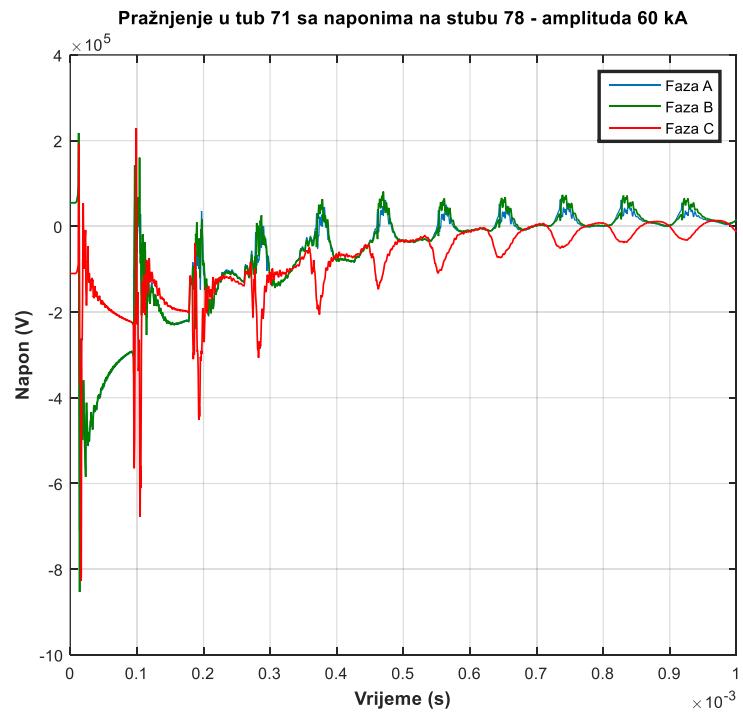
Slika 99. Vremenska promjena napona na stubu br. 70 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71



Slika 100. Vremenska promjena napona na stubu br. 69 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71



Slika 101. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71



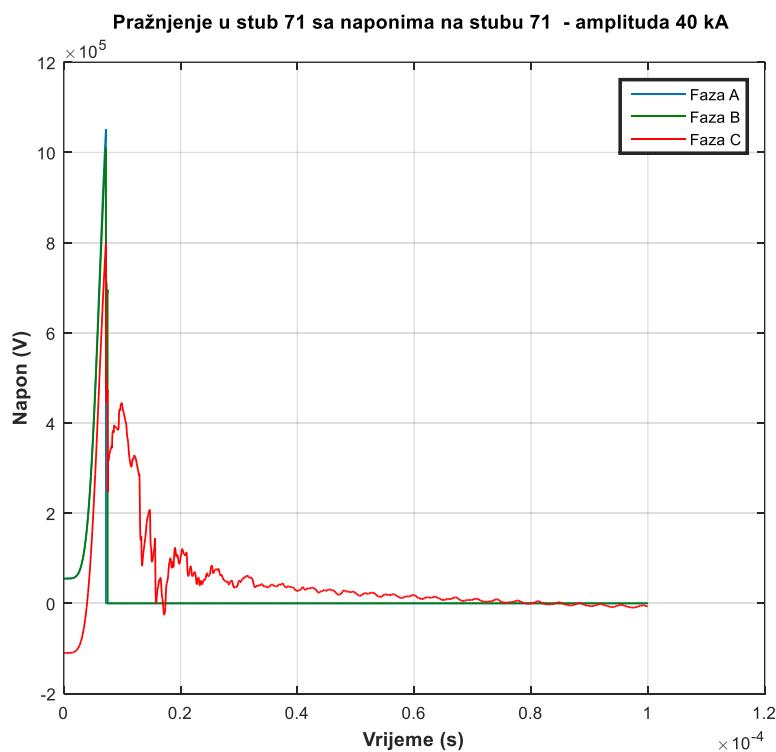
Slika 102. Vremenska promjena napona na stubu br. 78 pri udaru amplitude 60 kA u vrh stuba 71

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

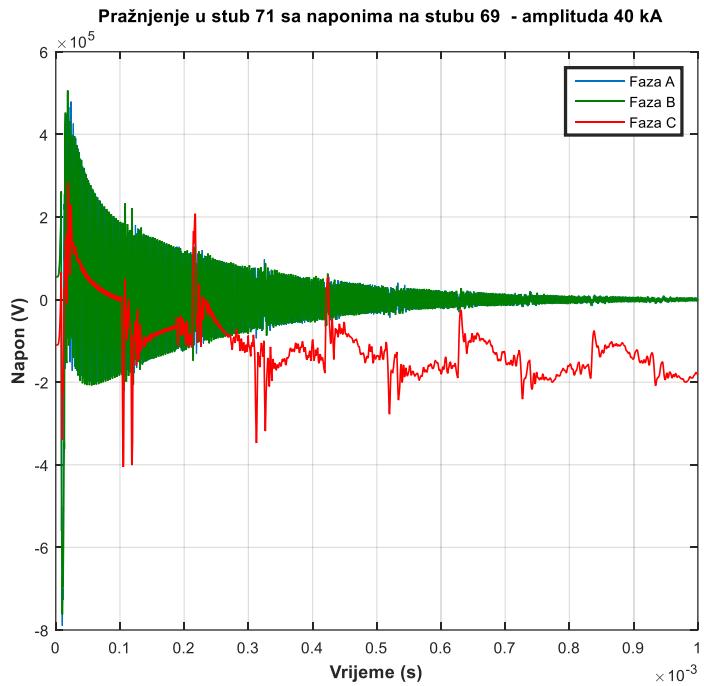
Grafici sa pražnjenjem amplitude 60 kA su prikazani samo za slučaj pražnjenja u vrh stuba broj 71. Simulacije su izvršene i za pražnjenja u vrhove ostalih stubnih mesta, kao i za pražnjenja u zaštitno uže. Ostali slučajevi nijesu prikazani iz razloga što je na osnovu simulacija zaključeno da bi zaštita od amplitude 60 kA bila poprilično skuplj a kako su navedena pražnjenja veoma rijetka, odlučeno je da se koncipiranje zaštite koje iziskuje instaliranje odvodnika prenapona odradi za pražnjenje amplitude 40 kA.

Sa grafika je jasno da u slučaju pražnjenja u vrh stuba 71 dolazi do proboja izolacije u sve tri faze na stubu 71 kao i u fazama A i B (donje dvije faze) na stubu 69 i u fazi A na stubu 70. Do proboja sporadično dolazi na drugim stubnim mjestima i to na stubu 72 u fazama A i B kao i na stubu 68 sa istim scenarijom. Najudaljenije stubno mjesto na kojem je zabilježen proboj izolacije jeste stub 75 gdje je zabilježen proboj izolacije u fazi C.

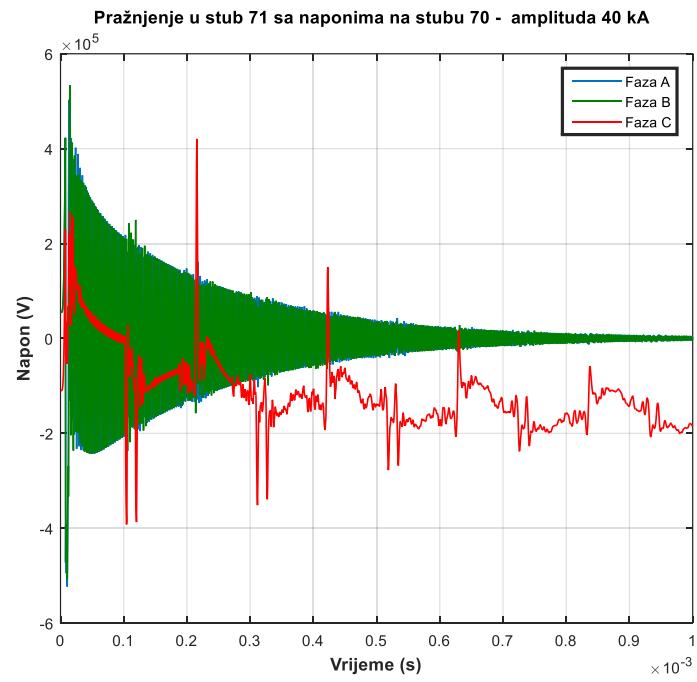
Na slikama 103 - 112 su prikazani grafici napona za slučaj pražnjenja amplitude 40 kA i to za više stubnih mesta.



