



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
Podgorica

Spec. Sci. Alma Kujović

**ANALIZA UTICAJA MODELA ODVODNIKA
PRENAPONA NA KARAKTERISTIKE
PRENAPONSKE ZAŠTITE U VISOKONAPONSKIM
MREŽAMA**

MASTER RAD

Podgorica, 2025. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Alma Kujović

Datum i mjesto rođenja: 16.03.1990. godine, Bijelo Polje, Crna Gora

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore

Smjer: Energetika i Automatika, 180 ECTS kredita, 2012. godine

Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore

Smjer: Elektroenergetski sistemi, 60 ECTS kredita, 2013.godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Studijski program: Energetika i automatika – Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Analiza uticaja modela odvodnika prenapona na karakteristike prenaponske zaštite u visokonaponskim mrežama

Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 16.10.2024. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 17.02.2025. godine

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

1. Doc. dr Snežana Vujošević, ETF Podgorica

2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica

3. Doc. dr Vladan Durković, ETF Podgorica

Mentor: Prof. dr Vladan Radulović

Komisija za ocjenu rada:

1. Doc. dr Snežana Vujošević, ETF Podgorica

2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica

3. Doc. dr Vladan Durković, ETF Podgorica

Komisija za odbranu rada:

1. Doc. dr Snežana Vujošević, ETF Podgorica

2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica

3. Doc. dr Vladan Durković, ETF Podgorica

Lektor:

Datum odbrane: 03.10.2025. godine

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Alma Kujović, Spec. Sci

ETIČKA IZJAVA

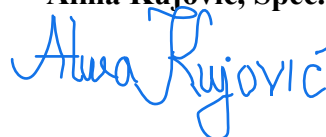
U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

"Analiza uticaja modela odvodnika prenapona na karakteristike prenaponske zaštite u visokonaponskim mrežama"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Alma Kujović, Spec. Sci



U Podgorici, dana 07.07.2025. godine

Predgovor

U ovom magistarskom radu prikazani su rezultati istraživanja u kojoj mjeri različiti modeli odvodnika prenapona utiču na njihove zaštitne karakteristike u visokonaponskim (VN) mrežama.

U postojećoj literaturi dostupan je veći broj modela odvodnika prenapona, gdje se sa više ili manje detalja modeluju njihove određene konstruktivne i/ili električne karakteristike. Međutim, u dostupnim istraživanjima nije data analiza uticaja ovih modela na zaštitne karakteristike odvodnika prenapona.

Dobijeni rezultati i izvedeni zaključci predstavljaju naučni doprinos predloženih istraživanja, s obzirom da ove analize ne egzistiraju u dostupnoj literaturi.

Ovom prilikom izražavam zahvalnost mentoru Prof. dr Vladanu Raduloviću, na uloženom trudu, ukazanim smjernicama i sugestijama kojima me je dodatno motivisao da nastavim ovaj magistarski rad.

Izvod rada

Elektroenergetski sistemi su složeni dinamični sistemi, koji se sastoje iz velikog broja elemenata (izvora, transformatora, prenosnih i distributivnih vodova i potrošača), i karakteriše ih kako geografska tako i matematička dimenzionalnost.

Kompleksnost proračuna u ovim sistemima dodatno povećavaju i modeli elemenata zavisno od obuhvata uticajnih faktora kao i brzina odvijanja elektromagnetnih pojava koje se u sistemu analiziraju. Proračun zaštitnih karakteristika odvodnika prenapona, pri nailasku prenaponskih talasa zahtijeva rješavanje sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina u vremenskom domenu.

Prenapon predstavlja povećanje napona iznad najvišeg napona opreme, i to je vrijednost koja se javlja između faznog provodnika i zemlje ili između faza, čija tjemena vrijednost prelazi tjemenu vrijednost najvišeg napona opreme.

Prenaponi izazivaju dielektrično naprezanje izolacije uređaja i provodnika u visokonaponskim mrežama. Ukoliko izolacija ne izdrži ova naprezanja dolazi do razornog pražnjenja i oštećenja izolacije, što dovodi do pojave kvarova i prekida u napajanju električnom energijom. Odvodnici prenapona imaju zaštitnu ulogu da svojim djelovanjem ograniče vrijednosti prenapona ispod vrijednosti podnosivog napona izolacije opreme i uređaja.

Proces usklađivanja izolacionih karakteristika uređaja i opreme sa zaštitnim karakteristikama odvodnika prenapona i drugih zaštitnih uređaja, predstavlja koordinaciju izolacije. Ovaj proces je izuzetno složen i kompleksan, i u prvom redu zahtijeva poznavanje odziva odnosno reagovanja odvodnika prenapona na nailzak prenapona, odnosno zahtijeva odgovarajuće modele odvodnika prenapona kako bi proračuni zaštitnih karakteristika bili dovoljno precizni i što je moguće jednostavniji za primjenu.

Odvodnici prenapona su elementi sa izraženom nelinearnom naponsko-strujnom karakteristikom. Ova nelinearnost značajno povećava kompleksnost proračuna u elektroenergetskim mrežama, s obzirom da je za svaki vremenski trenutak proračuna potrebno sprovesti određeni broj iteracija određivanja stanja odvodnika prenapona i njegovih strujno-naponskih prilika. Osim toga, značajno se povećava i vrijeme trajanja proračuna i simulacija u softverskim paketima, jer je ovaj postupak potrebno provesti za svaki odvodnik prenapona u analiziranoj mreži.

U dostupnoj literaturi postoji više različitih modela odvodnika prenapona, kojima se sa manje ili više detalja obuhvataju konstruktivne i zaštitne karakteristike. Prevažni cilj svakog od ovih modela jeste povećanje tačnosti proračuna u određenom dijelu vezanom za karakteristiku koja se analizira i posmatra.

Za svaki model odvodnika prenapona je analizirana tačnost dobijenih rezultata u odnosu na odabrani (referentni) model, kao i kompleksnost proračuna i vrijeme trajanja simulacije, za različite uslove eksploatacije odvodnika prenapona (različite vrste i karakteristike prenaponskih talasa, lokacije ugradnje odvodnika prenapona, itd).

Na osnovu dobijenih rezultata utvrđena je mogućnost definisanja opsega primjene pojedinih modela odvodnika prenapona u funkciji uticajnih faktora i uslova eksploatacije.

Očekivani rezultati predstavljaju naučni doprinos predloženih istraživanja, s obzirom da ove analize ne egzistiraju u dostupnoj literaturi. Sprovedene analize omogućuju adekvatnu primjenu odgovarajućih modela odvodnika prenapona uz definisane opsege i uslove.

Abstract

Electric power systems are complex dynamic systems, consisting of a large number of elements (sources, transformers, transmission and distribution lines and consumers), and are characterized by both geographical and mathematical dimensionality.

The complexity of the calculations in these systems is additionally increased by the element models depending on the scope of the influencing factors as well as the speed of the electromagnetic phenomena that are analyzed in the system. The calculation of the protective characteristics of the surge arrester, when the surge occurs, requires the solution of a system of nonlinear differential equations in the time domain.

Overvoltage represents an increase in voltage above the highest voltage of the equipment, and it is the value that occurs between the phase conductor and the ground or between the phases, whose peak value exceeds the peak value of the highest voltage of the equipment. Overvoltages cause dielectric stress of the insulation of devices and conductors in high-voltage networks. If the insulation does not withstand these stresses, a destructive discharge and damage to the insulation occurs, which leads to malfunctions and interruptions in the supply of electricity. Surge arresters have a protective role to limit overvoltage values below the tolerable voltage of equipment and device insulation.

The process of harmonizing the insulation characteristics of devices and equipment with the protective characteristics of surge arresters and other protective devices represents the coordination of insulation. This process is extremely complex, and first of all, it requires knowledge of the response of the surge arrester to the occurrence of a surge, that is, it requires appropriate models of the surge arrester so that the calculations of the protective characteristics are sufficiently accurate and as simple as possible to apply.

Surge arresters are elements with pronounced non-linear voltage-current characteristics. This non-linearity significantly increases the complexity of calculations in power networks, considering that for each moment of calculation, it is necessary to carry out a certain number of iterations of determining the state of the surge arrester and its current-voltage conditions. In addition, the duration of calculations and simulations in software packages increases significantly, because this procedure needs to be carried out for each surge arrester in the analyzed network.

In the available literature, there are several different models of surge arresters, which include more or less detailed construction and protection characteristics. The primary goal of each of these models is to increase the accuracy of calculations in a certain part related to the characteristic that is analyzed and observed. For each surge arrester model, the accuracy of the obtained results was analyzed in relation to the selected (reference) model, as well as the complexity of calculations and the duration of the simulation, for different operating conditions of the surge arrester (different types and characteristics of surge waves, installation locations of the surge arrester, etc.).

On the basis of the obtained results, the possibility of defining the scope of application of certain models of surge arresters in function of influencing factors and operating conditions is determined.

The expected results represent the scientific contribution of the proposed research, given that these analyzes do not exist in the available literature. The conducted analyzes will enable adequate application of appropriate surge arrester models with defined ranges and conditions.

Key words: overvoltages, surge arresters, overhead line, insulation, influencing factors.

SADRŽAJ:

1.	UVOD.....	12
2.	PRENAPONI U VISOKONAPONSKIM MREŽAMA.....	13
2.1	Unutrašnji prenapon.....	13
2.2	Spoljašnji ili atmosferski prenapon.....	14
2.3	Atmosferska pražnjenja.....	16
2.4	Parametri atmosferskog pražnjenja.....	19
2.5	Struja atmosferskog pražnjenja.....	19
2.6	Učestalost atmosferskih pražnjenja.....	20
3.	ODVODNICI PRENAPONA	22
3.1	Odvodnici prenapona-opšte.....	22
3.2	Konstrukcija ZnO odvodnika prenapona.....	23
3.3	Osobine ZnO odvodnika prenapona.....	29
3.4	Termička stabilnost MO odvodnika prenapona.....	31
3.5	Definisanje parametara vezanih za izbor odvodnika prenapona i parametara koji se koriste u postupcima testiranja.....	32
3.6	Izbor MO odvodnika prenapona.....	35
3.6.1	Izbor MO odvodnika za distributivnu mrežu	35
3.6.2	Izbor MO odvodnika za prenosne mreže	37
3.6.3	Izbor MO odvodnika za zaštitu neutralne tačke transformatora.....	38
3.7	Ugradnja odvodnika prenapona.....	40
4.	MODELI ODVODNIKA PRENAPONA.....	42
4.1	Uporedne karakteristike IEEE i IEC standarda.....	42
4.2	Osnovne razlike između standarda IEEE C62.11 i IEC 60099-4.....	43
4.3	IEEE model odvodnika prenapona.....	43
4.4	PINĆETI-ĐANETONI model odvodnika prenapona.....	45
4.5	MARDIRA- SAHA model odvodnika prenapona.....	46
4.6	FERNANDEZ-DIAZ model odvodnika prenapona	46
4.7	Modelovanje IEEE modela odvodnika prenapona u programskom paketu EMTTP®.....	47
5.	UTICAJ MODELA ODVODNIKA PRENAPONA NA ZAŠTITNE KARAKTERISTIKE.....	48
5.1	Modelovanje elemenata elektroenergetskog sistema primjenom EMTTP programskog paketa.....	48
5.1.1.	Modelovanje talasnog oblika struje atmosferskog pražnjenja	48
5.1.2.	Model uzemljivača dalekovodnog stuba.....	49
5.1.3.	Model stuba dalekovoda.....	50
5.1.4.	Model faznog provodnika i zaštitnog užeta.....	53
5.1.5.	Model kanala groma.....	55
5.1.6.	Model preskoka na izolaciji voda.....	56
5.2	Primjer simulacije pojave prenapona i reagovanja odvodnika prenapona pri atmosferskom pražnjenju.....	58
5.2.1.	Udar u zaštitno uže.....	58
5.2.2.	Udar direktno u fazu “a”	63
5.3	Modelovanje op prema različitim U-I karakteristikama i uporedna analiza.....	75
6.	DISKUSIJA I ANALIZA REZULTATA.....	84
7.	ZAKLJUČAK.....	104
8.	LITERATURA.....	106

Sadržaj tabela

<i>Tabela 1. Standardne vrijednosti naznačenog napona mreže U_n i najvišeg pogonskog napona mreže U_m.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 2. Klasifikacija struja odvođenja odvodnika prenapona.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 3. Nivoi zagađenja sredine.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4. Poređenje IEEE standarda sa IEC standardima.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 5. Vrijednosti posmatranih parametara pri atmosferskom pražnjenju u zaštitno uže (maksimalne vrijednosti) kada ne postoje ugrađeni LOP.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 6. Vrijednosti posmatranih parametara pri atmosferskom pražnjenju u fazu "a"</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 7. Energetsko opterećenje OP pri pojavi prenapona.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 8. Maksimalna vrijednost napona u tački mjerenja ispred postrojenja.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 9. Procentualna razlika maksimalne vrijednosti napona za različite tipove odvodnika prenapona.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 10. Podaci za provodnik i zaštitno uže.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 11. Podaci za odvodnike prenapona.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 12. Podaci za odvodnike prenapona i vrijednosti energije kojom su opterećeni odvodnici prenapona prilikom atmosferskog pražnjenja.....</i>	<i>98</i>

Sadržaj slika

Slika 1. Prekidački prenapon.....	13
Slika 2 Atmosfersko pražnjenje.....	14
Slika 3 Podjela prenapona prema vremenu trajanja i faktoru prenapona.....	15
Slika 4 Putujući talas prenapona.....	16
Slika 5 Mogući načini atmosferskog pražnjenja.....	16
Slika 6 Geometrija stuba za objašnjenje EGM.....	17
Slika 7 Izložena površina faznog provodnika bez zaštitnog užeta.....	18
Slika 8 Prikaz standardnog atmosferskog talasa oblika 1,2/50 μ s.....	20
Slika 9 Uporedna analiza napona koje podnosi oprema i vrijednosti prenapona sa i bez OP.....	22
Slika 10 Uporedna U-I karakteristika SiC i ZnO odvodnika prenapona.....	23
Slika 11 Poprečni presjek ZnO odvodnika prenapona	23
Slika 12 Mikroskopski pregled metal-oksidnog diska.....	24
Slika 13 Konstrukcija cinkoksidnog odvodnika prenapona sa porcelanskim kućištem.....	24
Slika 14 Detalji konstrukcije metaloksidnog odvodnika prenapona	26
Slika 15 Konstrukcija metal oksidnih odvodnika prenapona -porculansko kuciste.....	27
Slika 16 Konstrukcija metal oksidnih odvodnika prenapona -polimerno kućište	27
Slika 17 Distributivni odvodnik sa polimernim kućištem.....	28
Slika 18 Trofazni GIS odvodnik.....	28
Slika 19 Visokonaponski odvodnici prenapona.....	29
Slika 20 Strujno-naponska karakteristika ZnO odvodnika prenapona.....	30
Slika 21 Zagrijavanje i hlađenje MO odvodnika.....	31
Slika 22 Međusobni odnos radnog faznog napona mreže U, trajnog radnog napona odvodnika U_c , naznačenog napona odvodnika U_r i preostalog napona odvodnika U_p	33
Slika 23 Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena u odnosu na naznačeni napon U_r	36
Slika 24 Odabir električnih karakteristika MO odvodnika prenapona prema EN 60099-5	39
Slika 25 Odabir kućišta MO odvodnika prenapona prema EN 60099-5.....	39
Slika 26 Načini ugradnje linijskih odvodnika prenapona na stubovima dalekovod.....	40
Slika 27 Načini ugradnje odvodnika prenapona u postrojenju.....	41
Slika 28 Načini ugradnje linijskih odvodnika prenapona.....	41
Slika 29 IEEE model odvodnika prenapona.....	43
Slika 30 Nelinearne U-I karakteristike otpornika A_0 i A_1	44
Slika 31 Pinčeti-Đanetoni model odvodnika prenapona.....	45
Slika 32 MARDIRA-SAHA model odvodnika prenapona.....	46
Slika 33. FERNANDEZ-DIAZ model odvodnika prenapona.....	46
Slika 34 IEEE model odvodnika prenapona predstavljen u EMTP.....	47
Slika 35. Cigre model talasnog oblika struje atmosferskog pražnjenja.....	49
Slika 36. Jonizacijski model uzemljivača.....	50
Slika 37. Jednostavni distributivni model stuba dalekovoda	51
Slika 38. " Multy-story" model stuba dalekovoda.....	51
Slika 39. Modelovanje različitih tipova stubova u EMTP-u.....	52
Slika 40. Frekvencijski zavisani model nadzemnog voda.....	54
Slika 41. Numerički podaci kojima se definiše geometrija stubnog mjesta i položaj vodova..	54
Slika 42. Komponente struje atmosferskog pražnjenja	56
Slika 43. Izgled preskoka na izolaciji voda.....	57
Slika 44. Modelovanje preskoka na izolaciji voda.....	57

<i>Slika 45. Modelovanje dijela 110 kV mreže.....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 46. Udar u zaštitno uže, 10kA, bez OP na stubovima.....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 47. Udar u zaštitno uže, 20kA, bez OP na stubovima.....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 48. Udar u zaštitno uže, 30kA, bez OP na stubovima.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 49. Udar u zaštitno uže, 40kA, bez OP na stubovima.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 50. Udar u zaštitno uže, 50kA, bez OP na stubovima.....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 51. Udar u zaštitno uže, 100kA, bez OP na stubovima.....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 52. Uporedna analiza uticaja prenapona na vrijednost faznih napona u tački mjerenja 1.....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 53. Udar u fazu "a", 2kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 54. Udar u fazu "a", 2.9kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 55. Udar u fazu "a", 2.9kA, sa OP na stubu, sa OP ispred postrojenja.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 56. Udar u fazu "a", 10kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 57. Udar u fazu "a", 10kA, sa OP na stubu, sa OP ispred postrojenja.....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 58. Udar u fazu "a", 40kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja.....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 59. Udar u fazu "a", 40kA, sa OP na stubu, sa OP ispred postrojenja.....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 60. Uporedna analiza uticaja prenapona na vrijednost faznih napona u tački mjerenja 1.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 61. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 2.9 kA.....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 62. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 10 kA.....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 63. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 40 kA.....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 64. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 100 kA.....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 65. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 2A.....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 66. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 10kA.....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 67. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 100kA.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 68. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 100kA, kada ne postoje ugrađeni linijski OP.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 69. Dio 110 kV mreže modelovan u EMTP-u.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 70. U-I karakteristika za EMTP model OP i modelovanje u EMTP.....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 71. U-I karakteristika za SAVIĆ model OP i modelovanje u EMTP.....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 72. U-I karakteristika za IEEE model OP i modelovanje u EMTP.....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 73. U-I karakteristika za TEORIJSKI model OP i modelovanje u EMTP.....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 74. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju amplitude struje 10 kA.....</i>	<i>77</i>
<i>Slika 75. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 10 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu.....</i>	<i>77</i>
<i>Slika 76. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 40 kA.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 77. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 40 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 78. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 60 kA.....</i>	<i>79</i>
<i>Slika 79. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 60 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu.....</i>	<i>79</i>
<i>Slika 80. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 67 kA.....</i>	<i>80</i>

Slika 81. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 67 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu.....	80
Slika 82. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 100 kA.....	81
Slika 83. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 100 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu.....	81
Slika 84. Grafički prikaz vrijednosti napona u odnosu na vrijednost amplitude stuje atmosferskog pražnjenja, za različite modele odvodnika prenapona.....	83
Slika 85. Modelovanje dionice DV 2x400 kV Lastva-Trebinje i Lastva-Pljevlja (dionica Lastva-Čevo) u EMTP-u.....	84
Slika 86. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br.54, $I_{max}=20$ kA.....	86
Slika 87. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 55, $I_{max}=20$ kA.....	87
Slika 88. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 56, $I_{max}=20$ kA.....	87
Slika 89. Vremenska promjena napona na fazama, tačka mjerenja, $I_{max}=20$ kA.....	88
Slika 90. Vremenska promjena napona, postrojenje, $I_{max}=20$ kA.....	88
Slika 91. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 54, $I_{max}=100$ kA.....	89
Slika 92. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 55, $I_{max}=100$ kA.....	89
Slika 93. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 56, $I_{max}=100$ kA.....	90
Slika 94. Vremenska promjena napona na fazama, tačka mjerenja, $I_{max}=100$ kA.....	90
Slika 95. Vremenska promjena napona, postrojenje, $I_{max}=100$ kA.....	91
Slika 96. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 54, $I_{max}=200$ kA.....	91
Slika 97. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 55, $I_{max}=200$ kA.....	92
Slika 98. Vremenska promjena napona na izolatorima na sm br. 56, $I_{max}=200$ kA.....	92
Slika 99. Vremenska promjena napona na fazama, tačka mjerenja, $I_{max}=200$ kA.....	93
Slika 100. Vremenska promjena napona, postrojenje, $I_{max}=200$ kA.....	93
Slika 101. Energija kroz LOP za struju atmosferskog pražnjenja od 50 kA.....	94
Slika 102. Energija kroz LOP za struju atmosferskog pražnjenja od 100 kA.....	95
Slika 103. Energija kroz LOP za struju groma od 200 kA.....	95
Slika 104. Energija kroz OP ispred postrojenja za struju atmosferskog pražnjenja od 50 kA..	96
Slika 105. Energija kroz OP ispred postrojenja za struju atmosferskog pražnjenja od 100 kA..	96
Slika 106. Energija kroz OP ispred postrojenja za struju atmosferskog pražnjenja od 200 kA.	97
Slika 107. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i Savić modelu, $I_{max}=20$ kA.....	99
Slika 108. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i Savić modelu, $I_{max}=100$ kA.....	99
Slika 109. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i Savić modelu, $I_{max}=200$ kA.....	100
Slika 110. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i EMTP modelu, $I_{max}=20$ kA.....	100
Slika 111. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i EMTP modelu, $I_{max}=100$ kA.....	101
Slika 112. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i EMTP modelu, $I_{max}=200$ kA.....	101
Slika 113. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i TEOERIJSKI modelu, $I_{max}=20$ kA.....	102
Slika 114. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i TEOERIJSKI modelu, $I_{max}=100$ kA.....	102
Slika 115. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i TEOERIJSKI modelu, $I_{max}=200$ kA.....	103

1. UVOD

Sve veću potrebu za električnom energijom potrebno je obezbijediti kroz izgradnju novih izvora električne energije, kroz razvoj i širenje elektroprenosne i elektrodistributivne mreže te kroz održavanje i unapređenje postojećih elemenata cjelokupnog energetskeg sistema države.

U ovom radu akcenat je stavljen na postizanje efikasne prenaponske zaštite, kao jednog od najznačajnijih koraka u postizanju sigurnosti funkcionisanja energetskeg sistema.

Zaštita izolacije uređaja i provodnika u elektroenergetskim mrežama danas se dominantno ostvaruje primjenom odvodnika prenapona (OP). Adekvatnost i performanse prenaponske zaštite u fazi projektovanja mreža i postrojenja se utvrđuju na osnovu proračuna naponskih i strujnih prilika u posmatranim mrežama. Osnov ovih proračuna su modeli elemenata mreža i postrojenja, od čije tačnosti u najvećoj mjeri zavisi i preciznost rezultata. Sa druge strane, elektroenergetski sistemi su složeni, dinamički i visoke dimenzionalnosti, što dovodi do problema u postizanju rezultata proračuna u realnom vremenu. Iz toga razloga se nastoje primjenjivati modeli elemenata i metode proračuna koje će dati rezultate odgovarajuće tačnosti u očekivano razumnoj trajanju proračuna.

S obzirom da su odvodnici prenapona nelinearni elementi, njihov uticaj na tačnost rezultata i vrijeme trajanja proračuna je značajan.

Cilj rada je da se analizira uticaj odabranog modela odvodnika prenapona pri proračunima prostiranja prenaponskih talasa na vrijednosti karakteristika prenaponske zaštite i odrede opsezi primjene pojedinih modela. Dobijeni rezultati će omogućiti adekvatan izbor modela odvodnika prenapona u zavisnosti od uticajnih faktora.

Istraživanje u ovom radu je zasnovano na analizi uticaja različitih modela odvodnika prenapona na njihove zaštitne karakteristike u zavisnosti od različitih uticajnih faktora. Navedena analiza treba da determiniše pokazatelje tačnosti, rezultate proračuna zaštitnih karakteristika, kompleksnost proračuna, numeričku stabilnost i trajanje proračuna.

Cilj istraživanja je utvrđivanje pojedinih modela odvodnika prenapona u zavisnosti od različitih uticajnih faktora, kao i određivanje opsega tačnosti pojedinih modela.

Rad se sastoji od 8 poglavlja.

U prvom, uvodnom, poglavlju date su uvodne napomene o temi istraživanja, metodologiji i očekivanim rezultatima.

Drugo poglavlje, prenaponi u VN mrežama, daje opis prenapona koji se pojavljuju u elektroenergetskim mrežama i sistemima, njihove podjele i karakteristike. U trećem poglavlju će detaljno biti opisani odvodnici prenapona, njihova konstrukcija, električne karakteristike, parametri i način njihovog izbora i određivanje lokacije ugradnje.

U četvrtom poglavlju će biti predstavljeni različiti modeli odvodnika prenapona, zavisno od njegovih konstruktivnih karakteristika i/ili modelovanja njihovog odziva u eksploataciji.

U petom poglavlju biće prezentovani rezultati proračuna i simulacija uticaja modela odvodnika na njihove zaštitne karakteristike u zavisnosti od uslova eksploatacije (vrste prenaponskih talasa, mjesta ugradnje itd).

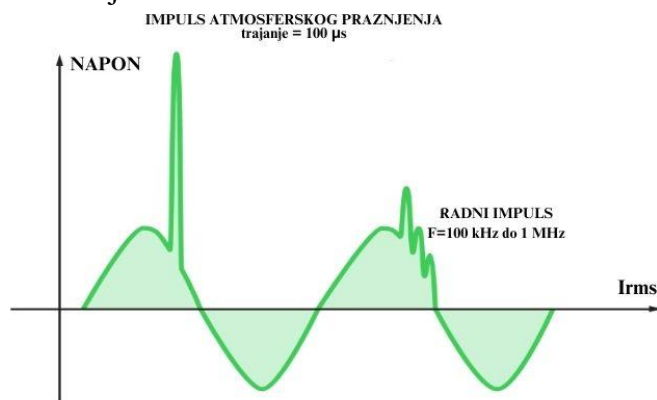
U šestom poglavlju biće data diskusija i analiza dobijenih rezultata i predloženi opsezi primjene pojedinih modela odvodnika prenapona.

U sedmom poglavlju dati su zaključci i smjernice za dalji rad. I na kraju je prikazan spisak korišćene literature.

2. PRENAPONI U VISOKONAPONSKIM MREŽAMA

Prenapon predstavlja svako povećanje napona čija tjemena vrijednost prelazi tjemenu vrijednost odgovarajućeg faznog i/ili linijskog napona opreme i/ili mreža, kao što je prikazano na slici 1.

Prenaponi naprežu izolaciju opreme i mogu da dovedu do njenog razornog pražnjenja čime ona gubi svoja dielektrična svojstva.



Slika 1. Prekidački prenapon

Podjela prenapona se može izvršiti u dvije grupe [3]:

- Unutrašnji prenaponi
- Spoljašnji prenaponi

2.1 Unutrašnji prenapon

Unutrašnji prenaponi nastaju zbog sklopnih operacija, pri određenim uklopnim stanjima u VN mrežama.

Podjela unutrašnjih prenapona se vrši prema uzroku nastanka:

- komutacione prenapone
 - privremene prenapone
- Komutacioni (sklopni) prenaponi- nastaju pri manipulacijama u postrojenju. Naročito pri operacijama na rastavljačima dolazi do pojave vrlo brzih sklopnih prenapona, zbog višestrukih paljenja i gašenja električnog luka pri uključivanju ili isključivanju malih kapacitivnih struja. Učestanost im varira od nekoliko stotina Hz, do nekoliko desetina hiljada Hz. Nastaju usljed sledećih aktivnosti: uklapanje neopterećenog dalekovoda, isklapanje malih kapacitivnih struja, isklapanje malih induktivnih struja, isklapanja pri kvarovima.
 - Privremeni (povremeni) prenaponi nastaju usljed zemljospoja, naglog rasterećenja, rezonanse, ferorezonanse. Izazivaju probleme u radu odvodnika prenapona ili naponskih mjernih transformatora. Traju od nekoliko perioda napona industrijske učestanosti, do nekoliko sati, a trajanje prenapona je važno zato što od te karakteristike zavisi proboj izolacije. Privremeni prenaponi su Ferantijev efekat, ferorezonansa, prenaponi usljed kvarova (zemlj spoj, privremeni prenaponi uzrokovani ispadom tereta).

2.2 Spoljašnji ili atmosferski prenapon

Spoljašnji prenaponi nastaju usljed atmosferskog pražnjenja u elemente elektroenergetskog sistema, u objekte na zemlji ili u zemlju u blizini elemenata i objekata.

Atmosferske prenapone karakteriše:

Amplituda (temena vrijednost) U_m

Polaritet

Vreme trajanja čela σ_ϵ

Vreme trajanja začelja σ_z

Atmosferskim pražnjenjima može doći do indukovanja prenapona i na obližnje objekte i vodove na kojima nije bilo direktnog udara, pa se taj indukovani napon širi na obje strane voda, te u čvornim tačkama izaziva pojavu prenapona. Na slici 2 je prikazano atmosfersko pražnjenje u zoni elektroenergetskih objekata.

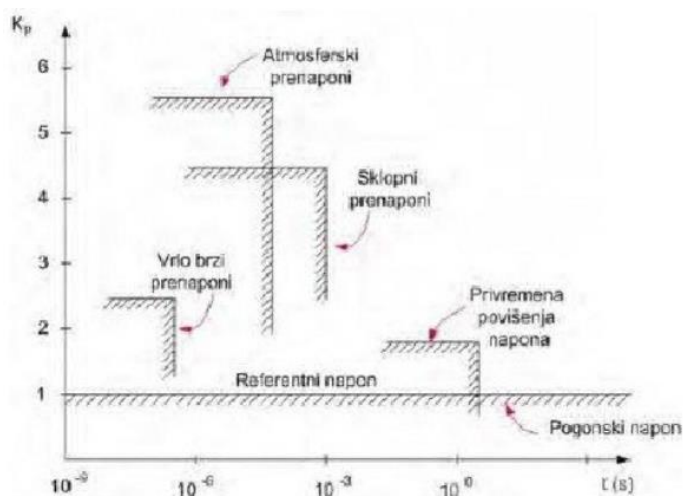


Slika 2. Atmosfersko pražnjenje

Dosta rijetka ali nije nemoguća pojava da se desi direktan udar u fazni provodnik, gdje se udarni talas širi na obje strane od mjesta udara, a vrijednost prenapona se dobije kao proizvod struje atmosferskog pražnjenja i talasnog otpora voda. Ovo je najkritičniji slučaj pri razmatranjima kada se realizuje prenaponska zaštita. Kao treći slučaj razmatra se bliski udar atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže ili u stub dalekovoda, uz preskok na fazni provodnik, ili usljed udara u fazni provodnik, uz preskok na stub dalekovoda. Otpor uzemljenja stuba dalekovoda ima veliki uticaj na visinu prenapona.

Postoje i drugi tipovi prenapona čije posljedice takođe nijesu zanemarljive.

Na slici 3 su prikazani naponi prema dužini trajanja i iznosu, gdje je K_p je faktor prenapona.



Slika 3. Podjela prenapona prema vremenu trajanja i faktoru prenapona

Faktor prenapona računa se iz izraza [28]:

$$K_p = \frac{U_{max}}{\sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{3}}} = 1,225 \frac{U_{max}}{U} \quad (1)$$

Gdje je:

U_{max} - amplituda prenapona U_{max}

U - linijski napon, odnosno efektivna vrijednost pogonskog napona

Prenaponi prostorno predstavljeni na karakteristici, prema faktoru prenapona i vremenu trajanja (slika 3), opisani su u nastavku: [4]

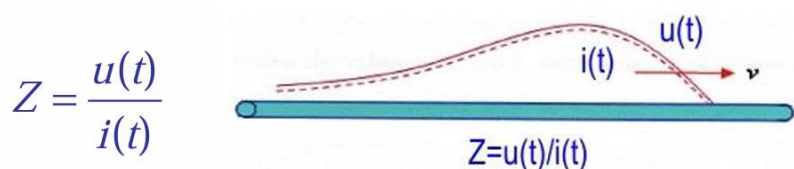
1. Privremena povišenja napona
 - Frekvencija: niske frekvencije, dugo trajanje i blago prigušen;
 - porijeklo: kvarovi, manipulacije, nelinearnost, Ferrantijev efekat;
 - MO odvodnici prenapona, filteri, reaktori;
2. Sklopni prenaponi
 - Frekvencija: vrijeme porasta između 20 μ s i 5000 μ s, vrijeme trajanja talasa < 20ms;
 - porijeklo: naelektrisanje i razelektrisanje vodova, pojava kvarova, otklanjanje kvarova, isključivanje kapacitivnih baterija ili induktivne struje, indukcija usljed atmosferskog pražnjenja;
 - zaštitna oprema: odvodnici prenapona, filteri, vazдушna izolacija;
3. Atmosferski prenaponi
 - Frekvencija: vrijeme porasta između 0,1 μ s i 20 μ s, vrijeme trajanja < 300 μ s;
 - zaštitna oprema: odvodnici prenapona, filteri, izolatori;
4. Vrlo brzi prenaponi (VFT)
 - Frekvencija: vrijeme porasta < 0,1 μ s, sa ili bez superponiranih oscilacija na frekvenciji 30 kHz < f < 100 MHz;
 - porijeklo: prekidači u GIS postrojenjima, isključenja motora;
 - zaštitna oprema: odvodnici prenapona, filteri, izolatori;

Izolacija može podnijeti više uzastopnih kratkotrajnih prenapona, dok prenaponi dužeg trajanja izazivaju oštećenje izolacije i ako su nižih amplituda od kratkotrajnih. Tako atmosferski, sklopni i ultra brzi prenaponi dostižu amplitudu poslije kratkog vremena, nakon čega se prigušuju i nestaju. Atmosferski prenaponi imaju najvišu amplitudu i najkraće traju, dok privremeni prenaponi traju duže i amplituda im je tek nekoliko veća od najvisočijeg napona u mreži. [3]

2.3. Atmosferska pražnjenja

Atmosferski prenaponi spadaju u red prenapona vrlo brzog porasta čela, kratkog trajanja, ali dostižu veoma visoke vrijednosti zbog čega predstavljaju i najveću opasnost za izolacioni sistem elektroenergetskih objekata.

Atmosfersko pražnjenje u provodnik proizvodi putujuće talase napona $u(t)$ i struje $i(t)$ koji uzrokuju naponska naprezanja u sistemu, kao što je prikazano na slici 4.

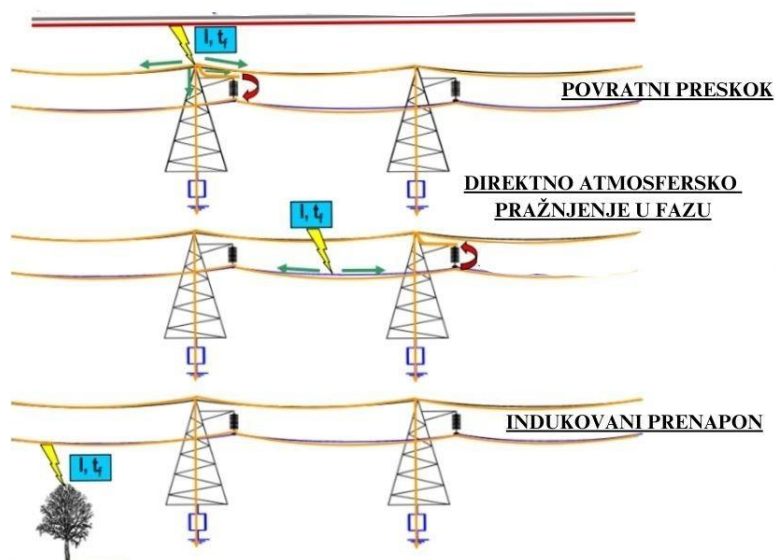


Slika 4. Putujući talas prenapona

Atmosferski prenaponi nastaju usljed direktnog atmosferskog pražnjenja u nadzemni vod, stub ili u neposrednu blizinu. Kada se prenapon indukuje na vod udar se naziva indirektni udar. [22]

Atmosferska pražnjenja u nadzemne vodove (slika 5) se prema mjestu udara, mogu podijeliti:

- na atmosfersko pražnjenje u zaštitno uže ili stub,
- na atmosfersko pražnjenje direktno u fazne provodnike,
- atmosfersko pražnjenje u stub;



Slika 5. Mogući načini atmosferskog pražnjenja

Pri atmosferskim pražnjenjima u vrh stuba ili zaštitno uže, kada su struje atmosferskog pražnjenja velikih amplituda, česta je pojava da potencijal konzole stuba u odnosu na fazni provodnik poraste iznad podnosivog napona izolacije. Tada dolazi do pojave povratnog preskoka, sa konzole stuba na fazni provodnik. Najčešća je pojava da atmosferska pražnjenja najvećih amplituda pogađaju zaštitno uže dalekovoda, koje štiti fazne provodnike. Zaštita pomoću zaštitnog užeta nikad nije potpuna i pored nje dešava se direktno atmosfersko pražnjenje u fazni provodnik. [23]

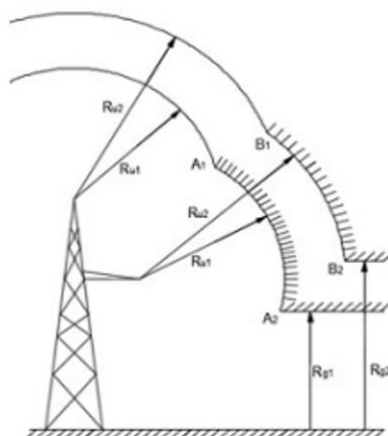
Geometrijske dimenzije dalekovodnog stuba utiču na to koje amplitude struje atmosferskog pražnjenja mogu udariti direktno u fazni provodnik. Određuju se elektrometrijskim modelom kojim se utvrđuje vjerovatnoća raspodjele amplituda struja atmosferskog pražnjenja direktno u fazni provodnik i u slučaju kada postoji zaštitni provodnik. [24]

Primjenom elektrometrijskog modela vrši se pretpostavka da je dužina poslednjeg skoka skokovitog lidera srazmerna amplitudi struje atmosferskog pražnjenja i računa se prema izrazu [5]:

$$R_u = k * I^n \quad (2)$$

gdje su: k i n empirijske konstante (k: od 6 do 10, n: 0.65 do 0.8)

Zona zaštite faznog provodnika se određuje prema slici 6, na kojoj je prikazana dispozicija dalekovodnog stuba za koji se određuje.



Slika 6. Geometrija stuba za objašnjenje EGM

Oznake na slici predstavljaju:

R_{u1} - udarno rastojanje do faznog provodnika odnosno do zaštitnog užeta za slučaj amplitude struje atmosferskog pražnjenja I_1 ;

R_{u2} - udarno rastojanje do faznog provodnika odnosno do zaštitnog užeta za slučaj amplitude struje atmosferskog pražnjenja I_2 , pri čemu je $I_2 > I_1$;

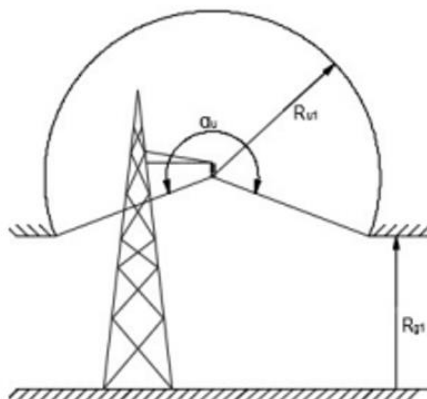
R_{g1} - udarno rastojanje do zemlje za slučaj amplitude struje atmosferskog pražnjenja I_1 ;

R_{g2} - udarno rastojanje do zemlje za slučaj amplitude struje atmosferskog pražnjenja I_2 , pri čemu je $I_2 > I_1$;

Pri projektovanju nadzemnih vodova, za udarno rastojanje od glave skokovitog lidera do zemlje (R_g), usvaja se nešto manja vrijednost u odnosu na udarno rastojanje prema faznim

provodnicima ili zaštitnim užadima. Za koeficijent korekcije udarnog rastojanja prema zemlji je usvojena vrijednost 1 (kreće se u opsegu od 0.64 do 1).

U slučaju kada ne postoji zaštitno uže, izloženost faznog provodnika atmosferskom pražnjenju je prikazana na slici 7.



Slika 7. Izložena površina faznog provodnika bez zaštitnog užeta

Vjerovatnoća da i pored postojanja zaštitnog užeta može doći do udara atmosferskog pražnjenja amplitude I_1 određuje se iz odnosa površine faznog provodnika u prisustvu zaštitnog užeta-ugao formiran između faznog provodnika i luka A_1A_2 na slici 16, i površine faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta -ugao označen sa a_u na slici 7 [5]:

$$P(I) = \frac{a_1(I)}{a_u(I)} \quad (3)$$

Shodno elektrogeometrijskom modelu svako atmosfersko pražnjenje čija je očekivana amplituda struje I_1 (I_2), a čija se glava skokovitog lidera nađe u kružnom isečku koji formira fazni provodnik i luk A_1A_2 (B_1B_2), uvijek dovodi do pražnjenja u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta, odnosno da manji zaštitni ugao, pruža veću sigurnost za fazne provodnike.

Atmosferska pražnjenja mogu imati višestruki karakter i sadrže do 10 udara, međutim od 45% do 55% udara atmosferskog pražnjenja sadrži samo jedan udar [25]. Kod višestrukih udara pražnjenja, pojedinačni udari imaju naelektrisanje od 8-10 kulona.

Ukupno naelektrisanje koje se neutrališe tokom jednog udara predstavlja udarnu količinu elektriciteta, obuhvata struju skokovitog lidera i struju glavnog pražnjenja i računa se po obrascu [25]:

$$q = \int i dt \quad (4)$$

Ukupna količina elektriciteta koja proteče u zemlju u toku svih n pražnjenja se računa [25]:

$$q_u = \sum_{i=1}^n \int i dt \quad (5)$$

2.4 Parametri atmosferskog pražnjenja

Najvažnije karakteristike atmosferskog pražnjenja su [3]:

- struja atmosferskog pražnjenja
- napon koji se javlja prilikom udara
- oblik napona / struje
- polaritet struje
- opterećenje koje struja atmosferskog pražnjenja odnosno oblik imaju
- učestanost pojave struje atmosferskog pražnjenja

2.5 Struja atmosferskog pražnjenja, odnosno, udar atmosferskog pražnjenja se posmatra kao strujni izvor koji ima vrijednost struje od nekoliko kA do preko 200 kA, nema konstantnu vrijednost već vrlo brzo naraste do maksimalne vrijednosti, zatim postepeno opada. Maksimalna vrijednost struje atmosferskog pražnjenja se naziva amplituda struje atmosferskog pražnjenja. Struja atmosferskog pražnjenja može imati pozitivan i negativan polaritet, 90% udara prema zemlji je negativnog polariteta.

Zakoni raspodjele vjerovatnoće amplituda struja atmosferskog pražnjenja se određuju na osnovu velikog broja mjerenja i različiti su u više zemalja. Relacija (6) definiše zakon raspodjele vjerovatnoće prema [3]:

$$P(I) = e^{-\frac{I_m}{\alpha}} \quad (6)$$

gdje je:

I_m -struja pražnjenja

α -konstanta koja se određuje eksperimentalno na osnovu rezultata mjerenja za posmatranu oblast ili državu, zavisi od nadmorske visine oblasti.

Zakoni raspodjele struja atmosferskog pražnjenja se primjenjuju pri projektovanju gromobranske zaštite objekata široke primjene, uz posebnu pažnju na elektroenergetske objekte.

Vjerovatnoća amplitude struje atmosferskog pražnjenja može se odrediti i preko Andersenovog izraza [3]:

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (7)$$

Amplituda strujnih talasa predstavlja maksimalnu vrijednost struje u datom trenutku i karakterističnu veličinu u datom trenutku, jer svaki udar atmosferskog pražnjenja ima svoju vrijednost. Vrijeme od početka pojave do postizanja amplitude struje naziva se čelo talasa. Vrijeme začelja talasa predstavlja vrijeme koje je potrebno da talas dostigne svoju maksimalnu vrijednost a zatim opadne na polovinu svoje maksimalne vrijednosti.

Strmina talasa se određuje iz izraza [3]:

$$S = \alpha I^\beta \quad (8)$$

Strmina struje atmosferskog pražnjenja predstavlja promjene koje nastaju pri udaru atmosferskog pražnjenja u objekat i zavise isključivo od brzine promjene koja se odvija. Struje atmosferskog pražnjenja sa brзом promjenom imaju veliku strminu a one sa sporom

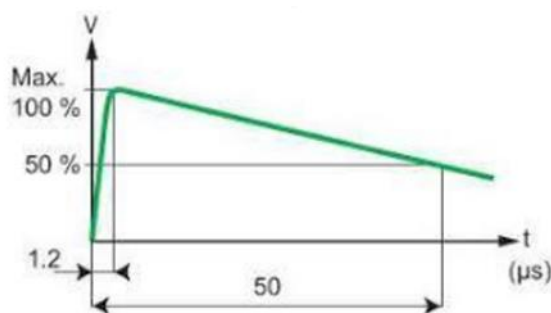
promjenom imaju malu strminu. Nagle promjene struje stvaraju brzo promjenljiva magnetna polja, a od brzine promjene magnetnog polja zavisi veličina napona koji se indukuje na objektima unutar tog polja i računaju se iz izraza [3]:

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (9)$$

Strmina struje atmosferskog pražnjenja računa se kao odnos vrijednosti amplitude struje i trajanja čela talasa [3]:

$$s = \frac{di}{dt} \text{ [kA/}\mu\text{s]} \quad (10)$$

Taladni impuls napona koji se pojavljuje na elementima elektroenergetskih mreža se modeluje pomoću talasa oblika 1,2/50 μs , kao što je prikazano na slici 8., gdje 1,2 predstavlja vrijeme trajanja čela, dok je vrijeme od 50 μs vrijeme trajanja začelja talasa.