Slika 103. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71

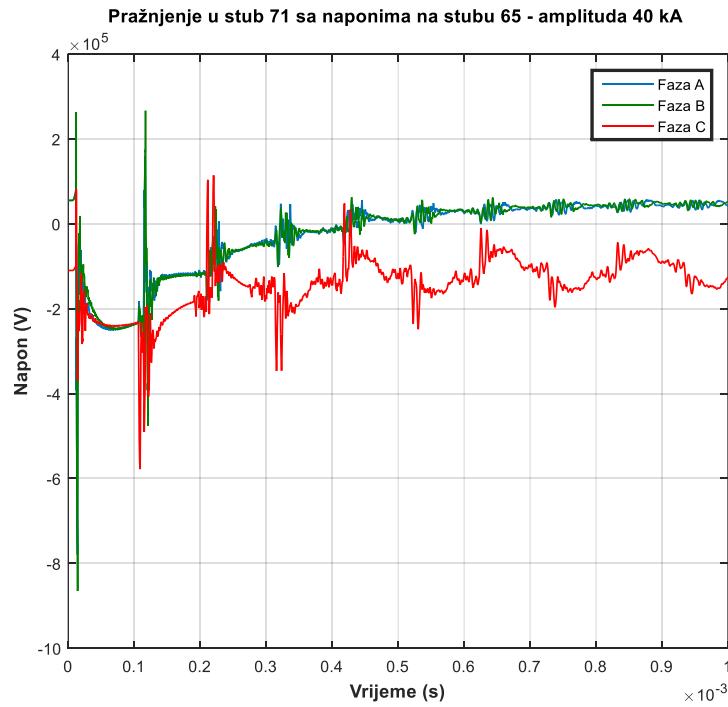


Slika 104. Vremenska promjena napona na stubu br. 69 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71

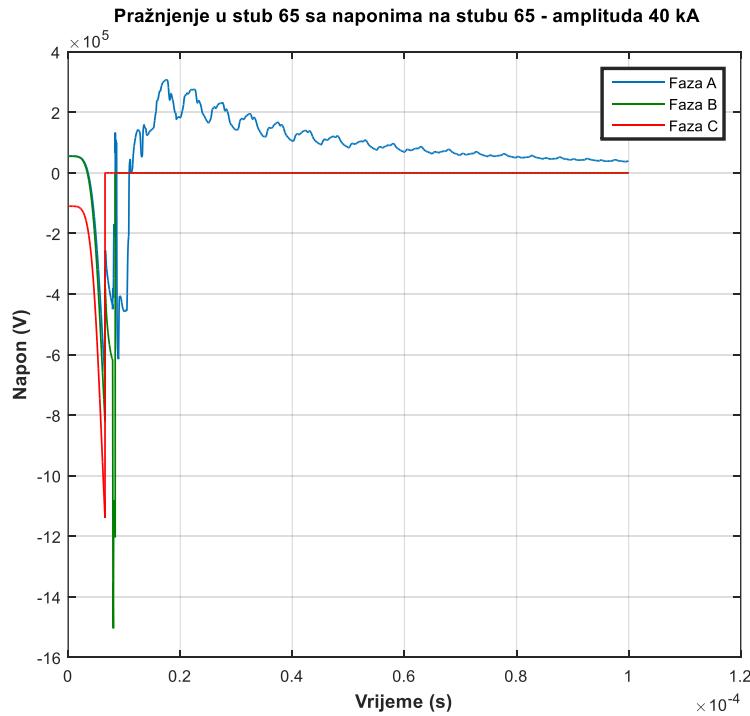


Slika 105. Vremenska promjena napona na stubu br. 70 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71

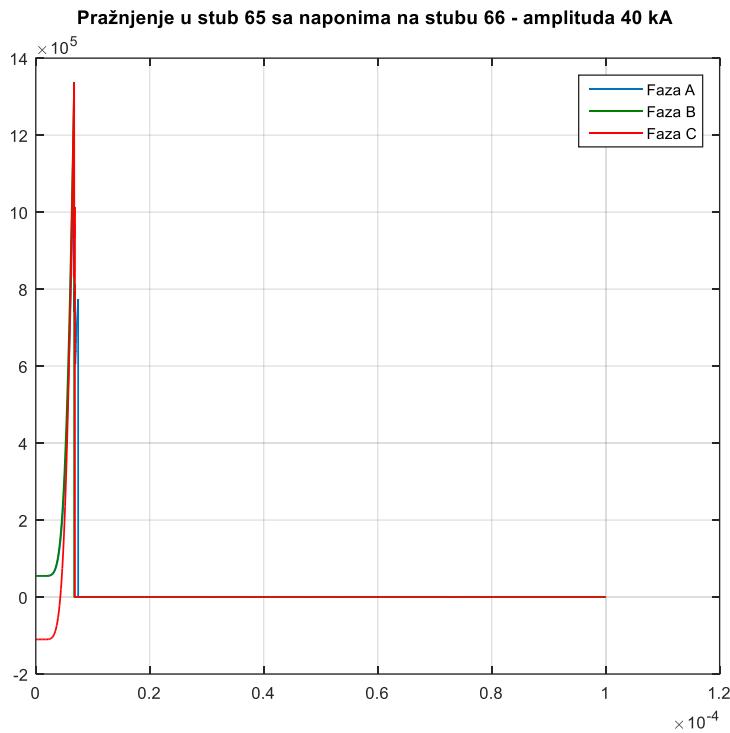
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



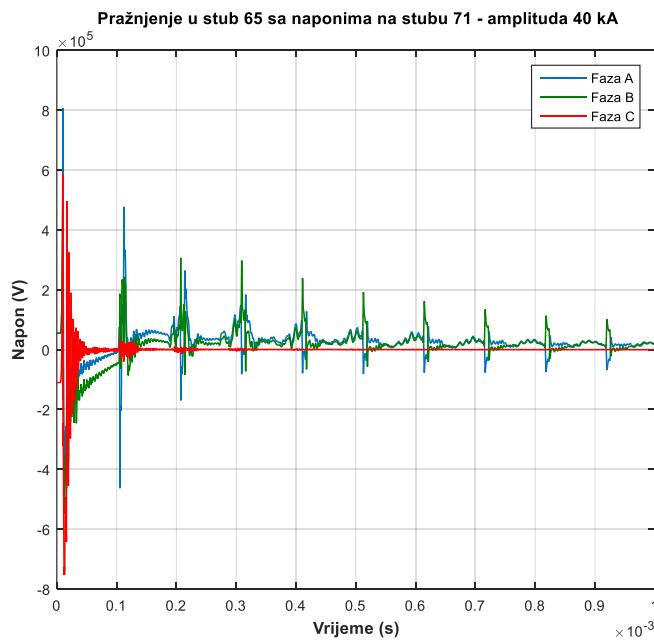
Slika 106. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71



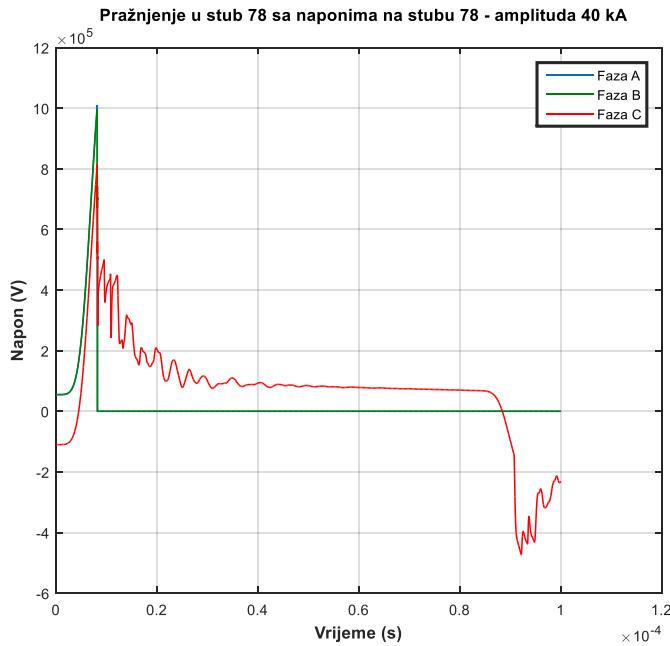
Slika 107. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65



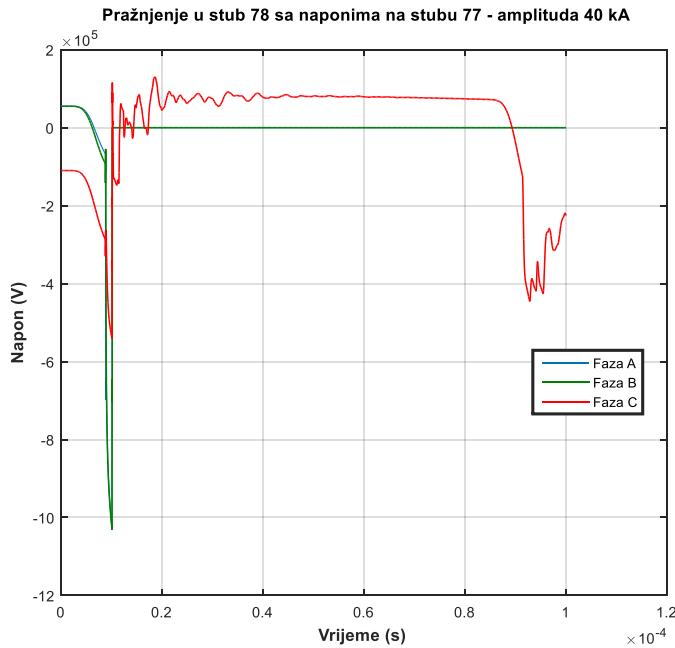
Slika 108. Vremenska promjena napona na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65



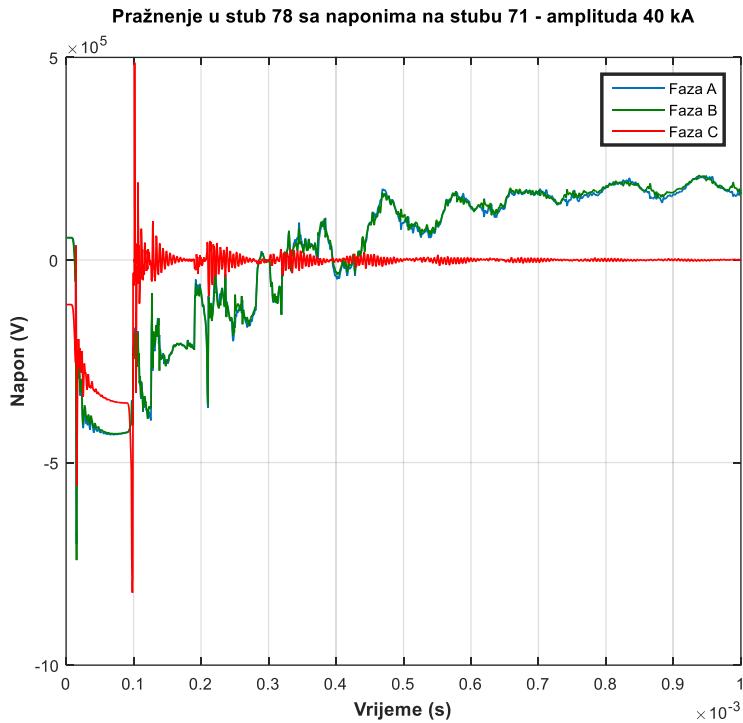
Slika 109. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65



Slika 110. Vremenska promjena napona na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78



Slika 111. Vremenska promjena napona na stubu br. 77 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78



Slika 112. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78

Sa grafika prikazanih za slučaj pražnjenja u vrh stuba 71 amplitude 40 kA se jasno uočava da se grafici napona razlikuju u odnosu na slučaj pražnjenja amplitude 60 kA kao i da takav udar rezultira sa manjim brojem probaja izolacije gdje je ukupno zabilježeno 9 probaja u odnosu na 14 probaja izolacije iz modela sa pražnjenjem amplitude 60 kA. Situacija je slična i pri modelovanju udara u druge stubove gdje je takođe evidentiran probaj izolacije i to ne samo na stubu pogodjenom udarom ili stubu najbližem mjestu udara u slučaju pražnjenja u zaštitno uže već i na susjednim stubovima. Situacija je karakteristična za slučaj pražnjenja u vrh stuba 65 gdje je izraženiji uticaj na susjedni stub u odnosu na stub pogoden pražnjenjem gdje je uočen probaj u sve tri faze. Za slučaj pražnjenja u vrh stuba 78 posljedice po izolaciju su identične i na susjednom stubu iz modela gdje dolazi do probaja u fazama A i B. Slični scenariji se ponavljaju i pomjeranjem mjesta pražnjenja u neku drugu tačku pri čemu je za svaki slučaj evidentiran probaj izolacije na mnogim stubnim mjestima.

Nakon izvršenih simulacija pristupilo se na način opisan u prethodnom poglavlju procesu odabira odvodnika prenapona kao i određivanju broja odvodnika i lokacija na kojima je iste neophodno ugraditi u cilju sprječavanja probaja izolacije. Postupak određivanja optimalnih lokacija i broja potrebnih odvodnika se sastoji od niza iteracija postavljanja i uklanjanja odvodnika sa ciljem dobijanja potpune zaštite uz najmanji broj instaliranih odvodnika prenapona.

Odvodnici koji su korišteni u simulaciji su identični kao odvodnici opisani u poglavlju 6 i preuzeti su iz kataloga jednog od proizvođača. Nakon izvršenog većeg broja simulacija

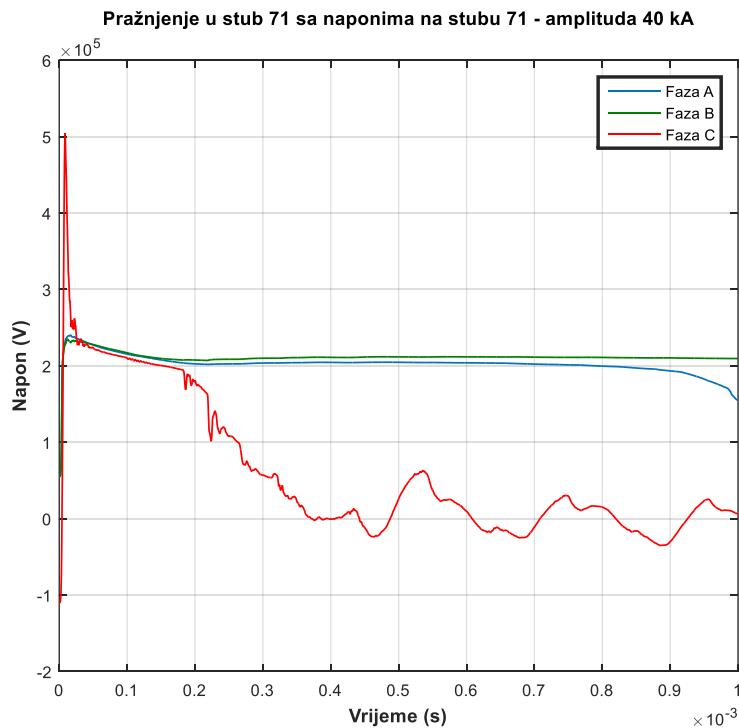
dobijen je broj kao i optimalne lokacije za ugradnju odvodnika prenapona koje će spriječiti probaj izolacije u najvećem broju slučajeva, mogućnost probaja evidentirana je u određenim situacijama pražnjenja direktno u fazno uže samo. Tabela 11 prikazuje koliko je odvodnika prenapona instalirano na stubnim mjestima iz modela.

Tabela 11. Odvodnici prenapona koji su ugrađeni su cilju sprječavanja probaja izolacije u slučaju pražnjenja u vrh stuba ili zaštitni uže

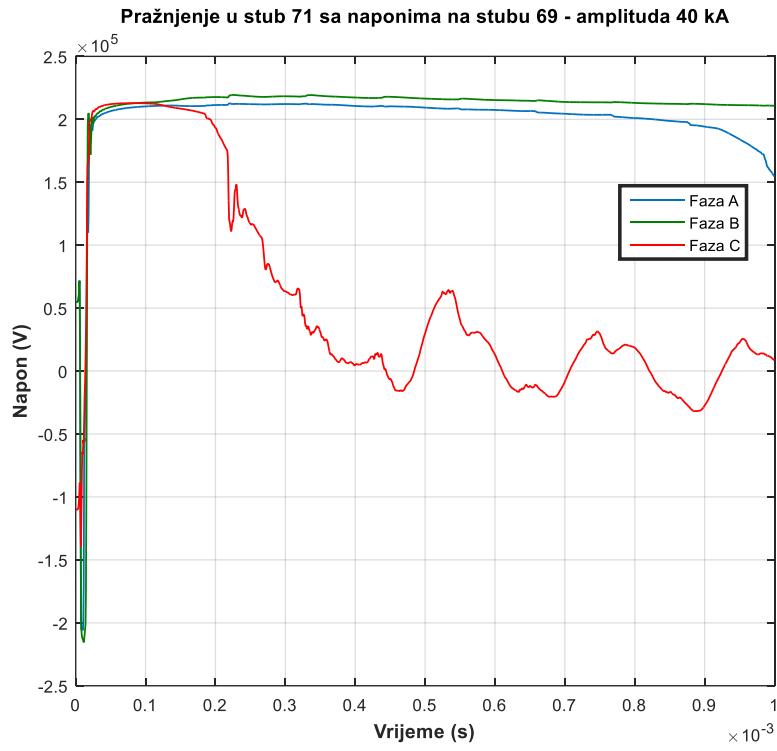
Ugrađeni odvodnici prenapona po fazama (A,B,C)														
Stub 65	Stub 66	Stub 67	Stub 68	Stub 69	Stub 70	Stub 71	Stub 72	Stub 73	Stub 74	Stub 75	Stub 76	Stub 77	Stub 78	
A,B,C	A,B,C	A	A	A,B,C	A	A,B	A	A,B	A,B,C	A,B,C	A,B	A,C	A,B	

Ukupno je primjenjeno 29 odvodnika prenapona sa tim da su određeni odvodnici ugrađeni sa ciljem sprječavanja probaja izolacije na susjednim stubnim mjestima ili stubnim mjestima udaljenim par raspona u odnosu na mjesto udara.