Slika 8. prikaz standardnog atmosferskog talasa oblika 1,2/50 μs

T1- vrijeme porasta do 100% vrijednosti-vrijeme čela talasa;

T2- vrijeme porasta do 50% vrijednosti-vrijeme začelja;

Napon koji se javlja usljed atmosferskog pražnjenja je parametar vrlo velike vrijednosti koji se teško određuje, a definiše se kao razlika potencijala između zemlje i oblaka koji se javlja usljed atmosferskog pražnjenja i reda je veličine 10^7 V. [1]

Napon se određuje kao proizvod vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja i impedanse kanala atmosferskog pražnjenja [3]:

$$U = Z_g * I_m \quad (11)$$

2.6 Učestalost atmosferskih pražnjenja

Gustina pražnjenja u zemlju se računa iz izraza [3]:

$$N_g = 0.04 * T_d^{1,35} \text{ [km}^{-2} \text{ god}^{-1} \text{] m} \quad (12)$$

Gdje:

T_d predstavlja broj grmljavinskih dana u toku godine i koji se dobija iz izokerauničke karte. Keraunički nivo se definiše kao prosječan broj dana sa grmljavinom u toku godine na određenom području koji se određuje posmatranjem, i bitan je podatak pri projektovanju zaštite od atmosferskih prenapona.

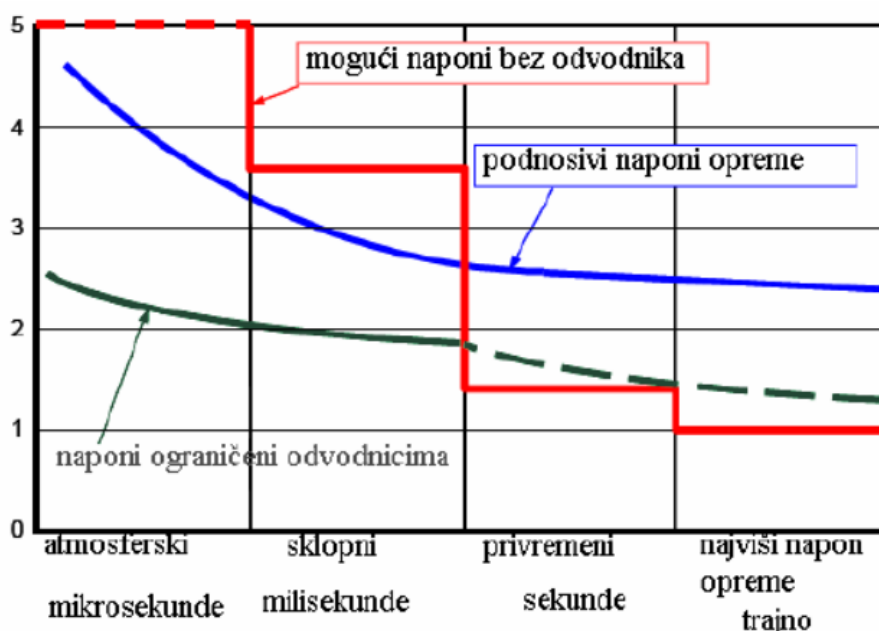
Broj udara atmosferskog pražnjenja u dalekovode, prema IEEE standardu, se određuje prema izrazu [3]:

$$N_L = N_g * (w + 4 * h_z^{1,09}) * 10^3 \text{ [km}^{-2}\text{god}^{-1}\text{]} \quad (13)$$

3. ODVODNICI PRENAPONA

3.1 Odvodnici prenapona-opšte

Uređaji koji služe kao zaštita od prenapona energetskim transformatorima, visokonaponskim vodovima i dr. vrijednoj opremi u energetskim postrojenjima, nazivaju se odvodnici prenapona. Izvode se kao nelinearni otpornici, koji pri pojavi prenapona smanjuju svoju otpornost odvođeći dio energije u zemlju. Pri nestanku prenapona njihova otpornost opet raste. Uloga im je da smanje amplitudu i strminu prenapona. Uglavnom se ugrađuju između faznih provodnika i zemlje, postavljaju se paralelno sa opremom, ispred postrojenja, transformatora, i tako preusmjeravaju struju koja nastane usljed prenapona. Na slici 9 je grafički prikazana uporedna analiza vrijednosti napona koji podnosi oprema i prenapona sa i bez ugrađenih odvodnika prenapona.



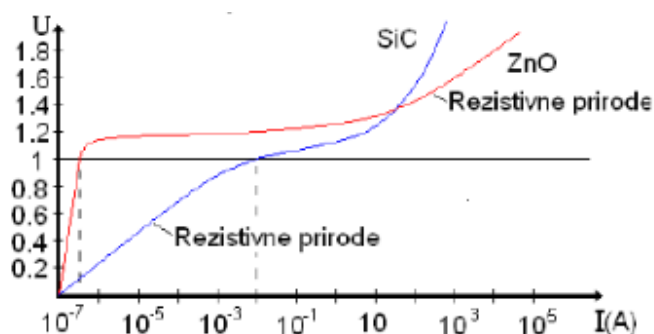
Slika 9. Uporedna analiza napona koje podnosi oprema, i vrijednosti prenapona sa i bez odvodnika prenapona

Odvodnici prenapona se dijele se u dvije grupe:

1. Silicijum-karbidni odvodnici prenapona (sa iskrištem-SiC)
2. Metal oksidni (MO) ili cink oksidni odvodnici prenapona (ZnO)

Razvoj nauke doprinio je isključivom korišćenju druge grupe odvodnika prenapona. Osnovna prednost ZnO u odnosu na SiC odvodnike prenapona jeste što nemaju iskrište i imaju vrlo povoljnu U-I karakteristiku. Sastoje se od pločica od nelinearnog otpornog materijala (koeficijent nelinearnosti je znatno veći nego kod SiC otvodnika prenapona), serijski vezanih, koje su smještene u odgovarajuće kućište. Ovi odvodnici prenapona nemaju problem sa povratnom strujom, kao što je to slučaj sa SiC odvodnikom prenapona, jer se nestankom prenapona odvodnik odmah vraća u stanje velike otpornosti. ZnO odvodnici prenapona nemaju

napon reagovanja, te poslije reagovanja napona preko koljena, dolazi do provođenja struje bez naglog prelaska iz faze u kojoj provodi malu struju, u fazu kada provodi veliku struju. U-I karakteristike SiC i ZnO odvodnika prenapona prikazane su na slici 10.



Slika 10. Uporedna U-I karakteristika SiC i ZnO odvodnika prenapona

3.2 Konstrukcija ZnO odvodnika prenapona

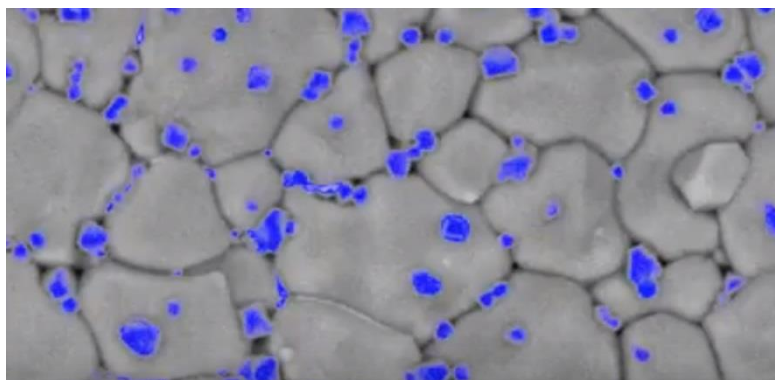
Glavni element odvodnika prenapona jesu metal-oksidni varistori (diskovi), koji predstavljaju vrstu nelinearnog otpornika u obliku diska, kao što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Poprečni presjek ZnO odvodnika prenapona

Metal-oksidni varistori mogu da promijene svoju otpornost, od visoke koju imaju pri normalnim uslovima rada, do vrlo niske vrijednosti, ukoliko dođe do pojave prenapona. Metal oksidni varistori (MOV) mogu podnijeti višestruka atmosferska pražnjenja jer su njihove karakteristike dostigle vrlo visok nivo, ulaganjem u dizajn i proizvodnju.

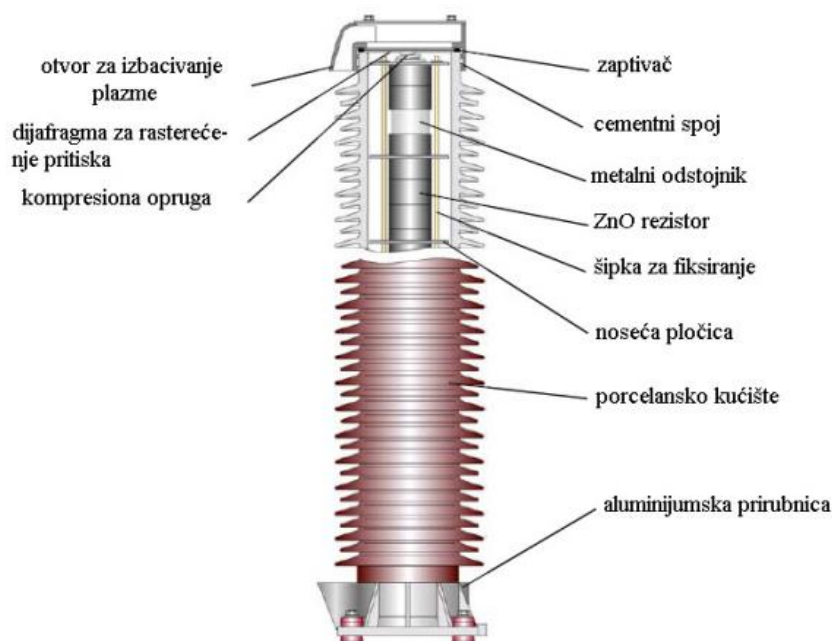
Mikroskopski izgled MOV-a prikazan je na slici 12.



Slika 12. Mikroskopski pregled metal-oksidnog diska

Diskovi se sastoje od cink-oksidnih kristala nastalih u toku visokotemperaturnog procesa, dodavanjem aditiva u tečnom stanju. Granice između kristalnih zrnadi uspostavljaju električne karakteristike diskova. Dodaci na granicama kristala se ponašaju kao prekidači. Ovi dodaci sadrže okside drugih materijala kao što su kobalt, nikl, hrom i bizmut. Struja pri proticanju bira put sa najmanjim brojem spojeva između zrna. Sposobnost provođenja struja srazmjerna je površini poprečnog presjeka. [5]

Na slici 13 prikazani su sastavni elementi ZnO odvodnika prenapona sa porculanskim kućištem.



Slika 13. Konstrukcija cinkoksidnog odvodnika prenapona sa porculanskim kućištem

Odvodnici penapona, pored aktivnih elemenata, imaju i dodatnu opremu, kao što je prikazano na prethodnim slikama:

- Gornja stezaljka za vezu sa faznim provodnikom
- Sigurnosna membrana
- Otvor za ispuštanje vrelih gasova u slučaju pojave električnog luka
- Opruga za postizanje kontaktnog pritiska između blokova otpornika i provodnih dijelova
- Nelinearni otpornici od ZnO i aditiva
- Porculansko kućište
- Otvor za ispuštanje velikih gasova u slučaju pojave električnog luka
- Donja stezaljka za vezu sa uzemljenjem
- Gornja kapa
- Zaptivka između membrane i kućišta
- Distantni cilindar od provodnog materijala
- Donja kapa

U odnosu na drugu opremu u elektroenergetici, odvodnik prenapona je relativno jednostavan uređaj jer nema pokretne djelove. Stub MO diskova se nalazi u porculanskom kućištu i hermetički je zatvoren i pričvršćen sa četiri izolaciona štapa (od fiberglasa) i sa fiksirajućim nosećim pločicama. Prilikom kratkog spoja unutar odvodnika prenapona formira se vrela plazma koja se ispušta kroz otvor dvije identične aluminijske prirubnice koje se nalaze sa gornje i donje strane i koje su vezane cementom za porcelansko kućište. Preko aluminijske prirubnice sa otvorom izbacuju se vreli gasovi kao prevencija od pucanja odvodnika. Pritisak se ograničava tankom čeličnom dijafragmom, a na gornjoj strani je cilindrični ili pločasti gornji priključak, dok su na donjoj prirubnici vijačni priključci za uzemljenje.

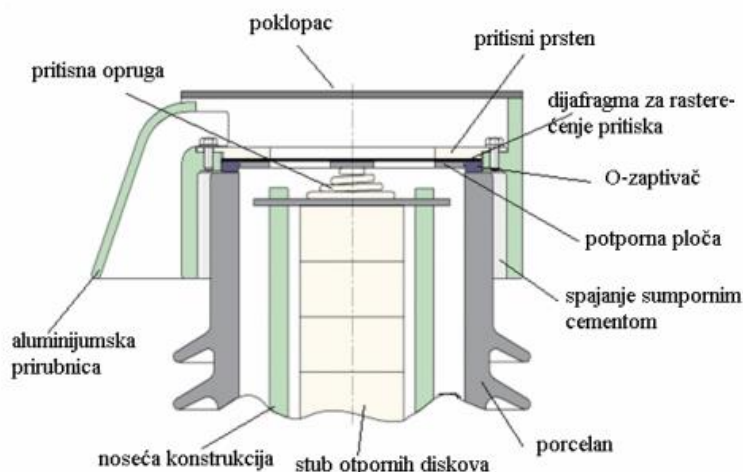
Diskovi su pritisnuti pomoću kontaktne opruge te je kontaktni otpor mali pa struja lako prelazi sa jednog diska na drugi i stub sa diskovima se ne pomjera.

O-zaptivač je gumeni zaptivač kojim se postiže hermetičnost. Izazov kod odvodnika prenapona jeste obezbijediti zaptivenost, jer je dijafragma veoma tanka koja se savije ukoliko nastane jak pritisak usljed luka. Vreli gas se na taj način usmjeri prema ventilacionim otvorima.

Pri pojavi prenapona, struja sa cilindričnog priključka prelazi na poklopac. Zatim sa poklopca elektroni prelaze na aluminijumski obod koji je u kontaktu sa metalnim prstenom za pritezanje sigurnosne membrane. Konstrukcija sigurnosne membrane je od tankog nerđajućeg čelika što omogućava provođenje elektrona dalje. Elektroni prelaze na pritisnu oprugu i dalje na stub otpornika (niz diskova). Na donjem delu, sa stuba otpornika (diskova) elektroni prelaze na donji aluminijski obod i priključke, sa kojih, kroz provodnik elektroni odlaze na uzemljivač postrojenja.

Otpornost odvodnika naglo poraste kada sva struja prenapona kroz odvodnik oteče u zemlju, i kroz njega teče vrlo mala struja. Do naglog porasta otpornosti dolazi zbog prirode materijala. Jedan od elemenata koje je poželjno ugraditi a koji se vezuje između odvodnika prenapona i uzemljenja jeste brojač pražnjenja, koji registruje svako povećanje napona kroz odvodnik. Time se dobijaju informacije koliko je posmatrana mreža izložena prenaponima i koliko je sami odvodnik prenapona bio napregnut odvođenjem struje, radi kontrole njegove ispravnosti. Na samom odvodniku prenapona se postavlja uređaj za fizičko odvajanje odvodnika prenapona od mreže, u slučaju kvara, čime se izbjegava njegovo potpuno oštećenje. Mrežni odvajač djeluje tako što odvoji odvodnik od mreže i izvrši gašenje luka u trenutku odvajanja. Odvodnik prenapona, odvojen od mreže, nema nikakvu ulogu, dok se ne zamijeni, što je loša strana ovog procesa. [17]

Na slici 14 su prikazani detalji konstrukcije ZnO odvodnika prenapona.



Slika 14. Detalji konstrukcije metaloksidnog odvodnika prenapona

Uzročnici koji izazivaju oštećenja odvodnika prenapona, odnosno izolacije i narušavanje zaštitnih karakteristika odvodnika su prodor vode (vlaga), površinske naslage nečistoće i apsorbovana toplota.

Ako bi došlo do prodora vlage u kućište i njene kondenzacije po zidovima, došlo bi i do pojave malih struja kroz tanke provodne opne od vlage. Problem nastaje pri isušivanju te opne, i na tim mjestima se pojavljuju djelimični preskoci, koji izazivaju pojavu iskrenja. Luk će se produžiti ukoliko je otpor iskre manji od otpora ostalog dijela provodne staze, sve do trenutka pojave kratkog spoja između nelinearnih otpornika. Struja kratkog spoja može dostići veliku vrijednost i time izazvati eksploziju odvodnika usljed porasta pritiska. Uloga membrane tu stupa na snagu, koja u slučaju pojave nadpritiska u kućištu, ispušta višak gasova kroz donji ili gornji otvor. Vreli gasovi ispuštaju luk sa spoljašnje strane, što nije opasno. Eksplozija odvodnika prenapona bi izazvala oštećenja drugih uređaja u postrojenju.

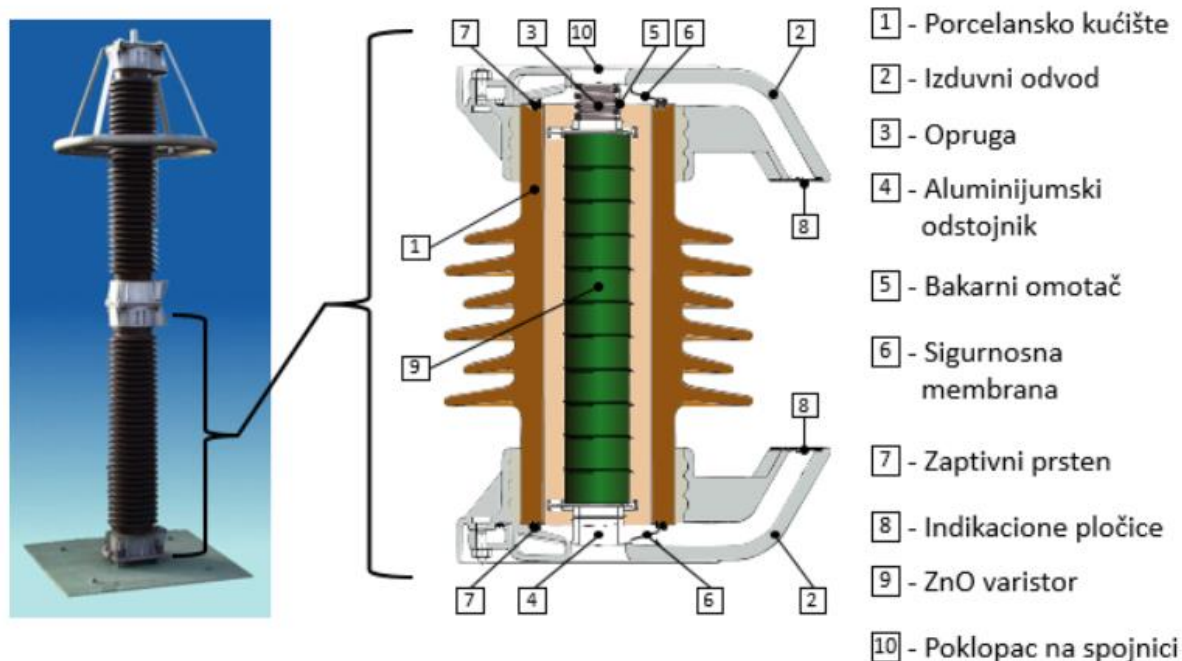
Do neravnomjerne raspodjele potencijala po blokovima kod odvodnika prenapona dolazi u slučaju kada je kućište velike dužine, za visoke napone. Razlog tome je smanjenje podužnih kapaciteta odvodnika. Pomoću elektroda za raspodjelu napona sa spoljašnje strane odvodnika prenapona se postiže ravnomjernija raspodjela potencijala. Radi se u obliku prstena koji je na faznom naponu. Površinsko zaprljanje uzrokuje neujednačenu raspodjelu polja širom odvodnika, dok apsorbovana toplota utiče na naprezanje, odnosno degradaciju karakteristika odvodnika-termički pobjeg.

Na degradaciju MO odvodnika ili njegovu lošiju operativnost utiči i sledeće pojave [18]:

- Pražnjenja po površini odvodnika uslijed površinskog zagađenja solima ili nekim drugim vodljivim aerosolima (kao posljedica nastanak površinskih struja);
- Energetska preopterećenja kod privremenih i tranzijentnih prenapona;
- Dugoročno starenje odvodnika pri normalnom pogonskom naponu;
- Unutarnja parcijalna pražnjenja (zbog nesavršenosti izrade);

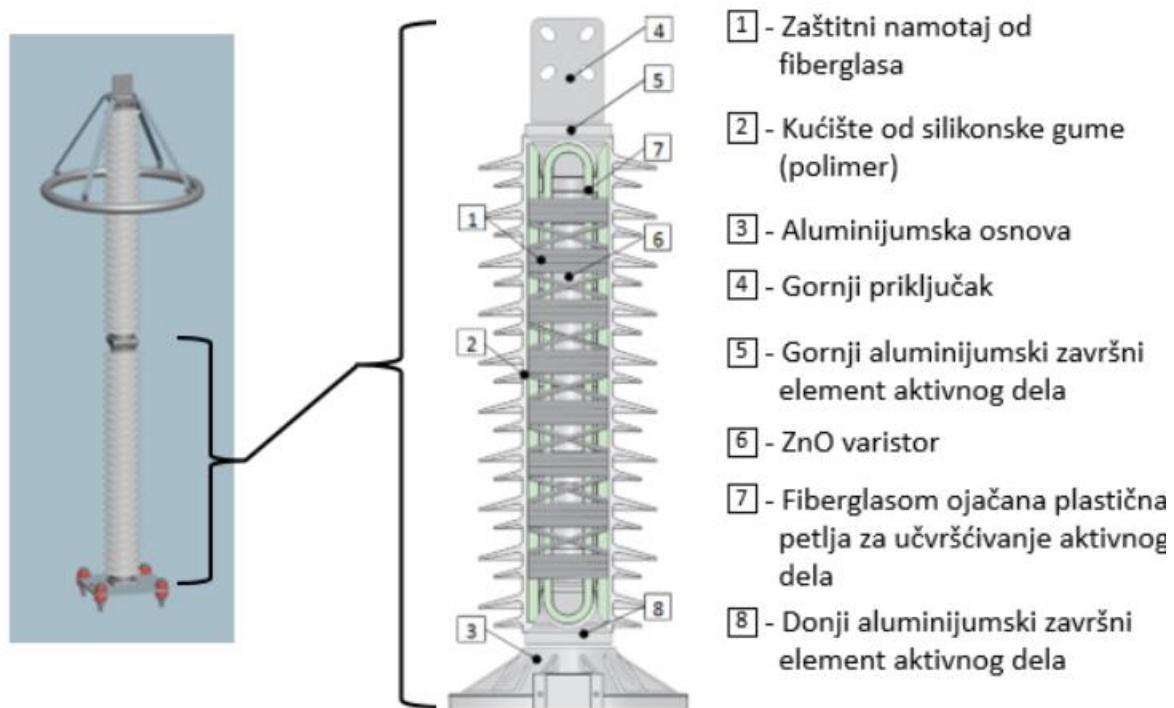
Degradacijom početnih karakteristika, kada se referentni napon MO odvodnika približava vrijednosti nazivnog napona, dolazi do narušavanja njegovih dugoročnih termičkih stabilnosti i prijete njegovom potpunom termičkom uništenju.

Na slici 15 prikazana je konstrukcija ZnO odvodnika prenapona sa porculanskim kućištem, sa navedenim značenjem elemenata.



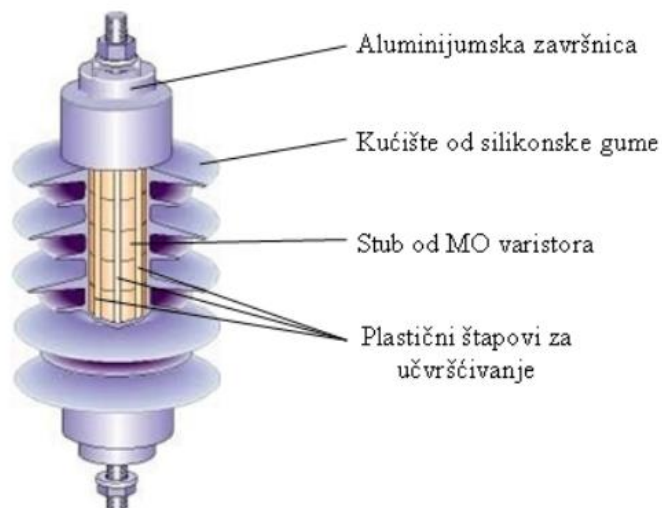
Slika 15. Konstrukcija metal oksidnih odvodnika prenapona-porculansko kućište

Na slici 16 prikazana je konstrukcija ZnO odvodnika prenapona sa polimernim kućištem, sa navedenim značenjem elemenata.

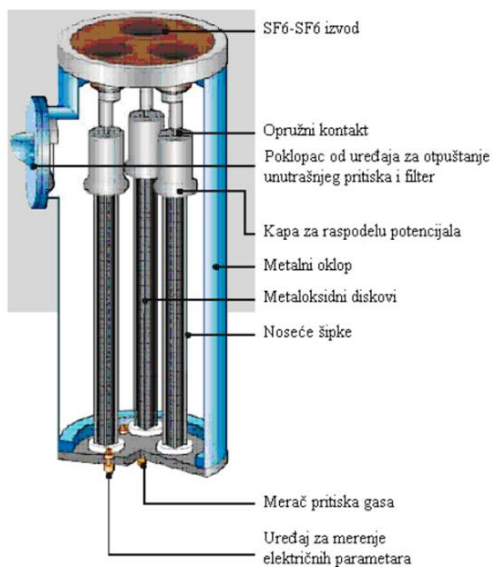


Slika 16. Konstrukcija metal oksidnih odvodnika prenapona -polimerno kućište

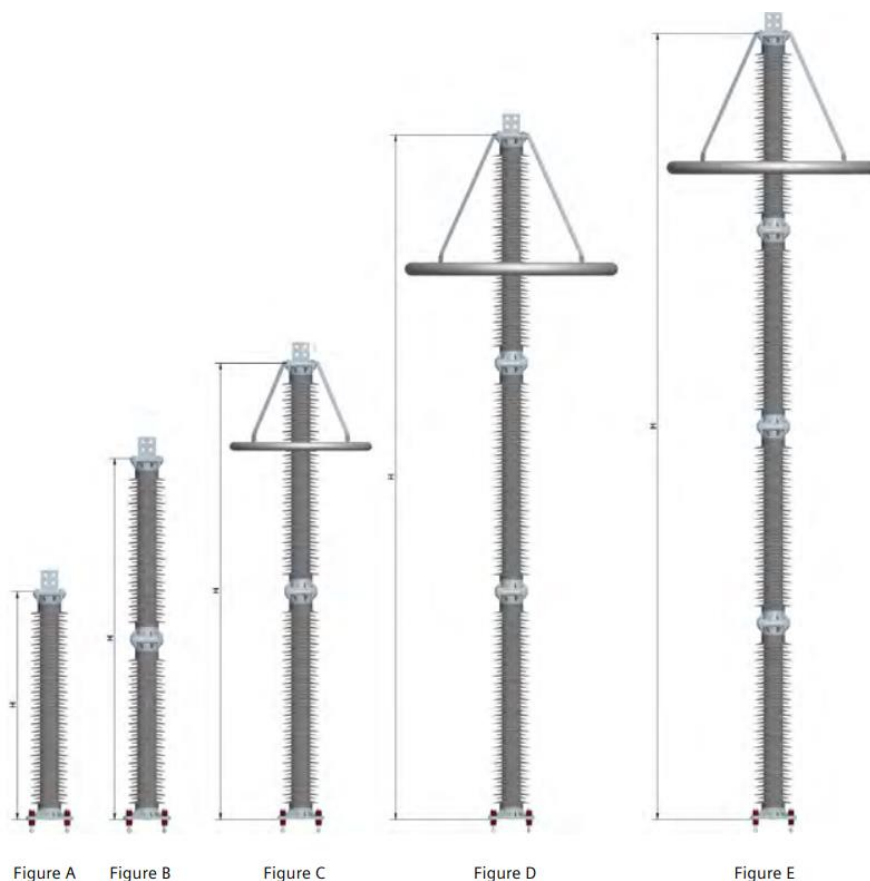
Na slikama 17, 18 i 19 su prikazane su neke vrste OP.



Slika 17. Distributivni odvodnik sa polimernim kućištem



Slika 18. Trofazni GIS odvodnik



Slika 19. Visokonaponski odvodnici prenapona

3.3 Osobine ZnO odvodnika prenapona

Vrlo izražen koeficijent nelinearnosti otpornika je osobina koja prednjači kod ZnO odvodnika prenapona. Koeficijent nelinearnosti otpornika nije konstantan, već mu se vrijednost kreće u granicama: $\alpha=20\sim 50$. Strujno naponska karakteristika odvodnika prenapona je eksponencijalnog oblika, opisanog relacijom [5]:

$$\frac{I}{I_{ref}} = \left(\frac{U}{U_{ref}}\right)^\alpha \quad (14)$$

Gdje su:

I_{ref} , U_{ref} - referentna struja i napon koji definišu jednu tačku na volt-amperskoj karakteristici;

α - koeficijent nelinearnosti;

Koeficijent nelinearnosti se mijenja, i za bilo koju tačku sa krive se određuje prema relaciji [5]:

$$\alpha(U) = \frac{d(\ln I)}{d(\ln U)} \quad (15)$$

Koeficijent nelinearnosti α je važna veličina od koje zavisi efikasnost prenaponske zaštite ZnO odvodnika prenapona. Uz pomoć relacije logaritamske srednje vrijednosti koeficijenta nelinearnosti, određuje se kompletna karakteristika nelinearnog otpornika u širokom opsegu struja, kao što je prikazano sledećom relacijom [5]:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{I_{max}}{I_0}\right)}{\ln\left(\frac{U_{max}}{U_0}\right)} \quad (16)$$

Gdje su:

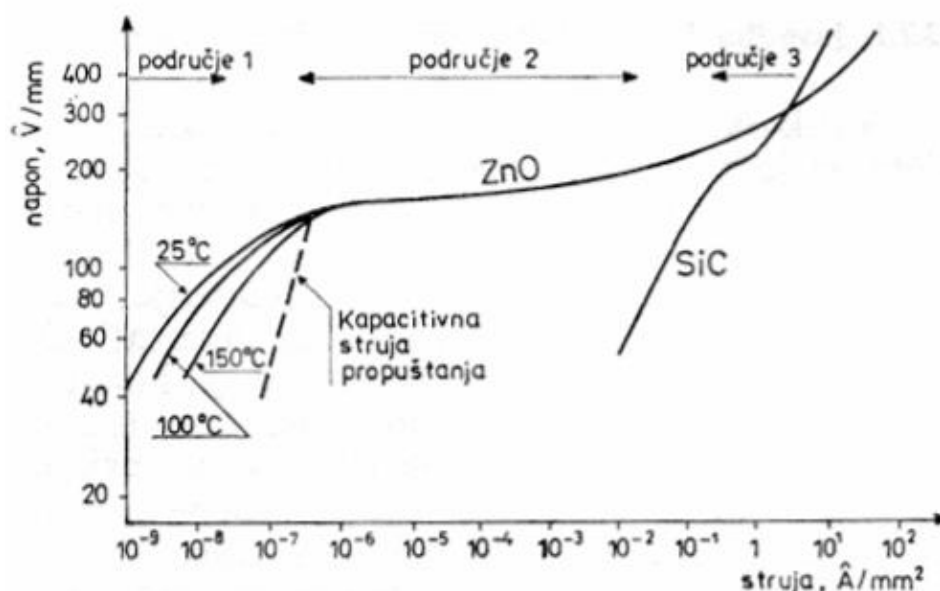
I_0 - dozvoljena stalna struja kroz odvodnik;

I_{max} - max udarna struja pražnjenja koja se očekuje kroz odvodnik;

U_0 - napon na odvodniku pri struji I_0 ;

U_{max} - napon na odvodniku pri struji I_{max} ;

Na slici 20 prikazana je strujno- naponska karakteristika ZnO odvodnika prenapona za širok dijapazon struja:



Slika 20. Strujno-naponska karakteristika ZnO odvodnika prenapona

Sa slike 20 se mogu uočiti 3 oblasti djelovanja ZnO odvodnika prenapona [3].

Prvo područje je tzv. područje “prije proboja” koje karakteriše mala struja proticanja. Gustina struje je približno $3 \cdot 10^{-7} \text{ A/mm}^2$ a relativna dielektrična konstanta je oko 700, te je struja propuštanja uglavnom kapacitivna i postoji i rezistivna komponenta struje curenja. Pri jednosmjernom naponu koji odgovara trajnom naponu protiče struja od oko 0,1 mA, a kapacitivna komponenta pri 50 Hz iznosi 0,5 mA. Praćenjem vrijednosti ovih struja, naročito rezistivne komponente i struje trećeg harmonika, može se zaključiti u kakvom stanju se nalazi odvodnik prenapona. U ovom području je karakteristika vrlo osjetljiva na temperaturu, pa je potrebno izabrati odvodnik sa radnom temperaturom ne većom od deklarisanane.

U drugom području je na karakteristici jako izražena nelinearnost, a temperaturna zavisnost je zanemarljiva. Struja se mijenja prema sledećoj formuli [3]:

$$I = cU^\alpha \quad (17)$$

Gdje je α koeficijent nelinearnosti, vrijednosti 30~50.

U ovom području struja preko 1A izmjerena je udarnom strujom 8/20 μ s/ μ s.

Što je veći koeficijent nelinearnosti to je manji preostali napon na odvodniku i tačna vrijednost koeficijenta α se može odrediti za samo ograničenu oblast struje na volt amperskoj karakteristici.

U trećem području karakteristika nije toliko linearna i odgovara omskoj provodnosti ZnO.

Prednost MO u odnosu na SiC odvodnika prenapona jeste i nepostojanje propratne struje nakon prestanka djelovanja prenapona. Odvodnik se trenutno vraća u stanje velike otpornosti, kada kroz njega teče jedino struja curenja.

ZnO odvodnici prenapona se mogu vezivati paralelno, u cilju povećanja energetske mogućnosti i ravnomjerne podjele opterećenja, što ranije nije bio moguć slučaj.

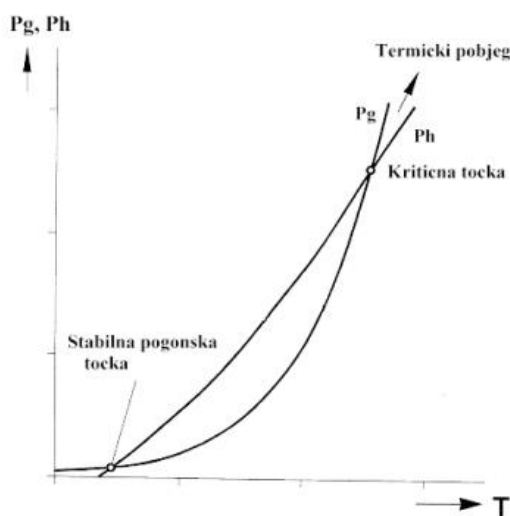
Pojavom vrlo strmih strujnih talasa na nelinearnim otpornicima uočava se povećanje preostalog napona sa porastom strmine talasa. Opisana pojava se dešava pri:

1. Djelovanju sporih talasa pri kojima dolazi do većeg zagrijavanja MOV-a, što uzrokuje smanjenje otpornosti diskova i sniženje preostalog napona.
2. Pojavi vrlo strmih talasa, sam stub nelinearnog odvodnika prenapona ima određenu induktivnost, koja uzrokuje povećan pad napona pri proticanju struje na čelu atmosferskog talasa. [5]

3.4 Termička stabilnost MO odvodnika

Proticanjem struje kroz odvodnik prenapona stvara se toplota koja je u slučaju male vrijednosti struje takođe mala i predaje se okolini. Pri velikim strujama pražnjenja stvaraju se velike količine toplote, te odvodnik, da bi bio termički stabilan, potrebno je da je uspostavljena ravnoteža između toplote koja se stvara i koja se odvodi. [3]

Na slici 21 prikazano je zagrijavanje i hlađenje MO odvodnika pri maksimalnoj efektivnoj vrijednosti trajnog pogonskog napona- U_c .



Slika 21. Zagrijavanje i hlađenje MO odvodnika

Zagrijavanje se povećava eksponencijalno s porastom temperature. Pri temperaturi većoj od kritičnih $P_g > P_h$ hlađenje nije dovoljno da umanjí zagrijavanje, pa će otpornici nastaviti da se zagrijavaju, nakon čega će odvodnik biti uništen uslijed prekomjernog zagrijavanja. Uz ispravno dimenzioniranje prilikom projektovanja može se podići kritična tačka, tako da ona ne može biti dostignuta niti pri najvećem prenaponu koji se može pojaviti.

Proces odvođenja toplote sa odvodnika prenapona opisan je relacijom [3]:

$$Q = K \cdot S \cdot (T - T_0) \quad (18)$$

Gdje je:

Q - količina toplote koja je odvedena hlađenjem (J);

K - koeficijent odvođenja toplote ($J/m^2\text{°C}$);

S - površina hlađenja (m^2);

T - temperatura odvodnika (°C);

T_0 - temperatura ambijenta (°C);

3.5 Definisane parametara vezanih za izbor odvodnika prenapona i parametara koji se koriste u postupcima testiranja

Osnovni parametri odvodnika prenapona su:

-Naznačeni napon mreže U_n - je vrijednost koja određuje naponski nivo mreže. Definiše se kao efektivna vrijednost međufaznog napona i standardne vrijednosti naznačenog napona mreže. [6]

-Najviši pogonski napon mreže U_m - to je maksimalna efektivna vrijednost međufaznog napona mreže. Obično je za 5-20 % procenata viši od vrijednosti napona U_n .

Vrijednosti najvišeg pogonskog napona i naznačenog napona mreže date su u tabeli 1. [6]

Tabela 1. Standardne vrijednosti naznačenog napona mreže U_n i najvišeg pogonskog napona mreže U_m

Naznačeni napon mreže U_n [kV]	3	6	10	20	35	60	110	220	400
Naznačeni napon mreže U_m [kV]	3,6	7,2	12	24	38	72,5	123	245	420

- Struja odvođenja odvodnika - je struja koja protiče kroz odvodnik. [2]

- Naznačena struja odvođenja odvodnika I_n - je tjemena vrijednost udarne struje standardnog oblika 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$. Na osnovu ove vrijednosti struje, odvodnici se svrstavaju u odgovarajuće klase (IEC 60099-4). Standardne vrijednosti za I_n su: 1.5 kA, 2.5 kA, 5 kA, 10 kA i 20 kA. [7]

Za mreže nazivnog napona 110 kV i višeg koriste se klase rasterećenja sa strujama 10 kA i 20 kA. U obzir se uzima klasa rasterećenja voda da bi se mogle odrediti karakteristike odvodnika i njegova sposobnost odvođenja struja pražnjenja, jer sama nazivna struja ne daje podatke o tome. Klasom rasterećenja se definiše sposobnost apsorpcije energije te se tako može odrediti koliku energiju pražnjenja odvodnik može izdržati a da pri tome ostane termički stabilan.

Sama energija se određuje tokom fabričkih ispitivanja samog odvodnika, kada se odvodnik podvrgava testiranju i razlikuje se od tipa do tipa odvodnika. Za odvodnike prenapona, koji se koriste u mrežama visokog i veoma visokog napona energija pražnjenja koju odvodnik može da apsorbira 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 i izražava se u kJ/kV naznačenog napona odvodnika.

- Naznačeni napon odvodnika U_r - je napon koji služi za raspoznavanje odvodnika. Naznačeni napon odvodnika ne predstavlja napon na koji se MO odvodnik prenapona može trajno priključiti, kao što je to uobičajena definicija kod ostale opreme. [10]

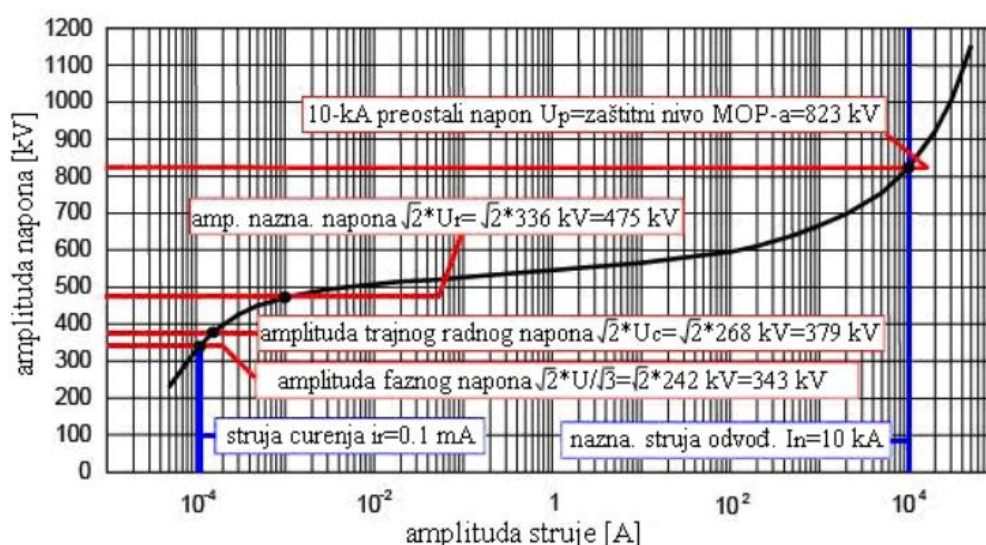
- Preostali napon odvodnika U_p - je amplituda napona na priključcima odvodnika kada kroz isti protiče struja odvođenja i ovim parametrom se definiše zaštitni nivo MO odvodnika prenapona. [8]

- Trajni radni napon odvodnika U_c - je najviša efektivna vrijednost napona na koji se odvodnik može trajno priključiti. Prema IEC standardu proizvođači sami određuju vrijednost napona U_c , dok se prema standardu IEEE propisuju maksimalne vrijednosti stalnog radnog napona.

- Referentna struja I_{ref} - je amplituda rezistivne komponente struje odvodnika koja je dovoljno velika da se efekti parazitnih kapacitivnosti mogu zanemariti. Ovu vrijednost specificira proizvođač opreme.

- Referentni napon U_{ref} - je amplituda napona odvodnika kojoj odgovara referentna struja odvodnika. Ovu vrijednost specificira proizvođač opreme.

Na slici 22 prikazana je U-I karakteristika MO odvodnika prenapona u 400 kV mreži.



Slika 22. Međusobni odnos radnog faznog napona mreže U , trajnog radnog napona OP U_c , naznačenog napona odvodnika U_r i preostalog napona odvodnika U_p za 400 kV mrežu

Uobičajeni odnosi koji među navedenim veličinama sa slike 22 vladaju, dati su sledećim relacijama [21, 28]:

$$0.75 * U_r \leq U_c \leq 0.8 * U_r \quad (19)$$

$$0.9 * U_{ref} \leq U_r \leq 0.98 * U_{ref} \quad (20)$$

$$U_{ref} \leq U_p \quad (21)$$

-Strma udarna struja- je udarna struja sa konvencionalnim trajanjem čela od 1 μ s, sa takvim ograničenjima u podešavanju opreme da se izmjerene vrijednosti kreću od 0,9 μ s do 1,1 μ s. Konvencionalno vrijeme do polovine vrijednosti na začelju ne smije biti duže od 20 μ s.

-Impuls struje atmosferskog pražnjenja - je udarna struja 8/20 μ s/ μ s sa granicama podešavanja takvim da se izmjerene vrijednosti za konvencionalno trajanje čela kreću od 7 μ s do 9 μ s, a vrijeme do polovine na začelju od 18 μ s do 22 μ s. [6]

-Dugotrajna udarna struja- je pravougaona udarna struja sa brzim usponom do maksimalne vrijednosti, koja zatim ostaje uglavnom konstantna u toku utvrđenog perioda, a zatim brzo pada na nulu. Pravougaonu udarnu struju definišu sledeći parametri: polaritet, najviša vrijednost, konvencionalno trajanje najviša vrijednosti i ukupno konvencionalno trajanje.

-Udarna struja odvodnika velike amplitude - je najviša vrijednost struje pražnjenja koja ima 4/10 μ s/ μ s oblik impulsa koji se koristi za ispitivanje stabilnosti odvodnika na direktnim udarima munje.

-Sklopna udarna struja odvodnika - je najviša vrijednost struje pražnjenja koja ima konvencionalno trajanje čela dužine od 30 μ s, ali kraće se od 100 μ s i konvencionalno vrijeme do polovine vrijednosti na začelju otprilike duplo dužim od konvencionalnog trajanja čela.

-Trajna struja odvodnika - je struja koja teče kroz odvodnik, kada je on pod trajnim radnim naponom. Trajna struja sastoji se od aktivne i kapacitivne komponente, a može se mijenjati sa temperaturom i djelovanjem rasipnog kapaciteta i vanjske nečistoće. Trajna struja ispitivanog uzorka ne mora biti ista kao trajna struja kompletnog odvodnika.

- Zaštitna karakteristika odvodnika- je kombinacija sljedećih karakteristika:

- preostalog napona za strmu udarnu struju,
- karakteristika preostalog napona u funkciji struje odvođenja za atmosferske udarne struje,
- preostalog napona za sklopne udarne struje.

3.6 Izbor MO odvodnika prenapona

ZnO odvodnici prenapona su primarna zaštita opreme koja ograničava prijelazne prenapone na distributivnim i prenosnim mrežama i biraju se sledećim postupcima:

1. Određivanje parametara sistema
2. Provjera nenormalnih uslova rada
3. Izbor naznačenog napona

Izbor odvodnika prenapona se vrši na osnovu klase rasterećenja voda, koja predstavlja energiju koja teče kroz odvodnik u slučaju sklopnog prenapona. Zatim na osnovu nazivne struje odvođenja koja je najveća struja koja protiče kroz odvodnik, naznačenog i trajnog radnog napona odvodnika i eksplozione čvrstoće, koja predstavlja vrijednost struje jednog polonog kratkog spoja pri kojoj odvodnik ne bi eksplodirao ali bi plazma izašla van odvodnika kroz specijalne otvore. Odvodnik prenapona se priključuje između faznog napona i zemlje. Preostali napon je napon na odvodniku dok on provodi struju atmosferskog pražnjenja ili sklopnog prenapona u zemlju i predstavlja zaštitni 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.

Preostali napon djeluje na izolaciju energetskog transformatora (u slučaju zaštite transformatora od prenapona), jer je sa njegovim namotajem vezan paralelno. Odvodnik prenapona treba postaviti što bliže štitićenom elementu, jer je njegovo djelovanje ograničeno.

3.6.1 Izbor MO odvodnika za distributivnu mrežu

-Izbor stalnog radnog napona odvodnika U_c

1. U mrežama sa izolovanom ili rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom treba da važi [3]:

$$U_c \geq U_m \quad (22)$$

U efikasno i neefikasno uzemljenim mrežama treba da važi [5]:

$$U_c \geq 1.05 * \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

Koeficijent 1.05 uzima u obzir eventualno postojanje viših harmonika. [3]

-Izbor naznačenog napona U_r

U mrežama sa izolovanom ili rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom [5]:

$$U_r \geq 1.25 * U_c \quad (24)$$

U mrežama sa efikasno i neefikasno uzemljenom neutralnom tačkom ovaj napon se bira kao veći od dvije vrijednosti [3]:

$$U_{r1} \geq 1.25 * U_c \quad \text{ili} \quad U_{r2} \geq \frac{U_{TOV}}{K_{TOV}} \quad (25)$$

gdje su:

U_{TOV} – privremeni prenapon,

K_{TOV} – koeficijent koji uvažava sposobnost odvodnika da podnosi privremene prenapone.

Privremeni prenapon određuje se kao [5]:

$$U_{TOV} \geq K_Z U_{mf} \quad (26)$$

gdje su:

U_{mf} – maksimalni fazni napon sistema,

K_Z – faktor zemljospoja koji zavisi od načina uzemljenja neutralne tačke i kreće se od 1.4 za direktno uzemljene mreže do 1.73 za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, dok je za mreže uzemljene preko impedanse između 1.4 i 1.73.

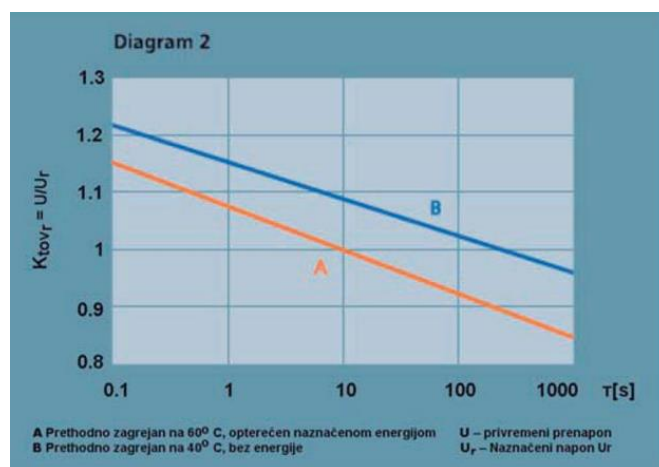
K_{TOV} se očitava sa dijagrama koji daje proizvođač odvodnika (slika 23). Neki proizvođači ovu karakteristiku daju u odnosu na U_c te očitani koeficijent K_{TOVc} treba svesti na K_{TOV} preko izraza [5]:

$$K_{TOV} = 0.8 * K_{TOVc} \quad (27)$$

Trajanje privremenih prenapona određeno je podešenjem reagovanja relejne zaštite i prekidača. Ukoliko ovo vrijeme nije poznato, prema IEC preporukama usvaja se 3s za prenosne mreže i 10s za distributivne. Naznačeni napon odvodnika u mrežama sa efikasno i neefikasno uzemljenom neutralnom tačkom bira se kao veći od dvije vrijednosti:

$$U_r \geq (U_{r1}, U_{r2}) \quad (28)$$

Kriva b važi u slučaju kada je odvodnik u vremenu $t = 0$ već bio opterećen sa trajnim radnim naponom U_c i pripadnom energijom. Zato kriva b leži ispod krive a, kao što je prikazano na slici 23, koja važi za slučaj odvodnika bez prethodnog opterećenja. [3]



Slika 23. Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena u odnosu na naznačeni napon U_r

3.6.2. Izbor MO odvodnika za prenosne mreže

-Trajni radni napon mora biti veći od najvišeg faznog napona koji se može pojaviti u mreži [3]:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

-Izbor nazivnog napona [3]:

$$U_r \geq \max(U_{eq1}, U_{eq2}, U_{eq3}, \dots) \quad (30)$$

$$U_{eqi} = U_{TOVi} * \left(\frac{t_{TOVi}}{10}\right)^{0.02} \quad (31)$$

Gdje je U_{TOVi} amplituda i-tog privremenog prenapona (1-privremeni prenapon prouzrokovan zemljospojem, 2-privremeni prenapon prouzrokovan ispadom tereta...)

-Izbor naznačene struje odvođenja (izbor klase odvodnika)

U Tabeli 2 date su naizmjenične struje odvođenja (klase odvodnika) i opsezi naznačenih napona za koje se ove klase vezuju. U našoj praksi koristi se klasa 10 kA za sve naponske nivoe.

Tabela 2. Klasifikacija struja odvođenja odvodnika prenapona

Klasa odvodnika I_n (A)	2500	5000	10000	20000
Naizmjenični napon U_r (kV)	$U_r \leq 36$	$U_r \leq 132$	$3 \leq U_r \leq 360$	$360 \leq U_r \leq 756$

-Provjera zaštitnog nivoa [7]

Odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo ako je ispunjen uslov:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10 kA}} > 1.4 \quad (32)$$

gdje su:

U_{pod} – podnosivi atmosferski napon opreme

$U_{10 kA}$ – preostali napon odvodnika za naznačenu struju odvođenja (u ovom slučaju 10 kA), koji daje proizvođač odvodnika.

-Izbor kućišta odvodnika [7]

Na izbor kućišta odvodnika utiču: statička i dinamička naprežanja, nivo zagađenja sredine, struja kratkog spoja na mjestu ugradnje odvodnika, kao i oblik spoljašnje površine kućišta. IEC standard 60815 definiše 5 nivoa zagađenja [9], a u zavisnosti od toga i minimalnu dužinu putne staze, kao što je prikazano u tabeli 3.

Tabela 3. Nivoi zagađenja sredine

Nivo zagađenja	Specifična dužina putne 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

Provjera nenormalnih uslova rada

Dešava se da se u uzemljenom sistemu, na neoštećenim faznim provodnicima, pojave visočiji naponi nego što bi trebali biti, pa je takav sistem neefikasno uzemljen. Postoji mogućnost nastanka privremenih prenapona zbog ispada opterećenja i zemljospoja, pa se i to mora uzeti u obzir.

3.6.3. Izbor MO odvodnika za zaštitu neutralne tačke transformatora

U zavisnosti od načina uzemljenja neutralne tačke sistema određuje se trajni radni napon odvodnika u zvezdištu transformatora, za izolovan ili rezonantno uzemljen sistem treba da važi [3]:

$$U_{cn} \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (33)$$

Za sistem uzemljen preko otpornika velike vrijednosti važi:

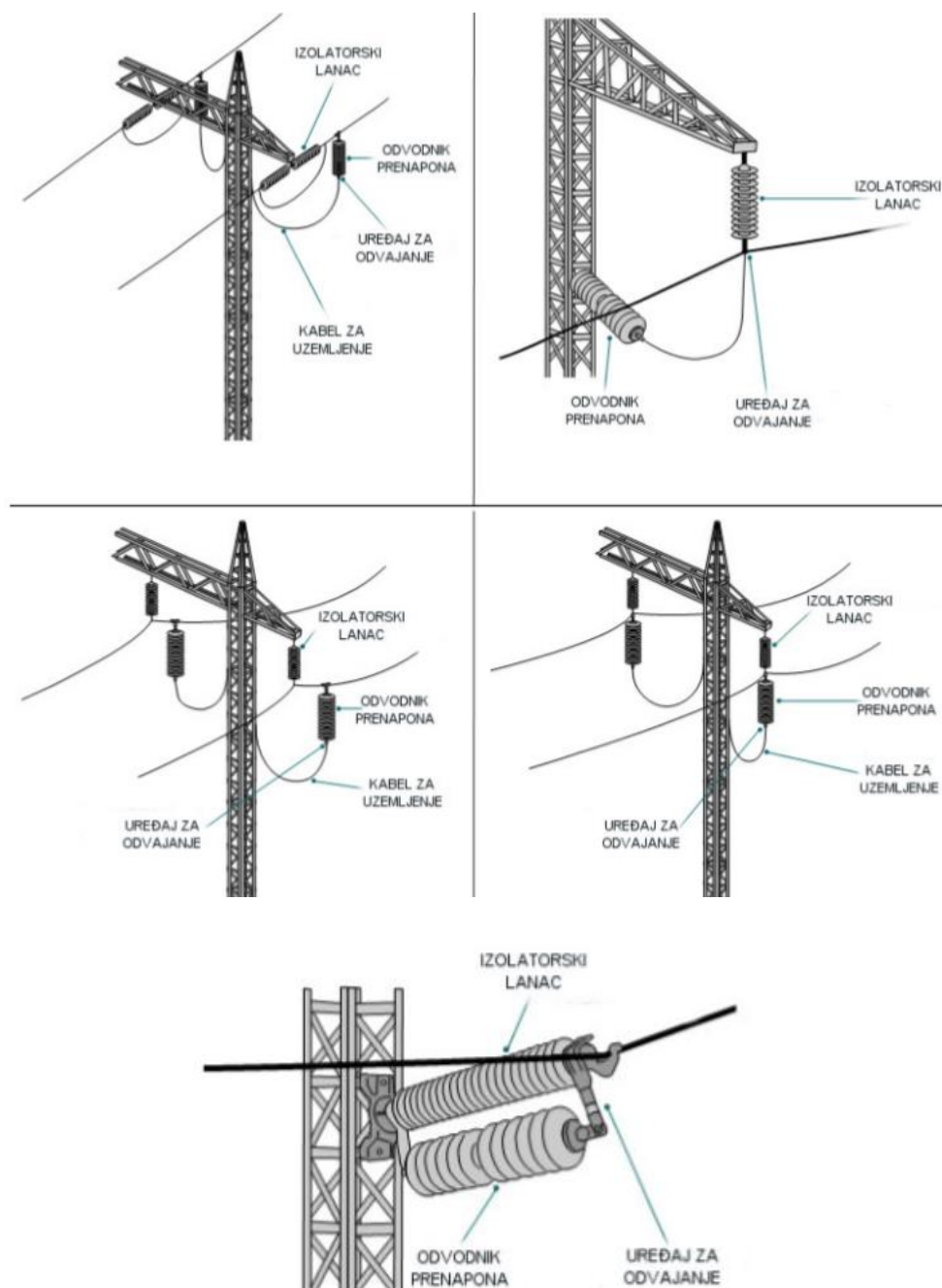
$$U_{cn} \geq \frac{U_m}{K_{TOVC}\sqrt{3}} \quad (34)$$

Na osnovu trajnog radnog napona U_{cn} odgovarajući naznačeni napon odvodnika je:

$$U_{rn} \geq 1.25U_{cn} \quad (35)$$

3.7 Ugradnja odvodnika prenaponsa

Odvodnici prenaponsa se po pravilu trebaju ugraditi što bliže šticeom objektu. Najkritičnija situacija je kod krajnjih TS. Za djelovanje odvodnika prenaponsa je bitna udaljenost odvodnika od šticenog voda i uzemljenje odvodnika, gdje odvodnik prenaponsa treba uzemljiti najkraćim putem na zajednički uzemljivač. Na slikama 26 i 27 su prikazani načini ugradnje linijskih odvodnika prenaponsa na različitim tipovima dalekovodnih stubova.



Slika 26. Načini ugradnje linijskih odvodnika prenaponsa na stubovima dalekovoda



Slika 27. Načini ugradnje linijskih odvodnika prenapona

Na slici 28 prikazan je način ugradnje odvodnika prenapona u postrojenju.



Slika 28. Načini ugradnje odvodnika prenapona u postrojenju

4. MODELI ODVODNIKA PRENAPONA

Podjele, izbor i modelovanje odvodnika prenapona se različito definišu kod IEC i IEEE standarda. U narednom dijelu biće date njihove uporedne karakteristike sa aspekta primjene odvodnika prenapona u VN mrežama.

4.1 Uporedne karakteristike IEEE i IEC standarda

U poređenju sa IEC standardom, IEEE serija standarda C62.11 ima drugačiji pristup u najmanje dva aspekta: prvo, pokriva odvodnike prenapona sa iskrištem kao i metal oksidne odvodnike prenapona sa nelinearnim otpornicima. Prilikom upoređivanja testova rukovanja energijom sa onima po IEC standardima, uvijek će se uočiti razlika u pogledu energetske sposobnosti.

Drugo, klasifikacija IEEE odvodnika je aplikativno orijentisana, dok se klasifikacija IEC odvodnika prenapona zasniva na nominalnoj struji pražnjenja i klasi linijskog pražnjenja. Različite klase se mogu grubo uporediti [11, 33], kao što je to učinjeno u tabeli 4.

Tabela 4. Poređenje IEEE standarda sa IEC standardima

ANSI/IEEE C62.11	IEC 60099-4
Laki uslovi rada	2,5 kA
Normalni uslovi rada	5 kA
Teški uslovi rada	10 kA, LD 1
Srednji	5 kA, LD 1 ili 2
Postrojenje 10 kA	10 kA, LD 3 ili 4
Postrojenje 15 kA	20 kA, LD 4 ili 5
Postrojenje 20 kA	20 kA, LD 4 ili 5

Prvobitna sinhronizacija između IEEE C62.11 i IEC 60099-4 standarda započela je još pojavom testa kratkog spoja, koji je bio kompletan za standard IEEE i uz minimalne modifikacije mogao se primijeniti i kod navedenog IEC standarda [13].

Vremenom potreba za harmonizacijom standarda bila je sve neophodnija, te je 2013. godine održan sastanak IEEE radnog tijela (Working Group – WG) sa ciljem da se revidira standard IEEE C62.11 i nastavi evolucija ovog standarda prema testovima zasnovanim na obrazloženju koji su bolje usklađeni sa IEC standardom 60099-4. Ubrzo je zaključeno da potpuna harmonizacija ovih standarda neće biti moguća.

Stoga je odlučeno da se nastavi sa neformalnom harmonizacijom razvijanjem sličnih ali ne identičnih metoda ispitivanja koje bi oba tijela za standarde mogla da usvoje kao dio svojih uobičajenih ciklusa i organizacija. U tom cilju, uskoro će postojati IEEE standard u kojem će većina glavnih laboratorijskih testova biti upotrebljiva za izradu i IEC i IEEE sertifikovanih izveštaja o testovima. [33]

Drugi cilj je bio kreirati set testova za linijske odvodnike prenapona jer mehanička ispitivanja nijesu obuhvaćena standardima C62.11 i samo djelimično u IEC 60999-4 i IEC 60099-8, te je radna grupa IES/IEEE ubrzo usvojila novi standard za linijske odvodnike prenapona koji ima sekciju sa vazдушnim razmakom (EGLAs-Externally gapped line arresters) i one bez (NGLAs-Non-gapped line arresters) [11, 15, 19].

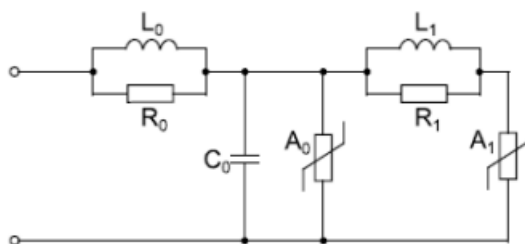
Daljim usklađivanjem i izdanjem 3.0 od standarda 60099-4 (2014) usvojeni su termini distributivni odvodnici prenapona i odvodnici prenapona za postrojenja. Ovim izdanjem je prevaziđena klasifikacija odvodnika prenapona prema klasi pražnjenja i umjesto toga se uzima u obzir struja punjenja/energetska klasifikacija koje se fokusiraju na energiju odvodnika i sposobnost smanjenja otpornosti varistora. I standard IEEE 62.11-2019 usvojio je isti pristup klasifikaciji odvodnika.

4.2 Osnovne razlike između standarda IEEE C62.11 i IEC 60099-4

1. C62.11 pokriva metal oksidne odvodnike prenapona sa vazдушnim razmakom kao i one bez, dok standard 60099-4 ne pokriva [15, 19];
2. IEEE standard pokriva samo odvodnike do 460 kV maksimalnog radnog napona. Iznad toga, testovi se moraju dogovoriti između kupca i proizvođača. IEC 60099-4 pokriva sve klase odvodnika iznad 1000V AC;
3. C62.11 ne koristi izraz 'Nazivni napon' odvodnika i sada se odnosi na maksimalni radni napon [11].

4.3 IEEE model odvodnika prenapona

Model frekventno zavisnog odvodnika prenapona, preporučen od strane IEEE radne grupe 3.4.11 [29], prikazan je na slici 29.

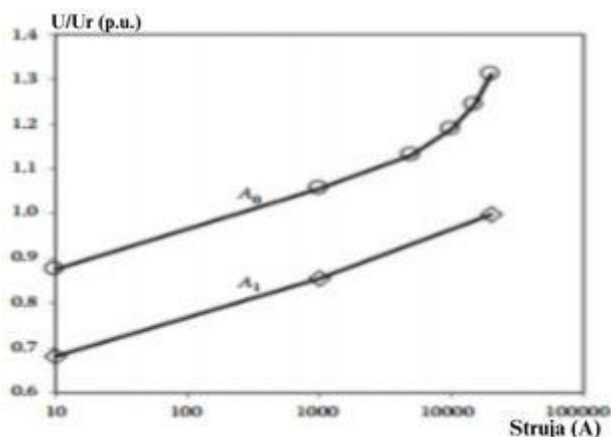


Slika 29. IEEE model odvodnika prenapona

Prikazani model daje zadovoljavajuće rezultate za strujne talase strmine 0,5-45 μ s. [12, 29]

Sastoji se od dva paralelno vezana nelinearna otpornika A_0 i A_1 . Između njih je povezan filter R_1L_1 . Preko kapacitivnosti C_0 je modelovan kapacitet odvodnika prenapona. Dodavanjem induktivnosti L_0 modeluje se prisustvo magnetnog polja u blizini odvodnika. Smanjenje numeričkih oscilacija se postiže ugradnjom otpornika R_0 .

Sa slike 30 mogu se analizirati U-I karakteristike nelinearnih otpornika A_0 i A_1 , svedene na preostali napon odvodnika za strujni talas amplitude 10 kA i oblika $8/20\mu\text{s}$ - $U_{r(10,8/20)}$.



Slika 30. Nelinearne U-I karakteristike otpornika A_0 i A_1

Pri pojavi strujnih talasa niske strmine, impedansa koju čine elementi R_1 i L_1 je veoma mala te su nelinearni otpornici A_0 i A_1 praktično paralelno vezani, dok pri pojavi strujnih talasa velike strmine impedansa ima veliku vrijednost, zbog čega veći dio struje teče kroz nelinearni otpornik A_0 čija je U-I karakteristika veća. Time dolazi do povećanja preostalog napona odvodnika, čemu se i težilo.

Prema preporuci [29] potrebno je izvršiti sledeće procedure za izbor parametara frekvencijsko zavisnog modela odvodnika prenapona:

1. Odrediti inicijalne vrijednosti parametara prema sledećim formulama [12, 30]:

$$L_1 = 15 \text{ d/n } [\mu\text{H}] \quad (36)$$

$$R_1 = 65 \text{ d/n } [\Omega] \quad (37)$$

$$L_0 = 0.2 \text{ d/n } [\mu\text{H}] \quad (38)$$

$$R_0 = 100 \text{ d/n } [\Omega] \quad (39)$$

$$C_0 = 100 \text{ n/d } [\text{pF}] \quad (40)$$

gdje je:

d- visina odvodnika,

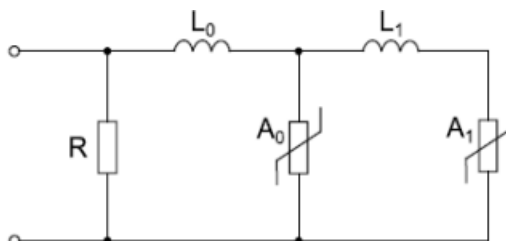
n- broj paralelnih kolona metaloksidnih blokova odvodnika;

2. Podešavanje vrijednosti po jedinicama na karakteristici sa A_0 i A_1 , kako bi se postiglo dobro podudaranje sa kataloški datim naponima;
3. Podešavanje parametra L_1

Parametar L_1 ima najveći uticaj na rezultat. Iz obrasca (36) dobija se samo početna vrijednost, zato L_1 treba podesiti metodom pokušaja i greške, kako bi dobijena vrijednost napona odgovarala preostalom naponu za struju atmosferskog pražnjenja oblika $8/20 \mu\text{s}$, prikazanu u katalogu proizvođača.

4.4 PINĆETI-ĐANETONI model odvodnika prenapona

Na slici 31. prikazan je novi frekventno zavisni model odvodnika prenapona.



Slika 31. Pinćeti-Đanetoni model odvodnika prenapona

Pinćeti i Đanetoni, po uzoru na prethodno opisani IEEE model, razvili su svoj model odvodnika prenapona, zanemarujući kapacitivnost odvodnika C_0 , otpornosti R_0 i R_1 , koje su zamijenjene otpornikom R. Otpornikom R, čija je vrijednost $1M\Omega$, postiže se smanjenje numeričkih oscilacija tokom simulacije. [30]

Kod ovog modela se ne uzimaju u obzir geometrijske osobine odvodnika i nije potrebno ponavljanje procesa prilikom određivanja njegovih parametara. Nelinearne komponente A_0 i A_1 se određuju prema slici 30, dok se preostali parametri modela računaju prema obrascima 41 i 42 [30]:

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} V_n [\mu H] \quad (41)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} V_n [\mu H] \quad (42)$$

Gdje je:

V_n - naznačeni napon odvodnika

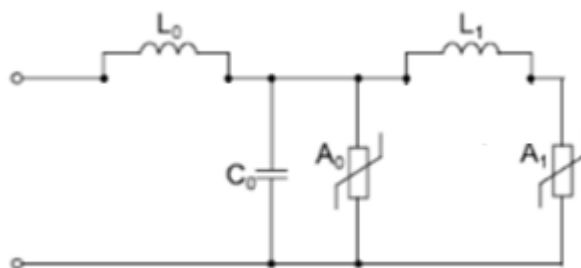
$V_{1/T2}$ - preostali napon odvodnika pri strujnom talasu 10 kA velike strmine $1/T_2$

$V_{8/20}$ - preostali napon odvodnika pri strujnom talasu 10 kA oblika $8/20 \mu s$

$R = [1M\Omega]$;

4.5 MARDIRA- SAHA model odvodnika prenapona

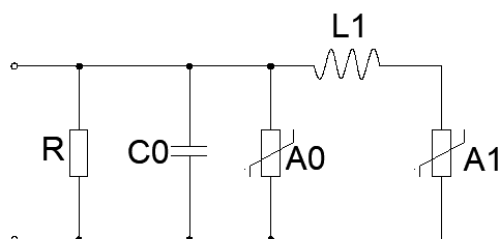
Još jednim pojednostavljivanjem IEEE modela odvodnika prenapona, pri kojem su eliminisani otpornici R_0 i R_1 , nastao je Mirdira-Saha model odvodnika prenapona. [12] Autori tvrde da ovaj model daje dobre rezultate prilikom trenutnog pražnjenja talasnog oblika 8x20 μs i takođe nije potreban iterativni proces (proces ponavljanja) pri određivanju parametara. Međutim, za širok spektar talasnih oblika ovaj model nije zadovoljavajući. Opisani model je prikazan na slici 32:



Slika 32. MARDIRA-SAHA model odvodnika prenapona

4.6 FERNANDEZ-DIAZ model odvodnika prenapona

Fernandez- Diaz model odvodnika prenapona [31] je još jedan izvedeni model od IEEE odvodnika prenapona, nastao zamjenom paralelnih otpornosti R_0 i R_1 sa jednom otpornošću R , koja je paralelno postavljena u odnosu na kapacitivnost C_0 . Takođe, jedan induktivni element L_0 je eliminisan. Odnos između struja kroz nelinearne komponente A_0 i A_1 i napona na njima, mora biti 0,02. Fernandez-Diaz model odvodnika prenapona šematski je prikazan na slici 33.



Slika 33. FERNANDEZ-DIAZ model odvodnika prenapona

Vrijednosti L_1 i C se računaju prema sledećim obrascima [12, 31]:

$$L_1 = \frac{2}{5} \cdot \frac{V_{r8/20} - V_{ss}}{V_{r8/20}} V_r [\mu H] \quad (43)$$

$$C = \frac{1}{55} \cdot \frac{V_{r8/20} - V_{ss}}{V_{r8/20}} V_r [pF] \quad (44)$$

gdje je:

V_{ss} prostali napon oblika 500 μs ili 30/70 μs u kV

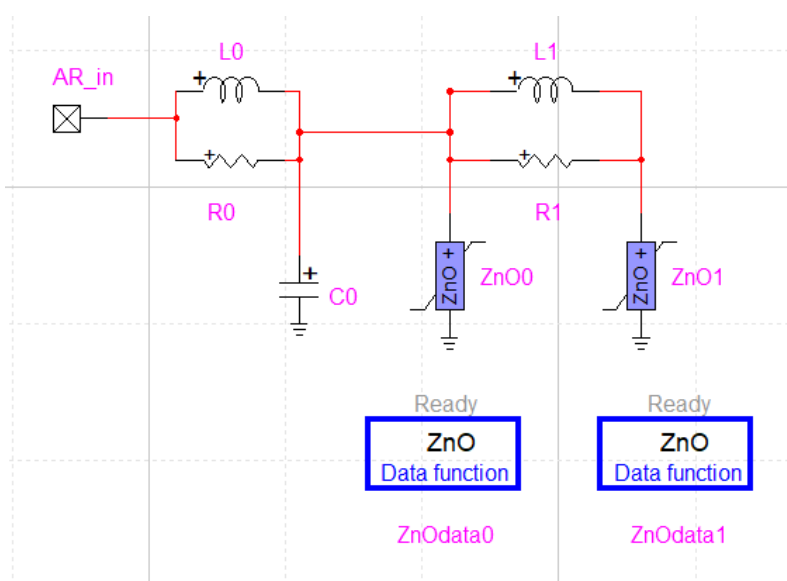
$V_{r8/20}$ preostali napon odvodnika pri strujnom talasu 10 kA oblika 8/20 μs .

4.7 Modelovanje IEEE modela odvodnika prenapona u programskom paketu EMTP®

Za modelovanje elemenata elektroenergetskog sistema je izabran programski paket EMTP® koji predstavlja kontrolni centar za interaktivni dizajn i simulaciju energetskih mreža.

EMTP® je Program za analizu elektromagnetnih prelaznih pojava u elektroenergetskim sistemima. Sa svojim jedinstvenim mogućnostima i preciznošću, EMTP je najbrži, najtačniji i najstabilniji softver u industriji. Računarsko modelovanje visokonaponskih dalekovoda i postrojenja pomaže inženjerima da razumiju kako se sistem ponaša prilikom pojave poremećaja i grešaka. [32]

U nastavku je prikazano modelovanje IEEE modela odvodnika prenapona, preporučenog od strane IEEE radne grupe [2, 32]. Na slici 34 je prikazan model odvodnika prenapona u EMTP programskom paketu:



Slika 34. IEEE model odvodnika prenapona predstavljen u EMTP

Potrebno je odrediti parametre frekventno zavisnog modela odvodnika prenapona tako da vrijednost proračunatog preostalog napona što manje odstupa od izmjerenih vrijednosti datih u katalogu proizvođača odvodnika prenapona. Parametri se mogu optimizovati prema jednom ili većem broju istovremeno primijenjenih strujnih talasa. Kriterijumska funkcija za određivanje parametara se definiše sledećim obrascem [22]:

$$KF = \sum_{i=1}^N \left(\left| \frac{V(x)_{r(I_i, T_{1i}/T_{2i})} - V(x)_{rm(I_i, T_{1i}/T_{2i})}}{V(x)_{rm(I_i, T_{1i}/T_{2i})}} \right| \right) \quad (45)$$

gdje je:

N-broj primijenjenih strujnih impulsa;

$V(x)_{r(I_i, T_{1i}/T_{2i})}$ - proračunata vrijednost preostalog napona za slučaj i-tog strujnog impulsa;

$V(x)_{rm(I_i, T_{1i}/T_{2i})}$ - izmjerena vrijednost preostalog napona za slučaj i-tog strujnog impulsa;

x-vektor nepoznatih veličina: L_0, R_0, C_0, L_1, R_1 za slučaj IEEE modela odvodnika prenapona;

5. UTICAJ MODELA ODVODNIKA PRENAPONA NA ZAŠTITNE KARAKTERISTIKE

Kako bi se analizirao uticaj modela odvodnika prenapona na zaštitne karakteristike sistema, neophodno je sagledati i uzeti u obzir veliki broj parametara. Potrebno je poznavati karakteristike odvodnika prenapona, sagledati načine modelovanja, uporediti ih, analizirati djelovanje pri uticaju prenapona različitih naponskih nivoa. Potrebno je izvršiti i detaljno modelovanje svih prisutnih elemenata posmatranog sistema, visinu nadzemnog voda-visinu ovješena fazne užadi, električne parametre - otpornost i induktivnost, tijela stubova, karakteristike, broj i dimenzije izolatorskih članaka, tip i dimenzije provodnika i zaštitnih užadi, međusobnu pozicioniranost, karakteristike uzemljivača, dužinu raspona, modelovati elemente postrojenja. U ovom poglavlju će biti detaljno obrađeni svi elementi posmatranog sistema, analiziran uticaj prenapona nastao atmosferskim pražnjenjem u različite elemente mreže. Sve navedeno će biti obrađeno u cilju izvođenja zaključaka kako se odvodnici prenapona ponašaju pri različitim uslovima rada, da li dolazi do pojave proboja ili preskoka i u kojim slučajevima.

5.1 Modelovanje elemenata elektroenergetskog sistema primjenom EMTP programskog paketa

U ovom potpoglavlju prikazani su modeli elemenata VN mreža neophodni za simulacije prelaznih procesa i analizu uticaja modela odvodnika prenapona. Dati su modeli struje atmosferskog pražnjenja, dalekovodnog stuba, uzemljivača dalekovodnog stuba, faznog provodnika i zaštitnog užeta, kanala groma, preskoka na izolaciji voda.

5.1.1. Modelovanje talasnog oblika struje atmosferskog pražnjenja

Taladni oblik struje atmosferskog pražnjenja može se prikazati sledećim modelima [20]:

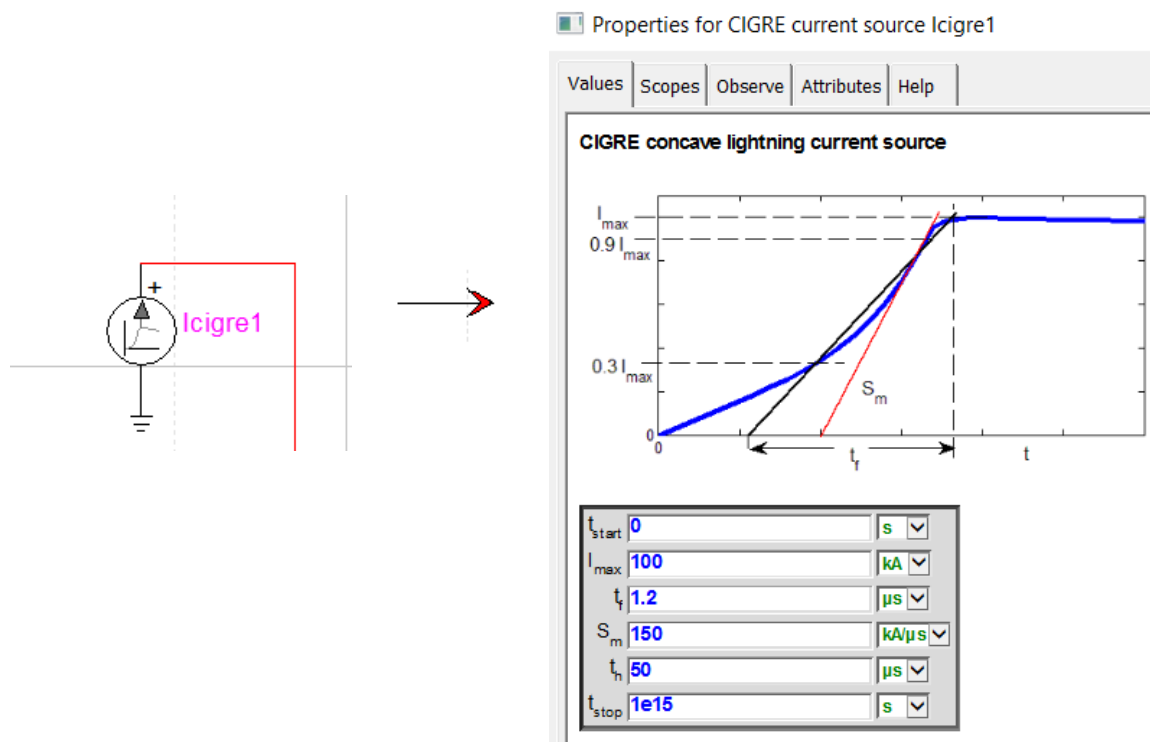
1. Talas linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja
2. Hajdlerov izvor
3. CIGRE izvor

Prvi oblik je najjednostavniji pri proračunima, ali ne odgovara realnom talasnom obliku struje atmosferskog pražnjenja.

Hajdlerov izvor je pogodan pri modelovanju konkavnog čela strujnog talasa i zaključeno je prema [20], da daje najmanje kritične rezultate u odnosu na druge modele.

Analitički izraz CIGRE strujnog izvora je komplikovan jer su čelo i začelje definisani preko dva različita izvora, ali najviše odgovara prirodnom talasnom obliku struje atmosferskog pražnjenja.

U radu je primijenjen CIGRE model talasnog oblika struje atmosferskog pražnjenja. U EMTP programskom paketu CIGRE model izgleda kao na slici 35:



Slika 35. CIGRE model talasnog oblika struje atmosferskog pražnjenja

5.1.2 Model uzemljivača dalekovodnog stuba

Usljed atmosferskog pražnjenja velikog intenziteta dolazi do jonizacije zemljišta, pri pojavi jakog električnog polja. Ovom pojavom dolazi do smanjenja udarne otpornosti uzemljivača. Jonizacija tla ima značajan uticaj na rezultate proračuna za velike vrijednosti amplitude struje atmosferskog pražnjenja, dok je za male struje ovaj uticaj zanemarljiv i uzemljenje stuba se određuje preko otpornosti uzemljenja mjenog pri niskoj frekvenciji i maloj amplitude struje. [20, 23]

Zbog pojave jonizacije tla, otpor uzemljivača ima nelinearnu karakteristiku, čija se zavisnost od amplitude struje atmosferskog pražnjenja određuje prema relaciji [20]:

$$R_i = \frac{R_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)^2}} \quad (46)$$

gde je:

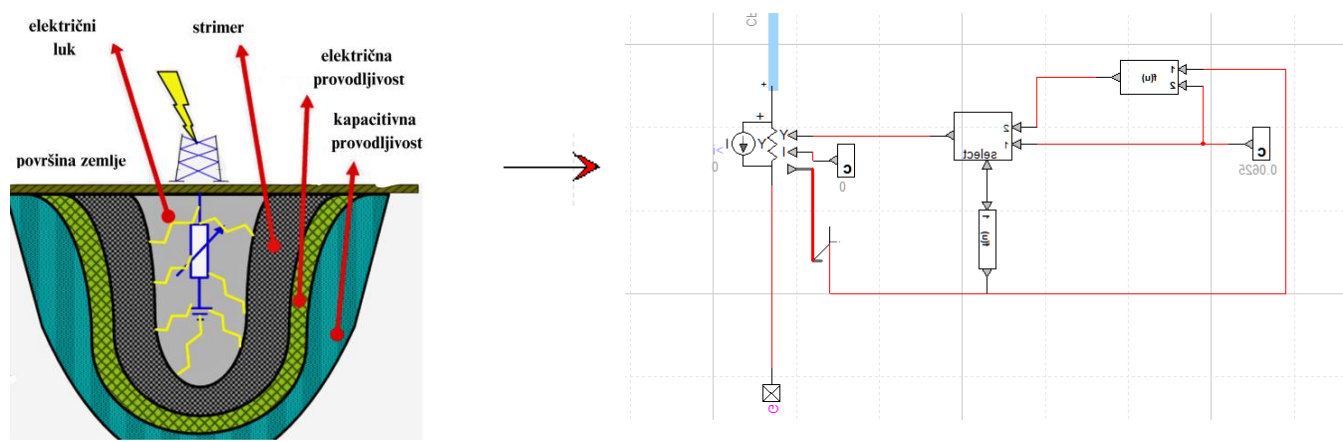
R_s [Ω]- otpor uzemljenja stuba pri 50 Hz,

I [kA]- amplituda struje atmosferskog pražnjenja koja protiče kroz uzemljivač stuba,

I_g [kA]- granična struja atmosferskog pražnjenja (u kA): $I_g = \frac{\rho E_0}{2\pi R_s^2} \Rightarrow \rho$ specifična električna otpornost tla,

E_0 - jačina električnog polja pri kojoj dolazi do jonizacije zemljišta (400 kV/m).

Modelovanje otpora uzemljivača u EMTP programu, uzimajući u obzir pojavu jonizacije tla usljed velikih amplituda struje atmosferskog pražnjenja, prikazano je na slici 36:



Slika 36. Jonizacijski model uzemljivača

5.1.3 Model stuba dalekovoda

Subovi se modeluju karakterističnom impedansom koja zavisi od pravca širenja atmosferskog pražnjenja i oblika struje pražnjenja, i to na dva načina [20,23]:

- jednostavni distributivni model
- multifunkcionalni model stuba

Kod jednostavnog distributivnog modela, stub se posmatra kao kupa, te se prema IEEE standardu [26] preporučuje sledeći izraz za određivanje impedanse [23]:

$$Z = 60 \ln \left(\operatorname{ctg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) = 60 \ln \left(\operatorname{ctg} \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{R}{H} \right) \right) \right) \quad (47)$$

gdje su:

H [m]-visina stuba;

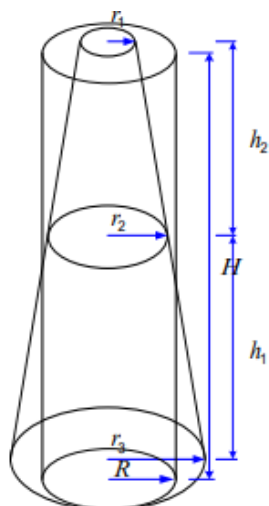
θ -poluugao kupe;

R [m] -poluprečnik osnove stuba koji se određuje dijeljenjem kupe na dvije manje, kao što je prikazano na slici 37.

$$R = \frac{(r_1 h_2 + r_2 H + r_3 h_1)}{H} \quad (48)$$

Aproksimacijom kupe u cilindar dolazi se do pojednostavljenog izraza za impedansu stuba [23]:

$$Z = 60 \left[\ln \left(\frac{H}{R} \right) - 1 \right], R \ll H \quad (49)$$

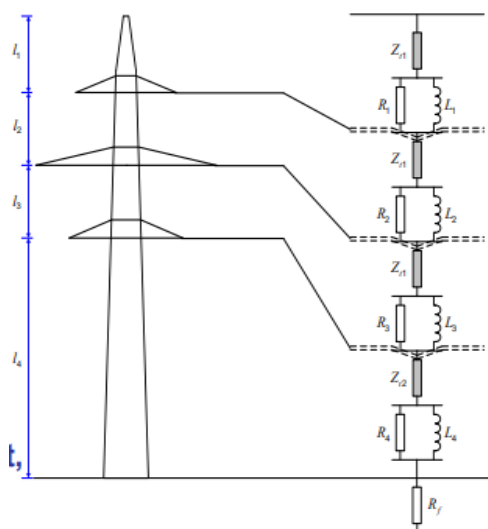


Slika 37. Jednostavni distributivni model stuba dalekovoda

Multifunkcionalni oblik stuba je modelovan sastavljanjem 4 sekcije [27], impedanse segmenta stuba vezane redno sa R-L kolom, kao na slici 38.

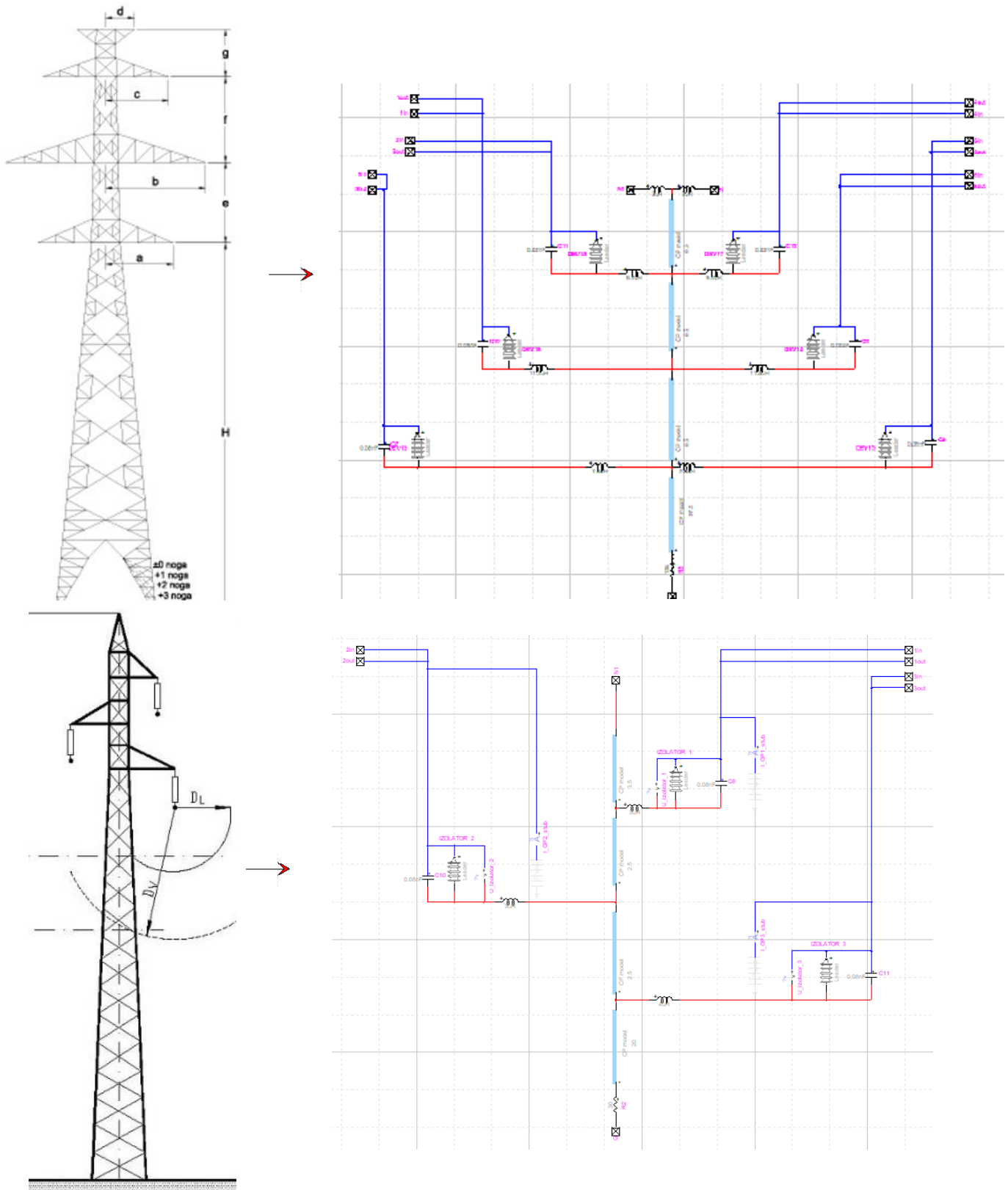
R-L kolom se modeluje prigušenje i distorzija pri prostiranju talasa kroz stub.

Nedostaci ovog modela stuba se ogledaju u tome što pojedini parametri modela ne zavise od dimenzija stuba i složen je postupak za proračun parametara modela. Ovaj način modelovanja stuba dalekovoda daje nešto nižu struju u kanalu groma koja uzrokuje povratni preskok.



Slika 38. "Multy-story" model stuba dalekovoda

Način modelovanja stubova u EMTP programskom paketu prikazan je na slici 39.



Slika 39. Modelovanje različitih tipova stubova u EMTP-u

U radu se stub nadzemnog voda modeluje prema IEEE preporuci [26] kao vod karakteristične imedanse koja se računa preko izraza (50) sa brzinom prostiranja talasa kroz stub koja iznosi 0.85 puta brzina prostiranja svjetlosti.

$$Z = 30 \ln \left(\frac{2(H^2 - R^2)}{R^2} \right) \quad (50)$$

gdje je H visina stuba u [m], R poluprečnik osnove stuba [m].

Stub se modeluje tako što se predstavi sa 4 CP modela voda. CP je skraćenica od engleskog naziva Constant Parameter Transmission line i klasifikovan je kao model frekvencijski nezavisnih prenosnih vodova. Manje je precizan od modela vodova i kablova zavisnih od frekvencije, ali može se uspješno koristiti u analizama problema sa ograničenom frekventnom disperzijom. Konzole stuba su predstavljene kao induktivni element, dok će modelovanje izolacijske zaštite biti detaljnije obrađeno u nastavku rada.

5.1.4 Model faznog provodnika i zaštitnog užeta

Modelovanje faznog provodnika, za potrebe analize uticaja atmosferskih prenapona, realizuje se kao da je nadzemni vod monofazan i za analizu se uzima nekoliko raspona, gdje je uticaj atmosferskog prenapona najizraženiji. U toku atmosferskog pražnjenja, prenaponski talas se uglavnom prostire duž provodnika na kojem se desilo pražnjenje, dok se na ostalim provodnicima indukuje napon, koji može biti manjih vrijednosti tako da ne utiče na izolaciju. U slučaju pojave povratnog preskoka, prenaponski talasi se javljaju i na preostalim provodnicima, koji se posmatraju kao ista pojava istih karakteristika. [22] Iz svega navedenog potvrđuje se zaključak se da se vod može modelovati kao monofazni, i posmatra se kao fazni provodnik i zaštitno uže. Impedanse faznog voda i zaštitnog užeta se određuje iz izraza [22]:

$$Z = 60 \ln \left(\frac{2H_{ef}}{R_u} \right) \quad (51)$$

gdje su:

efektivna visina provodnika iznad zemlje $H_{ef} = H - \frac{2}{3} f$,

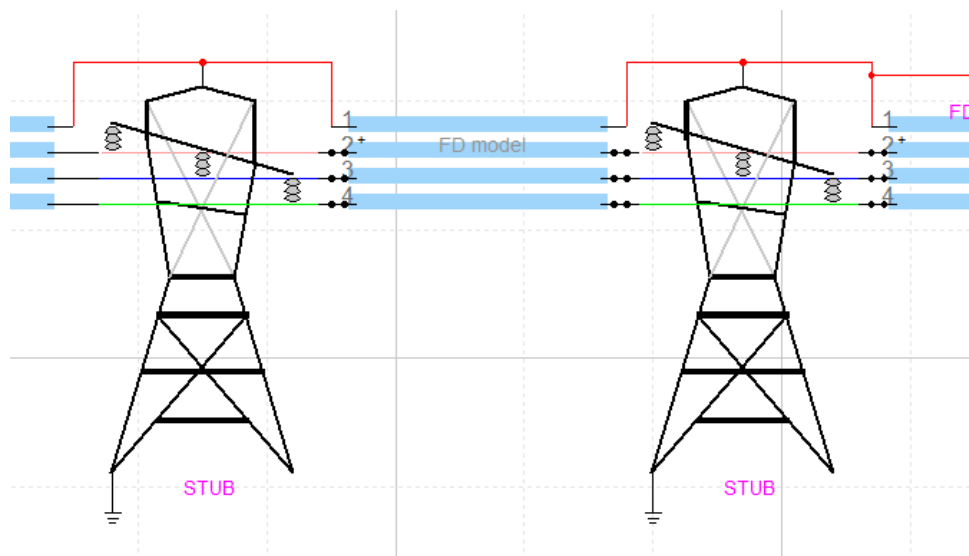
H- visina vješanja provodnika na stubu, f-ugib provodnika na sredini raspona;

R_u - poluprečnik užeta, R_{ekv} - ekvivalentni poluprečnik se računa kod vodova u snopu;

U EMTP programu je izvršeno modelovanje nadzemnih vodova i zaštitnih vodova korišćenjem FD (Frequency Dependent) modela voda, kod kojih je računarski proračun sporiji, zavistan od frekvencije te je pogodan za analizu promjena u elektroenergetskom sistemu, usljed djelovanja prenapona visokih frekvencija.