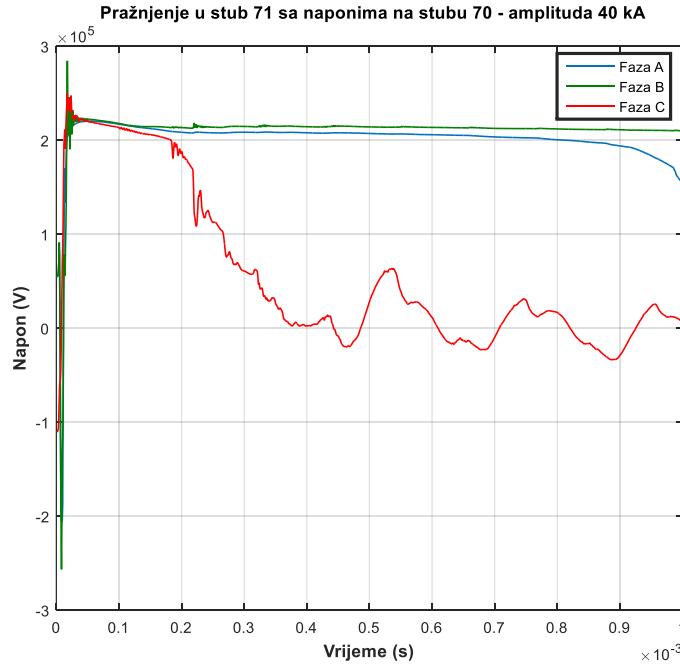
Na slikama 113- 122 su prikazani grafici napona u slučaju pražnjenja amplitude 40 kA ali sa ugrađenim odvodnicima prenapona.



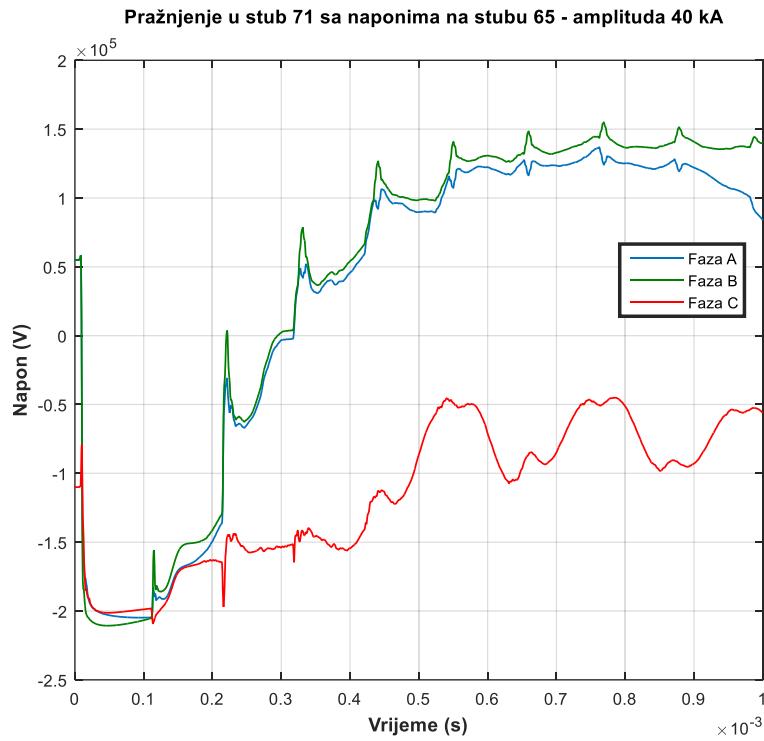
Slika 113. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71



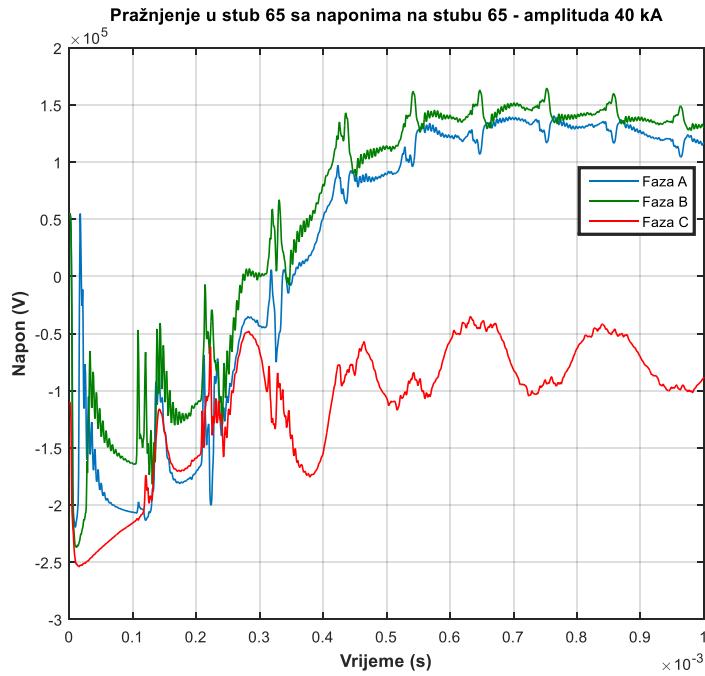
Slika 114. Vremenska promjena napona na stubu br. 69 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71



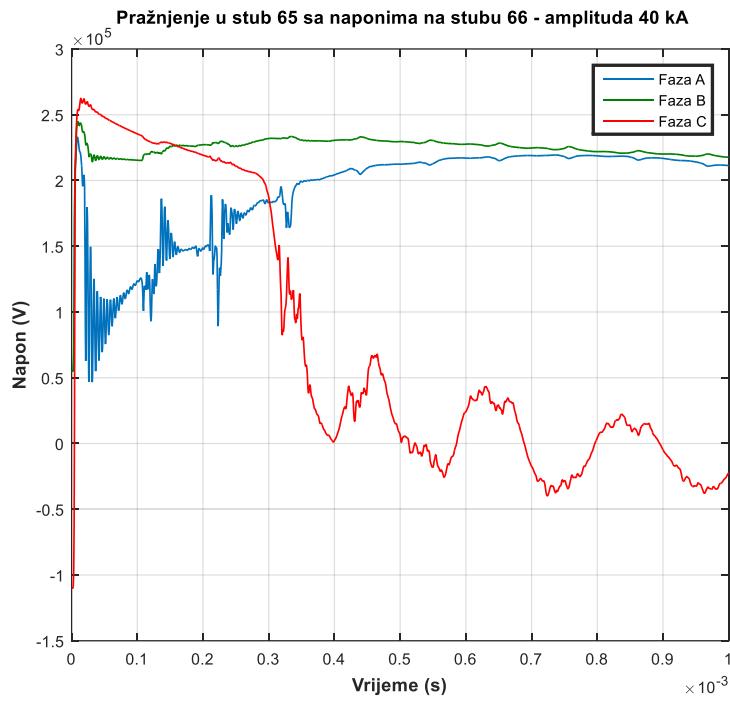
Slika 115. Vremenska promjena napona na stubu br. 70 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71



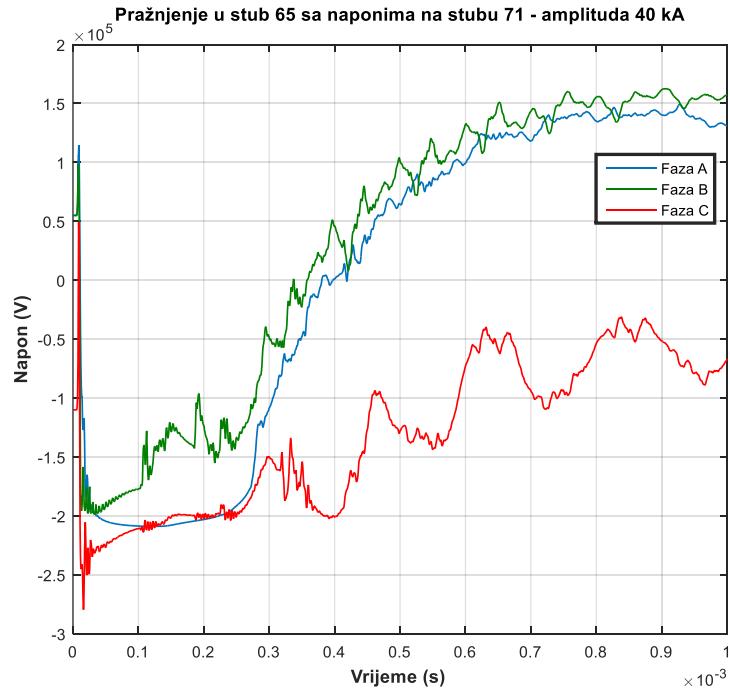
Slika 116. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71