U ovom slučaju su linijski otpor i induktivnost predstavljeni u funkciji frekvencije, kao što je određeno skin efektom. Usvojena je pretpostavka da je kapacitivnost konstantna. Nenulta konstantna provodljivosti šanta G (sa podrazumijevanom vrijednosti od 0.2×10^{-9} S/km) je uključena u model.

Glavno pojednostavljenje koje se koristi u ovom modelu je valjanost pretpostavke da se konstantna realna transformacijska matrica može koristiti za povezivanje faznih i modalnih veličina u produženom frekvencijskom opsegu. Na slici 40 je prikazan frekvencijski zavisani model nadzemnog voda.



Slika 40. Frekvencijski zavisan model nadzemnog voda

U Line Date funkciji specificira se raspored faznih provodnika na stubnom mjestu, detaljno se definišu podaci kao što su prečnik vodova, podužna otpornost, vertikalna i horizontalna pozicija vodova u odnosu na geometriju stuba, kao što je prikazano na slici 41.

Transmission line data calculation function

Conductor Data | Model | Line length | Output options | Options | Fitting | Generate data | Help

Geometrical and electrical data This device will not be supported, use Line/Cable Data instead of this device.

Module: Line Model
Units: Metric
Input option: Standard Conductor data
Use Database

Conductor Data
Number of conductors (wires): 8

Wire	Phase Number	DC resistance [Ohm/km]	Outside diameter [cm]	Horizontal distance [m]	Vertical Height at tower [m]	Vertical Height at Midspan [m]
1	2	0.059	3.06	-6.6	60.7	60.7
2	1	0.059	3.06	-10.2	51.7	51.7
3	3	0.059	3.06	-7.1	43.2	43.2
4	4	0.059	3.06	6.6	60.7	60.7
5	6	0.059	3.06	10.2	51.7	51.7
6	5	0.059	3.06	7.1	43.2	43.2
7	7	0.059	1.45	-3	65.7	65.7

Additional data for Wire 1

Skin effect correction

Thick/Diam 0.36
 None
 Solid conductor
 Galloway Wedepohl

Bundled Conductor

Relative permeability 1

Slika 41. Numerički podaci kojima se definiše geometrija stubnog mjesta i položaj vodova

5.1.5 Model kanala groma

Prilikom direktnog atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, struja pražnjenja se prostire kanalom groma. Kanal groma se modeluje neograničeno dugim vodom karakteristične impedanse Z_g po kome nailazi upadni naponski talas trenutne vrijednosti napona [5]:

$$U_{up} = Z_g * I_{up} \quad (52)$$

$$I_{up} = \frac{I_g}{2} \quad (53)$$

$$U_{up}(t) = \frac{Z_g I_g(t)}{2} \quad (54)$$

gdje su:

$I_g(t)$ - ukupna struja atmosferskog pražnjenja kod dobro uzemljenog objekta;

$U_{up}(t)$ - upadna komponenta napona po kanalu atmosferskog pražnjenja;

Za vrijednosti karakteristične impedanse kanala groma najčešće se usvaja 100 – 500 Ω , pri velikim amplitudama struje atmosferskog pražnjenja, dok za manje amplitude ona može imati veću vrijednost.

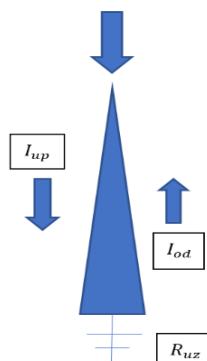
Za dobro uzemljene objekte važi:

$$I_{up} = I_{od} \quad (55)$$

tada je $I_g = 2I_{up}$, usljed totalne refleksije struje od uzemljivača, pod pretpostavkom da je impedansa stuba jednaka impedansi kanala groma te nema refleksije od vrha stuba.

Struje u kanalu groma koje prozrokuju povratni preskok na dalekovodu su mnogo manje u slučaju atmosferskog pražnjenja u vrh stuba nego u slučaju atmosferskog pražnjenja u sredinu raspona. Razlog tome je što prilikom atmosferskog pražnjenja u vrh stuba najveći dio struje protiče kroz uzemljivač i podiže napon konzole što uzrokuje pojavu povratnog preskoka. [20] Prema [20] uticaj karakteristične impedanse kanala groma na rezultate proračuna nije veliki i izabrana vrijednost nije od velike važnosti u proračunima, odnosno smanjenje vrijednosti karakteristične impedanse kanala groma neznatno povećava vrijednost struje u kanalu groma koja izaziva povratni preskok.

Na slici 42 su grafički prikazane komponente struje atmosferskog pražnjenja.



Slika 42. Komponente struje atmosferskog pražnjenja

5.1.6 Model preskoka na izolaciji voda

Ispitivanjima uticaja talasnog oblika prenapona na vrijednosti preskočnih napona u vazduhu, razvijene su različite metode modelovanja preskoka na vazdušnoj izolaciji, od kojih se najčešće koristi neka od sledeće tri metode [20]:

- 1) Volt-sekundna karakteristika izolacije,
- 2) Metoda destruktivnog efekta,
- 3) Metod progresivnog lidera.

-Prva metoda je najjednostavnija i najčešće korišćena, međutim nedostatak ove metode je što je v-t karakteristika dobijena pomoću standardnog naponskog talasa 1.2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$, tako da je metoda pogodna samo za proračun preskočnih napona pri delovanju prenapona standardnog oblika. Volt-sekundna karakteristika izolacije ima analitički oblik [20]:

$$U(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \quad (56)$$

gdje su $K_1 = 400d$, $K_2 = 710d$, d-međuelektrodni razmak u m, t vrijeme do preskoka u μs .

-Metoda destruktivnog efekta se najčešće koristi za izolacione razmake manje od 1.2 m [20]:

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} (u(t) - V_0)^k dt \quad (57)$$

Za vrijednost k (konstanta od 1) ovaj metod se naziva metod površine, gdje su u(t) trenutna vrijednost napona, V_0 amplituda napona ispod koje nije moguće da se dođe do preskoka, t_0 trenutak kada primijenjeni prenaponski talas prvi put prevaziđe napon V_0 , t_b trenutak preskoka na izolaciji.

Preskok u vazdušnom razmaku se javlja kada je ispunjen uslov $DE \geq$ kritična površina koja uzrokuje preskok na izolaciji.

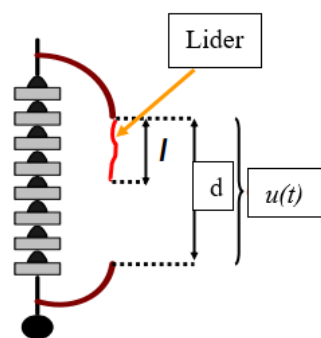
-Metod progresivnog lidera temelji se na modelovanju realnih fizičkih procesa u međuelektrodnom prostoru za vrijeme delovanja impulsnih prenaponskih talasa. Brzina razvoja lidera može odrediti prema relaciji [20]:

$$v = 170d \left(\frac{u(t)}{d-l} - E_0 \right) e^{(0.0015 \frac{u(t)}{d})} \quad (58)$$

gdje su:

d dužina međuelektrodnog rastojanja [m], l dužina lidera [m], u(t) trenutna vrijednost napona [kV], x dužina nepremoštenog međuelektrodnog rastojanja [m], E_0 kritična jačina električnog polja [kV/m], preporučena vrijednost je 545 kV/m.

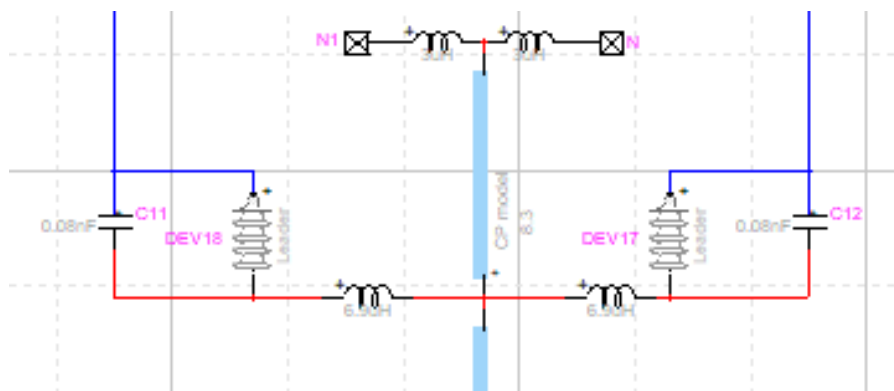
Na slici 43 prikazan je izgled preskoka na izolaciji voda.



Slika 43. Izgled preskoka na izolaciji voda

Prema [20] upotrebom V-t preskočne karakteristike izolacije uočava se veliki uticaj modela talasnog oblika struje atmosferskog pražnjenja na rezultate proračuna. U slučaju korišćenja metoda progresivnog lidera ili metod površine, navedeni problem je znatno manje izražen. Preporuka je da model V-t krive izolacije treba izbjegavati u proračunima zbog velikih odstupanja dobijenih rezultata u odnosu na rezultate dobijene u slučaju primjene drugih modela preskoka.

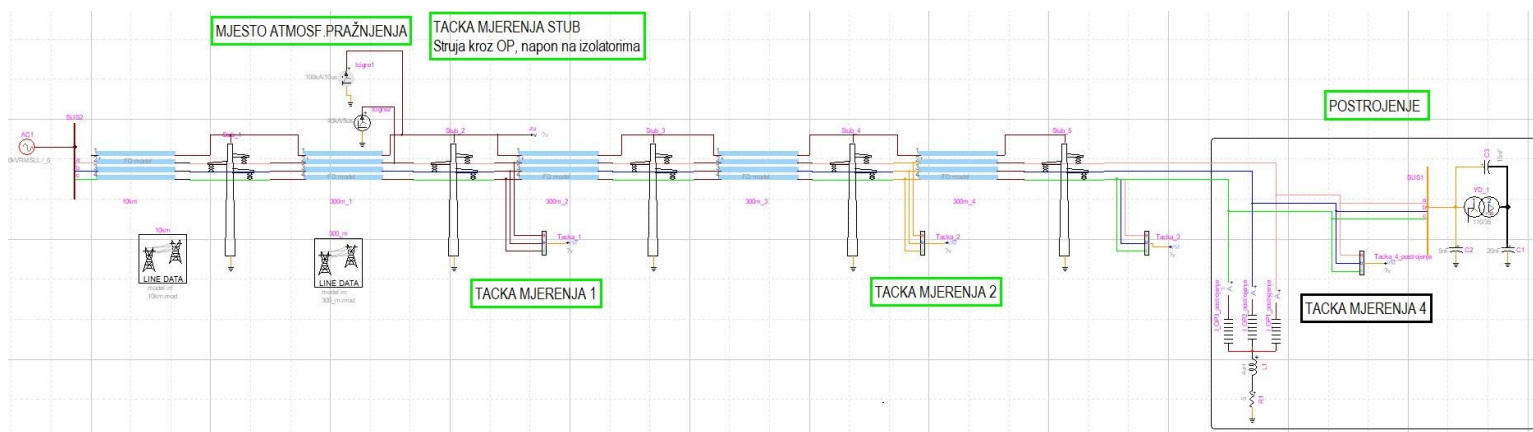
U radu je primijenjen CIGRE model [34, 35], te je modelovanje preskoka na izolaciji voda, u EMTP programskom paketu prikazano na slici 44:



Slika 44. Modelovanje preskoka na izolaciji voda

5.2 Primjer simulacije pojave prenapona i reagovanja odvodnika prenapona pri atmosferskom pražnjenju.

Modelovan je dio mreže naponskog nivoa 110 kV sa 5 stubnih mjesta i 4 raspona, gdje je usvojeno da su stubna mjesta istih geometrijskih karakteristika, sa istom vrijednosti otpora uzemljenja i dužinom raspona od 300 m. Vod kojim je modelovan preostali dio mreže do izvora, dužine je 10 km. Na vodu se nalaze ugrađeni linijski odvodnici prenapona na određenim mjestima, čije zaštitne karakteristike će se razmatrati zavisno od uticajnih faktora. Na slici 45 prikazan je izgled modelovanog dijela 110 kV mreže.



Slika 45. Modelovanje dijela 110 kV mreže

Na prikazanom modelu mreže obilježeno je nekoliko tačaka mjerenja, u kojima će se posmatrati vremenska promjena napona. Prvenstveno će se posmatrati tačka u blizini atmosferskog pražnjenja u element mreže i tačka ispred postrojenja. Za mjesto atmosferskog pražnjenja razmatraju se dva slučaja, i to udar u zaštitno uže i udar direktno u fazni provodnik. Pojava atmosferskog pražnjenja u elemenat mreže modelovana je strujnim izvorom talasnog oblika $10/350 \mu\text{s}/\mu\text{s}$, što odgovara pozitivnom atmosferskom pražnjenju, odnosno prvom udarnom talasu.

Ispred postrojenja su prikazani odvodnici prenapona modelovani prema IEEE standardu, za koje je, prema katalogu proizvođača, definisan preostali napon vrijednosti 230 kV, naznačeni napon od 102 kV, nominalna struja pražnjenja 10 kA i energetska sposobnost od 11 kJ/kV naznačenog napona (U_T). Za sve slučajeve modelovanja usvojeno je da su prisutni odvodnici prenapona ispred postrojenja.

Atmosfersko pražnjenje se dešava ispred stubnog mjesta br. 2, pa je usvojeno da se linijski odvodnici prenapona nalaze na navedenom stubnom mjestu, za slučaj kada se razmatra da su ugrađeni. Ovi odvodnici prenapona takođe su modelovani prema IEEE standardu i sledećih su karakteristika: preostali napon vrijednosti 244 kV, naznačeni napon od 108 kV, nominalna struja pražnjenja 10 kA i energetska sposobnost od 11 kJ/kV naznačenog napona (U_T).

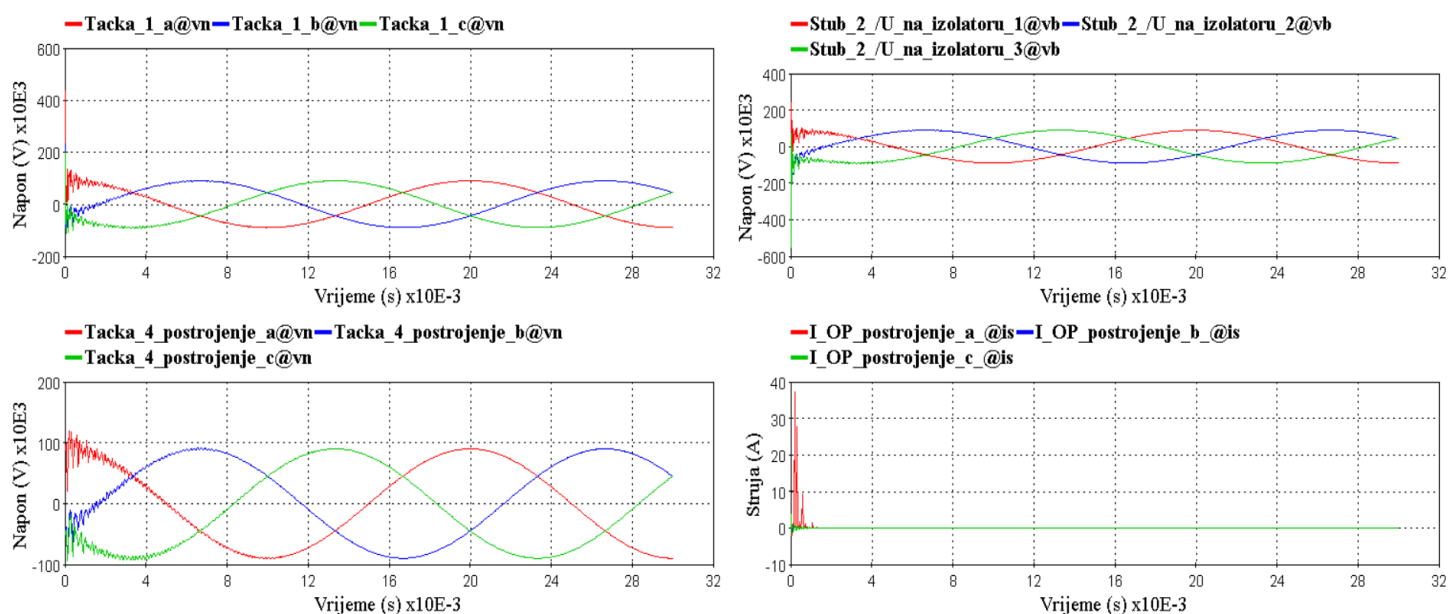
5.2.1. Udar u zaštitno uže

Prvenstveno je razmatran udar atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže. U nastavku se mogu vidjeti vremenske promjene napona neposredno poslije stubnog mjesta broj 2 (Tačka_1_a, Tačka_1_b, Tačka_1_c) i ispred postrojenja (Tačka_4_postrojenje_a, Tačka_4_postrojenje_b, Tačka_4_postrojenje_c). Takođe je prikazana vremenska promjena napona na izolatorskim lancima ugrađenim na stubu broj 2 (Stub_2/U_na_izolatoru_1,

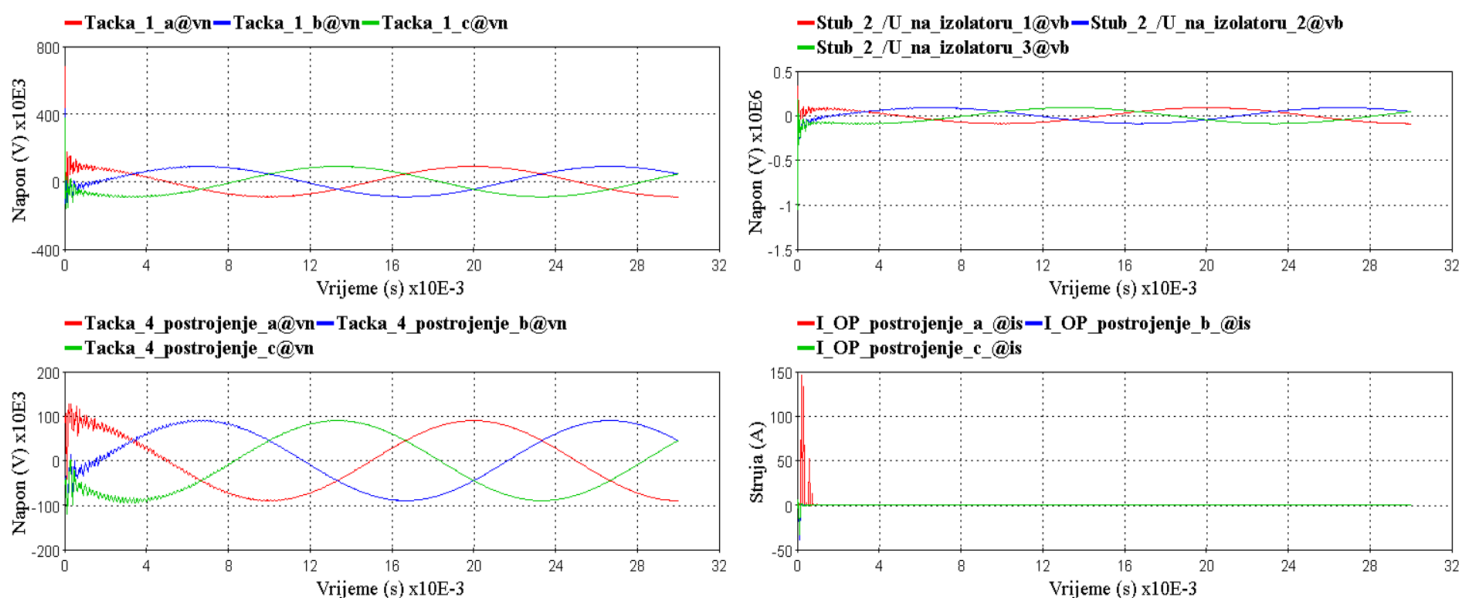
Stub_2/U_na_izolatoru_2, Stub_2/U_na_izolatoru_3), u cilju analize uticaja pojave prenapona na izolaciju mreže. Prikazana je i vrijednost struje koja protiče kroz odvodnike prenapona ispred postrojenja, pri pojavi atmosferskog pražnjenja u mrežu (I_OP_postrojenje_a, I_OP_postrojenje_b, I_OP_postrojenje_c).

Razmatrano je više slučajeva, zavisno od vrijednosti amplitude struje atmosferskog pražnjenja. Odvodnici prenapona ispred postrojenja su uvijek aktivni.

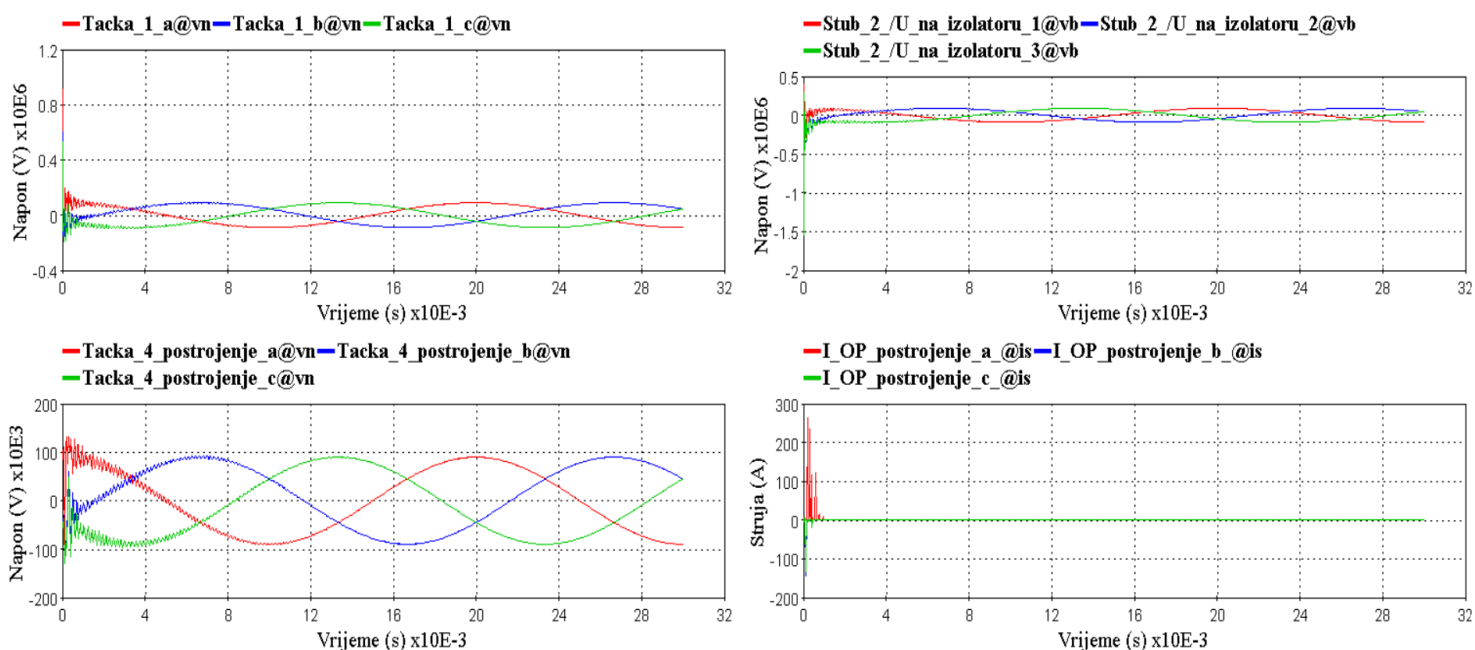
Na slikama od 46 do 51 su prikazani talasni oblici napona u tačkama mjerenja obilježenim na modelu (prikazanom na slici 45) sa Tačka 1, Tačka 4, zatim vrijednost napona na izolatorima stuba broj 2 i vrijednost struje koja protiče kroz odvodnike prenapona ispred postrojenja. Navedene vrijednosti su izmjerene za slučaj atmosferskog pražnjenja od 10 kA, 20 kA, 30 kA, 40 kA, 50 kA i 100 kA u zaštitno uže, bez primjene OP na stubovima.



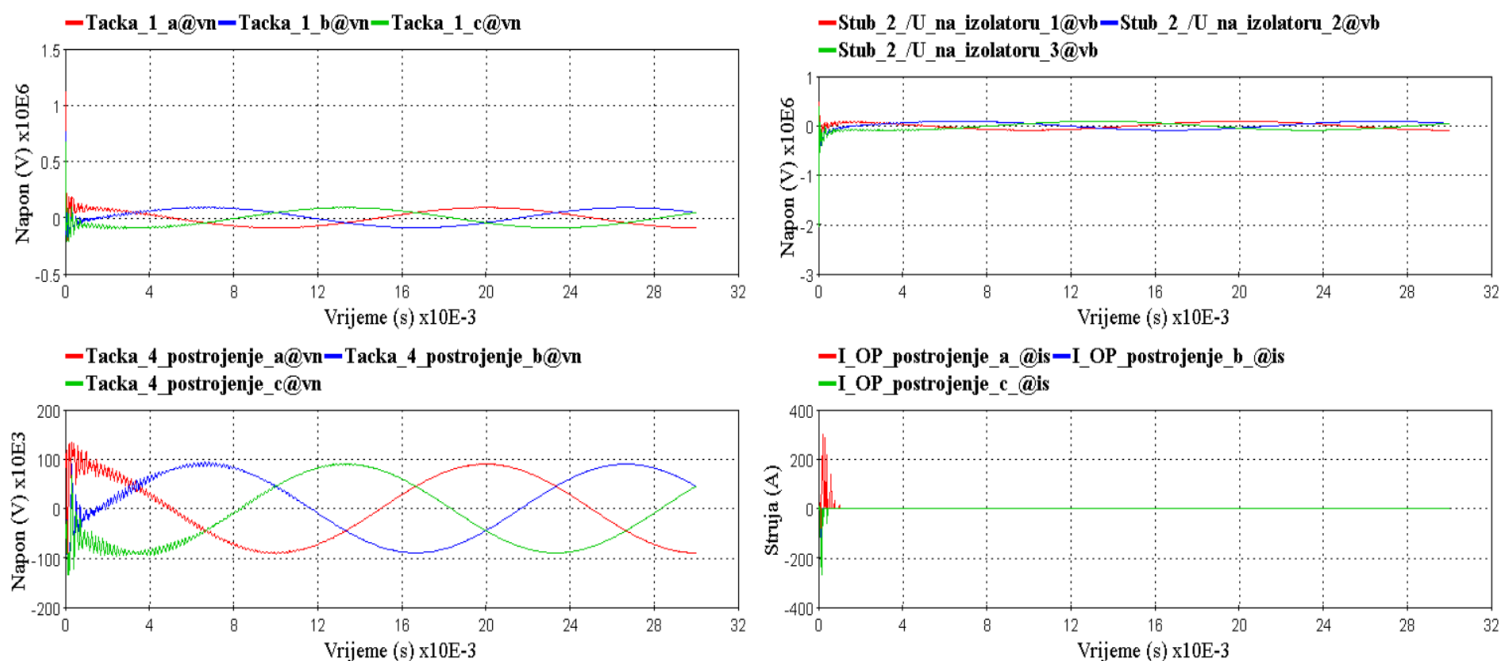
Slika 46. Udar u zaštitno uže, 10kA, bez OP na stubovima



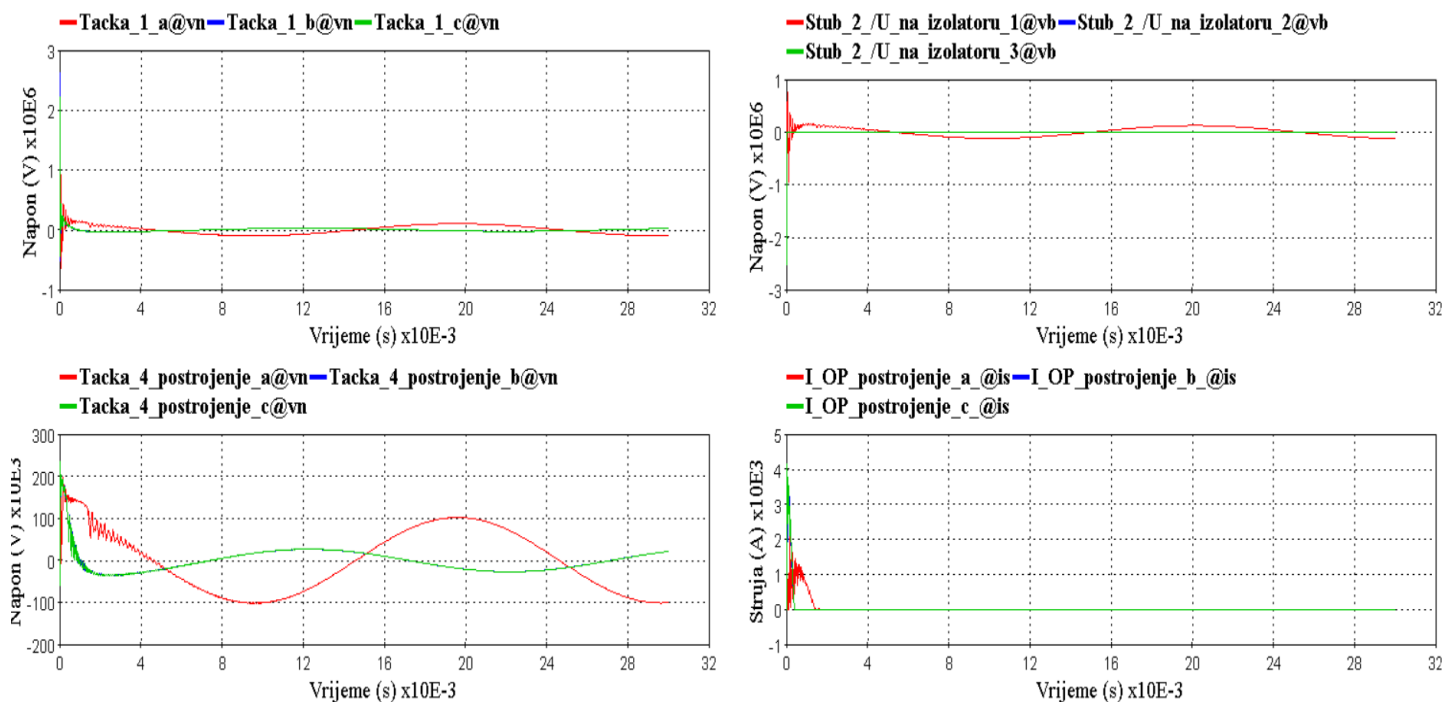
Slika 47. Udar u zaštitno uže, 20kA, bez OP na stubovima



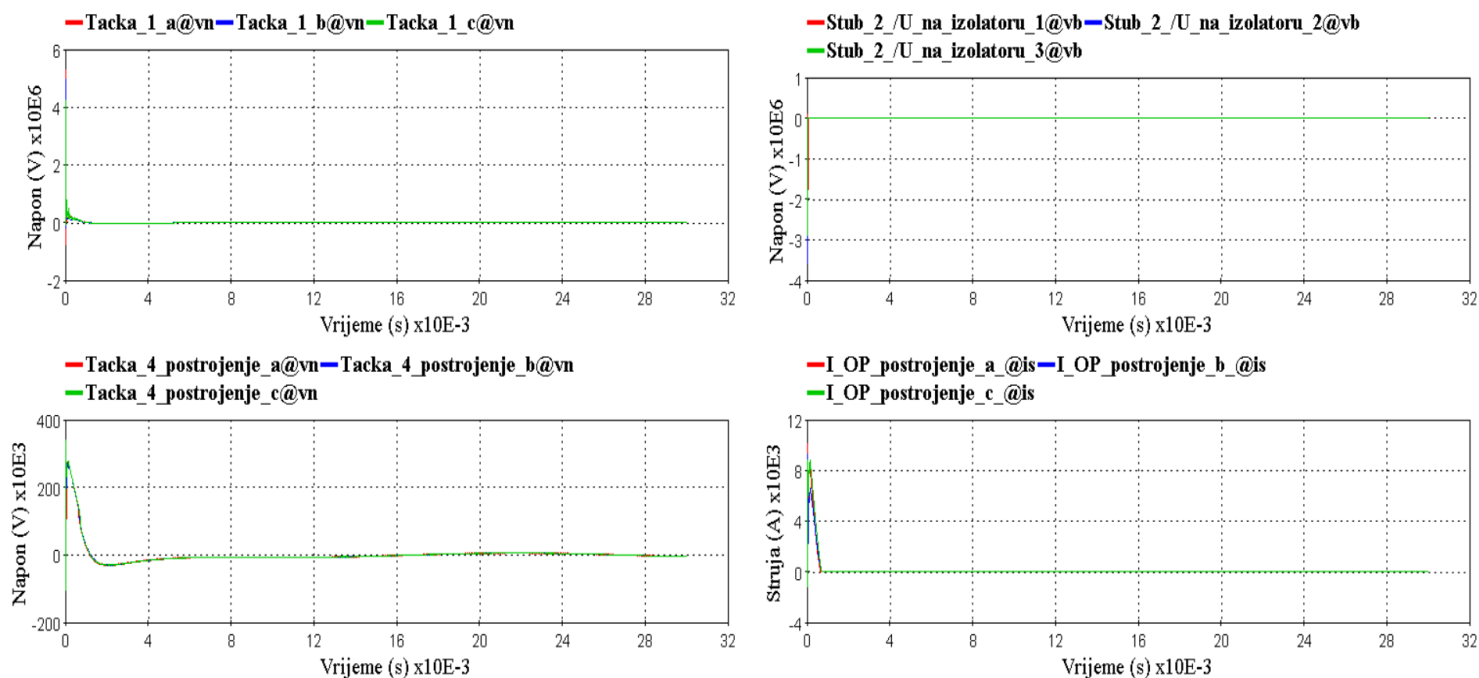
Slika 48. Udar u zaštitno uže, 30kA, bez OP na stubovima



Slika 49. Udar u zaštitno uže, 40kA, bez OP na stubovima



Slika 50. Udar u zaštitno uže, 50kA, bez OP na stubovima



Slika 51. Udar u zaštitno uže, 100kA, bez OP na stubovima

Pored grafičkih prikaza talasnih oblika napona i struje u tačkama mjerenja (na slikama od 46 do 51), u tabeli 5 su prikazane i analitičke vrijednosti, i to: napon poslije stuba broj 2, napon ispred postrojenja, pad napona na izolatorima stubnog mjesta broj 2 i struja kroz OP ispred postrojenja.

Tabela 5. Vrijednosti posmatranih parametara pri atmosferskom pražnjenju u zaštitno uže (maksimalne vrijednosti), kada ne postoje ugrađeni LOP

Udar u zaštitno uže, I_{max} [kA]	Napon u Tački 1 [kV]			Napon ispred postrojenja [kV]			Napon na izolatoru na stubnom mjestu broj 2 [kV]			Struja kroz OP ispred postrojenja [A]		
	“a”	“b”	“c”	“a”	“b”	“c”	“a”	“b”	“c”	“a”	“b”	“c”
faza												
10	436	232	200	120	29	18	239	78	74	37	~0	~0
20	680	430	380	128	13	2	333	180	185	146	4.6	5
30	909	601	531	132	60	50	400	283	293	263	5.4	6
40	1121	767	674	134	90	67	480	384	390	300	5	7
50	1568	2621	2228	197	229	234	57	~0	~0	2113	4109	4140
100	5275	4956	4233	330	332	337	1	~0	~0	10143	9262	8824

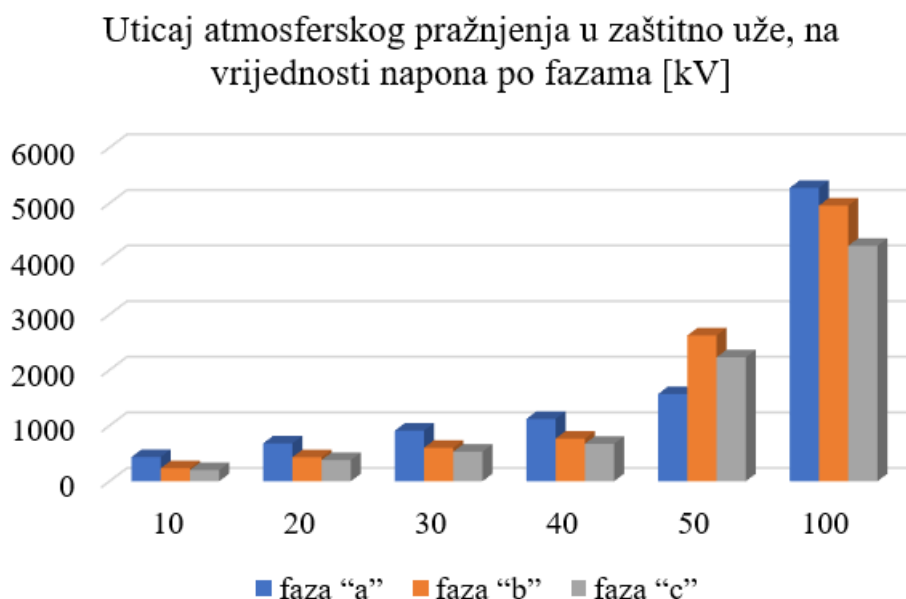
Standardni podnosivi atmosferski udarni napon (efektivna vrijednost) za 110 kV naponski nivo je 550, dok je amplituda 778 kV.

Kako bi se izvršila korektna analiza pri atmosferskom pražnjenju u element mreže, bitno je znati da li se pražnjenje desilo kada je analizirani fazni napon bio u pozitivnom ili negativnom dijelu xy ose. U ovom slučaju modelovanje je izvršeno tako da je pražnjenje započelo u vremenskom trenutku 0, kada je faza “a” imala vrijednost napona 90 kV, faze “b” i “c”-45 kV. Kada je fazni napon u opoziciji sa prenaponskim talasom dobijaju se niže vrijednosti prenapona i izolacija izdrži prenapon i sprječava nastanak proboja, u zavisnosti od vrijednosti prenaponskog talasa i postojanja zaštitnih elemenata.

Shodno navedenom zaključuje se da je faza “a” u ovom slučaju najugroženija, dok se iz tabele može vidjeti da faza “a” ima najviše vrijednosti napona usljed uticaja prenaponskog talasa.

Na osnovu analize grafika (slike od 46-51) i tabele 5, može se zaključiti da faza “c”, odnosno najniža faza ima najveći prirast. U praksu se potvrdilo da je pojava povratnog preskoka najizraženija na najnižoj fazi. Posmatrajući vrijednosti napona u tabeli, zaključuje se da pri prenaponu većem od 30 kA, vrijednosti napona na fazi “a” su veće od podnosivog napona izolacije za 110 kV mrežu. To znači da je došlo do preskoka, jer u slučaju pojave većeg napona u odnosu na podnosivi napon izolacije, doći će do preskoka. Sa slike 50 se vidi da je došlo do proboja izolacije jer napon na izolatorima faze “b” i “c” pada na 0. Za vrlo visoke vrijednosti prenapona (za struju atmosferskog pražnjenja od 50 kA i više) dolazi do proboja izolacije na svakoj fazi.

Na slici 52 je, za tačku mjerenja 1, grafički prikazana analiza izmjerenih vrijednosti faznih napona pri uticaju prenapona.



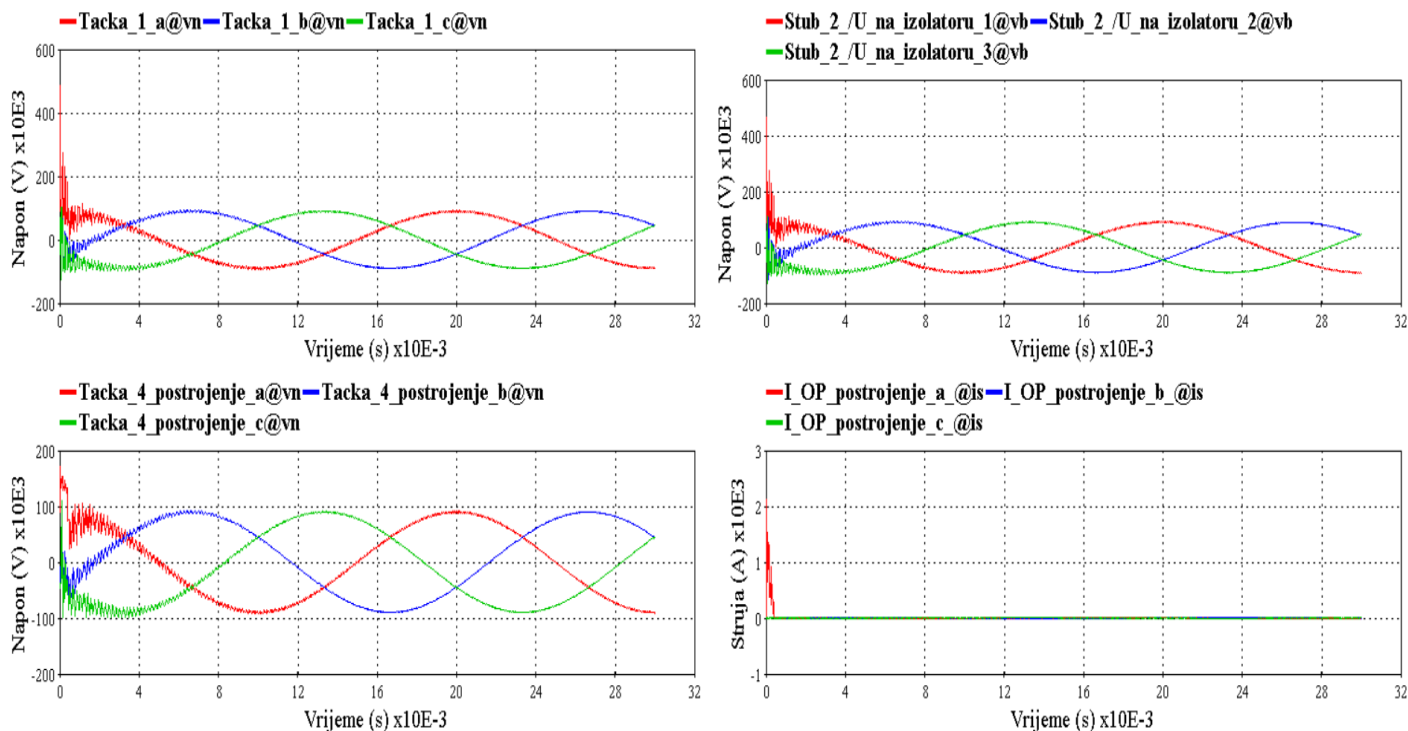
Slika 52. Uporedna analiza uticaja prenapona na vrijednost faznih napona u tački mjerenja 1

Sa slike 52 se uočava da je već pri vrijednosti prenapona od 30 kA izmjerena vrijednost napona na fazi "a" veća od vrijednosti podnosivog atmosferskog udarnog napona, dok je za veće vrijednosti prenapona (50 kA i 100 kA) došlo do proboja izolacije na svakoj fazi, čime su potvrđeni zaključci sa prethodne stranice.

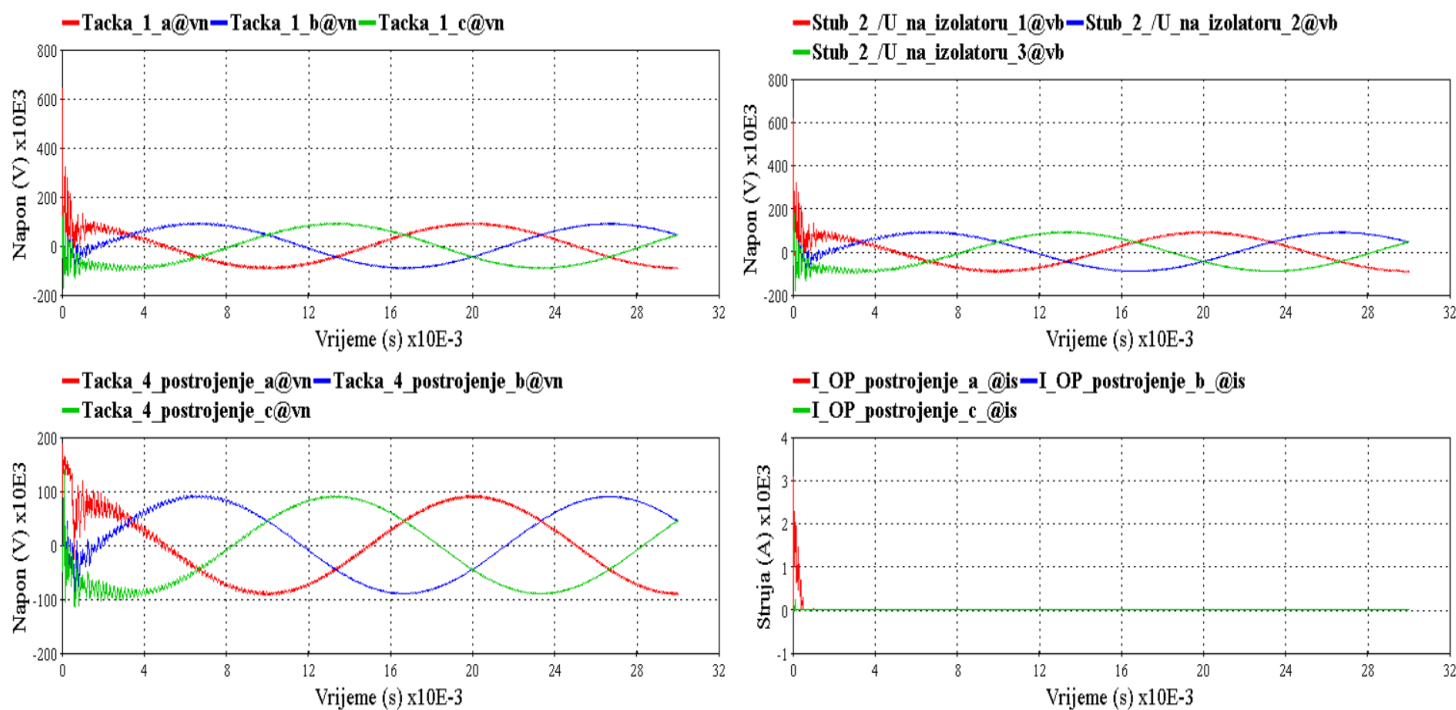
5.2.2 Udar direktno u fazu "a"

Dalja analiza se odnosi na posmatranje modelovanog sistema za slučaj kada se atmosfersko pražnjenje dešava direktno u fazni provodnik.

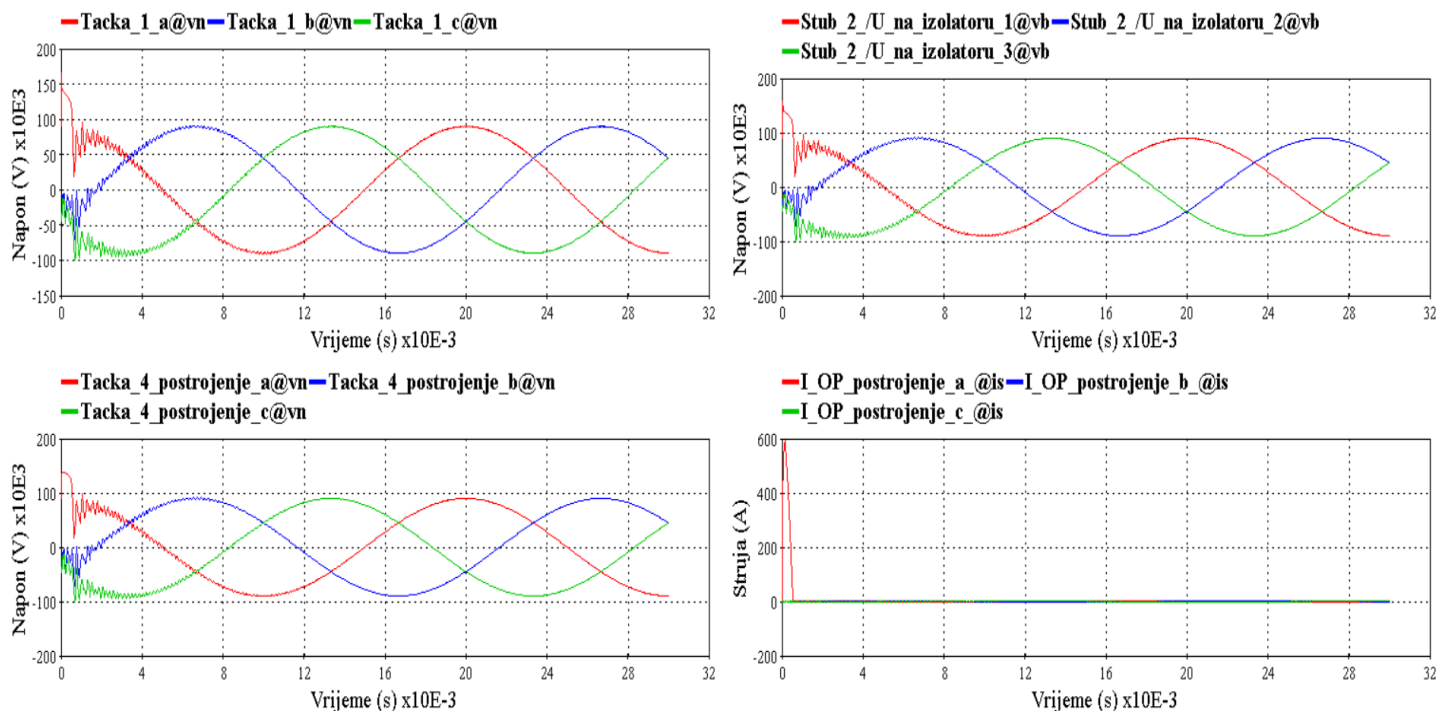
Na slikama od 53 do 59 su prikazani talasni oblici napona u tačkama mjerenja obilježenim na modelu (prikazanom na slici 45) sa Tačka 1, Tačka 4, zatim vrijednost napona na izolatorima stuba broj 2 i vrijednost struje koja protiče kroz odvodnike prenapona ispred postrojenja. Navedene vrijednosti su izmjerene za slučaj atmosferskog pražnjenja direktno u fazni provodnik, i to za slučajeve kada postoje i ne postoje ugrađeni linijski odvodnici prenapona na stubnom mjestu broj 2. Simulacije su vršene pri različitim vrijednostima amplituda struje atmosferskog pražnjenja, i to: 2 kA, 2.9 kA, 10 kA i 40 kA.



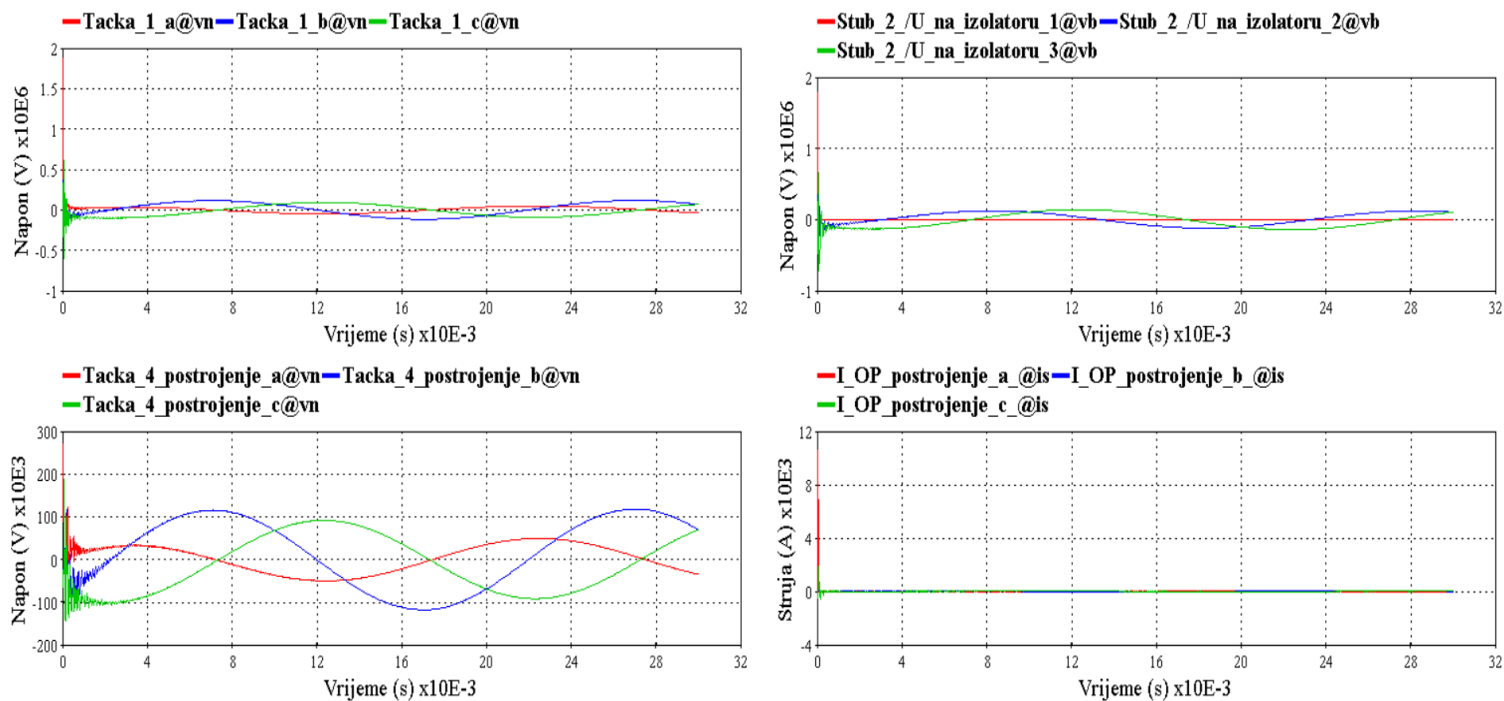
Slika 53. Udar u fazu a, 2kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja



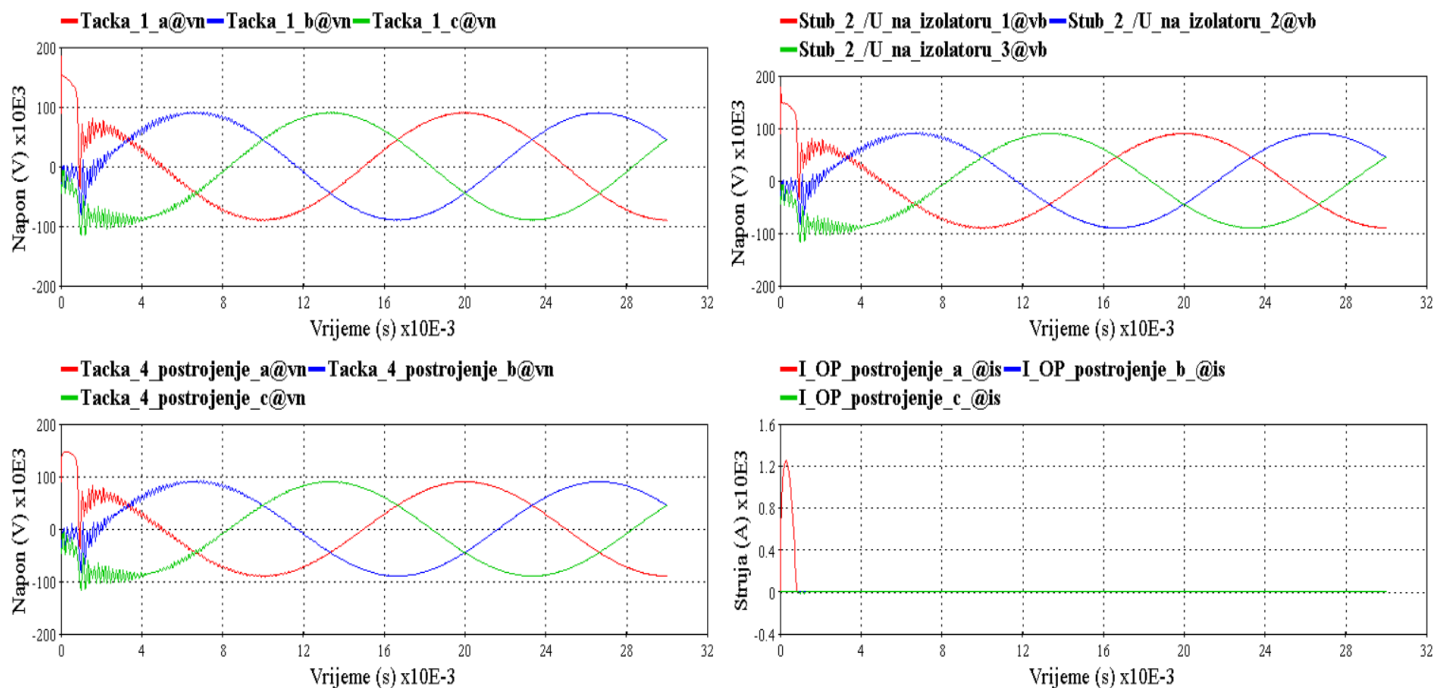
Slika 54. Udar u fazu "a", 2.9kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja



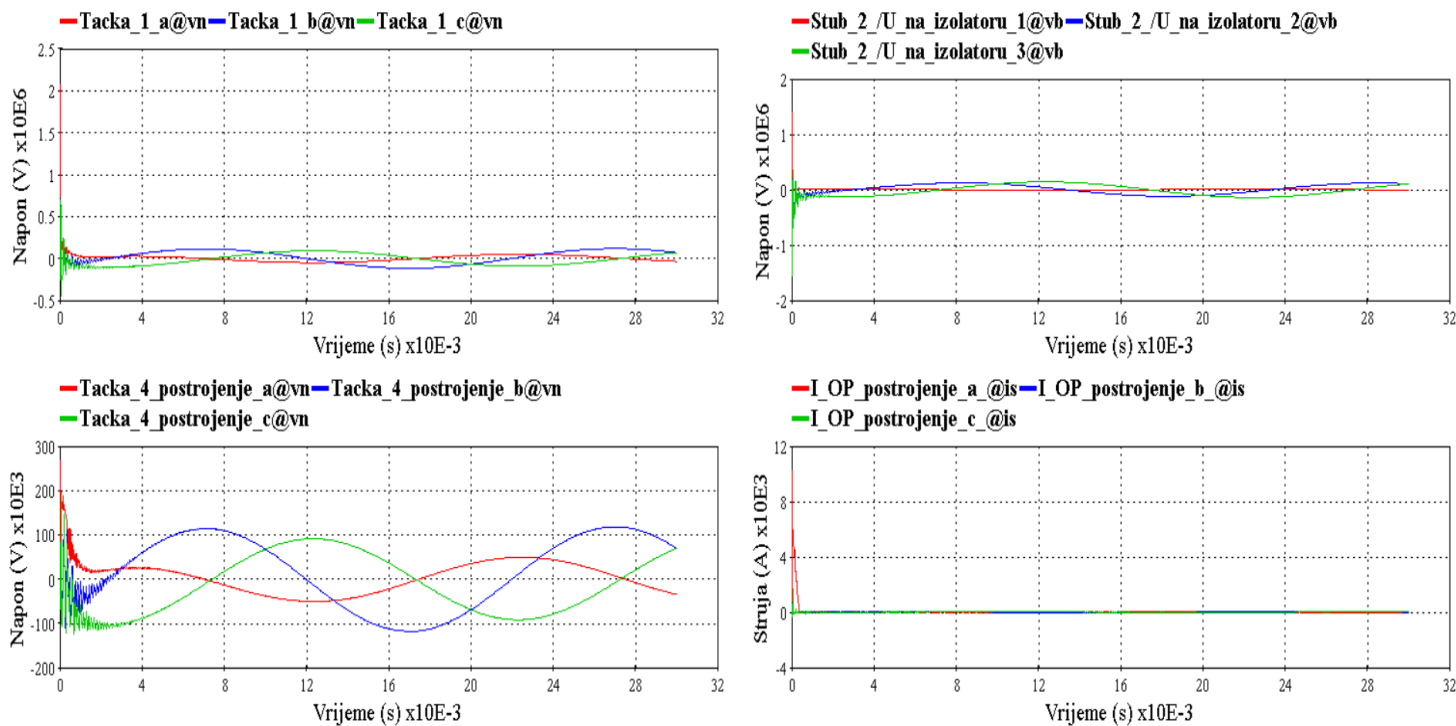
Slika 55. Udar u fazu "a", 2.9kA, sa OP na stubu, sa OP ispred postrojenja



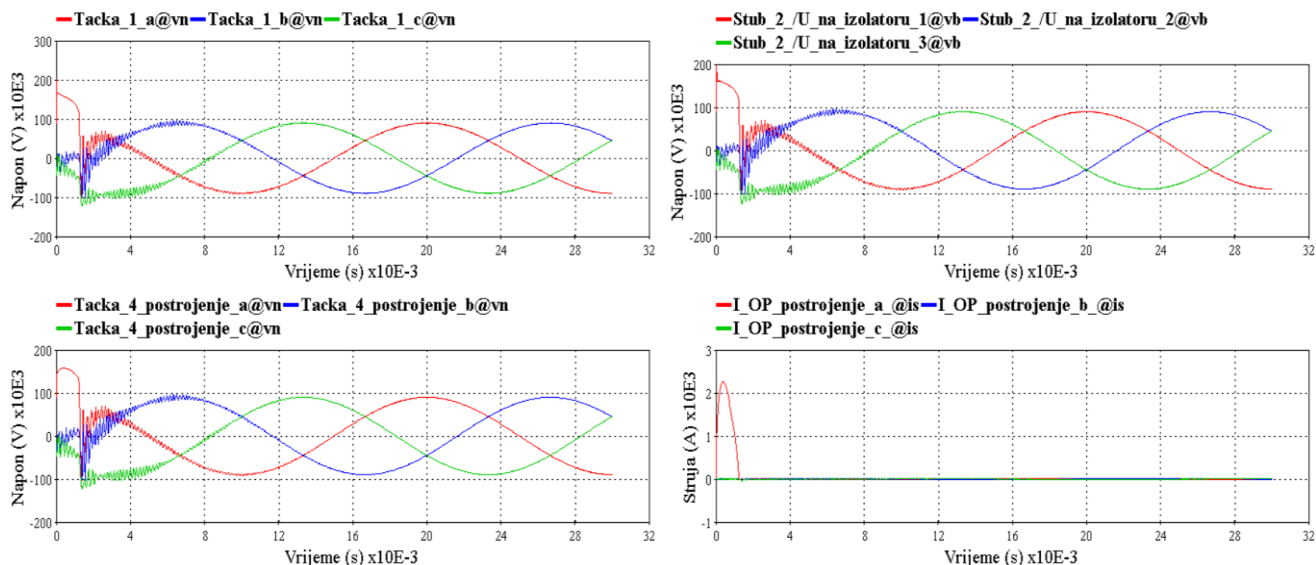
Slika 56. Udar u fazu "a", 10kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja



Slika 57. Udar u fazu "a", 10kA, sa OP na stubu, sa OP ispred postrojenja



Slika 58. Udar u fazu "a", 40kA, bez OP na stubu, sa OP ispred postrojenja



Slika 59. Udar u fazu "a", 40kA, sa OP na stubu, sa OP ispred postrojenja

Iz prethodnih slika (od 53 do 59) zapaža se da su, u slučaju direktnog udara atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, znatno niže vrijednosti amplituda struja atmosferskog pražnjenja pri kojima dolazi do narušavanja svojstava izolacije i pojave povratnog preskoka. U nastavku su prikazane analitičke vrijednosti napona i struje, i to vrijednost napona mjerena poslije stuba broj 2, vrijednost napona ispred postrojenja, pad napona na izolatorima stubnog mjesta broj 2 i vrijednost struja kroz OP ispred TS. Navedena mjerenja su izvršena za slučaj pojave atmosferskog pražnjenja u najvisočiju fazu-fazu "a", i to za različite vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja, kao što je prikazano u tabeli 6.

U ovom modelu se nije razmatrao efekat jonizacije pri određivanju otpora uzemljenja stubnih mjesta, već je usvojena vrijednost statičkog otpora uzemljenja od 30 Ω za svako stubno mjesto.

Tabela 6. Vrijednosti posmatranih parametara pri atmosferskom pražnjenju u fazu "a"

Udar u fazni provodni I_{max} [kA]	OP na stubu 2	Napon u Tački 1 [kV]			Napon ispred postrojenja [kV]			Napon na izolatoru na stubnom mjestu 2 [kV]			Struja kroz OP ispred postrojenja [A]		
		"a"	"b"	"c"	"a"	"b"	"c"	"a"	"b"	"c"	"a"	"b"	"c"
2	ne	485	103	100	172	109	110	465	106	111	2116	~0	~0
2.9	ne	645	152	162	187	140	140	616	167	177	3069	202	224
2.9	da	165	1,5	12.3	137	2.7	11.3	157	2.8	14	591	~0	~0
10	ne	1872	583	618	267	184	188	1787	628	668	10558	1542	1869
10	da	185	11	6	146	10	5	179	11	7	1256	~0	~0
40	ne	2066	719	695	266	191	192	0	332	355	10221	1547	1663
40	da	200	56	7.5	157	3	14	196	50	4	2260	~0	~0

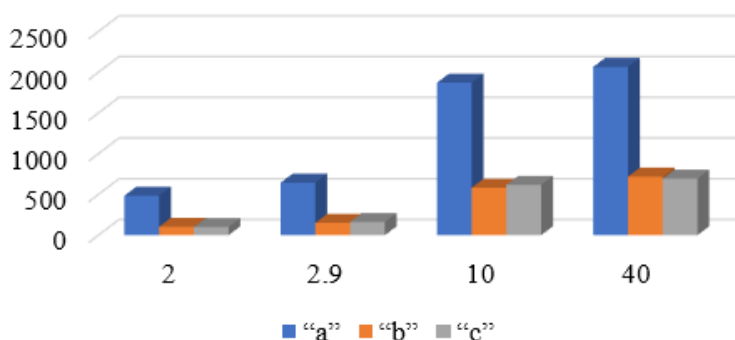
Analizom grafika prikazanih u ovom poglavlju, kao i analitičkih vrijednosti datih u tabeli 6, zaključuje se da do proboja izolacije prvo dolazi na fazi na kojoj je došlo do direktnog atmosferskog pražnjenja. Uticaj prenaponskog talasa se osjeća i na susjednim rasponima, do postrojenja, gdje su ugrađeni odvodnici prenapona.

Do proboja izolacije dolazi već pri struji atmosferskog pražnjenja vrijednosti 10 kA, što se može vidjeti i sa slike 56, gdje napon na izolatoru faze "a" ima vrijednost 0.

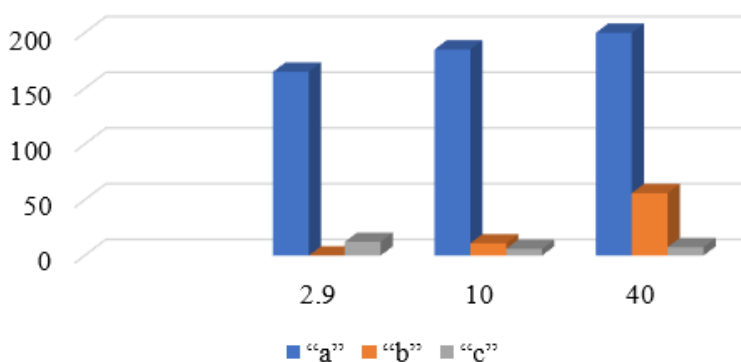
Takođe, analizirajući vrijednosti iz tabele 6 i posmatrajući grafike, može se potvrditi da je uloga odvodnika prenapona ogromna u zaštiti elemenata mreže od pojave prenapona, što se može zaključiti i sa slike 60. Vrijednosti napona u tački 1, mjernom mjestu gdje se napon posmatra nakon stubnog mjesta broj 2, su u granicama koje su ispod podnosivog napona mreže. Zaključuje se da za prikazane vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja, kada se pražnjenje dešava direktno u fazu "a" i kada postoje ugrađeni odvodnici prenapona na stubnom mjestu 2, neće doći do proboja izolacije.

Uticaj atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, na vrijednosti napona po fazama [kV]

1. bez OP na stubu br. 2



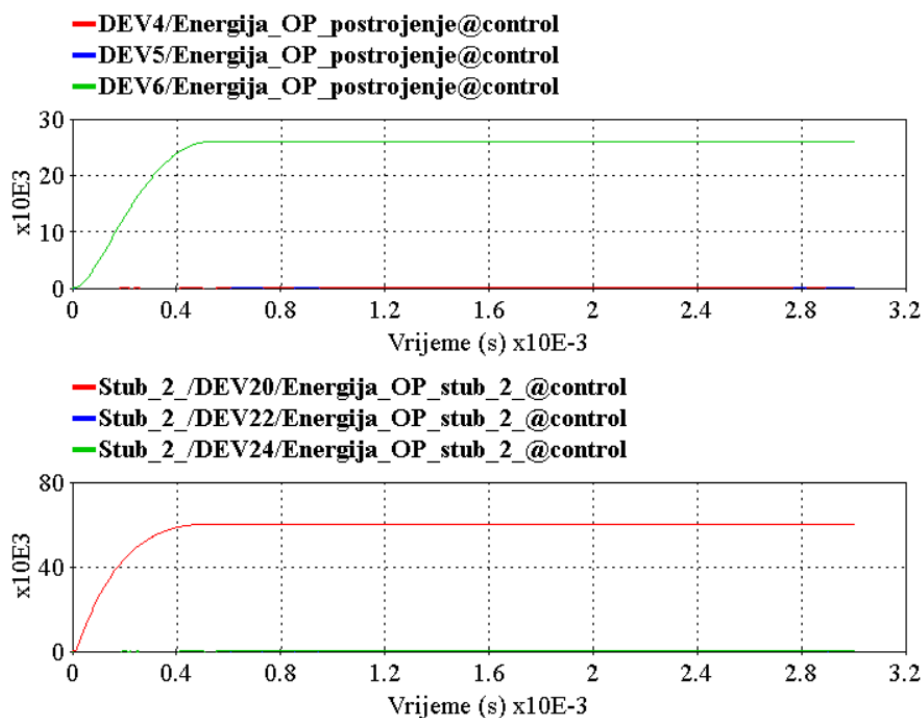
2. sa OP na stubu br. 2



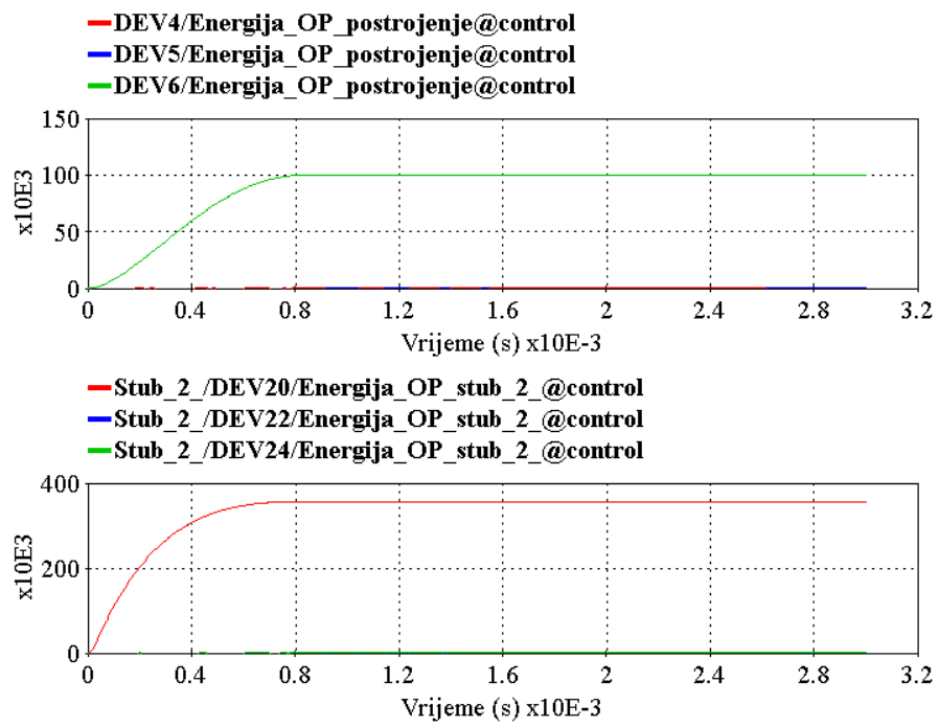
Slika 60. Uporedna analiza uticaja prenapona na vrijednost faznih napona u tački mjerenja 1.

Daljom analizom grafika i analitičkih vrijednosti određiće se energetska opterećenost odvodnika prenapona ispred postrojenja i linijskih odvodnici prenapona, respektivno.

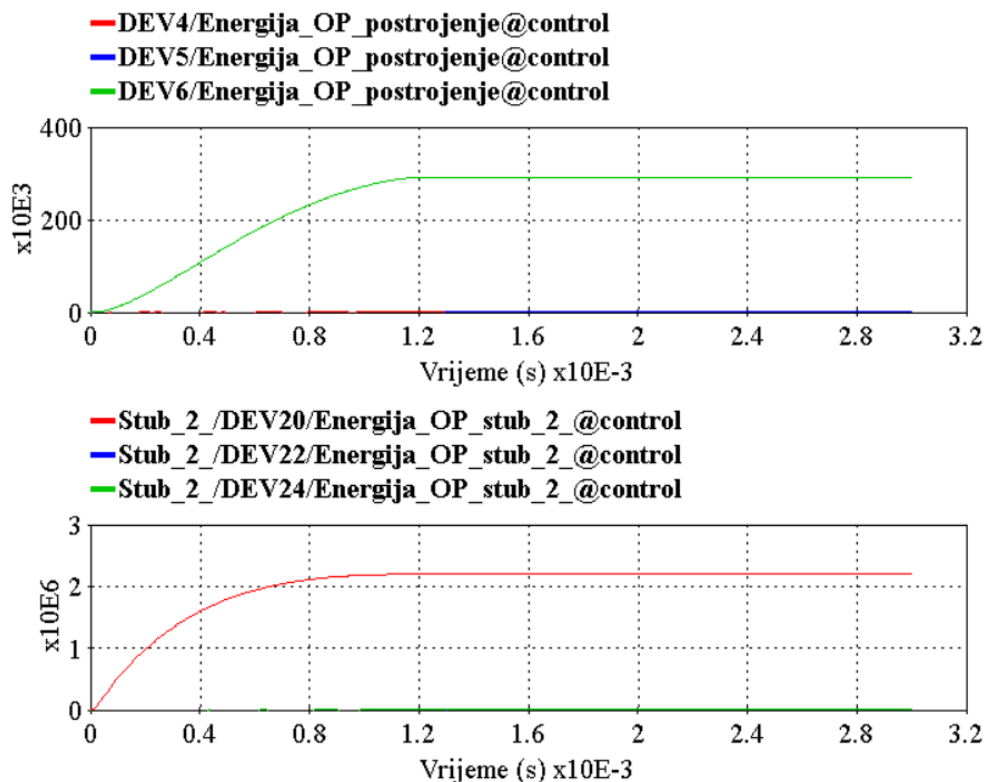
Na slikama 86-89 je prikazana energetska opterećenost odvodnika prenaponsa za različite vrijednosti amplituda struja atmosferskog pražnjenja (2.9 kA, 10 kA, 40 kA i 100 kA) direktno u fazu "a".



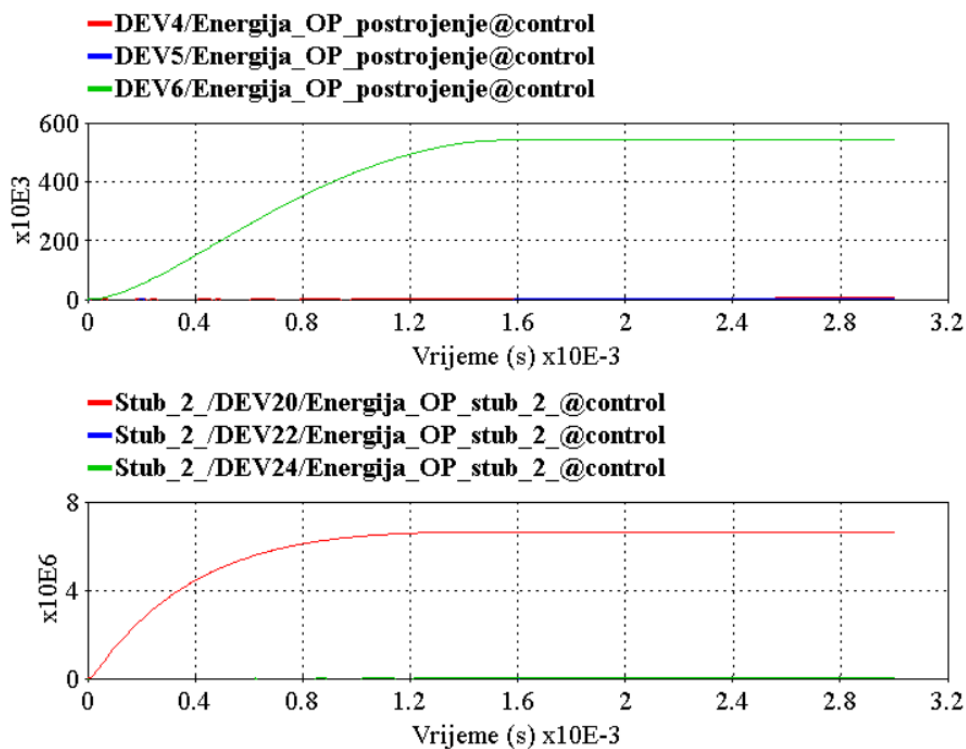
Slika 61. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 2.9 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



Slika 62. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 10 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



Slika 63. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 40 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



Slika 64. Energija kroz OP za struju atmosferskog pražnjenja od 100 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")

Grafički prikazi energije kroz odvodnike prenapona, prikazane na slikama 61, 62, 63 i 64 su prikazani analitičkim vrijednostima u tabeli 7.

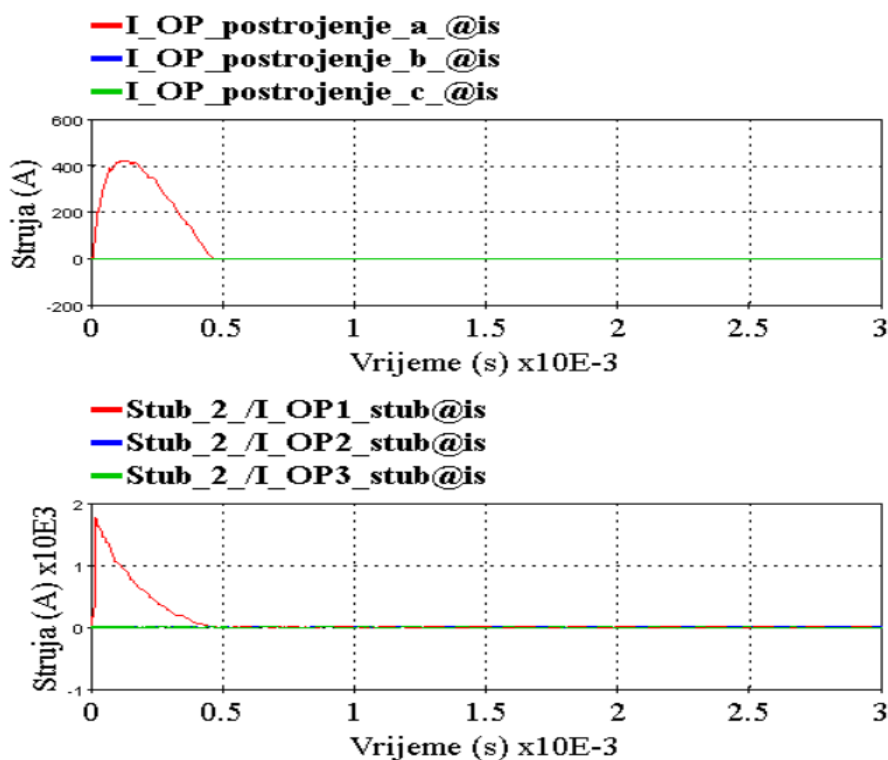
Tabela 7. Energetsko opterećenje OP pri pojavi prenapona

Udar u fazni provodni I_{max} [kA]	Energija na OP ispred postrojenja [kJ]	Energija na OP na stubu broj 2 [kJ]	Energija na OP na stubu broj 2 [kJ], bez OP ispred postrojenja
faza	c	a	a
2.9	26	61	62
10	100	360	458
40	295	2200	2500
100	540	6617	7200

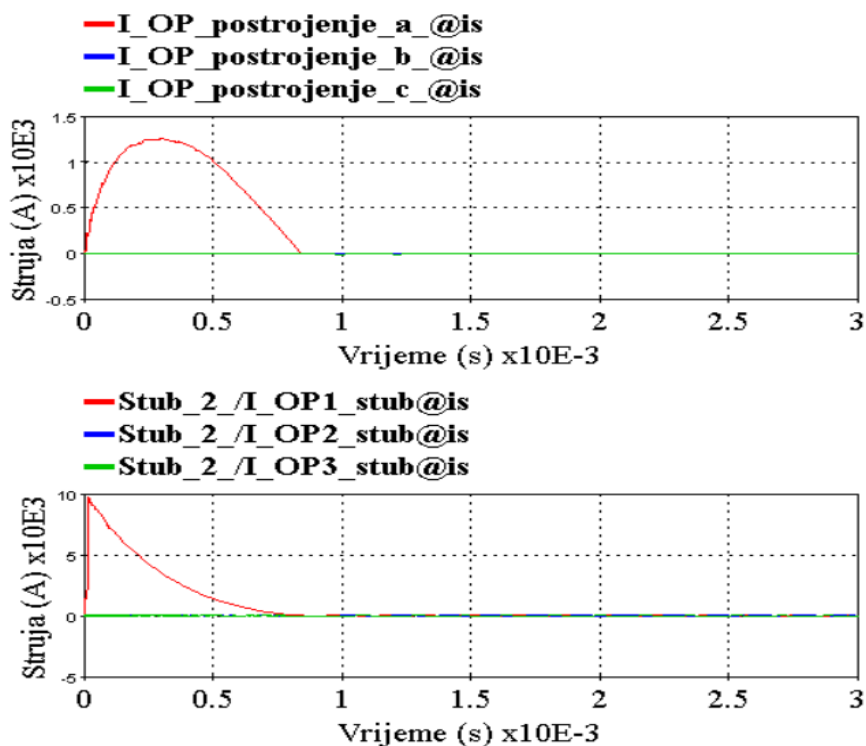
Maksimalna vrijednost energije koju odabrani linijski odvodnik prenapona može da propusti a da ostane stabilan jeste $102 \cdot 11 = 1122$ kJ (računa se prema kataloškim vrijednostima $U_r = 102$ kV, 11 kJ/kV), dok je za odvodnike prenapona ispred postrojenja $108 \cdot 11 = 1188$ kJ (računa se prema kataloškim vrijednostima $U_r = 108$ kV, 11 kJ/kV). Analizom grafika i vrijednosti iz tabele 7 koje su učitane sa grafika (slike 61-64), zaključuje se da su odvodnici ispred postrojenja najmanje opterećeni, i kod njih najveću vrijednost energije prihvata otpornik na posljednjoj fazi.

Odvodnik prenapona na stubu 2 je najopterećeniji na fazi "a", gdje se i dešava direktno atmosfersko pražnjenje. Analizom tabele zaključuje se, da pri struji atmosferskog pražnjenja od 40 kA i 100 kA, linijski odvodnik biva preopterećen, odnosno dolazi do njegovog razaranja. Odvodnici prenapona ispred postrojenja značajno rasterećuju linijske odvodnike prenapona, što se može zaključiti na osnovu vrijednosti iz poslednje kolone, kada su odvodnici prenapona ispred postrojenja isključeni.

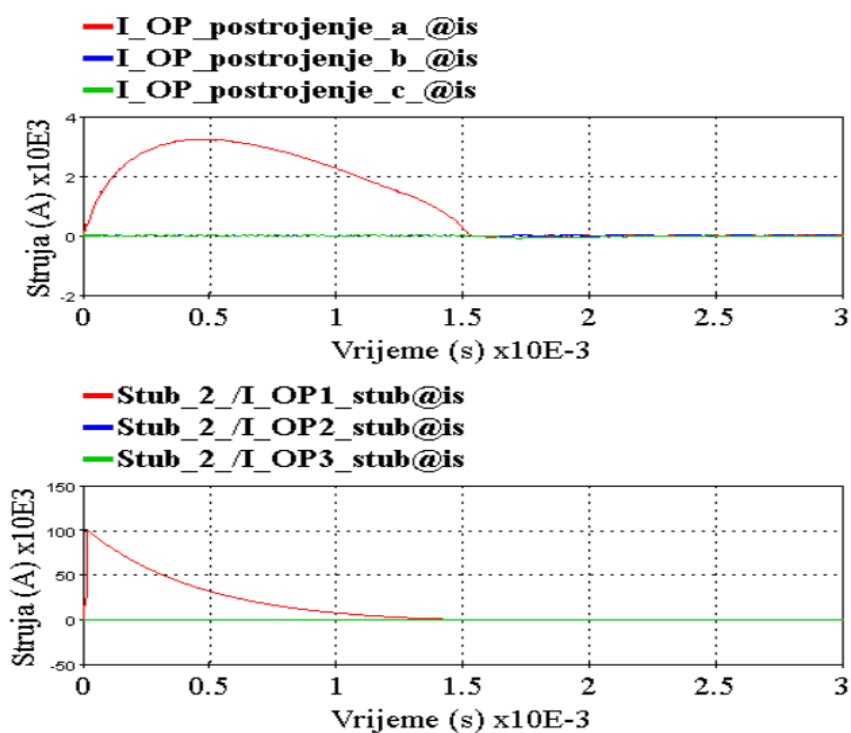
U nastavku (slike 65, 66 i 67) su prikazane slike sa grafičkim prikazom struje koja protiče kroz odvodnike prenapona na stubu broj 2 i ispred postrojenja.



Slika 65. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 2kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



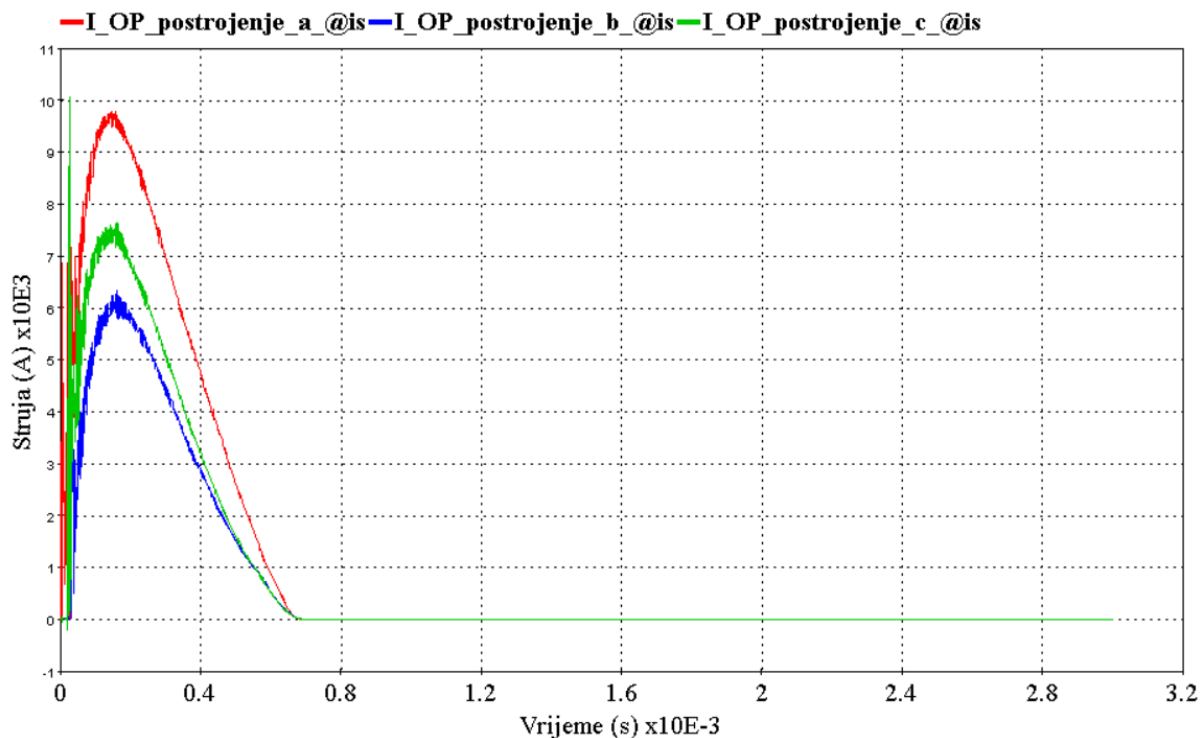
Slika 66. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 10kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



Slika 67. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 100kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")

Analizom slika 65-67 zaključuje se da je odvodnik prenapona faze "a", na stubnom mjestu 2 opterećen približno istom vrijednosti struje koju se ispraznila udarom atmosferskog pražnjenja u najvišočiju fazu. Vrijednosti struje kroz odvodnike prenapona ispred postrojenja su znatno manje.

Za slučaj da ne postoje linijski odvodnici prenapona, izgled vremenskog oblika struje kroz odvodnike prenapona ispred postrojenja izgleda kao na slici 68.



Slika 68. Vremenska promjena struje kroz odvodnike prenapona pri struji atmosferskog pražnjenja od 100kA, kada ne postoje ugrađeni linijski OP (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")

Posmatranjem slike 68 zaključuje se da su odvodnici prenapona ispred postrojenja znatno opterećeniji nego u slučaju kada su ugrađeni linijski odvodnici prenapona u dijelu mreže gdje se dešavaju atmosferska pražnjenja, što potvrđuje jedan od prethodnih zaključaka o raspodjeli energije između OP. Analiziran je slučaj samo kada se desi pražnjenje direktno u fazni provodnik, jer u slučaju pražnjenja u zaštitno uže ili stub, ne dolazi do pojave velikih vrijednosti struja kroz odvodnike prenapona.

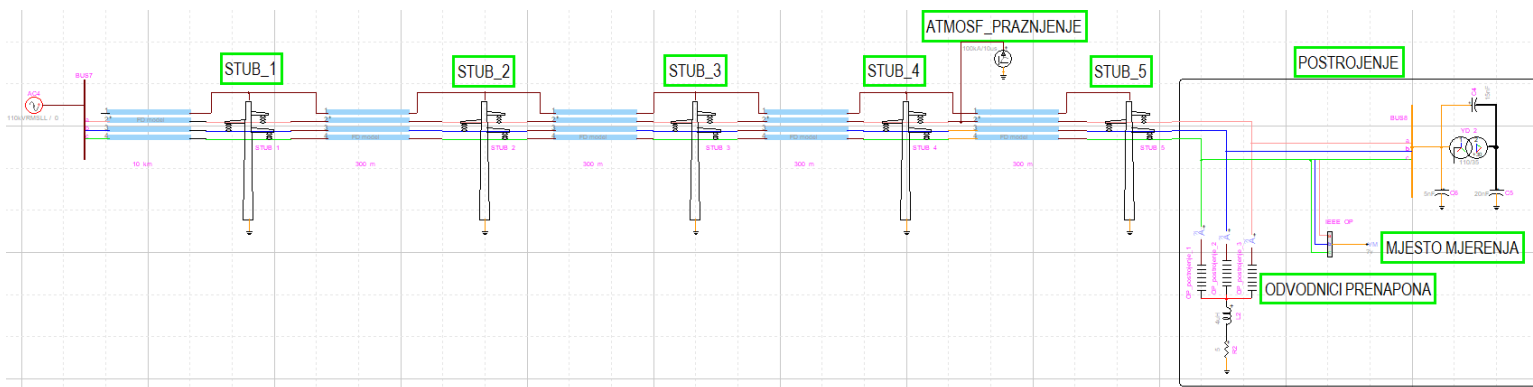
5.3 Modelovanje odvodnika prenapona prema različitim U-I karakteristikama i uporedna analiza

Odvodnici prenapona su elementi sa izraženom nelinearnom naponsko-strujnom karakteristikom. Ova nelinearnost značajno povećava kompleksnost proračuna u elektroenergetskim mrežama, s obzirom da je za svaki vremenski trenutak proračuna potrebno sprovesti određeni broj iteracija određivanja stanja odvodnika prenapona i njegovih strujno-naponskih prilika. Osim toga, značajno se povećava i vrijeme trajanja proračuna i simulacija u softverskim paketima, jer je ovaj postupak potrebno provesti za svaki odvodnik prenapona u analiziranoj mreži.