Slika 117. Vremenska promjena napona na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65

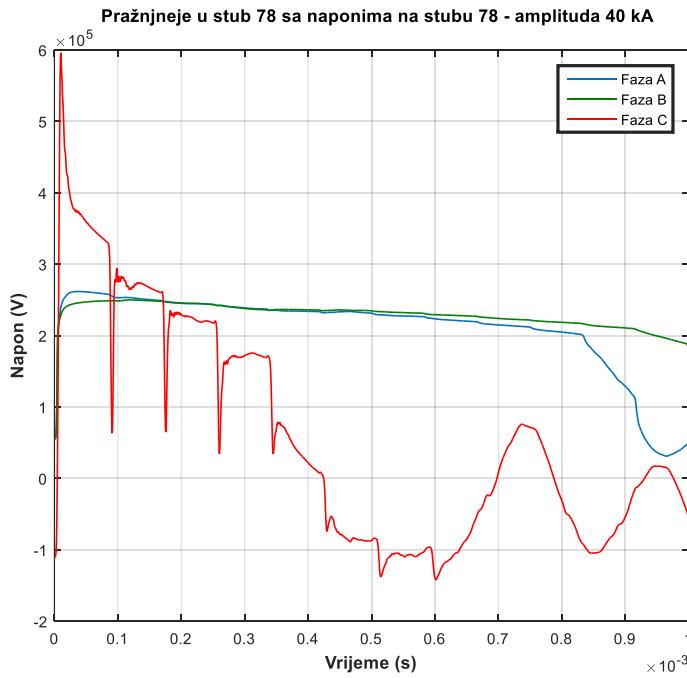


Slika 118. Vremenska promjena napona na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65

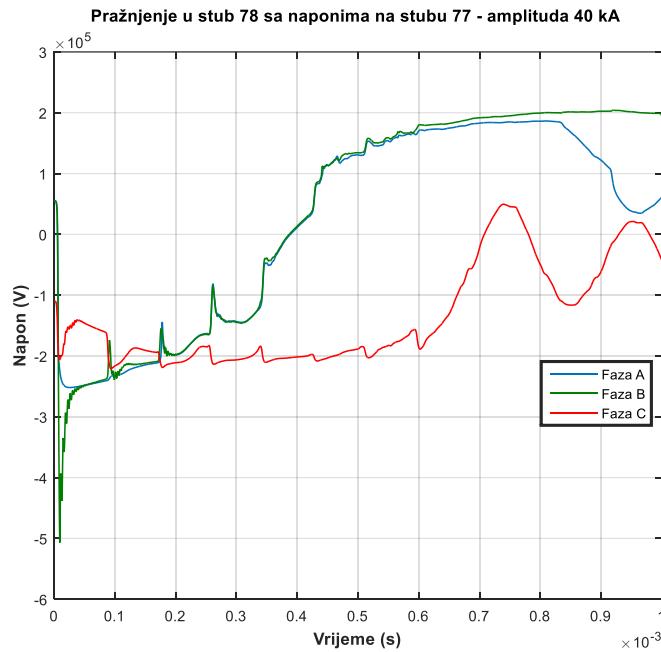


Slika 119. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65

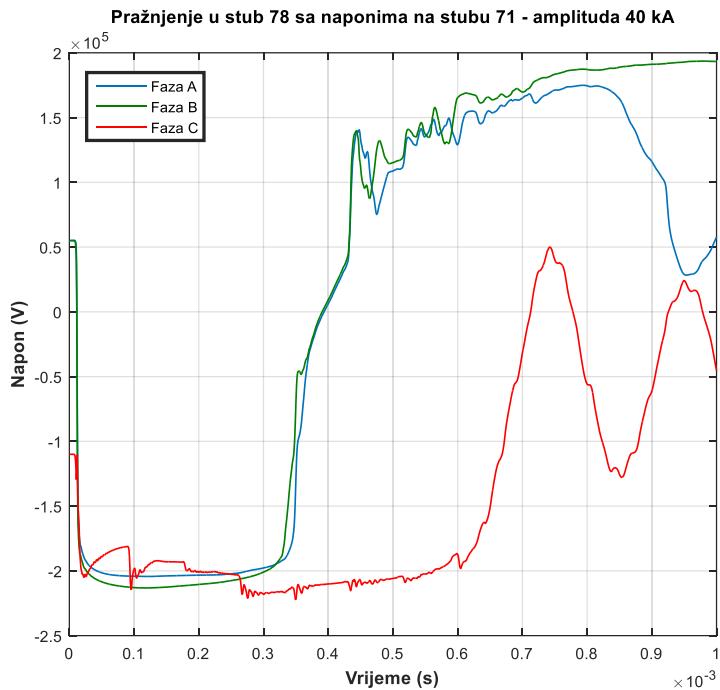
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



Slika 120. Vremenska promjena napona na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78



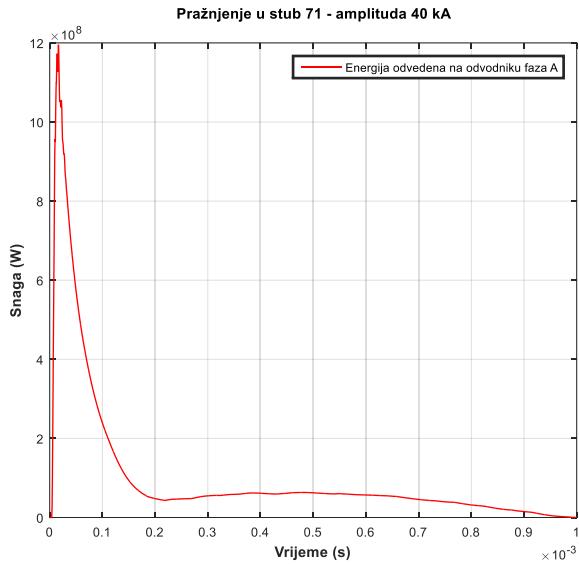
Slika 121. Vremenska promjena napona na stubu br. 77 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78



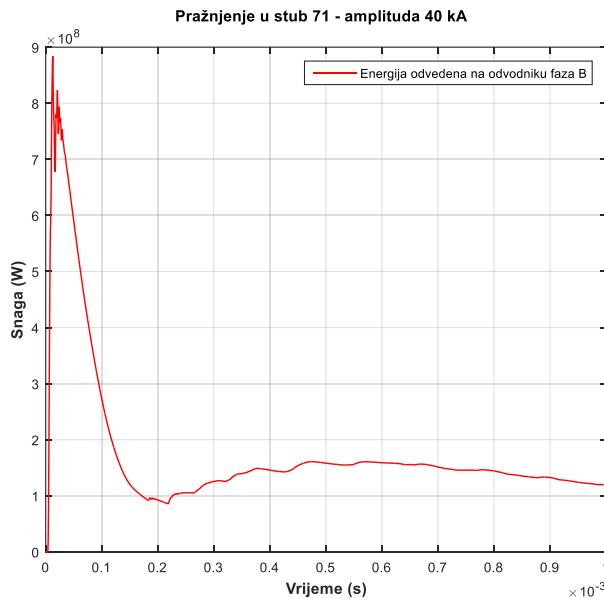
Slika 122. Vremenska promjena napona na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78

Poredeći grafike napona dobijenih u simulacijama bez ugrađenih odvodnika prenapona i sa ugrađenim odvodnicima na pozicijama prikazanim u tabeli 11 jasno je da u slučaju pražnjenja u vrh stuba ili zaštitno uže postignuta potpuna zaštita voda. Da bi zaštita bila potpuna neophodno je sprječiti prenapregnutost odvodnika prenapona a samim tim i njegovo moguće stradanje prilikom odrade. Do stradanja odvodnika dolazi u slučaju neadekvatno odabrane karakteristike odvodnika koja se tiče njegove sposobnosti odvođenja energije. Prilikom vršenja svih simulacija provjeravano je da li je i jedan odvodnik prenapona doveden u stanje da nije u mogućnosti da odvede energiju koja se generisala prilikom pražnjenja. Na slikama 123 – 132 su prikazane snage koje su odvedene na odvodnicima prenapona na osnovu kojih se može zaključiti da li su odvodnici dovedeni u stanje preopterećenja ili ne. Snage koje su generisane na odvodnicima prenapona su prikazane za slučajevе pražnjenja u vrh stuba 71, zatim stubove 78 i 65. Provjera je izvršena i za pražnjenja u vrhove drugih stubova iz trase kao i za pražnjenje u zaštitno uže. Ono što je karakteristično je da je prenapregnutost odvodnika prenapona jedino uočena pri pražnjenju za vrh stuba 78, dok je za slučaj pražnjenja u vrh stuba 65 uočena veća količina energije koja se generiše na odvodniku prenapona u fazi C na stubu 66. Ovakav rezultat se prepisuje modelu u kom su dionice ka TS Poda 110/35 koja predstavlja dionicu od stuba 78 modelovana elementom sa distribuiranim parametrima voda dužine od oko 12 km. Situacija je slična i sa drugim krajem dalekovoda gdje je dionica ka TS Trebinje modelovana elementom sa