U dostupnoj literaturi postoji više različitih modela odvodnika prenapona, kojima se sa manje ili više detalja obuhvataju konstruktivne i zaštitne karakteristike. Primarni cilj svakog od ovih modela jeste povećanje tačnosti proračuna u određenom dijelu vezanom za karakteristiku koja se analizira i posmatra.

U ovom poglavlju je izvršena uporedna analiza odvodnika prenapona koji su modelovani prema različitim U-I karakteristikama, i to: EMTP model odvodnika prenapona, model prema U-I karakteristici predstavljenoj u literaturi dr. Milana Savića, odvodnik prenapona modelovan prema IEEE standardu i odvodnik prenapona modelovan prema teorijskoj U-I karakteristici.

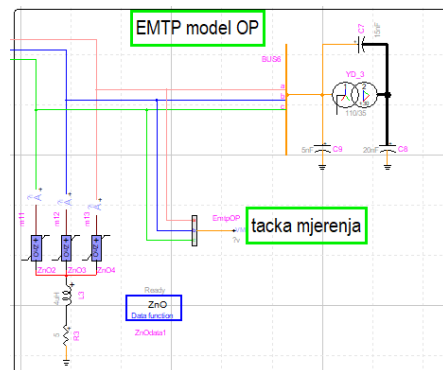
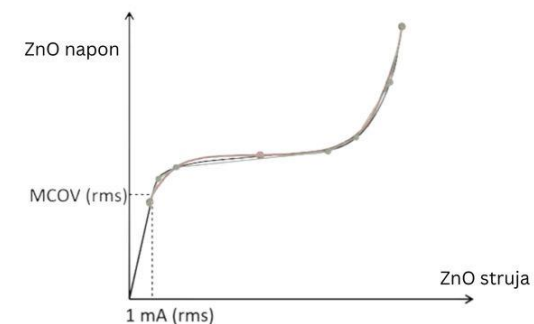
Cilj istraživanja je analiza rada pojedinih modela odvodnika prenapona u zavisnosti od različitih uticajnih faktora, kao i određivanje opsega tačnosti pojedinih modela. Na slici 69 prikazan je dio 110 kV mreže modelovan u EMTP programskom paketu.



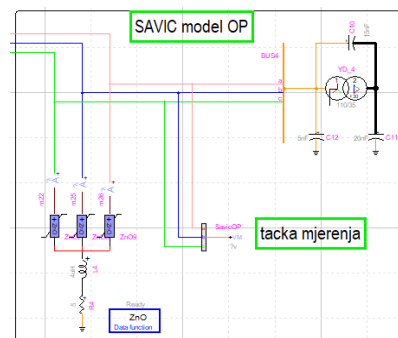
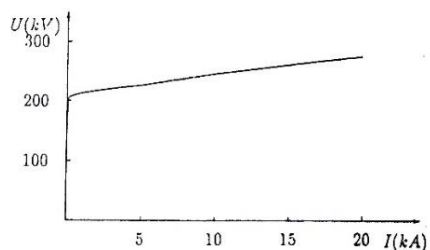
Slika 69. Dio 110 kV mreže modelovan u EMTP-u

U nastavku će se izvršiti analiza modelovanog dijela 110 kV mreže, prikazanog na slici 69, na način što će se porediti rezultati dobijeni pri modelovanju odvodnika prenapona prema različitim U-I karakteristikama, dok će ostali modelovani elementi dijela posmatrane mreže ostati potpuno isti. Analiza je izvršena poređenjem rezultata dobijenih za slučaj kada se mijenjaju samo odvodnici prenapona postavljeni ispred postrojenja.

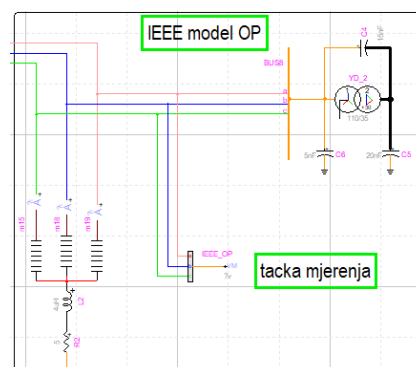
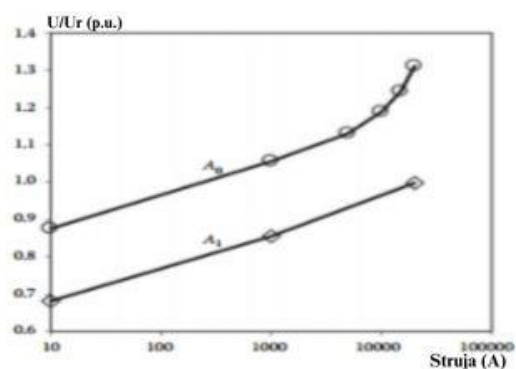
Na prikazanom dijelu mreže ne postoje ugrađeni linijski odvodnici prenapona, već samo odvodnici prenapona ispred postrojenja, koji su modelovani na 4 načina, prema U-I karakteristici za EMTP model OP, SAVIĆ model OP, IEEE model OP i za TEORIJSKI model OP, kao što je prikazano na slikama 70, 71, 72 i 73.



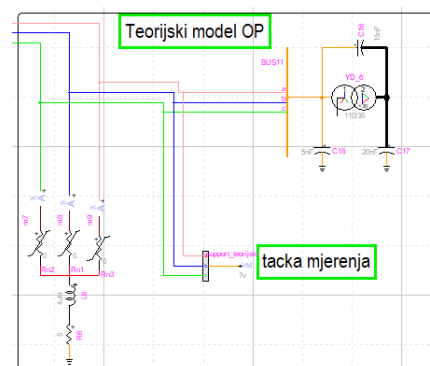
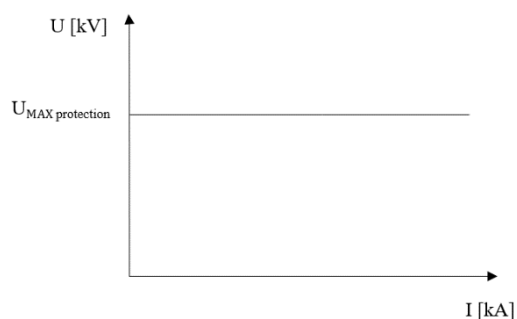
Slika 70. U-I karakteristika za EMTP model OP i modelovanje u EMTP



Slika 71. U-I karakteristika za SAVIĆ model OP i modelovanje u EMTP

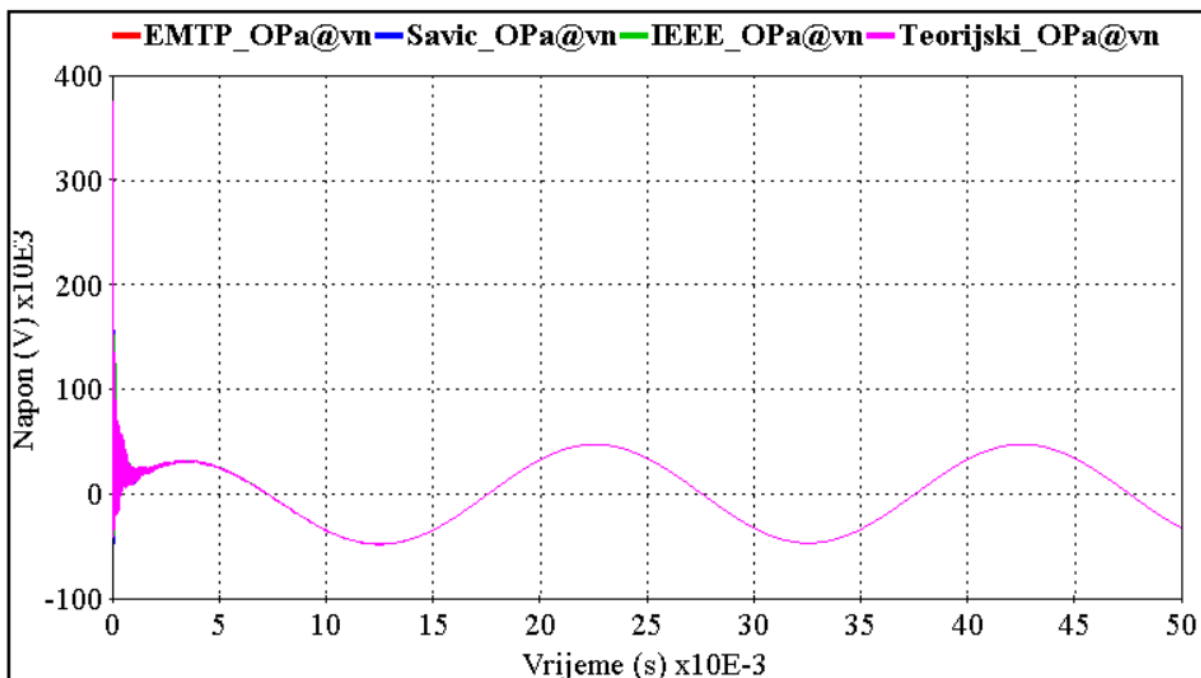


Slika 72. U-I karakteristika za IEEE model OP i modelovanje u EMTP

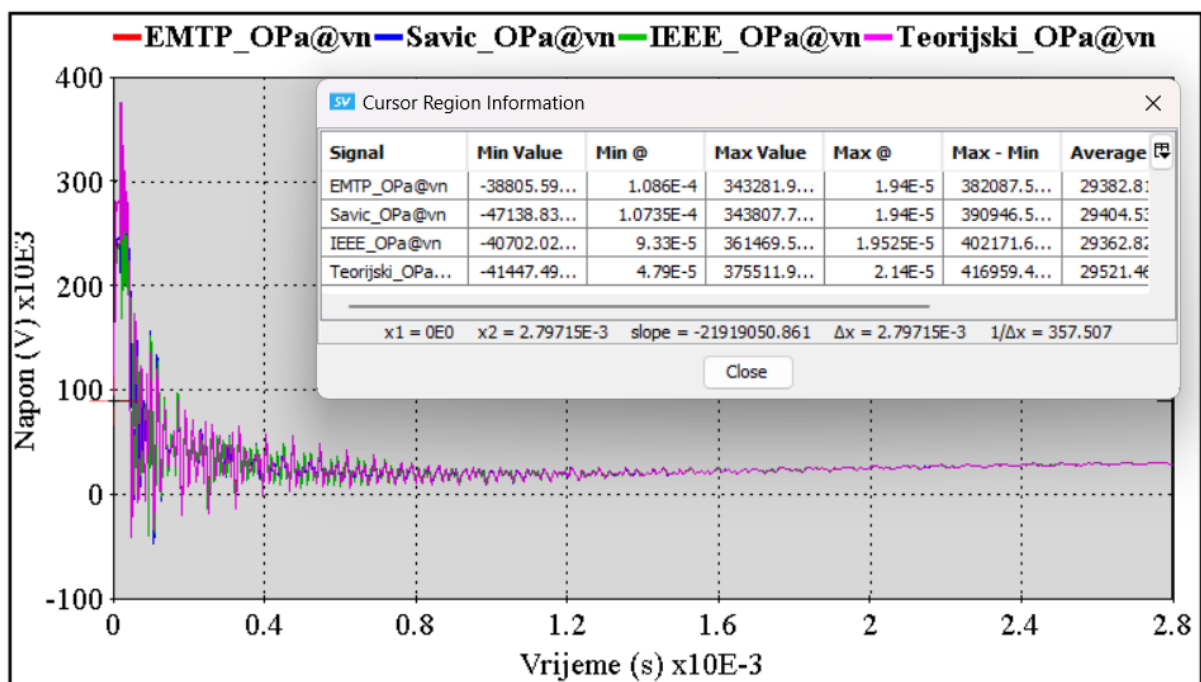


Slika 73. U-I karakteristika za TEORIJSKI model OP i modelovanje u EMTP

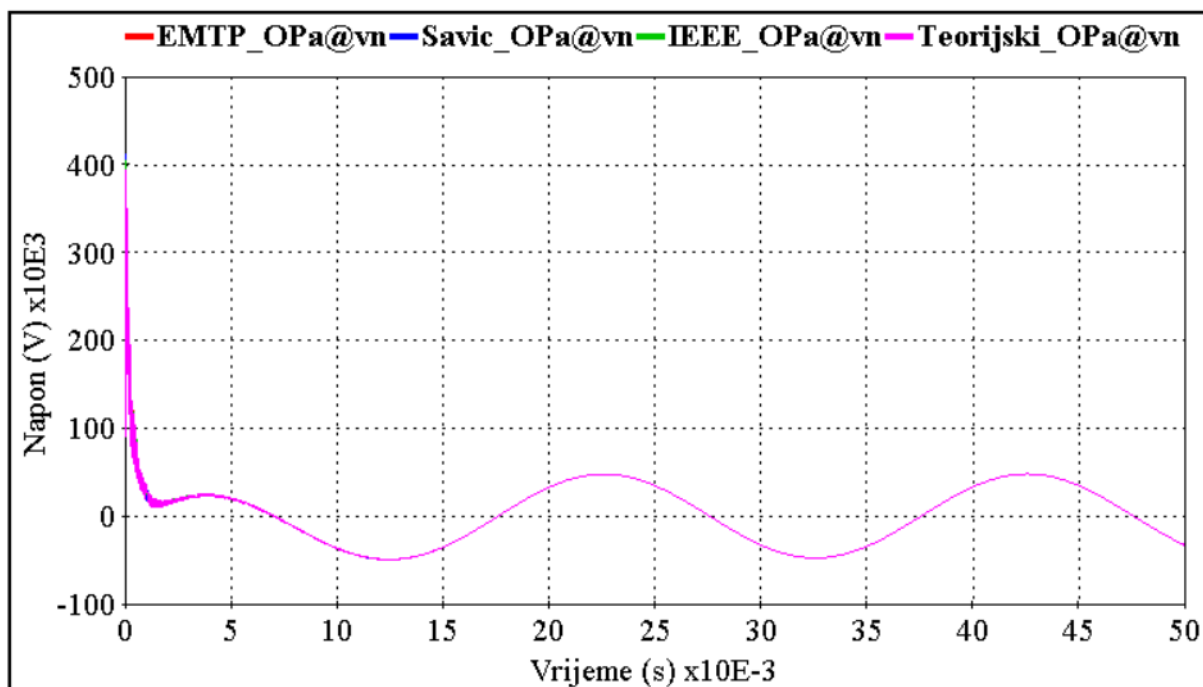
Izvršeno je modelovanje za svaki od navedenih modela sa slika 70-73, za slučaj da je do atmosferskog pražnjenja došlo u fazu “a”, u poslednjem rasponu ispred postrojenja. Pri atmosferskom pražnjenju čija je amplituda struje atmosferskog pražnjenja 10 kA, dobija se vremenska promjena napona za fazu “a”, za svaki model odvodnika prenapona, kao što je prikazano na slici 74.



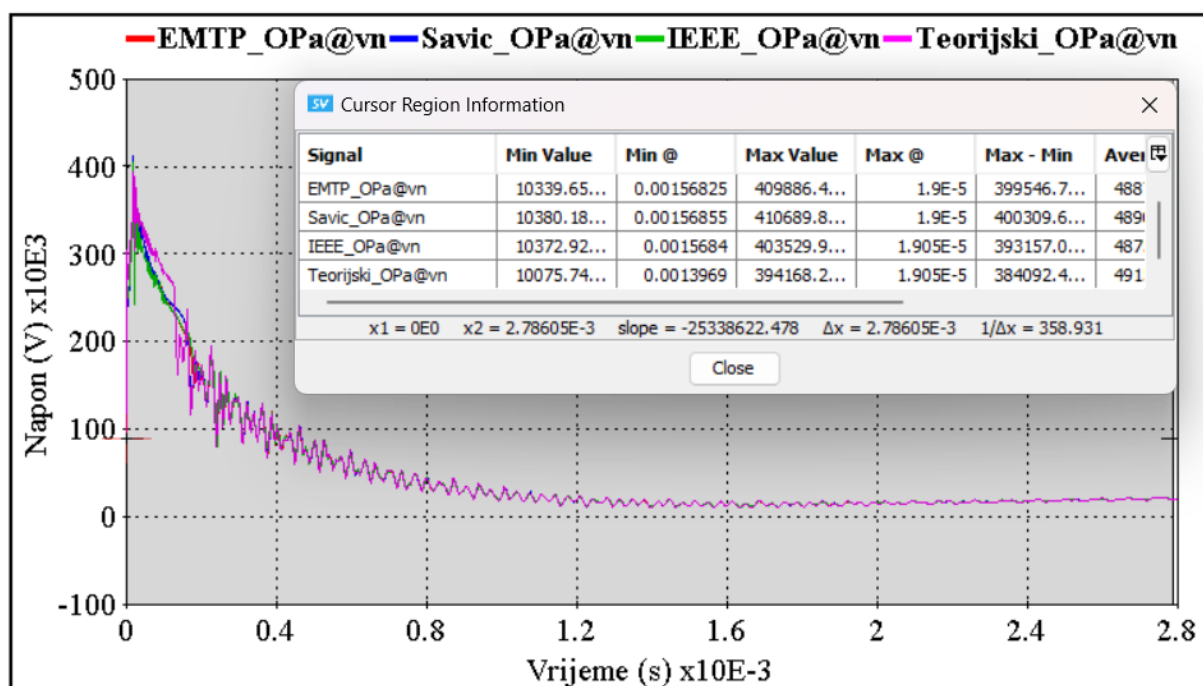
Slika 74. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju amplitude struje 10 kA



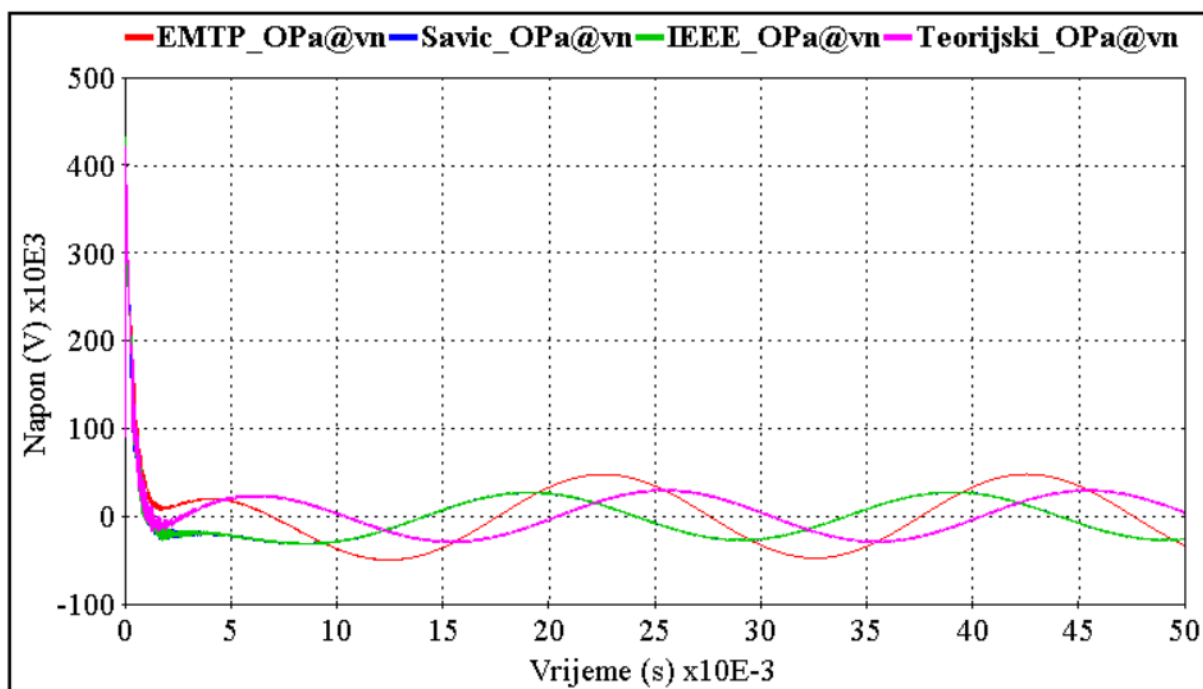
Slika 75. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 10 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu



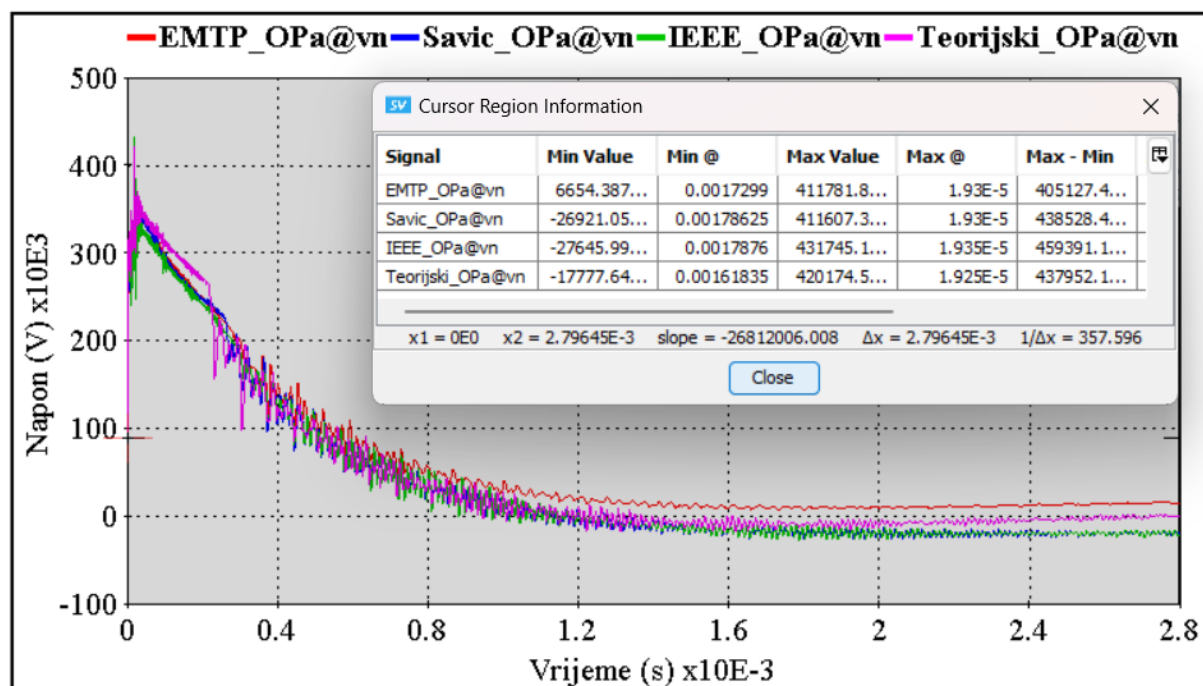
Slika 76. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 40 kA



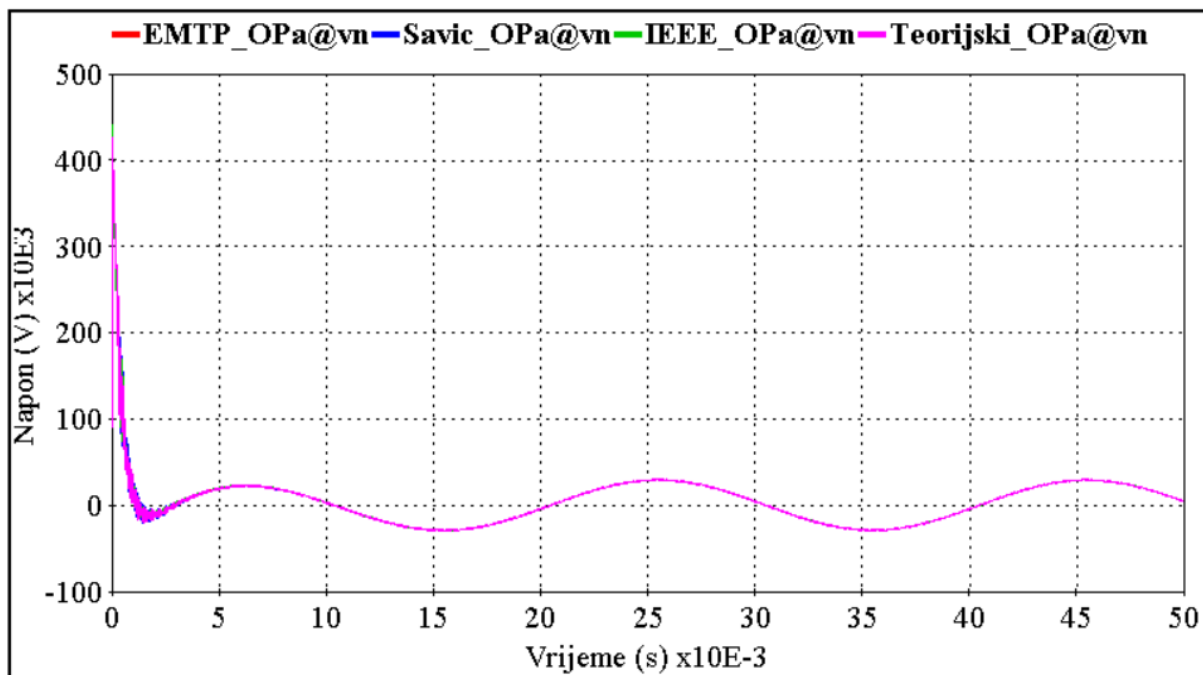
Slika 77. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 40 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu



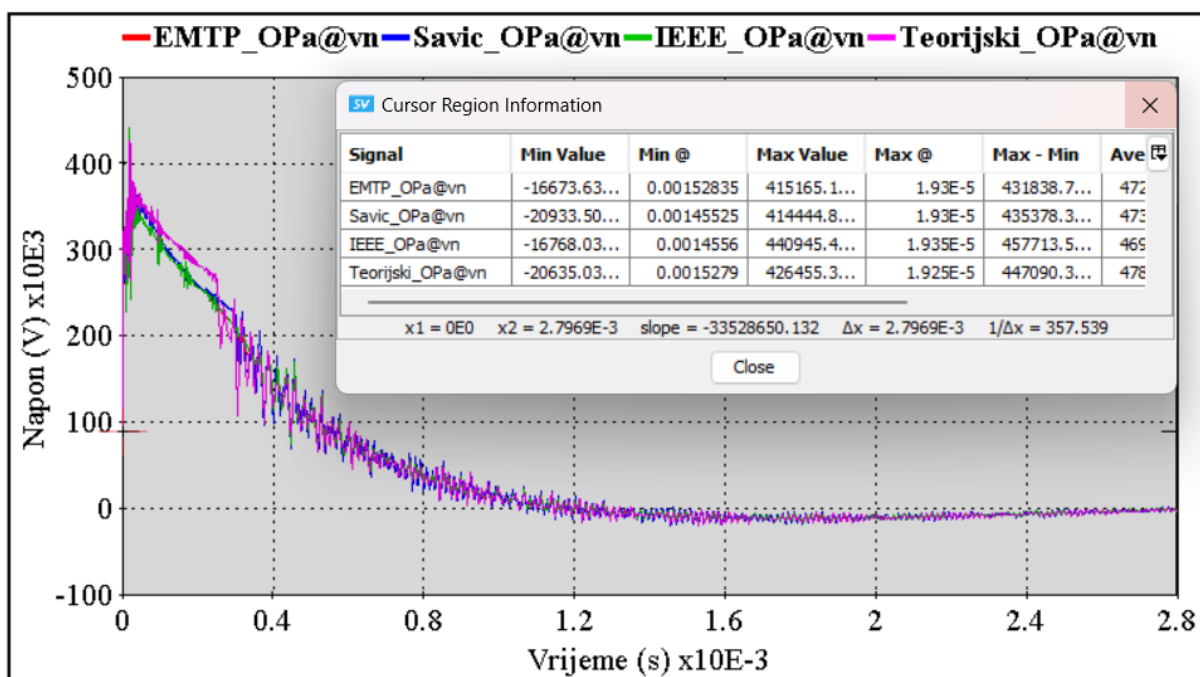
Slika 78. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 60 kA



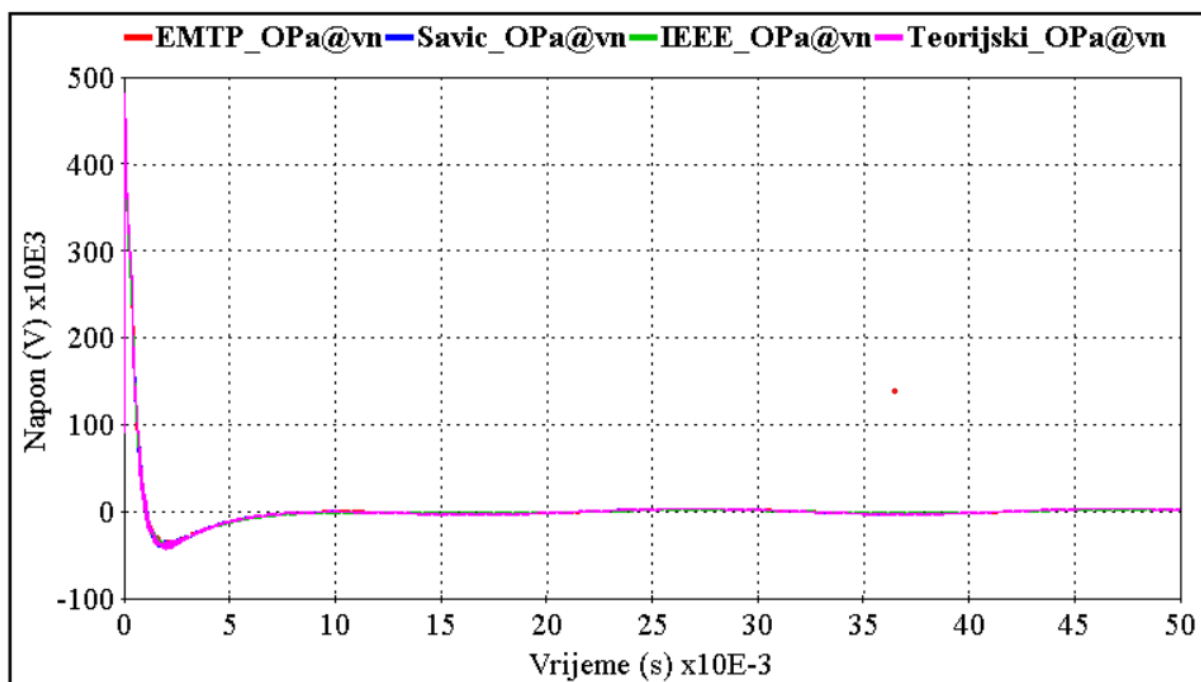
Slika 79. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 60 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu



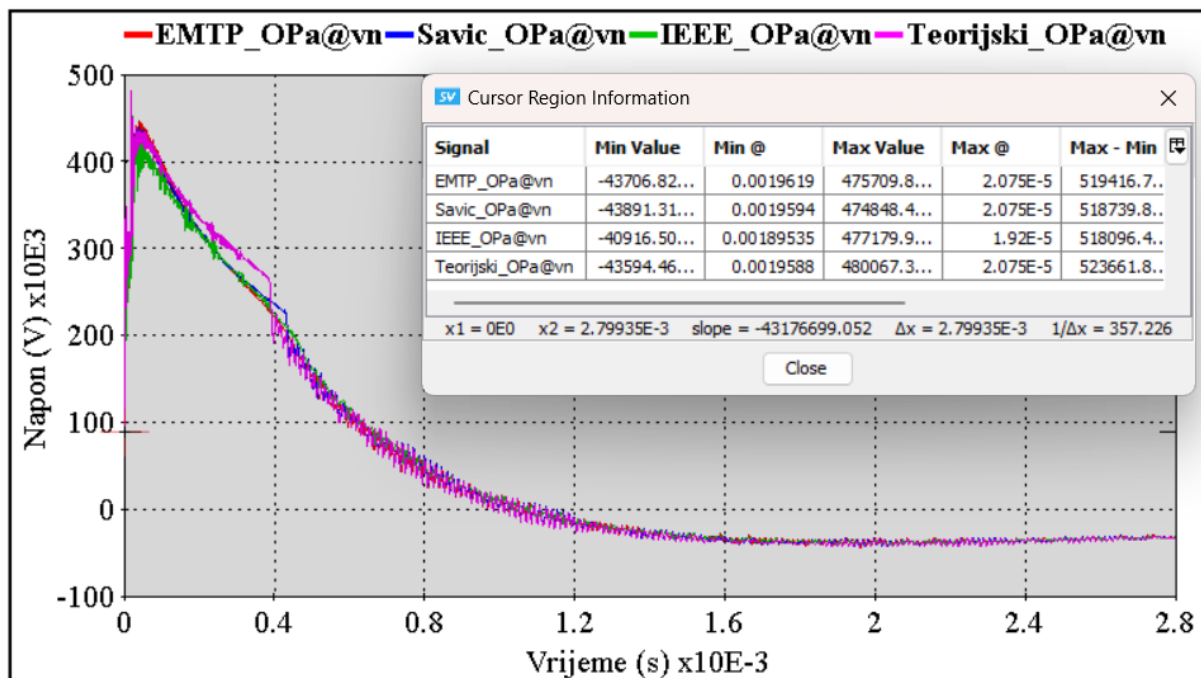
Slika 80. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 67 kA



Slika 81. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 67 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu



Slika 82. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 100 kA



Slika 83. Vremenska promjena napona pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 100 kA, posmatrano u kraćem vremenskom intervalu

Pored grafičkog prikaza vremenske promjene napona na slikama 74-83, prikazane su i analitičke vrijednosti napona za različite vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja u tabeli 8.

Tabela 8. Maksimalna vrijednost napona u tački mjerenja ispred postrojenja

Udar u fazu "a" I_{max} [kA]	EMTP model OP [kV]	IEEE model OP [kV]	SAVIĆ model OP [kV]	TEORIJSKI model OP [kV]
faza	"a"	"a"	"a"	"a"
10	343.3	361.5	343.8	375.5
40	410	403.5	410.7	394.2
60	411.8	431.7	411.6	420.2
67	415.2	441	414.4	426.5
100	475.7	477.2	474.8	480

Analiza se odnosi na fazu "a", na koju se desilo direktno atmosfersko pražnjenje, i poređenje će se vršiti nad rezultatima dobijenim za fazu "a", te upoređivanjem istih izvesti zaključci. Vrijednosti prikazane u tabeli 8 primjenjuju se za određivanje procentualne razlike vrijednosti napona u tački mjerenja, za različite modele odvodnika prenapona. Dobijene vrijednosti prikazane u tabeli 9.

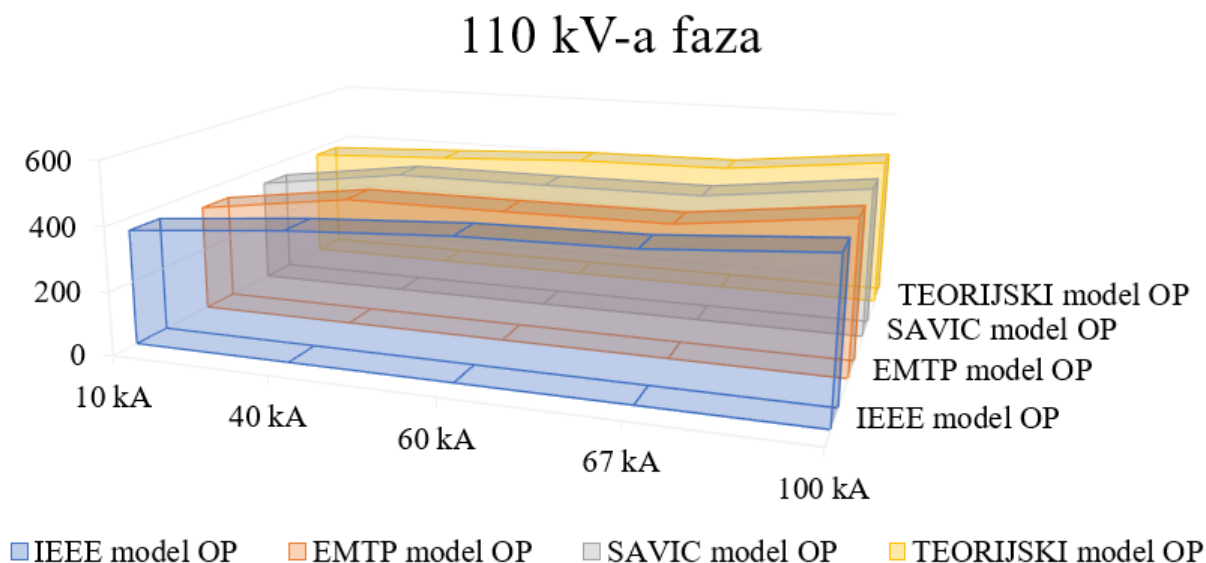
Tabela 9. Procentualna razlika maksimalne vrijednosti napona za različite tipove odvodnika prenapona.

faza	"a"		
razlika	EMTP-IEEE	EMTP-SAVIC	EMTP-TEOR
I_{max} [kA]			
10	5%	0%	9%
40	2%	0%	3%
60	5%	0%	2%
67	6%	0%	3%
100	0%	0%	1%
razlika [%]	IEEE-EMTP	IEEE-SAVIC	IEEE-TEOR
10	5%	5%	4%
40	2%	2%	2%
60	5%	5%	3%
67	6%	6%	3%
100	0%	1%	1%
razlika [%]	SAVIC-EMTP	SAVIC-IEEE	SAVIC-TEOR
10	0%	5%	9%
40	0%	2%	4%
60	0%	5%	2%
67	0%	6%	3%
100	0%	1%	1%

Analizom prethodne tabele, za koju su podaci uzeti sa grafika, pri modelovanju mreže za slučaj pražnjenja u fazu “a”, može se zaključiti:

1. Najmanja razlika između napona faze “a” uočava se poređenjem odvodnika prenapona modelovanih prema EMTP i SAVIĆ modelu.
2. Najveća razlika je kod napona faze “a” je za slučaj kada su odvodnici prenapona modelovani prema IEEE, u odnosu na EMTP i SAVIĆ modele.
3. Modelovanje odvodnika prenapona prema TEORIJSKOM modelu najviše odstupa u odnosu na SAVIĆ i EMTP model, dok je odstupanje u odnosu na IEEE model znatno manje.
4. Sva navedena odstupana su ispod 9%, ako se izuzme TEORIJSKI model odvodnika prenapona za niže vrijednosti prenapona, odstupanja za opisani opseg posmatranja su oko 5%, što je zanemarljivo mala vrijednost te se može zaključiti da izbor modela odvodnika prenapona ne utiče značajno na validnost tranzijentnih procesa prilikom analize uticaja atmosferskog pražnjenja.

Rezultati prikazani u tabeli 9 grafički su predstavljeni u obliku dijagrama na slici 84.

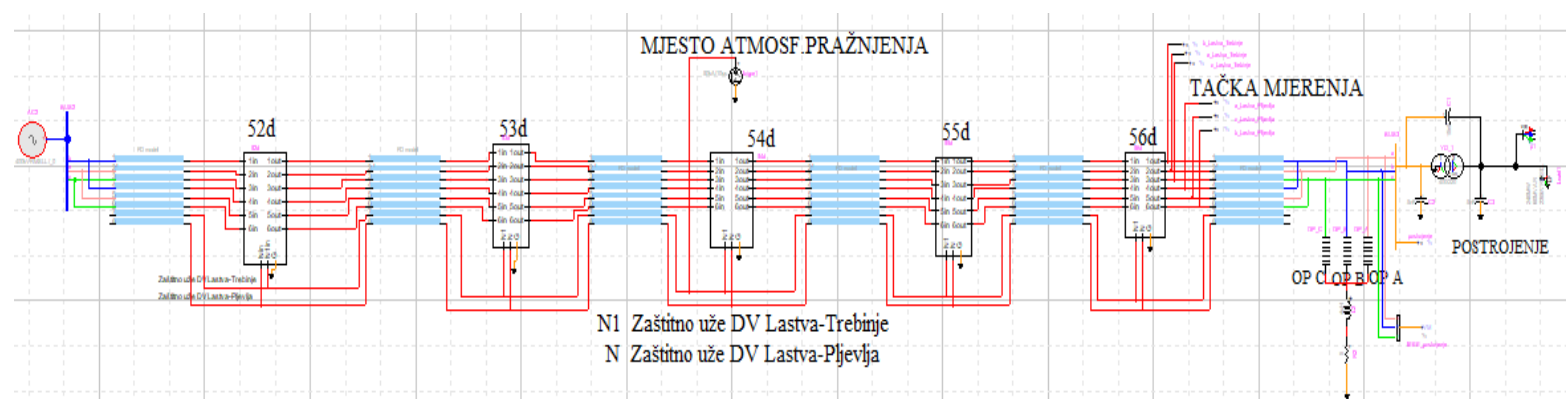


Slika 84. Grafički prikaz vrijednosti napona u odnosu na vrijednost amplitude stuje atmosferskog pražnjenja, za različite modele odvodnika prenapona

6. DISKUZIJA I ANALIZA REZULTATA U DIJELU REALNE VN MREŽE

Stalna potreba za sve većom povezanošću elektroenergetskih sistema među državama, zbog razmjene električne energije i proširenja i jačanja tržišta u okviru EU, SEE i regiona, zahtijeva proširenje i jačanje interkonektivnih veza između nacionalnih energetske sistema. Postojeća 110 kV mreža nije mogla zadovoljiti potrebe razvoja i planove razvoja primorske zone. Kao rezultat, izgrađena je nova trafo stanica u primorskoj zoni i 400 kV dalekovod od te zone do kontinentalnog dijela zemlje.

U radu je, u cilju analize uticaja modela odvodnika prenapona, posmatrana dionica DV 2x400 kV Lastva-Trebinje i Lastva-Pljevlja (dionica Lastva-Čevo), i to dio sa 5 stubnih mjesta označenih sa 52d-56d, kao što je prikazano na slici 85.



Slika 85. Modelovanje dionice DV 2x400 kV Lastva-Trebinje i Lastva-Pljevlja (dionica Lastva-Čevo) u EMTP-u

Na slici 85 je prikazano modelovanje dijela dionice Lastva-Čevo, dvosistemskog DV 2x400 kV Lastva-Trebinje i Lastva-Pljevlja. Odabrana dionica se sastoji od 5 stubnih mjesta, prema projektu označenih brojevima od 52d do 56d i dužine je 1305,41 m. Svi elementi sistema su modelovani u EMTP programu, prema podacima iz glavnog projekta. Odabrana dionica je specifična po visokoj statičkoj vrijednosti otpornosti uzemljenja, zbog lošeg geološkog sastava tla, pa je samim tim zanimljiva sa aspekta analize sistema prilikom atmosferskih pražnjenja. U nastavku je prikazana tabela 10 sa podacima o ugrađenom provodniku i zaštitnom užetu.

Tabela 10. Podaci za provodnik i zaštitno uže

Osnovni podaci za provodnik ACSR 490/65:	Osnovne karakteristike OPGW
Ukupan poprečni presek: 553.9 mm ² Ukupan prečnik: 30.6 mm Masa provodnika: 1.866 kg/m Specifična masa provodnika: 3.36 x 10 ⁻³ kg/m mm ² Proračunata prekidna sila: 15291.5 daN Modul elastičnosti: 7000 daN/mm ² Koeficijent termičkog širenja: 1.93 x 10 ⁻⁵ 1/°C Dozvoljeno radno naprezanje: 11.0 daN/mm ² Izuzetno dozvoljeno naprezanje: 20.7 daN/mm ²	Ukupan poprečni presek 125 mm ² : Ukupan poprečni presek 125 mm ² Ukupan prečnik 15 mm Masa zaštitnog užeta 0.587 kg/m Proračunata prekidna sila (RTS) 9400 daN Modul elastičnosti 10700 daN/mm ² Koeficijent termičkog širenja 1.52 x 10 ⁻⁵ 1/°C Dozvoljeno radno naprezanje 30.08 daN/mm ² Izuzetno dozvoljeno naprezanje 55.64 daN/mm ²

Na vodu Lastva-Trebinje ugrađeni su linijski odvodnici prenapona, i to na najnižoj fazi na stubnim mjestima broj 54d, 55d i 56d.

Linijski odvodnici prenapona i odvodnici prenapona koji štite transformator, modelovani su prema [29].

Tehnički podaci za odvodnike prenapona koji su ugrađeni ispred transformatora i linijske odvodnike prenapona, ugrađene na navedenom dijelu mreže, su prikazani u tabeli broj 11:

Tabela 11. Podaci za odvodnike prenapona

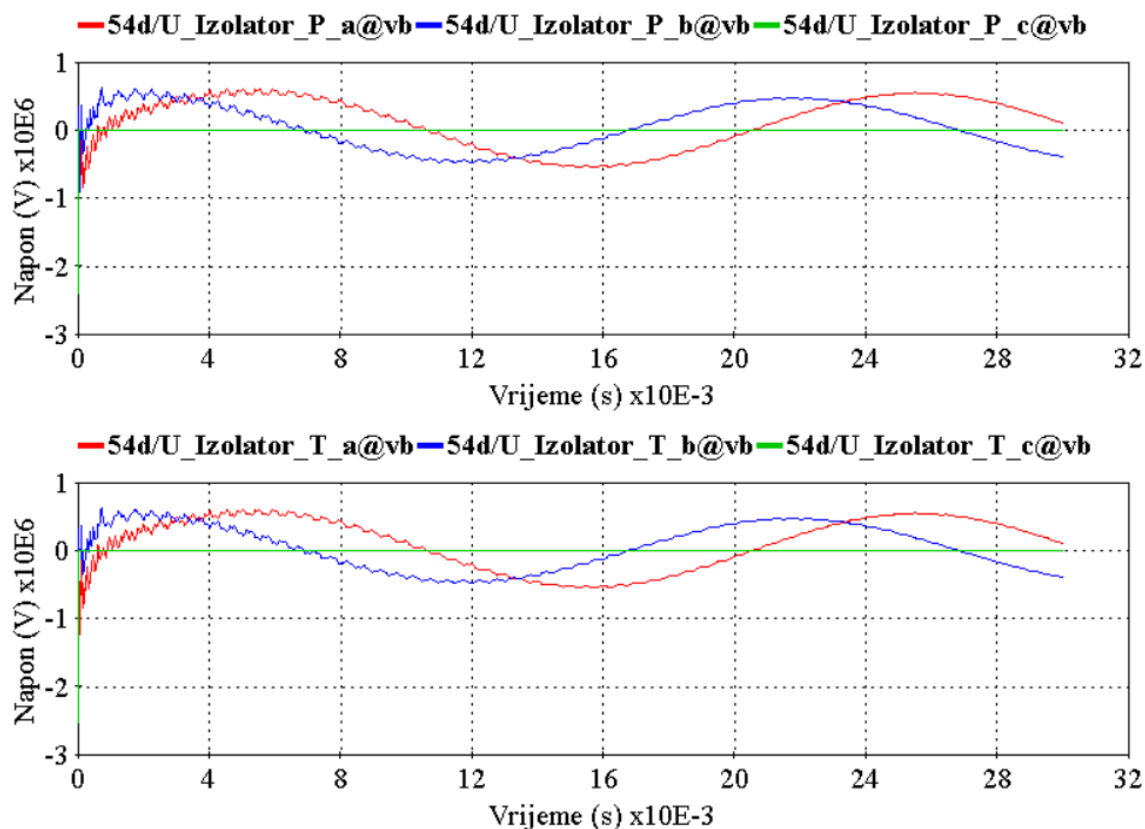
Linijski odvodnik prenapona Q360-YH420L	Odvodnik prenapona ispred transformatora 3EL2 340-6PJ43-4XA2-Z
$U_m=420$ kV, $U_r = 360$ kV, $U_c = 267$ kV, 2721 mm, n=3, LD-CL=3,	$U_m=420$ kV, $U_r = 336$ kV, $U_c = 269$ kV, 3186 mm, n=3, LD-CL=4,
HV MODEL-linijski odvodnik prenapona Visina odvodnika prenapona: 2.721 m Broj ZnO diskova odvodnika prenapona: 1 $L_0 = 0.2$ d/n=0.5442 μ H $L_1 = 15$ d/n= 40.815 μ H, korigovano $L_1=34$ μ H $R_0 = 100$ d/n=272.1 Ohm $R_1 = 65$ d/n =176.865 Ohm $C_0 = 100$ n/d=0.03675 pF	HV MODEL-postrojenje Visina odvodnika prenapona: 3.186 m Broj ZnO diskova odvodnika prenapona: 1 $L_0 = 0.2$ d/n=0.6372 μ H $L_1 = 15$ d/n= 47.8 μ H, korigovano $L_1=32$ μ H $R_0 = 100$ d/n=318.6 Ohm $R_1 = 65$ d/n =207.09 Ohm $C_0 = 100$ n/d=0.03139 pF

Prema [29], prilikom modelovanja odvodnika prenapona potrebno je korigovati vrijednost elementa L_1 (slika 29), kako bi se dobilo podudaranje sa kataloškom vrijednosti napona pražnjenja odvodnika za struju pražnjenja oblika $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$. U tabeli 11 su navedene korigovane vrijednosti za L_1 .