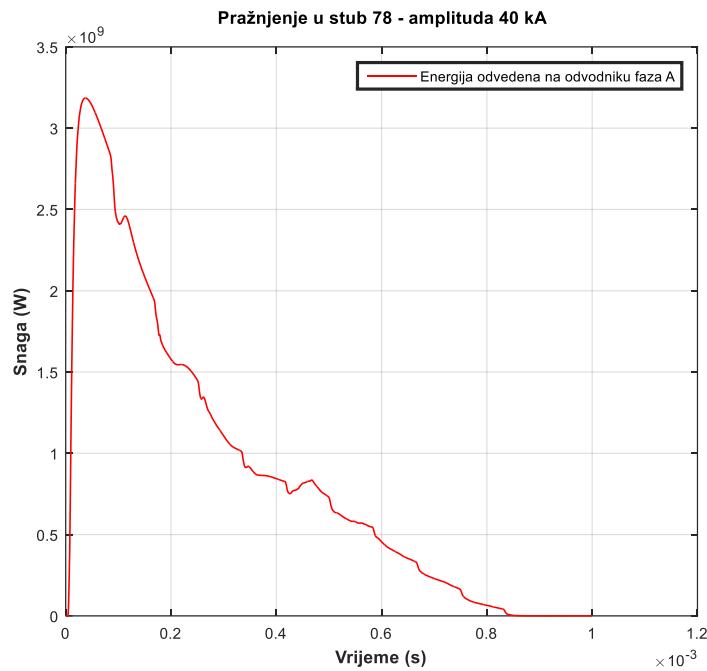
distribuiranim parametrima ali sa dužinom od preko 10 km. U realnom pogonu ovaj rezultat nije očekivan zbog blizine susjednih stubova preko kojih se odvodi dio pražnjenja u zemlju.



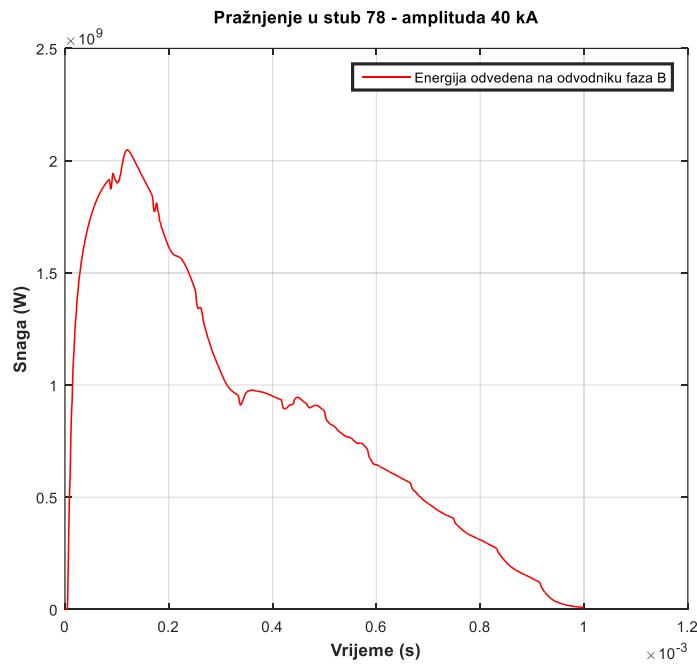
Slika 123. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71



Slika 124. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 71 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 71

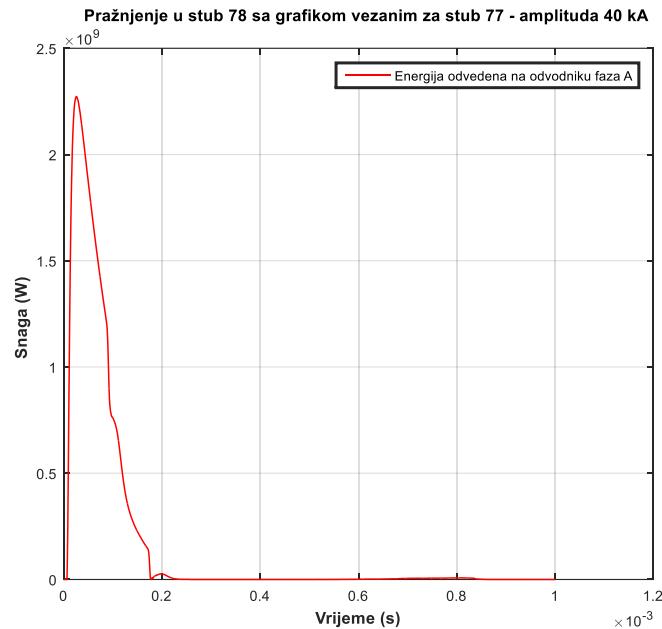


Slika 125. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78

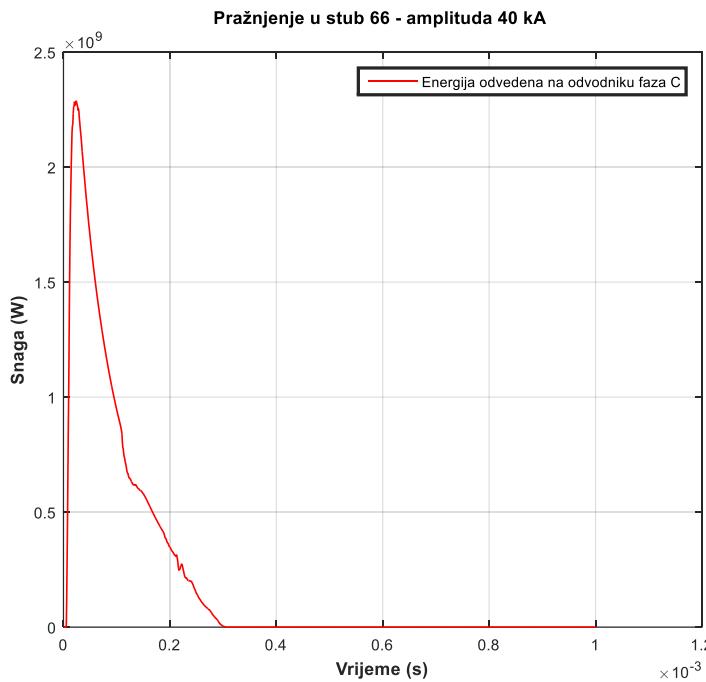


Slika 126. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 78 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78

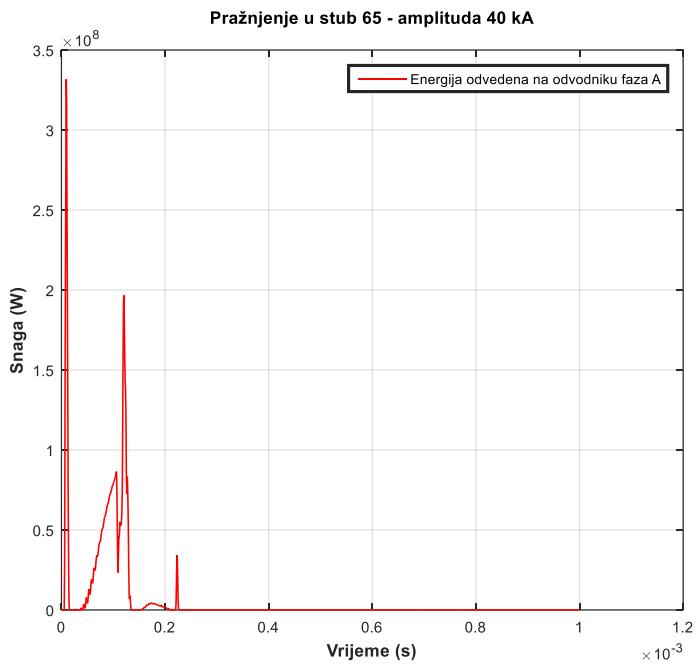
IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



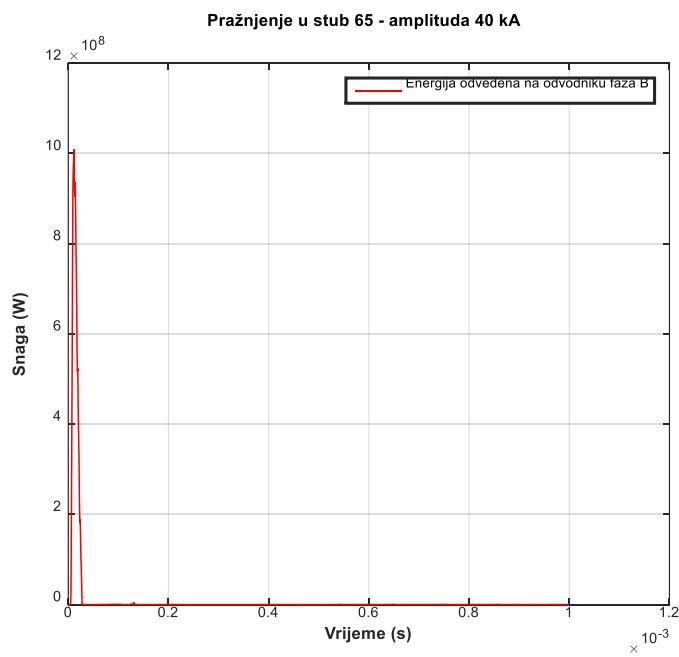
Slika 127. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 77 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 78