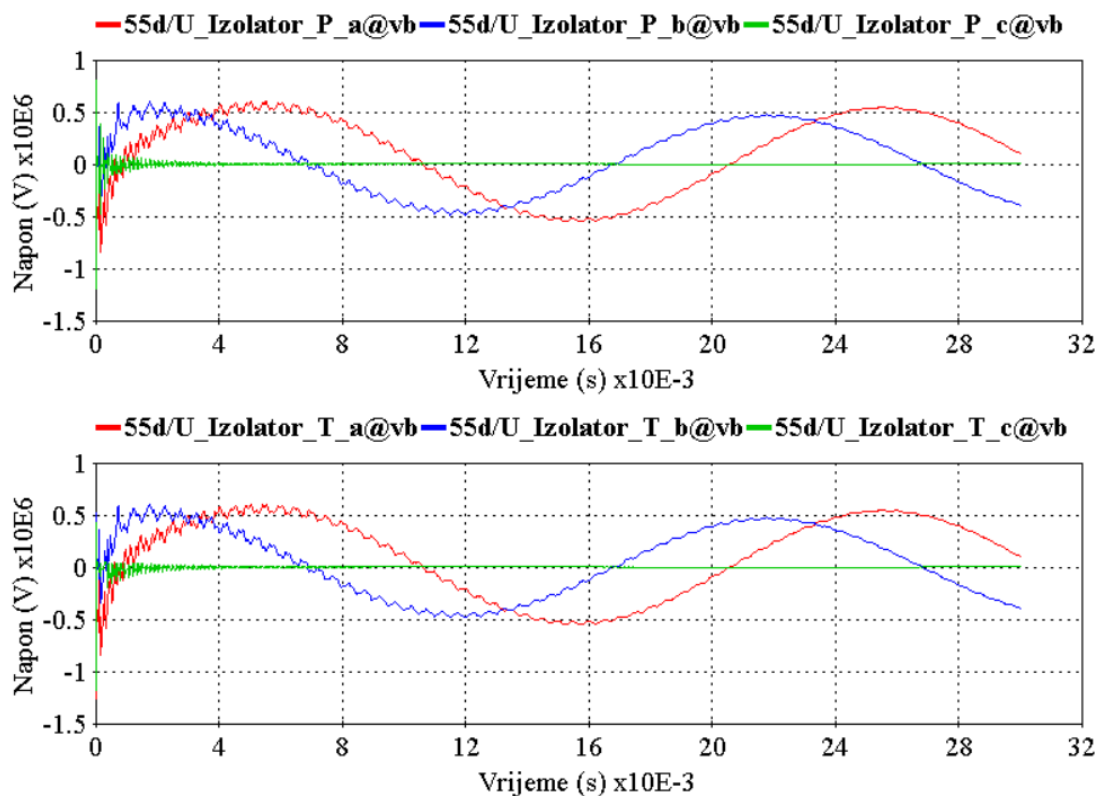
U ovoj analizi je razmatrano atmosfersko pražnjenje samo prvim udarom talasnog oblika $10/350 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ [36]. Usvojena je pretpostavka da se pražnjenje dešava u zaštitno uže dalekovoda Lastva-Trebinje, jer je mala vjerovatnoća da će do pražnjenja doći direktno u fazni provodnik, kada postoje ugrađena zaštitna užad. Na slikama broj 86-100, prikazane su vremenske promjene napona na izolatorima i odabranim tačkama mjerenja, u zavisnosti od vrijednosti amplitude struje atmosferskog pražnjenja.

Polozije odvodnika prenapona su usvojene kao što su realizovane na terenu. Odvodnici prenapona su modelovani prema IEEE standardu, uz korigovanu vrijednost induktivnosti L_1 , kako je preporučeno od strane IEEE radne grupe 3.4.11 [29]. Ostali elementi opisanog dijela prenosne mreže modelovani su kao što je detaljno opisano u poglavlju 5.

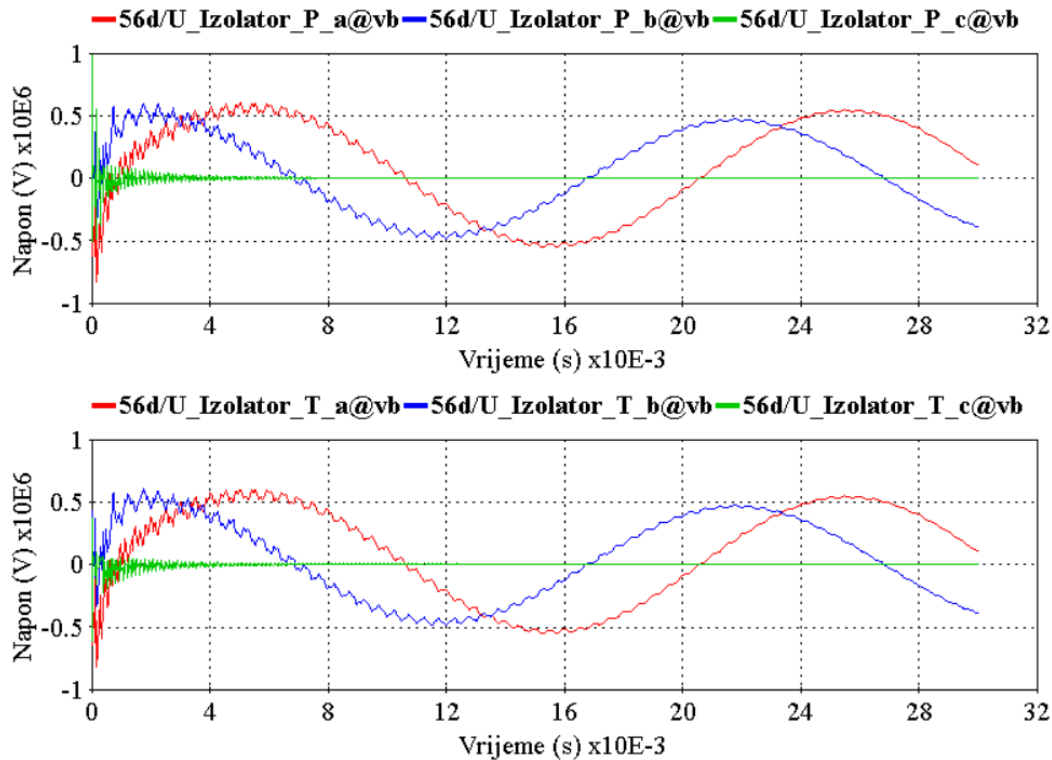
Na slikama 86-90 prikazane su vremenske promjena napona na izolatorima na stubnim mjestima broj 54, 56 i 57, na fazama i u tački mjerenja u postrojenju, prilikom atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže sa amplitudom struje $I_{\text{max}}=20 \text{ kA}$.



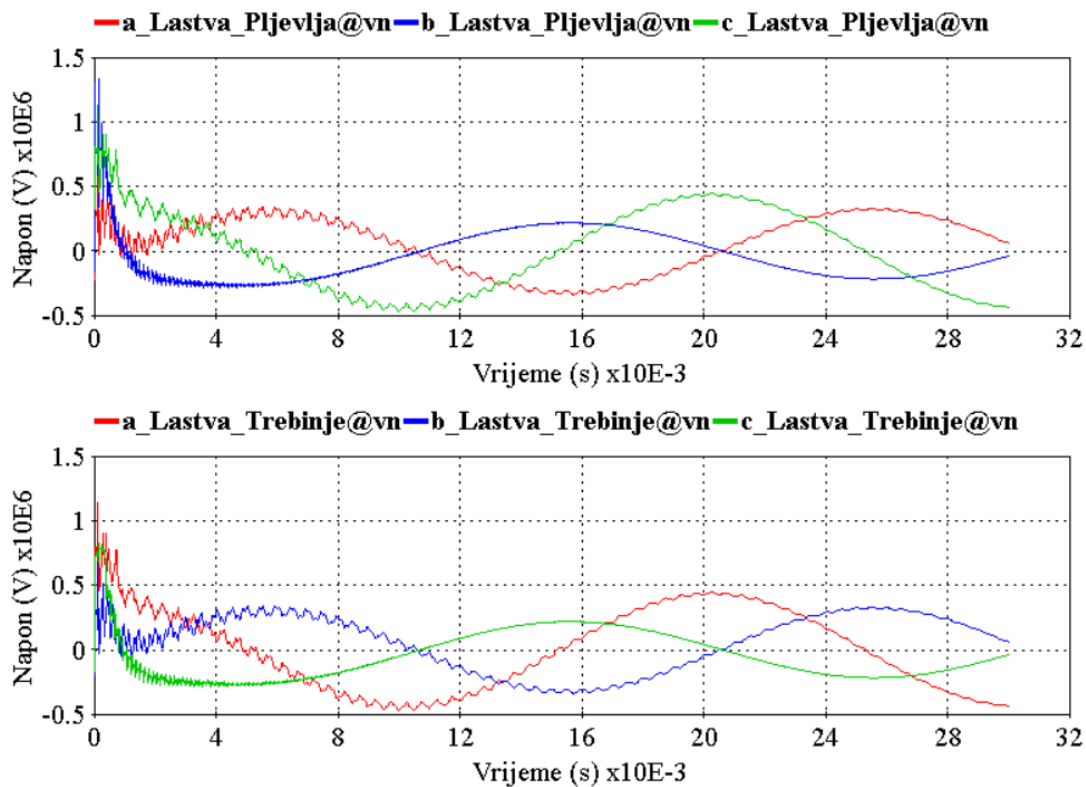
Slika 86. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 54, $I_{\text{max}}=20 \text{ kA}$



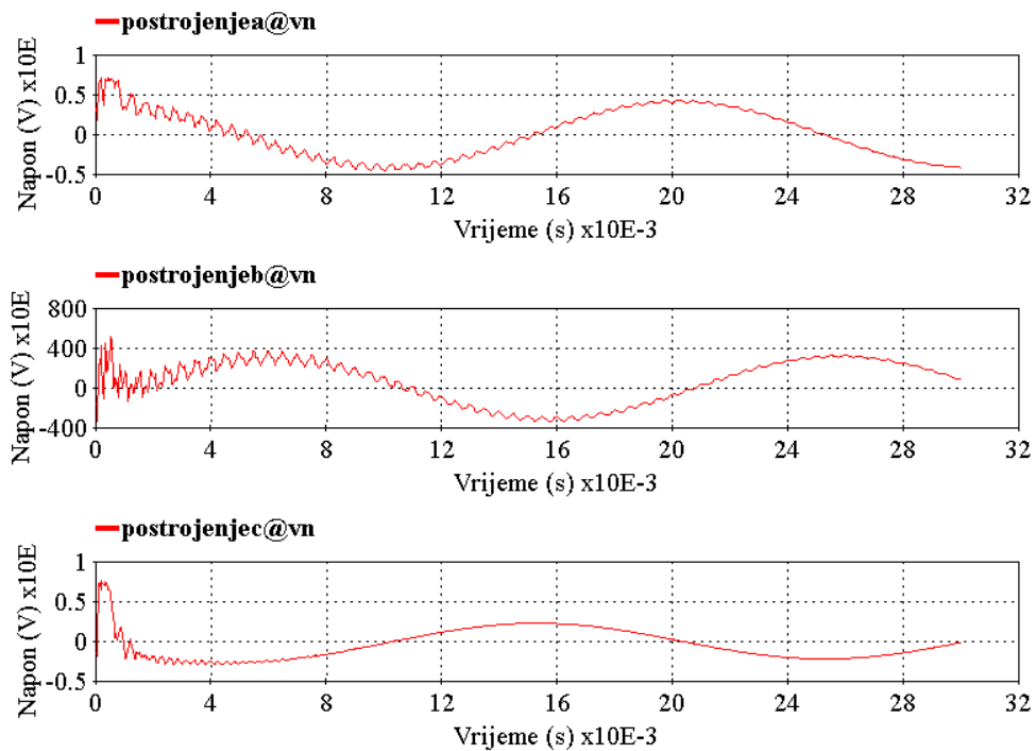
Slika 87. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 55, $I_{max}=20$ kA



Slika 88. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 56, $I_{max}=20$ kA

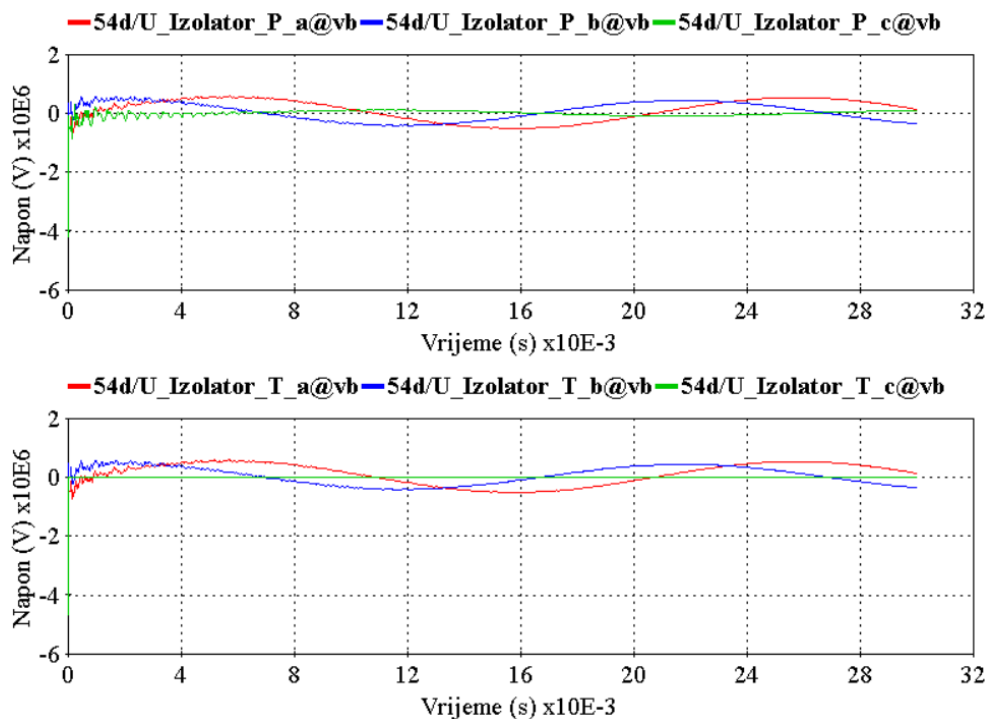


Slika 89. Vremenska promjena napona na fazama, tačka mjerenja, $I_{max}=20$ kA

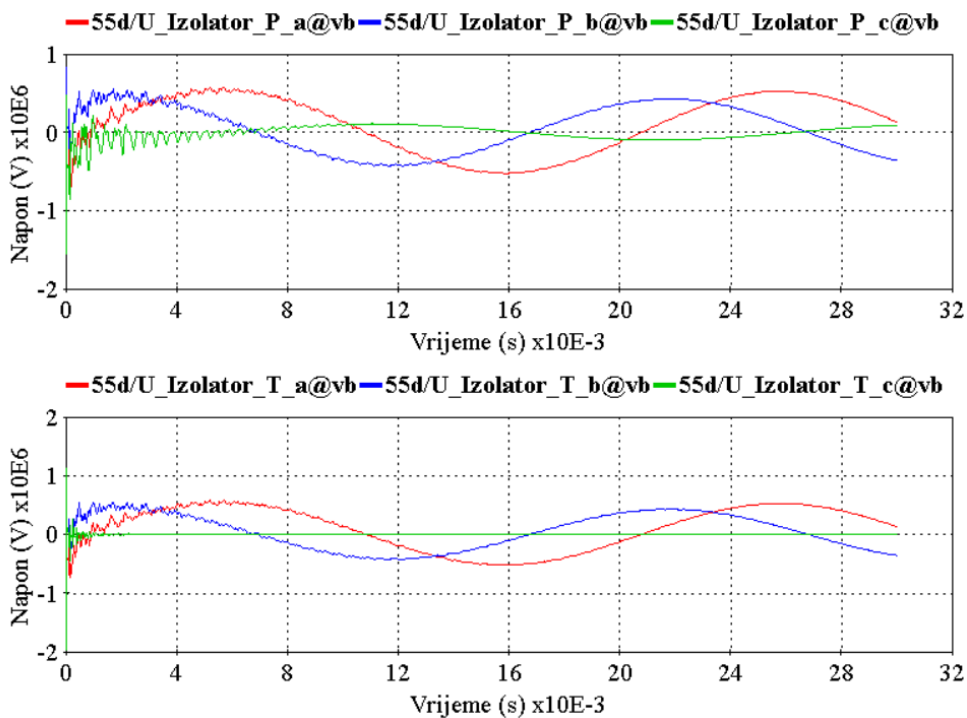


Slika 90. Vremenska promjena napona, postrojenje, $I_{max}=20$ kA

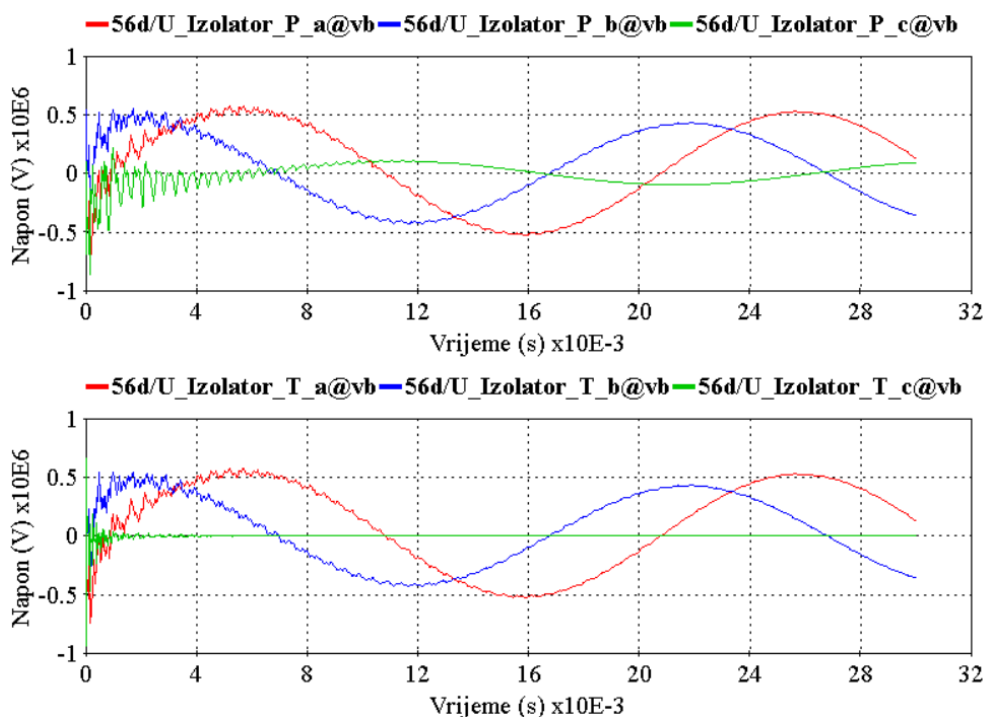
Na slikama 91-95 prikazane su vremenske promjena napona na izolatorima na stubnim mjestima broj 54, 56 i 57, na fazama i u tački mjerenja u postrojenju, prilikom atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže sa amplitudom stuje $I_{max}=100$ kA.



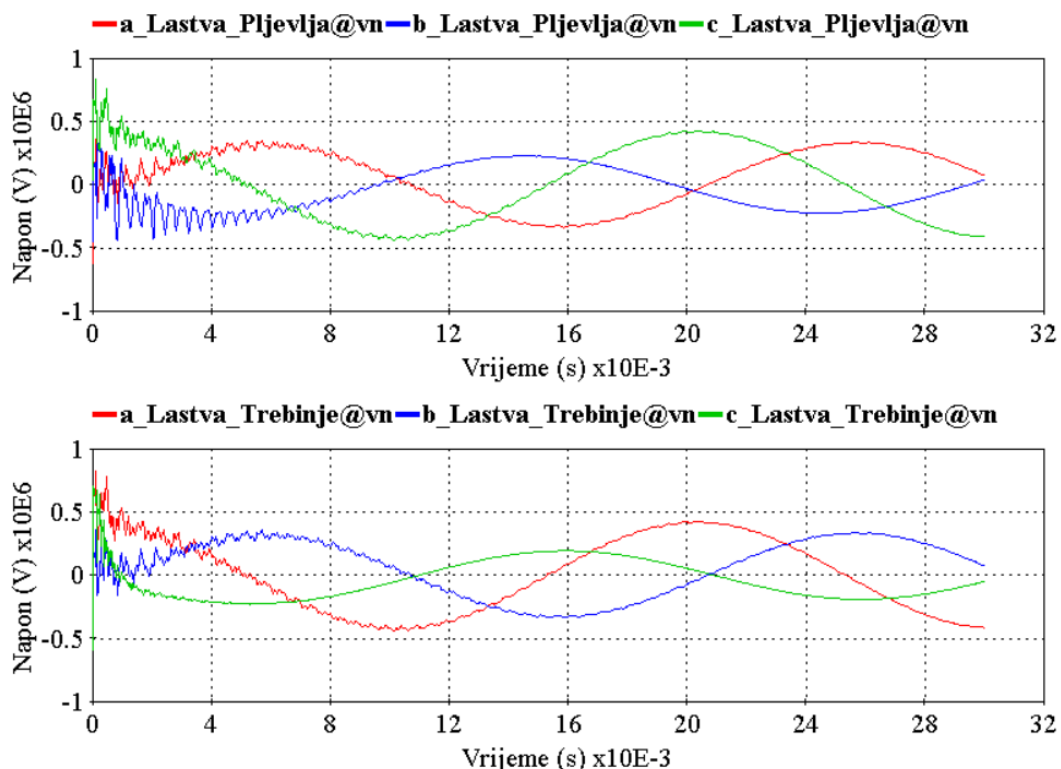
Slika 91. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 54, $I_{max}=100$ kA



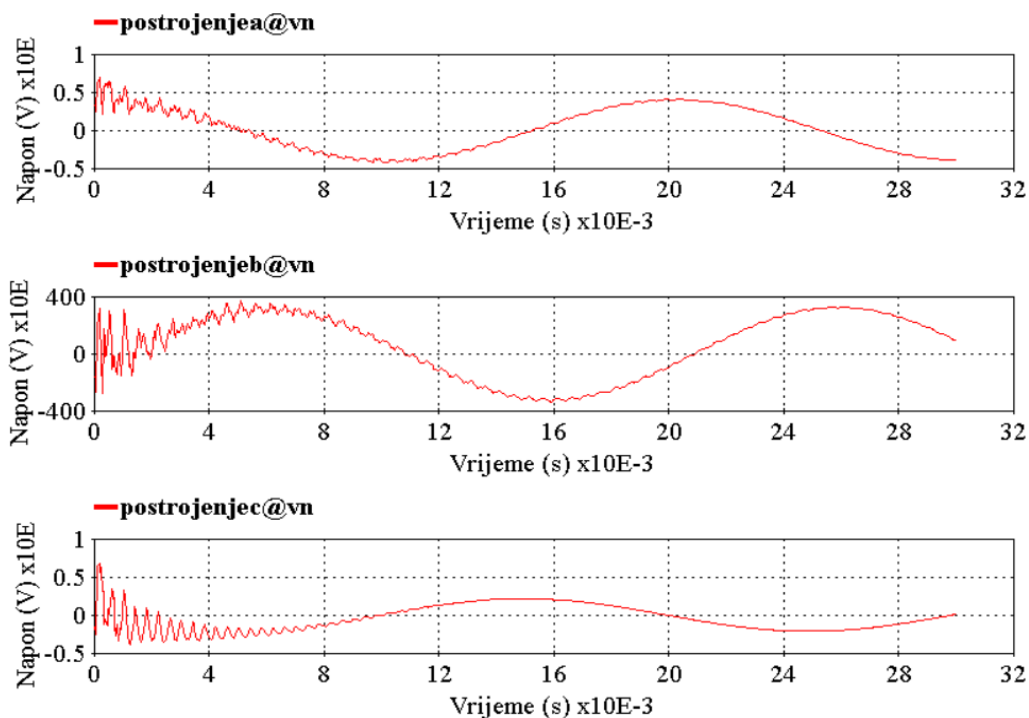
Slika 92. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 55, $I_{max}=100$ kA



Slika 93. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 56, $I_{max}=100kA$

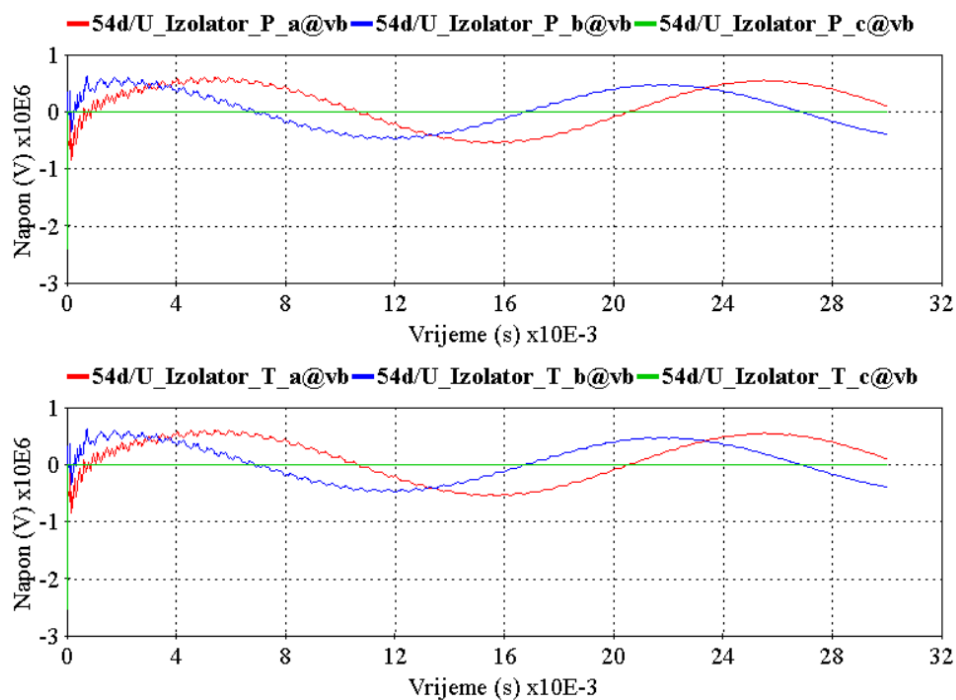


Slika 94. Vremenska promjena napona na fazama, tačka mjerenja, $I_{max}=100 kA$

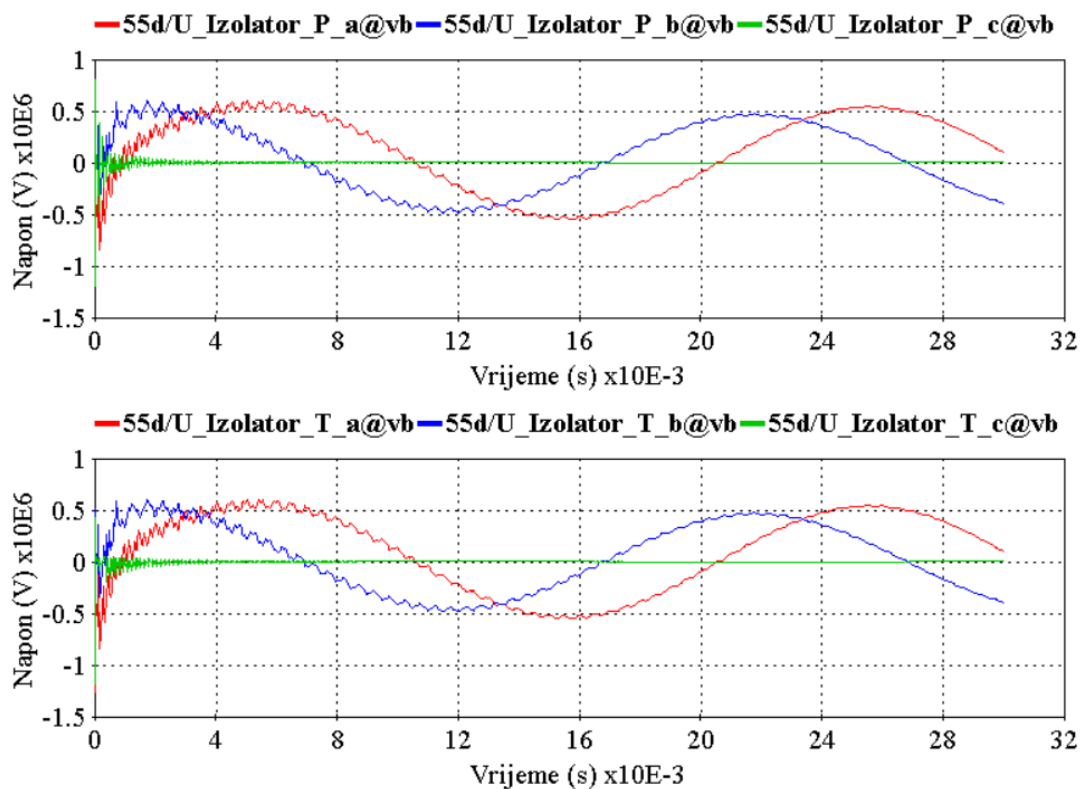


Slika 95. Vremenska promjena napona, postrojenje, $I_{max}=100$ kA

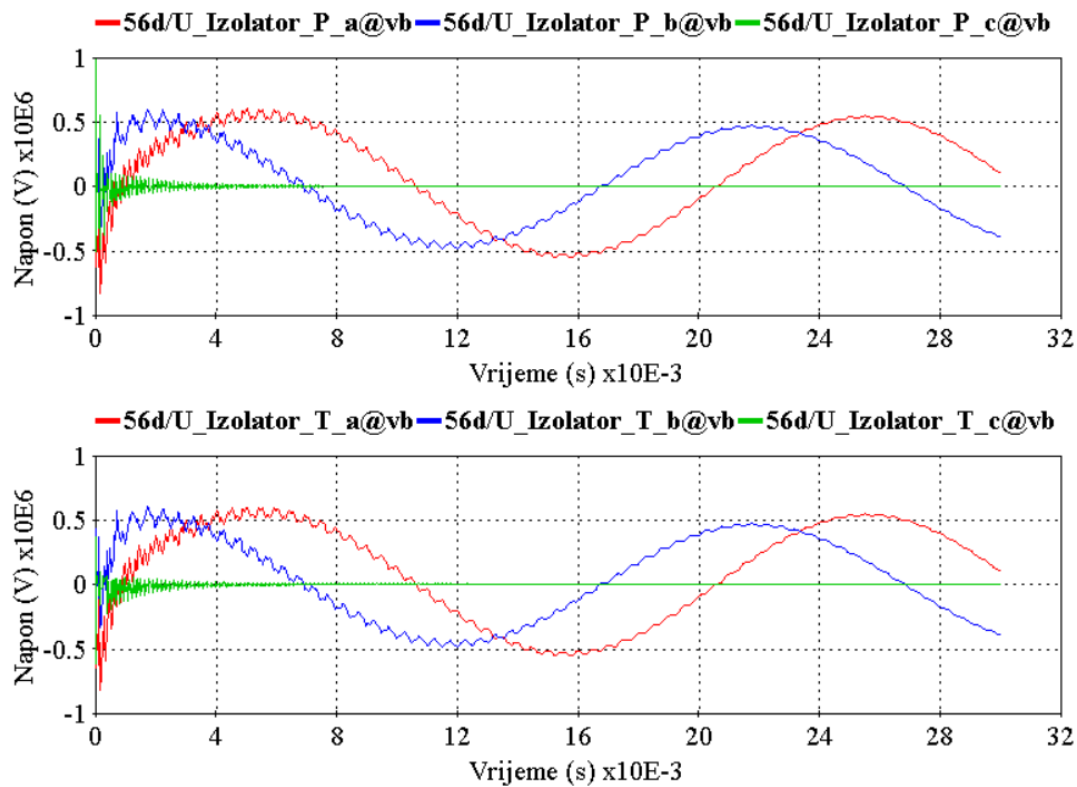
Na slikama 96-100 prikazane su vremenske promjene napona na izolatorima na stubnim mjestima broj 54, 56 i 57, na fazama i u tački mjerenja u postrojenju, prilikom atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže sa amplitudom stuje $I_{max}=200$ kA.



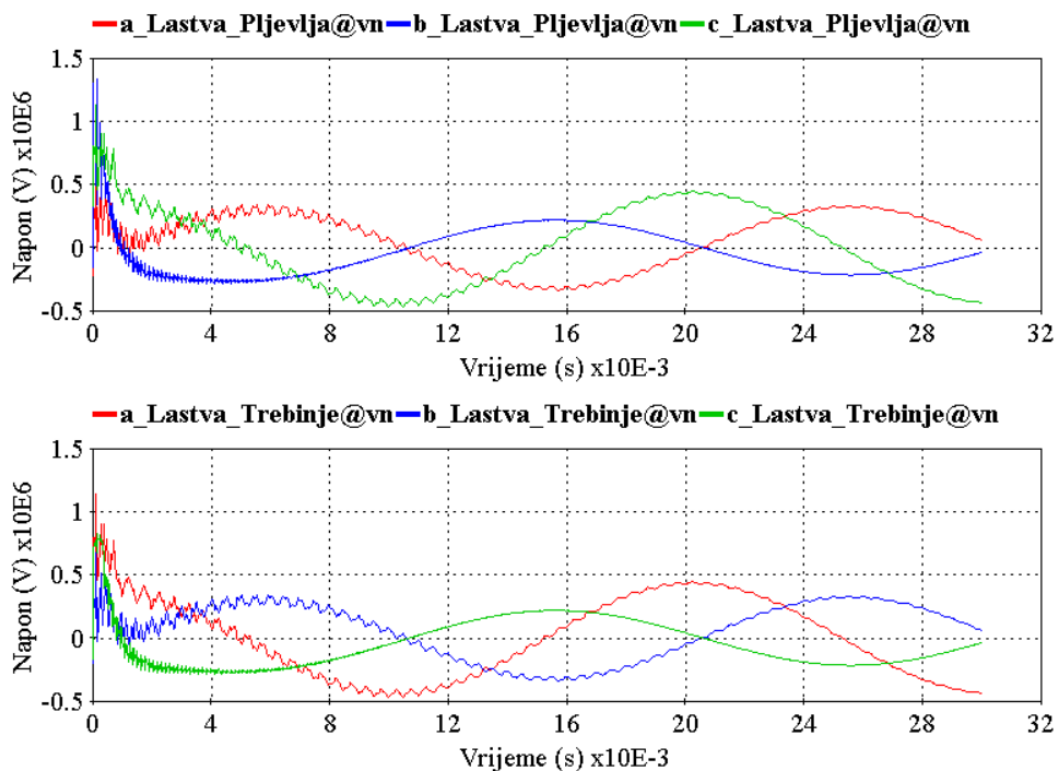
Slika 96. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 54, $I_{max}=200$ kA



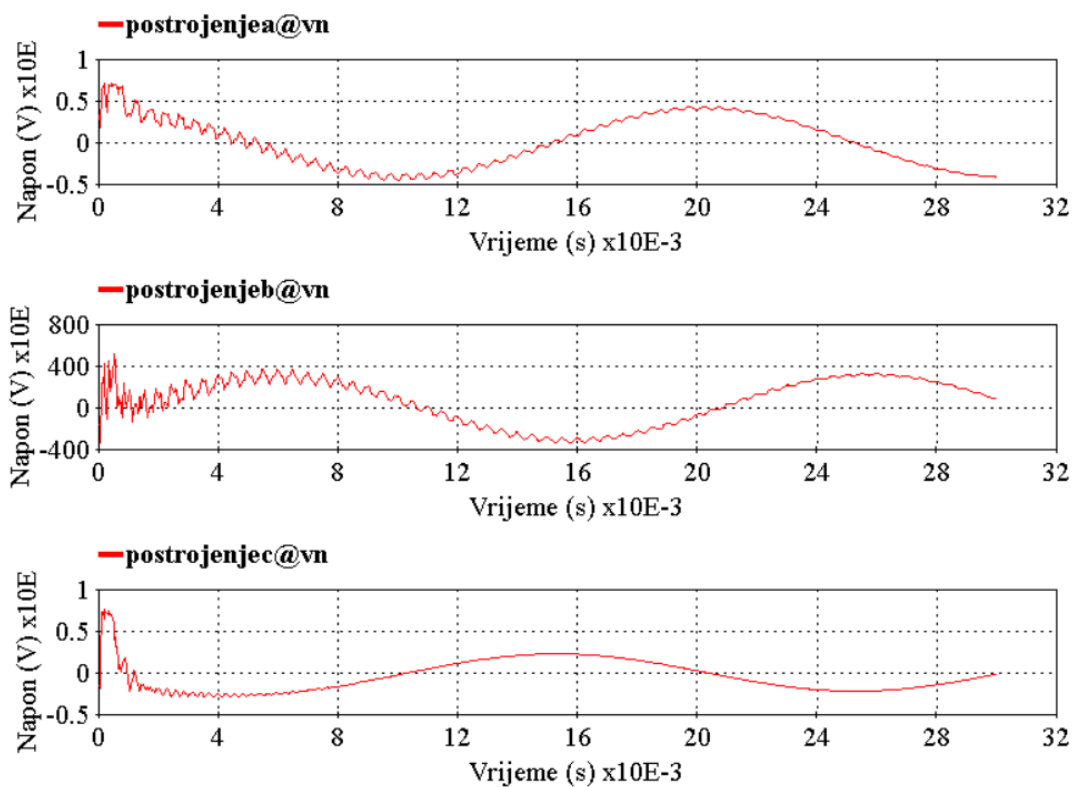
Slika 97. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 55, $I_{max}=200kA$



Slika 98. Vremenska promjena napona na izolatorima na stubnom mjestu br. 56, $I_{max}=200kA$



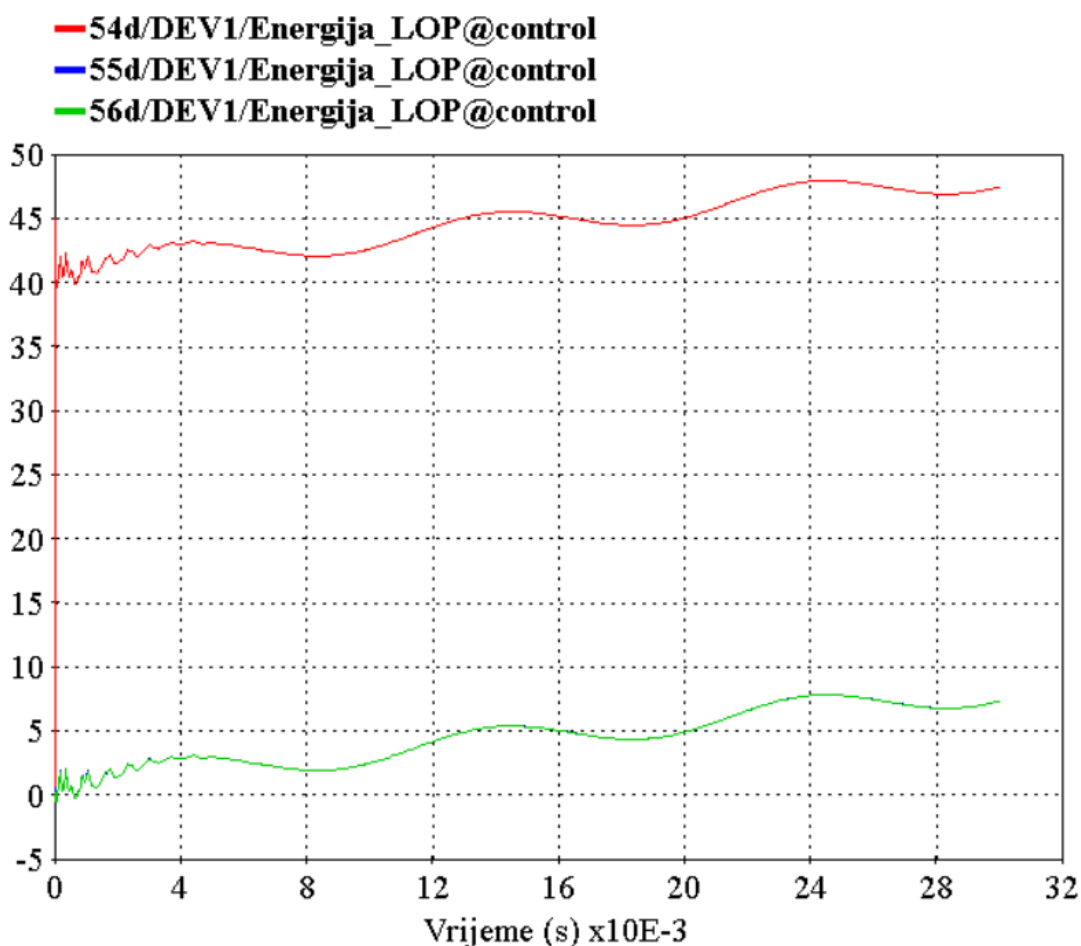
Slika 99. Vremenska promjena napona na fazama, tačka mjerenja, $I_{max}=200$ kA



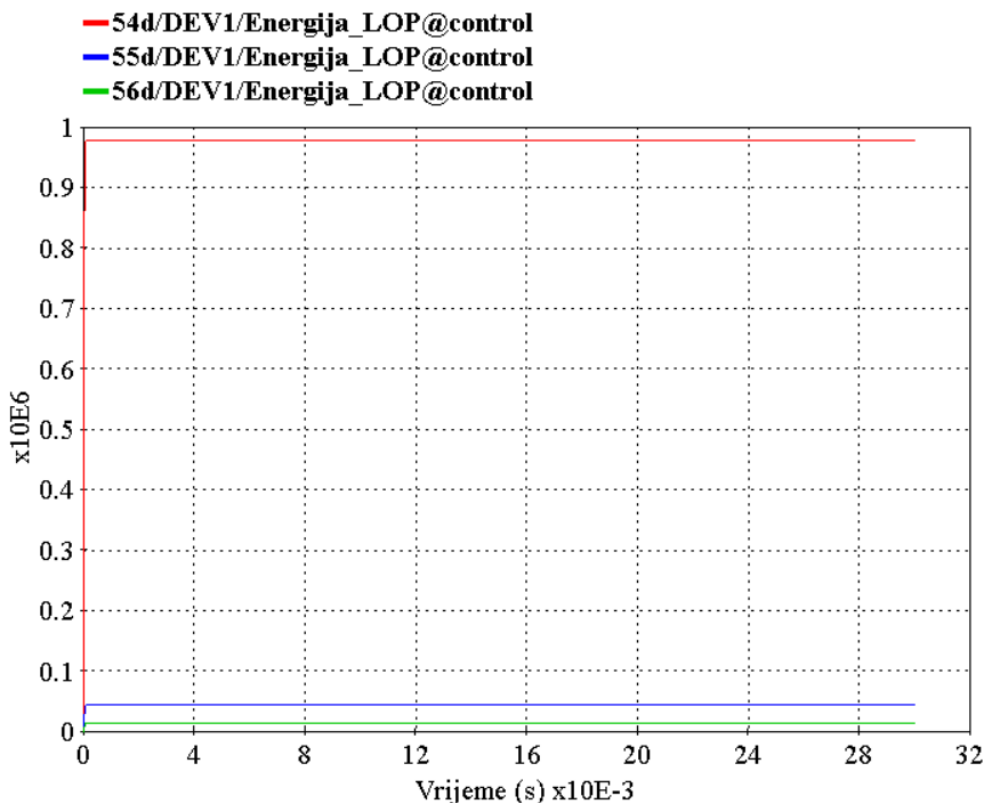
Slika 100. Vremenska promjena napona, postrojenje, $I_{max}=200$ kA

Analizom grafika dobijenih simulacijama atmosferskog pražnjenja sa amplitudama struje od 20 kA, 100 kA i 200 kA, u zaštitno uže modela prikazanog na slici 85, može se primijetiti da niže vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja (20 kA) nemaju značajan uticaj na naponske prilike posmatrane dionice. Struja atmosferskog pražnjenja vrijednosti 100 kA izaziva proboj izolacije na fazi (faza “c”) sekcije Lastva-Trebinje (slike 91, 92, 93), na sva tri posmatrana stubna mjesta 54d, 55d i 56d, dok struja atmosferskog pražnjenja vrijednosti 200 kA izaziva proboj izolacije faze “c” i na sekciji Lastva-Pljevlja, takođe na sva 3 navedena stubna mjesta (slike 96, 97, 98).