Slika 128. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi C na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 66

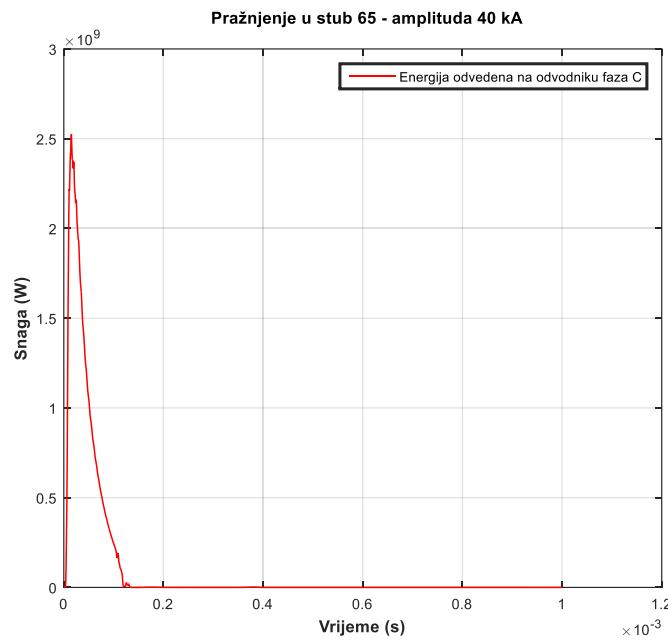


Slika 129. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi A na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65

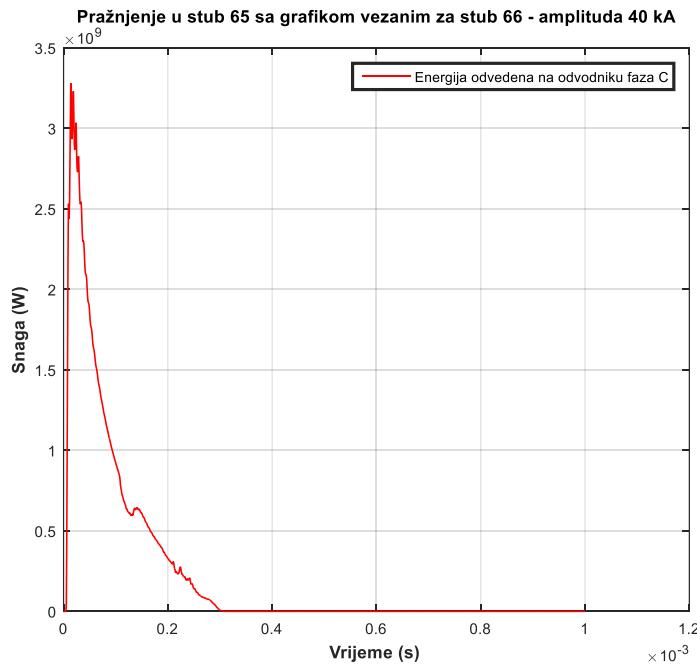


Slika 130. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi B na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA



Slika 131. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi C na stubu br. 65 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65



Slika 132. Vremenska promjena snage generisane na odvodniku instaliranom u fazi C na stubu br. 66 pri udaru amplitude 40 kA u vrh stuba 65

Sa grafika se energija dobija na način da se izračuna površina koja je ograničena krivom prikazanom na grafiku. Kako je ranije navedeno do prenapregnutosti odvodnika prenapona dolazi u fazi A na stubu 77 gdje je energija generisana na odvodniku prenapona veća od 864 kJ koliko je odabrani odvodnik sposoban da odvede ($Ur = 108 \text{ kV}$, 8 kJ/kV) a da ostane stabilan. Da je ova pojava posljedica modela jasno je na osnovu grafika koji su prikazani za pražnjenje u vrh stub 65 gdje je veća generisana energija evidentirana na odvodniku postavljenom u fazi C na stubu 66 nego što je energija generisana na stubu pogodenom udarom. Iako je u tom slučaju na odvodniku u fazi C stuba 66 registrovana struja pražnjenja od 12 kA, što je veća struja u odnosu na nominalnu struju odvodnika, uslijed kratkog trajanja faze provođenja generisana je energija koja je ispod granice za odabrani tip odvodnika prenapona. Simuliranjem udara u vrh stuba 66 energija generisana na odvodniku u fazi C je znatno manja u odnosu na onu koja se stvara pri udaru u stub 65. Generalno se može zaključiti da sa odvodnicima postavljenim na ovaj način se postiže potpuna zaštita posmatrane dionice a samim tim dobra zaštita voda jer je predmetna dionica okarakterisana kao najnepovoljnija u trasi dalekovoda po pitanju vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača. Potpuna zaštita je postignuta i zbog činjenice da odvodnici prenapona koji su korišteni u simulaciji, a to su odvodnici bez iskiršta, omogućavaju paralelan rad čime se značajno smanjuje opterećenje među odvodnicima obzirom da se na taj način dijeli teret među instaliranim odvodnicima prenapona. To je jedan od bitnijih činilaca koji je prevagnuo da se primjene ti odvodnici umjesto odvodnika sa iskristem (EGLA).

Dodatna provjera je izvršena i za slučaj direktnog pražnjenja u fazni provodnik, ali sa nižim amplitudama u odnosu na one korištene u prethodnim modelima. Razlog za korištenje nižih amplituda je opisan u poglavlju 6. U svim modelima je korištena amplituda od 5 kA za koju se može smatrati da može zaobići zaštitno uže. Evidentirano je da u slučaju postavljanja odvodnika prenapona ne dolazi do proboga niti na jednom stubnom mjestu iz predmetne dionice. Kako je amplituda pražnjenja niska tako nijesu evidentirana ni preopterećenja ni na jednom od instaliranih odvodnika prenapona. U slučaju nepostojanja odvodnika prenapona u svakom slučaju pražnjenja (bilo koji od raspona) dolazi do proboga izolacije u fazi pogodenog udarom na više mjesta. Uočeno je da do proboga izolacije dolazi i do 5 stubnih mjesta. Proboj je evidentiran kako se i očekivalo na stubnim mjestima najbližim mjestu udara.

7.2. Predlog za implementaciju linijskih odvodnika prenapona u EES Crne Gore

U praksi bi se ugradnja prenapona mogla otpočeti na način koji je opisan u radu, korištenjem softvera za praćenje grmljavinske aktivnosti i na osnovu dužeg i pozornijeg praćenja samog dalekovoda tokom grmljavinskih dana uz uvažavanje otpora rasprostiranja uzemljivača. Za početak bi se u odnosu na rezultate iz simulacije mogao ugraditi i manji broj odvodnika, ukoliko se procijeni da je inicijalni trošak visok. Odvodnici bi se uz uređaj za praćenje stanja odvodnika prenapona, pomoću kojeg bi se mogao očitati i broj prorada kao i sama amplituda struje koja je prošla kroz odvodnik, instalirali na stubovima koji su tretirani u

IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMnim VODOVIMA

simulaciji. Na osnovu broja ispada i stvarnog stanja na dalekovodu odvodnici bi se mogli premiještati na neki drugi stub ili fazu, ukoliko bi se na osnovu pogonskih izvještaja zaključilo da je taj stub ili faza podložnija većem broju ispada. Potrebne dodatne instalacije ili premještanja odvodnika prenapona sa mesta gdje se procijeni da njihova instalacija nije neophodna bi se vršili tokom redovnih remonata dalekovoda, čime bi se izbjegli dodatni troškovi u tu svrhu. Naročito je potrebno naglasiti neophodnost pravljenja precizne baze podataka iz koje bi se mogao izvući broj ispada dalekovoda bez instaliranih odvodnika prenapona i broj ispada dalekovoda sa instaliranim odvodnicima prenapona, čime se može odrediti efikasnost zaštite.

Troškovi za nabavku opreme za instalaciju navedenog broja odvodnika prema tržišnim cijenama bi iznosila oko 68.000 €.

8. Zaključak

Usljed sve većih potreba za električnom energijom i dominantnog korištenja električne energije za potrebe industrije kao i domaćinstava pred elektroenergetske sisteme se postavljaju ozbiljni izazovi koji se ogledaju kroz potrebu obezbjedjivanja stalnog napajanja potrošača. Prekidi u isporuci električne energije dovode do velikih ekonomskih šteta naročito posmatrajući potrebe velikih gradskih sredina. Kroz redovno održavanje opreme moguće je postići visok nivo pouzdanosti rada elektronergetskih objekata. Parametar na koji čovjek ne može uticati jesu atmosferska pražnjenja koja najčeće dovode do isklapanja nadzemnih vodova sa mreže koji se koriste za prenos energije, a samim tim se značajno smanjuje i sigurnost napajanja.

Jasno je da je iz ekonomskih razloga nemoguće postići potpunu zaštitu nadzemnog voda u slučaju udara groma. Ono što je moguće i potrebno uraditi jeste svesti nivo ispada na najmanju moguću mjeru uz poštovanje svih ekonomskih ograničenja. U tu svrhu je potrebno primjeniti najbolju inženjersku praksu i primjenom odgovarajućih mjera osigurati veću pouzdanost rada elektroneregetskog sistema. Cilj ovog rada je upravo postizanje veće pouzdanosti rada nadzemnih vodova koji se nastoji postići optimalnim odabirom karakteristika kao i lokacija za ugradnju odvodnika prenapona.

U radu je opisana priroda kao i nastanak atmosferskog pražnjenja uz osvrt na štetne posljedice po funkcionalisanje elektroenergetskih sistema. Prikazani su načini štićenja energetskih objekata, konkretno nadzemnih vodova od štetnih posljedica atmosferskih pražnjenja. U prvom dijelu rada opisan je način štićenja primjenom zaštitnih užadi uz opis uzemljivačkog sistema nadzemnog voda, za koji se utvrdilo da ima najveći uticaj na nivo nastalih prenapona prilikom udara groma u nadzemni vod. Posebno poglavljje je posvećeno linijskim odvodnicima prenapona koji se sve češće koriste u svrhu štićenja nadzemnih vodova u slučaju udara atmosferskog pražnjenja. Ranija ograničenja po pitanju primjene odvodnika prenapona na nadzemnim vodovima su se ticala same tehnologije rada odvodnika prenapona kao i same težine odvodnika, koja je onemogućavala širu primjenu. Sa napretkom tehnologije izrade odvodnika prenapona i primjenom kompozitnih materijala znatno je smanjena težina odvodnika prenapona koja je omogućila širu primjenu odvodnika prenapona i na nadzemnim vodovima.

Da bi se moglo odrediti na kom vodu je neophodno instalirati odvodnike prenapona potrebno je imati dobru bazu podataka koja će sadržati informacije o broju ispada voda sa mreže kao i trajanje beznaponskog stanja a koji su uzrokovani udarom groma u nadzemni vod. U radu je poseban osvrt dat i na taj dio uz predlog računanja funkcije rizika pomoću koje se može odrediti lista prioritetnih vodova. Da bi se odredili parametri odvodnika prenapona koji se planira ugraditi potrebno je u obzir uzeti niz karakteristika voda uz podatke koji se dobijaju pomoću sistema za praćenje grmljavinske aktivnosti. Da li je odvodnike opravdano ugraditi ili ne sa aspekta troškova i odnosa uloženog i vraćenog je pitanje na koje je teško dati odgovor. Da bi se do njega došlo neophodno je odrediti koliki broj odvodnika je potrebno ugraditi da bi se postigao željeni cilj. Do broja potrebnih odvodnika prenapona se dolazi na osnovu vršenja simulacija u nekom od programske paketa. U ovom slučaju je za analize i simulacije korišten

programske pakete EMTP uz korištenje Matlab Simulinka. U okviru poglavlja broj 6 je opisan način korištenja navedenih softvera u svrhu dobijanja optimalnog rješenja. U ovom slučaju je zadati cilj bio potpuna zaštita voda i on je postignut. Postupak opisan u šestom poglavlju je primjenjen i za nadzemni vod 110 kV Trebinje Herceg Novi na kom je evidentiran veliki broj ispada sa mreže uslijed udara atmosferskog pražnjenja, gdje je za cilj takođe postavljena potpuna zaštita posmatrane dionice koja će u konačnom dovesti do smanjenja broja ispada dalekovoda. Na osnovu dobijenih rezultata se zaključuje da instaliranjem odvodnika prenapona na odabranom 110 kV vodu se dobija znatno veća pouzdanost rada te se na osnovu toga nameće pitanje ugradnje za što je dat i predlog da se otpočne sa ugradnjom u okviru elektroenergetskog sistema Crne Gore čime bi se otpočelo sa praksom mnogih elektroprenosnih sistema koji su na taj način riješili probleme sa čestim brojem ispada određenih dalekovoda.

Spisak korištene literature

1. IEC standard 60071-1
2. F. Kiessling, P. Nefzger, J.F. Nolasco , U. Kaintzyk: „Overhead power lines planning, design, construction“, Sprigner, Octobar 2002.
3. Lj. Milanković: „Tehnika visokog napona“, Naučna knjiga, Beograd 1987. godina
4. M. Savić, Z. Stojković: „Tehnika visokog napona“, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Beograd 1996. godina.
5. IEC standard 62350
6. Tehnoekonomka analiza opravdanosti uradnje odvodnika prenapona u DV poljima u TS CGES-a svih naponskih nivoa, Januar 2013.
7. IEC standard 60137
8. Zajednica Jugoslovenske Elektroprivrede : „Standardi i Tehnički normativi – Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova“, Beograd, 1980. Godine
9. Gordan Mirošević, Franjo Vidaković: „Projektiranje, gradnja i održavanje dalekovoda“, Kigen, Zagreb 2008
10. IEC standard 60099
11. Volker Hinrichsen: „Metal-Oxide Surge arresters in high voltage power systems“, Berlin and Darmstad, September 2011.
12. ABB, High voltage surge arresters buyer's guide
13. INMR magazine, Québec, Canada
14. Journal of Energy , volume 60, Special issue , 2011
15. Brett Ryan Terespolsky: „An Approximation to the Heidler Functionwith an Analytical Integral for EngineeringApplications Using Lightning Currents“, University of Witwatersrand Johannesburg, September 2015
16. Viktor Milardić, Ivo Uglešić, Alain Xemard: „Optimal line surge arrester installatiom using ligtening location system“, International Review of Electrical Engineering, March 2012
17. Juan A. Martinez – Velasco: „Power system transients, parameter determination“, CRC press Taylor and Francis Group,
18. Dieter Kind, Michael Kurrat, Tobias Hartmunt Kopp: „Voltage time characteristics of air Gaps and insulation coordination“, 2016.
19. Zacharias G. Datsios, Pantelis N. Makropoulos, Thomas E. Tsovilis: „Insulator String flashover modeling with the aid of an ATPDraw object“, Aristotle University of Thessaloniki, Septembre 2011.
20. www.cges.me
21. Interna dokumenta CGES-a
22. Ivo Uglešić: „Tehnika visokog napona“, Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, Zagreb 2002. godina
23. Selma Grebović: „Energy stresses of transmission line surge arresters due to lightning discharges “. Graz University of technology, September 2016

24. L. Stenström, J. Lundquist, , “ Selection, dimensioning and testing of line surge arresters ”, ABB Switchgear, Ludvika, Sweden
25. Bullich Massague, Sumper , Villafafila Robles, Rull Duran, „Optimization of Surge Arrester Locations in Overhead Distribution Networks ”, IEEE artical, 1 of April 2015.
26. M. Žarković, prof. dr M. Savić, G. Dobrić, “Tehno-ekonomksa primena linijskih odvodnika prenapona na vodovima”, CIGRE, Srbija
27. T. Judendorfer, S. Pack, M. Muhr, “ Line Arrester Application on a 110 kV High Alpine Overhead Line to reduce Lightning-Caused Outages ”, CIGRE, Cavtat 2008
28. Wang Qinghao, Ge Changxin, Xue Zhicheng, Sun Fengwei, Wu Shaoyong, Li Zhixuan, Shi Dongpeng, Ren Hao, Li Jinye, Ma Hui, Cao Feiyi, “Lightning on transmission lines hazards and Prevention Measures ”
29. C. A. Christodoulou, I. F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “ Lightning performance of high voltage transmision lines protected by surge arresters, A simulation for Hellenic Transmission network ”, 29 th international conference on lightning protection, 23 rd – 26 th June 2008, Uppsala, Sweden.
30. M. Majidi, H. Javadi, “ Feasible Installation of Transmission Line Surge Arresters to Decrease Lightning Transient Over-Voltages in Power Systems ”, International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 6, N. 5,September-October 2011

Ime i prezime autora: Stevan Čanović, Spec. Sci

E T I Č K A I Z J A V A

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

" IZBOR I OPTIMALNA RASPODJELA ODVODNIKA PRENAPONA NA NADZEMNIM VODOVIMA "

moje originalno djelo.

Podnositelj izjave,

Stevan Čanović, Spec. Sci

U Podgorici, dana 30.06.2021. godine