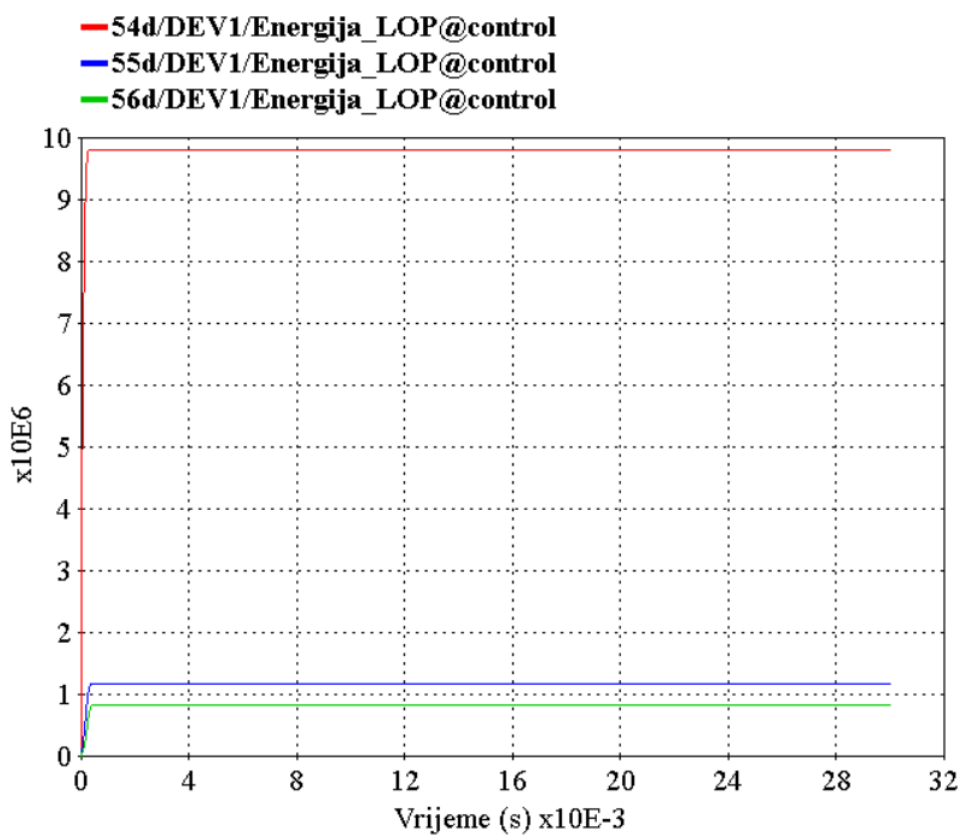
Na slikama od 101 do 106 prikazani su grafici koji definišu energetske opterećenje odvodnika prenapona prilikom atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže dalekovoda Lastva-Trebinje, na stubnom mjestu broj 54d, pri različitim vrijednostima amplitude struje atmosferskog pražnjenja.



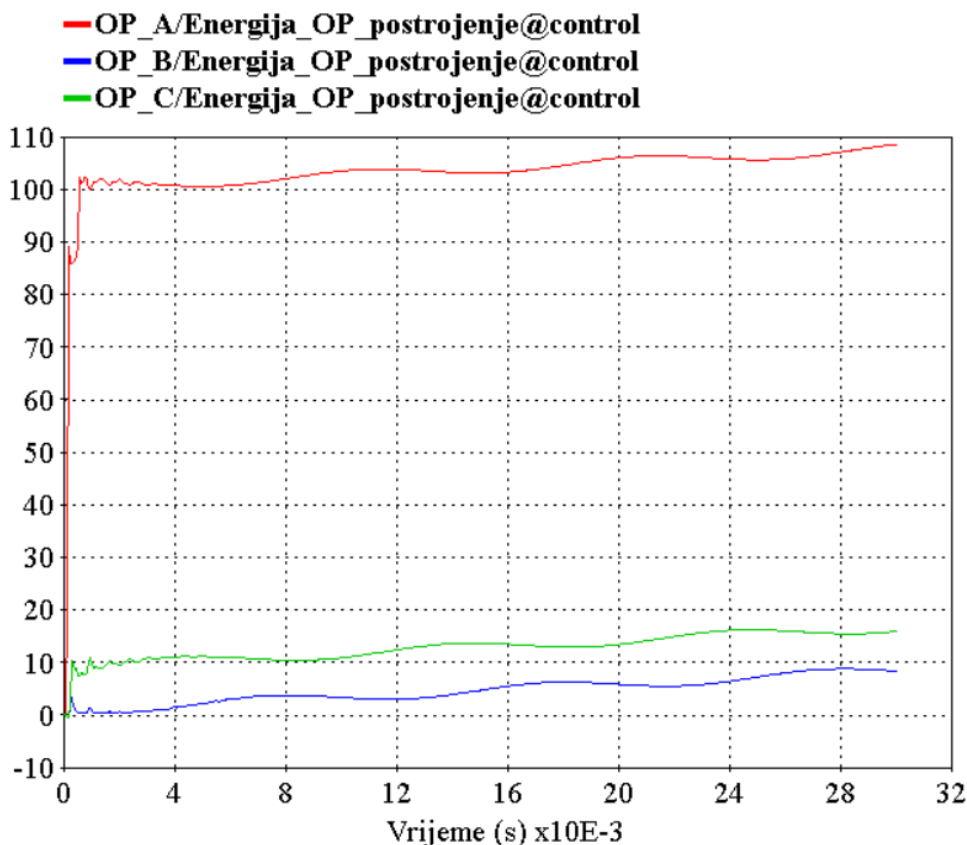
Slika 101. Energija kroz LOP za struju atmosferskog pražnjenja od 50 kA (crveni grafik-faza “a”, plavi grafik-faza “b”, zeleni grafik-faza “c”)



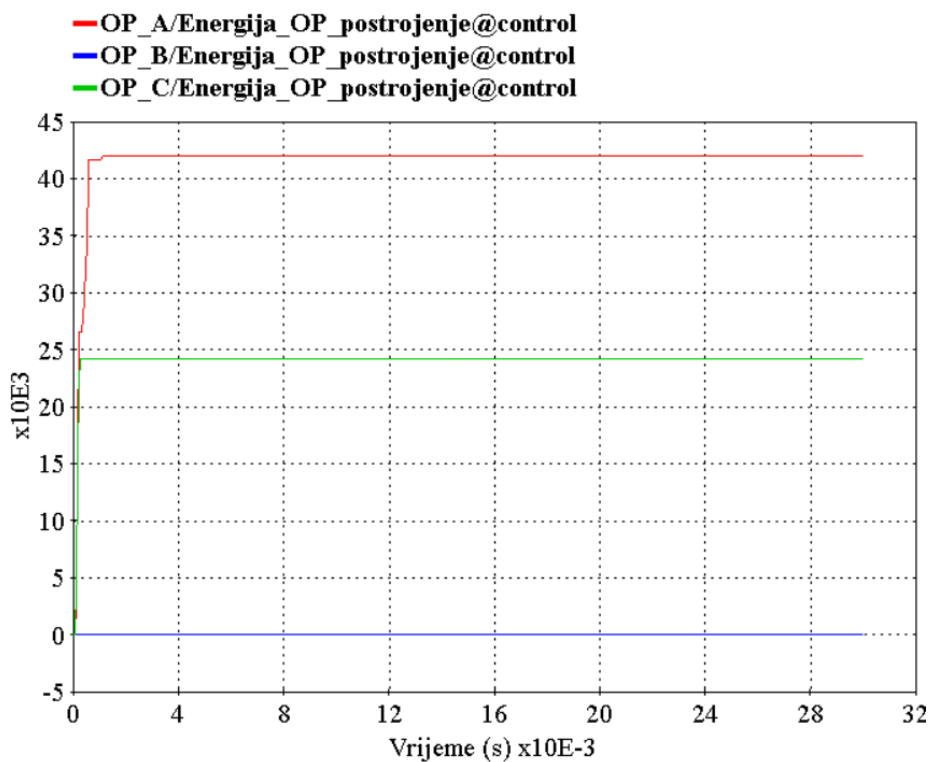
Slika 102. Energija kroz LOP za struju atmosferskog pražnjenja od 100 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



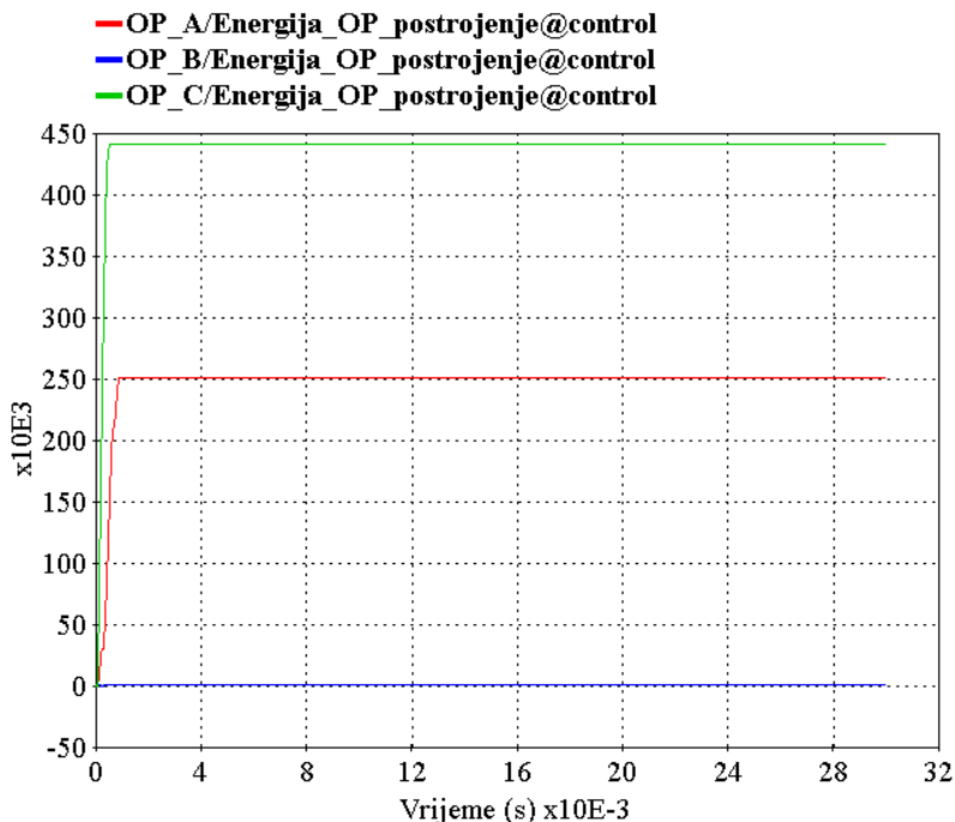
Slika 103. Energija kroz LOP za struju atmosferskog pražnjenja od 200 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



Slika 104. Energija kroz OP ispred postrojenja za struju atmosferskog pražnjenja od 50 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



Slika 105. Energija kroz OP ispred postrojenja za struju atmosferskog pražnjenja od 100 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")



Slika 106. Energija kroz OP ispred postrojenja za struju atmosferskog pražnjenja od 200 kA (crveni grafik-faza "a", plavi grafik-faza "b", zeleni grafik-faza "c")

Sposobnost apsorpcije energije odvodnika prenapona, bez posljedica, definisana je karakteristikama koje definišu proizvođači prilikom testiranja. 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 i izražava se u kJ/kV naznačenog napona odvodnika [9]. Količina energije koju odvodnik može da apsorbira zavisi od tipa odvodnika prenapona, kao što je prikazano u tabeli 12, za odvodnike prenapona ugrađene na dionici koja je predmet obrade u ovom poglavlju.

Tabela 12. Podaci za odvodnike prenapona i vrijednosti energije kojom su opterećeni odvodnici prenapona prilikom atmosferskog pražnjenja

	LOP na DV Lastva-Trebinje			POSTROJENJE		
U_r	360 kV			336 kV		
Sposobnost apsorpcije energije	8 kJ/kV (U_r)			10 kJ/kV (U_r)		
Maksimalna vrijednost energije OP	2 880 kJ			3360 kJ		
I_{max} [kA]	Energija na OP stubno mjesto 54d [kJ]	Energija na OP stubno mjesto 55d [kJ]	Energija na OP stubno mjesto 56d [kJ]	Energija na OP ispred transformatora [kJ]		
Faza	“c”	“c”	“c”	“a”	“b”	“c”
50	0.048	0.0078	0.0078	0.108	0.009	0.016
100	976.7	42.891	13.715	41.95	0.0054	24.19
200	9786.4	1169.17	806.65	250.71	0.0182	440.96

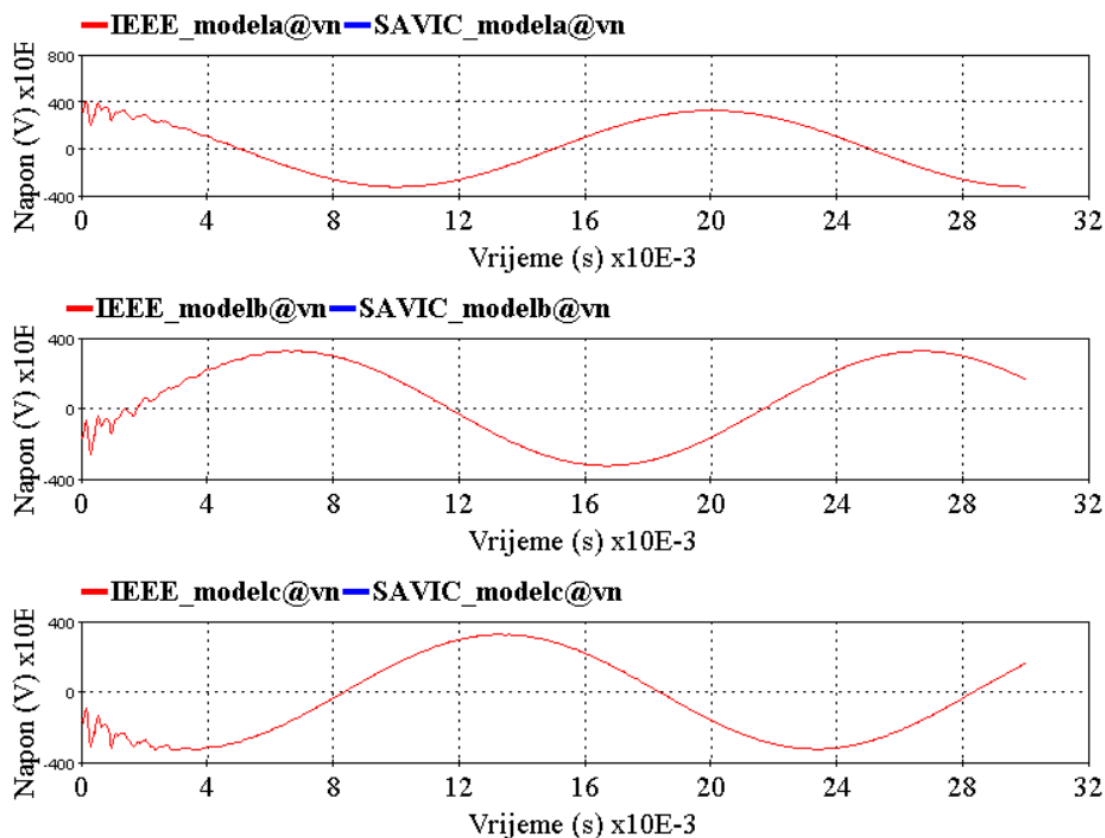
U tabeli 12 su prikazane izmjerene vrijednosti energije na svim postojećim odvodnicima prenapona posmatranog dijela mreže.

Linijski odvodnik prenapona može maksimalno propustiti energiju vrijednosti 2 880 kJ, dok odvodnik prenapona ispred postrojenja energiju vrijednosti 3360 kJ.

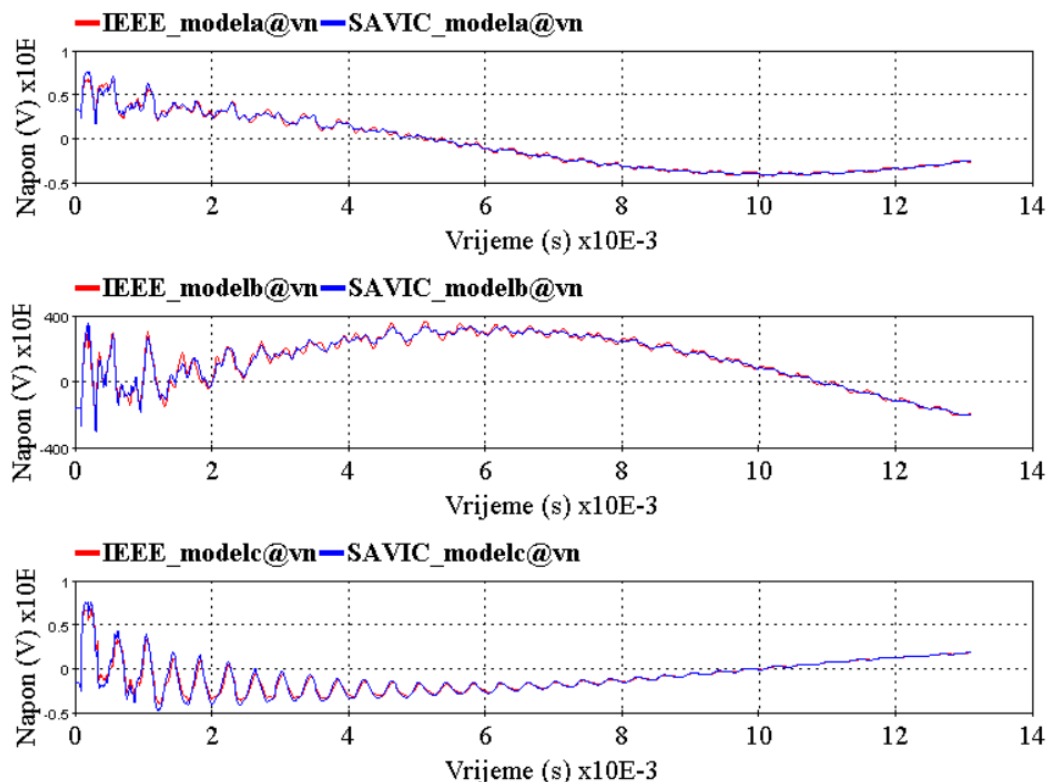
Analizom podataka iz prethodne tabele zaključuje se da pri atmosferskom pražnjenju sa amplitudom struje od 200 kA dolazi do preopterećenja odvodnika na stubnom mjestu 54d, odnosno na stubnom mjestu gdje se desilo pražnjenje u zaštitno uže. Odvodnici prenapona ispred postrojenja su znatno manje opterećeni, jer je dio energije prenapona raspoređen na linijske odvodnike prenapona.

Razaranjem odvodnika prenapona postavljenog na najnižu fazu (faza “c”), na stubnom mjestu broj 54d, pri $I_{max}=200$ kA, dolazi do povećanja energetske opterećenja na odvodniku prenapona ispred postrojenja, na fazi “c”, međutim ne dolazi do energetske preopterećenje navedenog odvodnika prenapona.

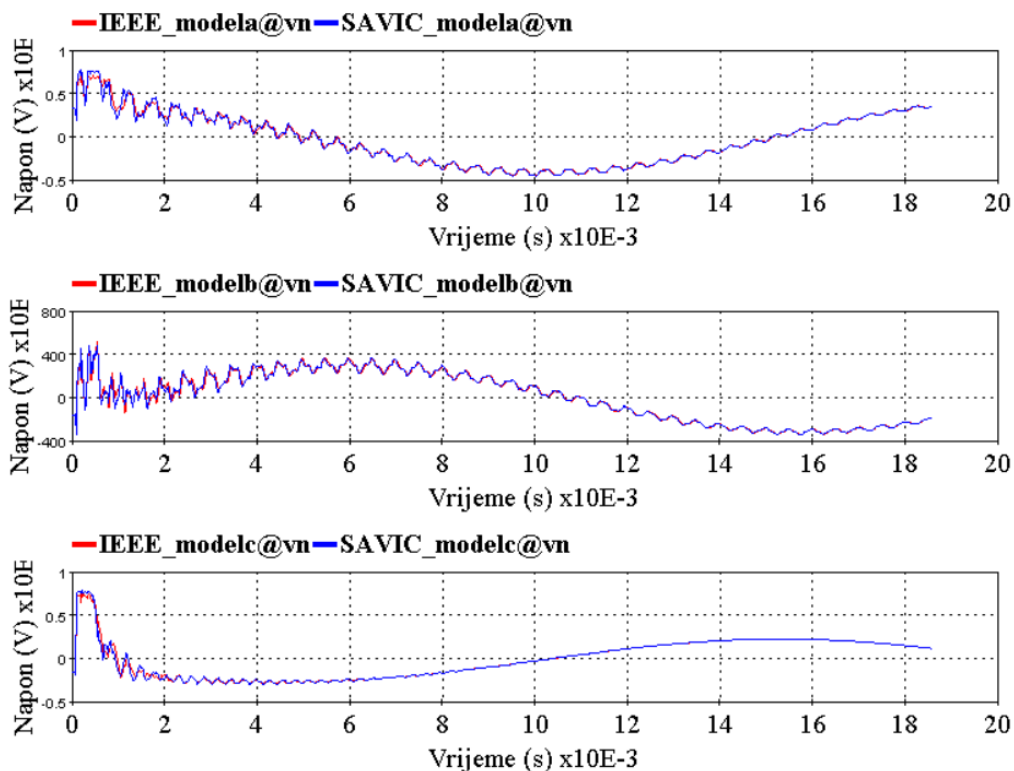
U nastavku, na slikama od 107 do 115, su prikazani grafici sa vremenskom promjenom napona u tački poslije odvodnika prenapona, ispred postrojenja. Grafici su prikazani tako da je izvršeno poređenje naponskih oblika po fazama, za dva različita modele odvodnika prenapona, čije modelovanje je prikazano u prethodnom poglavlju.



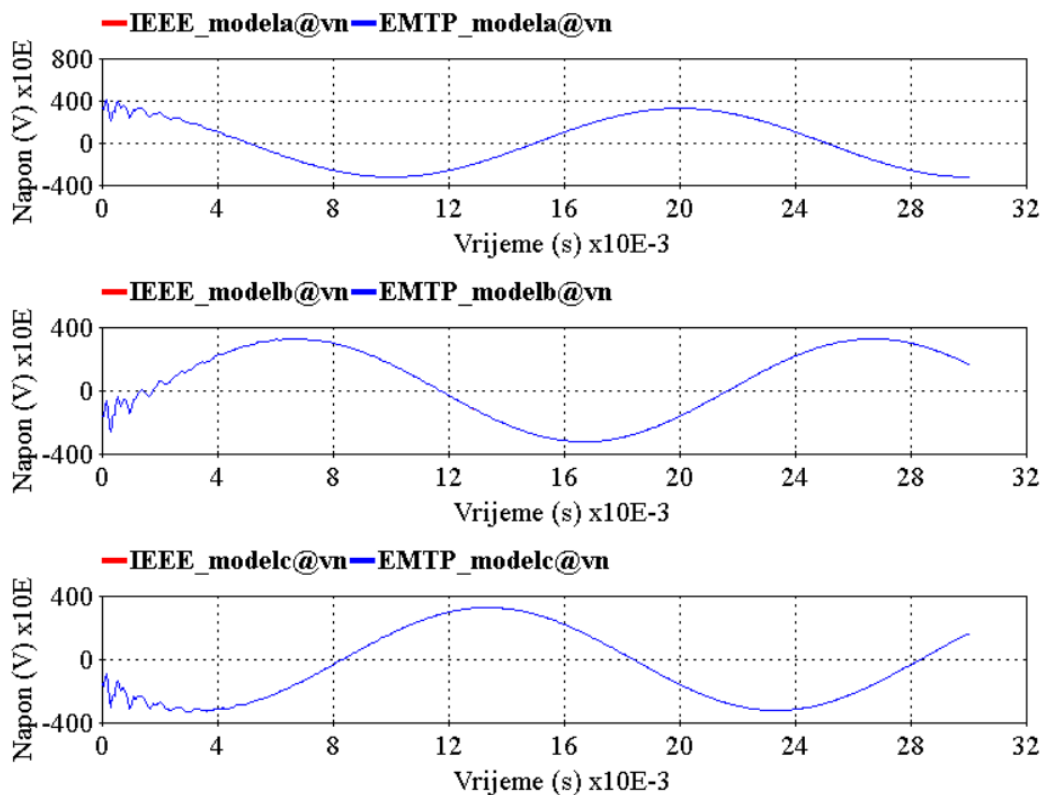
Slika 107. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i Savić modelu, $I_{max}=20$ kA



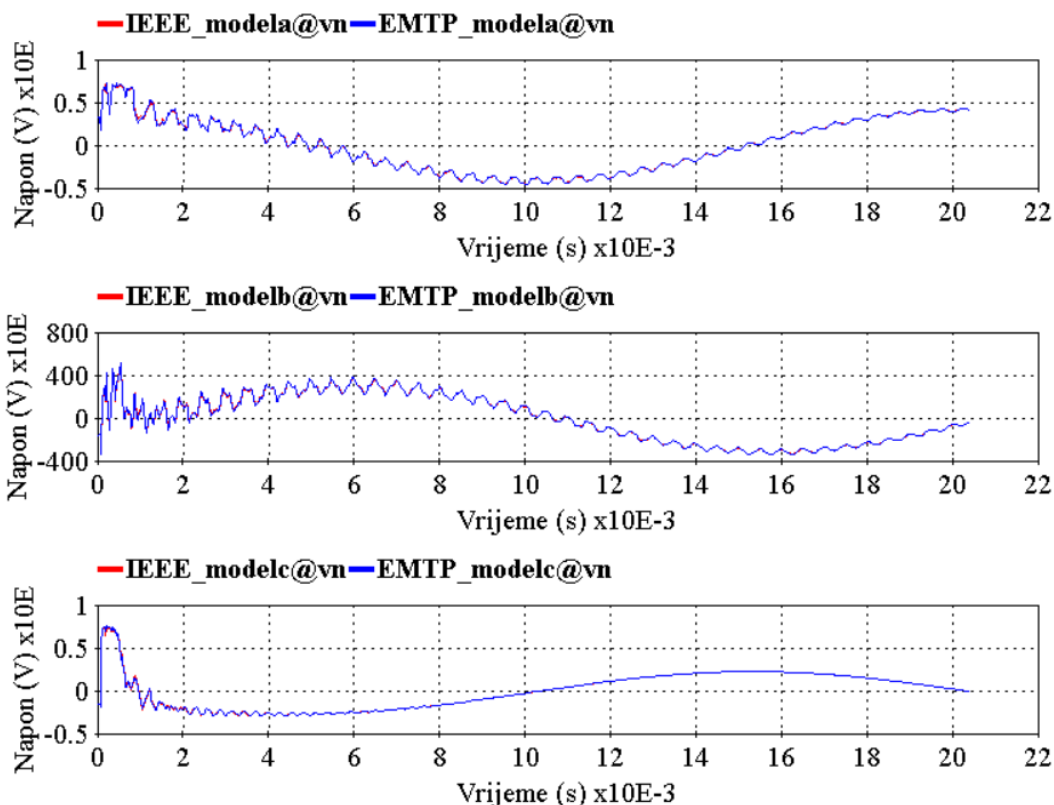
Slika 108. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i Savić modelu, $I_{max}=100$ kA



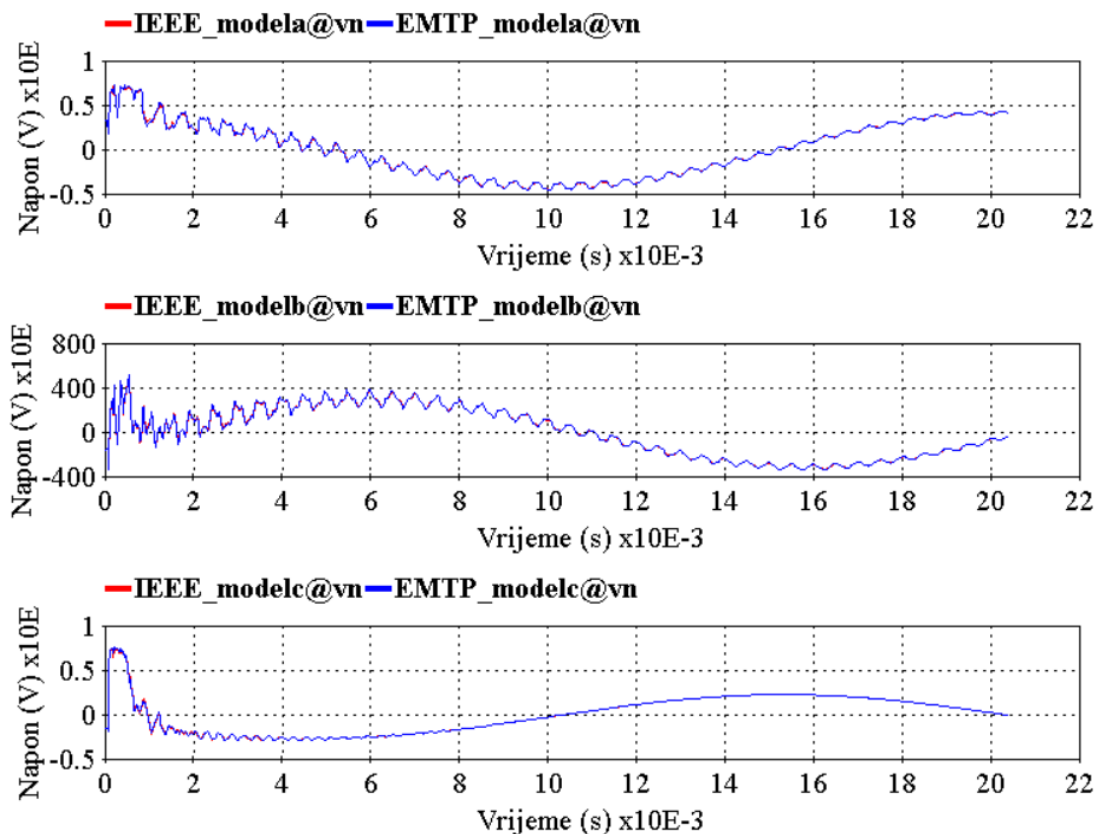
Slika 109. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i Savić modelu, $I_{max} = 200$ kA



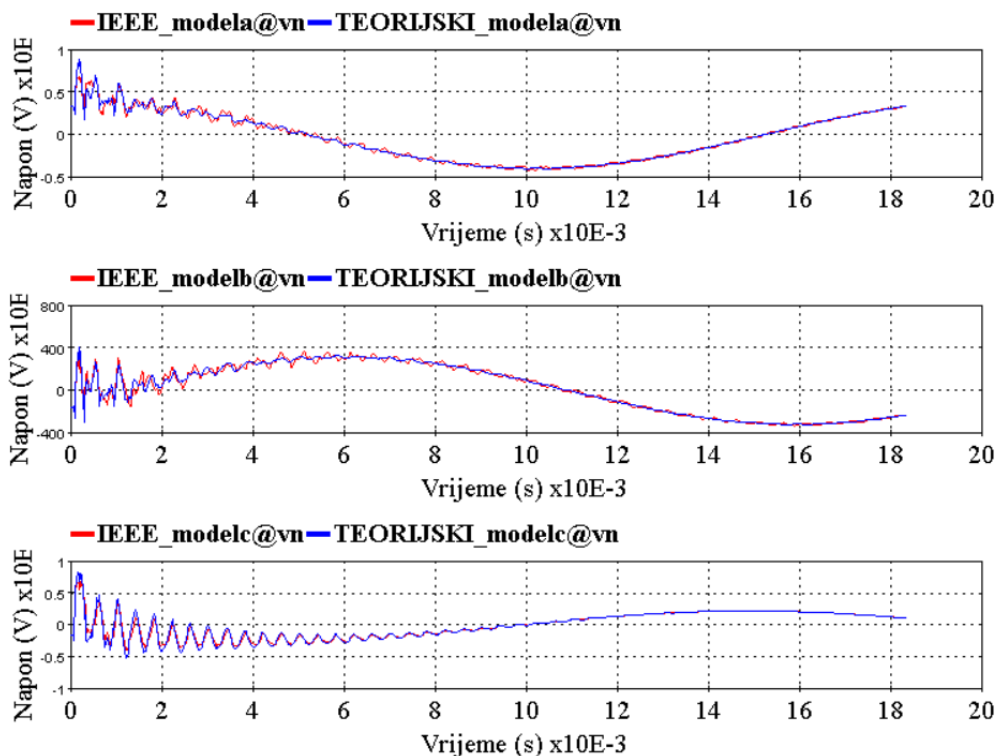
Slika 110. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i EMTP modelu, $I_{max} = 20$ kA



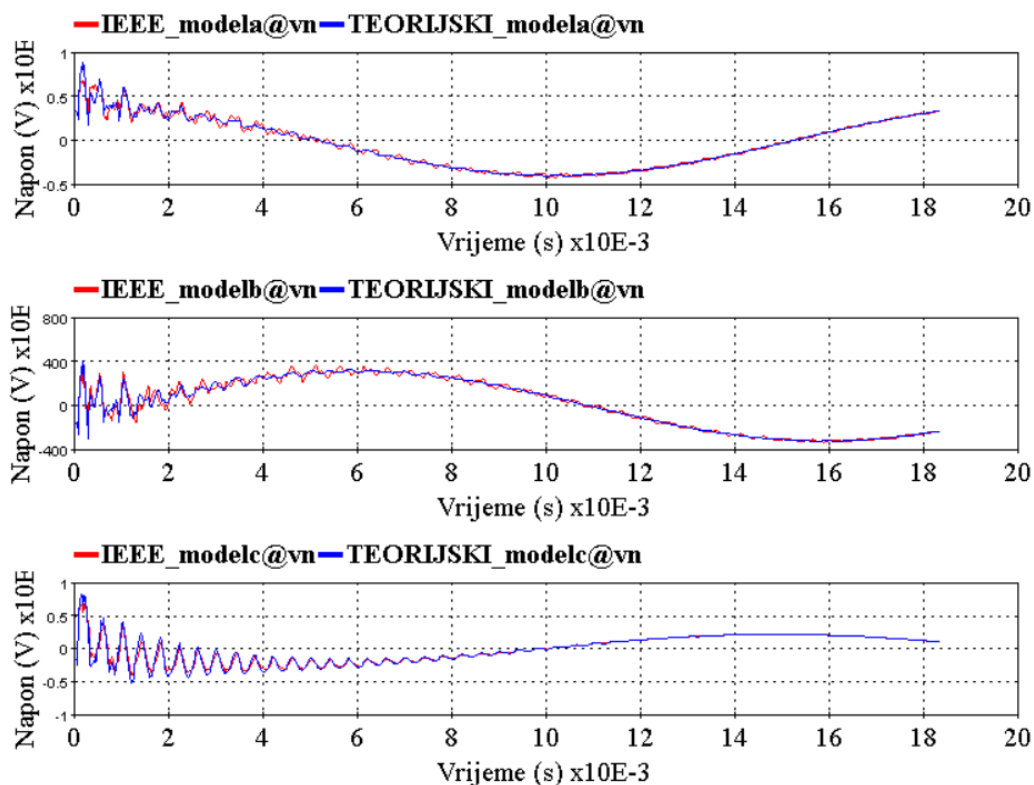
Slika 111. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i EMTP modelu, $I_{max} = 100 \text{ kA}$



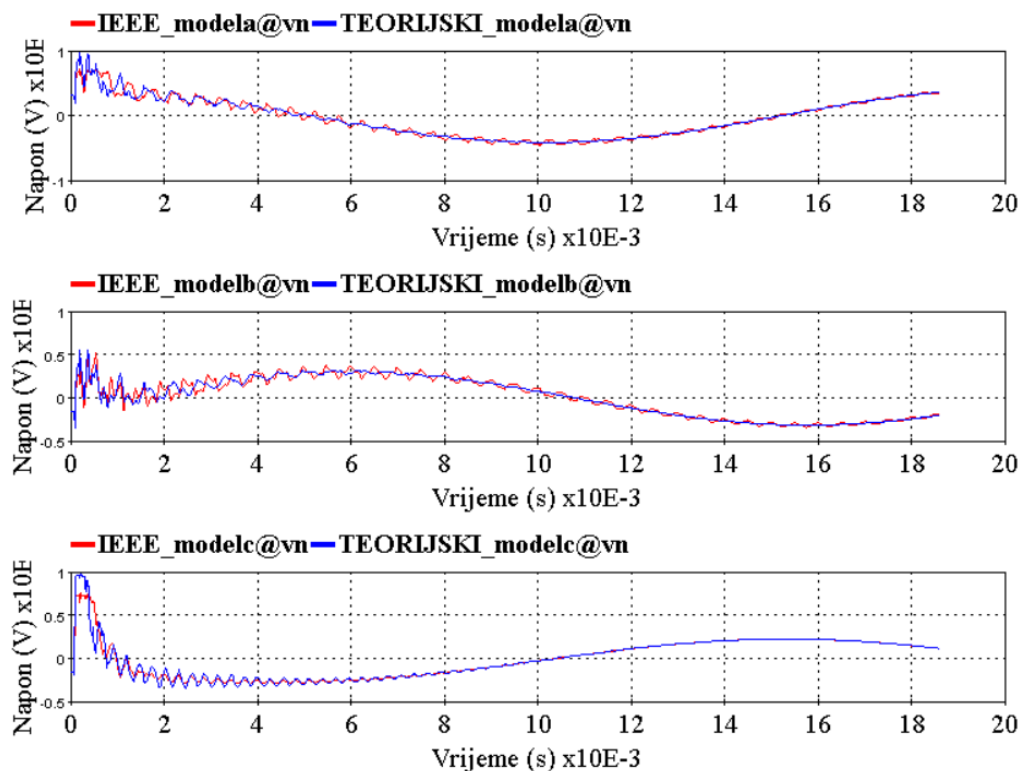
Slika 112. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i EMTP modelu, $I_{max} = 200 \text{ kA}$



Slika 113. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i TEORIJSKI modelu, $I_{max}=20\text{ kA}$



Slika 114. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i TEORIJSKI modelu, $I_{max}=100\text{ kA}$



Slika 115. Poređenje naponskih prilika u postrojenju pri modelovanju OP prema IEEE i TEORIJSKI modelu, $I_{max}=200$ kA

Potencijalna ograničenja istraživanja odnose se na probleme numeričke stabilnosti proračuna i vremenskog trajanja proračuna, zavisno od analiziranih uticajnih faktora. Naime, zbog dimenzionalnosti problema, početnih uslova i divergencije rješenja može se pojaviti problem numeričke stabilnosti proračuna u određenim slučajevima od interesa. Takođe, s obzirom da su odvodnici prenapona nelinearni elementi, može se pojaviti problem suviše dugog trajanja izvršenja proračuna, odnosno nemogućnosti njihovog završetka u realnom vremenu.

Buduća istraživanja iz ove oblasti treba da budu usmjerena na rješavanje navedenih potencijalnih ograničenja, kao i formiranje modela odvodnika prenapona koji bi imao optimalne pokazatelje proračuna u definisanim uslovima primjene.

Analizom grafika u ovom poglavlju, kojima je prikazano poređenje vremenske promjene napona u tački mjerenja ispred postrojenja, za slučaj kada su odvodnici prenapona modelovani prema 4 različite U-I karakteristike, zaključuje se da ne postoji značajna razlika i odstupanje među istim fazama.

Prethodno zapažanje se poklapa sa zaključcima koji su izvedeni u poglavlju 5.3, koji se odnosi na modelovanje dijela mreže 110 kV naponskog nivoa.

Analizom dijela 400 kV mreže došlo se do potvrde da izvedeni zaključci iz prethodnog poglavlja važe i za veći naponski nivo.

Dobijeni rezultati omogućiće jednostavniji izbor odgovarajućih modela odvodnika prenapona uz definisanje opsega i uslova, i postizanje potrebne tačnosti.

7. ZAKLJUČAK

Prenaponska zaštita elektroenergetskih postrojenja, objekata i transformatora postiže se primjenom odvodnika prenapona. Istraživanjima i naučnim doprinosima u oblasti energetike, došlo je do unapređenja i razvoja različitih odvodnika prenapona, sve u cilju efikasnijeg djelovanja u slučaju prenaponskih pojava.

U ovom radu je izvršeno istraživanje u cilju postizanja sigurnosti funkcionisanja energetskog sistema kroz efikasan izbor prenaponske zaštite.

Značaj postizanja prenaponske zaštite postaje jasniji kroz dati opis prenapona koji se pojavljuju u elektroenergetskim mrežama i sistemima, definisanje njihovih podjela i karakteristika.

Odvodnik prenapona je element čijom primjenom se ostvaruje zaštita izolacije uređaja i provodnika u elektroenergetskim mrežama i u radu su detaljno predstavljeni tipovi odvodnika prenapona, konstrukcija, način ugradnje, modelovanje, poređenje odvodnika prenapona modelovanih prema različitim U-I karakteristikama.

Pored odvodnika prenapona, u radu su prikazani modeli i ostalih elementa elektroprenosne mreže primjenom savremenog programskog paketa EMTP, pomoću kojeg se dobijaju vrlo precizni podaci tranzijentnih prilika u sistemu. Tačnim modelovanjem elemenata mreža i postrojenja, proračunom strujnih i naponskih prilika u posmatranom sistemu, postiže se adekvatan izbor prenaponske zaštite u fazi projektovanja posmatrane mreže.

Primjena modela elemenata i metoda proračuna daje rezultate odgovarajuće tačnosti u očekivano razumnom trajanju proračuna jer su elektroenergetski sistemi složeni, dinamični i visoke dimenzionalnosti, što dovodi do problema u postizanju rezultata proračuna u realnom vremenu. Uticaj odvodnika prenapona na tačnost rezultata i vrijeme trajanja proračuna je značajan, jer su odvodnici prenapona nelinearni elementi.

U radu je sprovedeno istraživanje upoređivanjem pojedinih modela odvodnika prenapona u zavisnosti od različitih uticajnih faktora, kao i određivanje opsega tačnosti pojedinih modela. Istraživanje u ovom radu je zasnovano na analizi uticaja odvodnika prenapona modelovanih prema modelima četiri različite U-I karakteristike (IEEE model, EMTP model, model prof. Savića i TEORIJSKI model.

Modelovanjem brojnih simulacija atmosferskog pražnjenja u različite elemente dijela prenosnog sistema, posmatrale su se vremenske promjene napona na izolatorima i drugim tačkama sistema koje su od značaja za analizu. Na taj način se posmatrao uticaj navedenih pojava na odvodnike prenapona, i to analizom da li je došlo do njihovog energetskog preopterećenja u odnosu na različite karakteristike sistema, u odnosu na poziciju atmosferskog pražnjenja te da se na osnovu istog moglo razmatrati da li je ugrađeni broj odvodnika prenapona opravdan sa aspekta ekonomičnosti ali i efikasnosti.

Analizom uticaja odabranog modela odvodnika prenapona pri proračunima prostiranja prenaponskih talasa na vrijednosti karakteristika prenaponske zaštite je postignut cilj rada, koji koji se ogleda i u definisanju opsega primjene pojedinih modela. Rezultati dobijeni modelovanjem realnog stanja i dijela prenosnog sistema Crne Gore, doveli su do zaključka da izbor modela odvodnika prenapona ne utiče značajno na validnost tranzijentnih procesa prilikom analize uticaja atmosferskog pražnjenja.

Analizom rezultata dobijenih poređenjem vrijednosti napona u posmatranim tačkama, za odvodnike prenapona modelovane prema četiri različite U-I karakteristike došlo se do zaključka da su odstupanja ispod 9%. Izuzimanjem rezultata za TEORIJSKI model odvodnika prenapona za niže vrijednosti prenapona, odstupanja za opisani opseg posmatranja su oko 5%,

Konačna analiza je izvršena na kompleksnom dijelu prenosne mreže dvosistenskog dalekovoda, i to na dionici sa visokim otporima uzemljenja što je posebno zanimljivo analizirati sa aspekta postizanja dobre prenaponske zaštite. I u tom dijelu je potvrđena tačnost izvedenih zaključaka.

Potencijalna ograničenja istraživanja odnose se na probleme numeričke stabilnosti proračuna i vremenskog trajanja proračuna, zavisno od analiziranih uticajnih faktora.

Zbog dimenzionalnosti problema, početnih uslova i divergencije rješenja može se pojaviti problem numeričke stabilnosti proračuna u određenim slučajevima od interesa.

Takođe, s obzirom da su odvodnici prenapona nelinearni elementi, može se pojaviti problem suviše dugog trajanja izvršenja proračuna, odnosno nemogućnosti njihovog završetka u realnom vremenu.

Buduća istraživanja iz ove oblasti treba da budu usmjerena na rješavanje navedenih potencijalnih ograničenja, kao i formiranje modela odvodnika prenapona koji bi imao optimalne pokazatelje proračuna u definisanim uslovima primjene.

8. LITERATURA

- [1] Insulation Coordination and Voltage Transients for Industrial Electrical Power Systems-IEEE Southern Alberta Section PES/IAS Joint Chapter Technical Seminar; Rasheek Rifaat, P.Eng, IEEE Life Fellow IEEE/IAS/I&CPSD Chair and Xiaoke (Ken) Duan, P.En Electrical Engineer;
- [2] IEEE Std C62.22-2009 (Reaffirmed 2003): IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems
- [3] Ivo Uglešić: „Tehnika visokog napona“, Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, Zagreb 2002. godina
- [4] [www.emtp.com\Origin and classification of overvoltages \(https://youtu.be/AuCQjwi-org?si=9grZTrvur5R5MGji\)](https://youtu.be/AuCQjwi-org?si=9grZTrvur5R5MGji)
- [5] M. Savić, Z. Stojković: „Tehnika visokog napona“, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Beograd 1996. godina.
- [6] IEEE Std C62.82.1- 2010; Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules
- [7] <http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/36/26%20PZ.pdf>
- [8] IEEE Std C62.22-2009 (Reaffirmed 2003): IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems
- [9] ABB, High voltage surge arresters buyer's guide
- [10] IEEE Std C62.11-2012: Standards for Metal Oxide Surge Arresters for AC Circuits (>1kV)
- [11] <https://www.inmr.com/harmonizing-iec-ieee-arrester-standards/>
- [12] Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies, André Meister, Rafael Amaral Shayani, Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira.
- [13] MO Surge Arresters Stresses and Test Procedures, Working Group A3.17
- [14] A novel parameter estimation method for metal oxide surge arrester models, Mehdi Nafar, Gevork B Gharehpetian and Taher Niknam;
- [15] IEC 60099-4, Ed. 2.1, 2006-07 Surge arresters –Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. system
- [16] IEC 60099-1
- [17] www.scribd.com, Koordinacija izolacije transformatorskih stanica izaštita od prenapona
- [18] Metode ispitivanja klasičnih i metaloksidnih odvodnika prenapona-10. savjetovanje HRO CIGRÉ Cavtat, 6. – 10. studenoga 2011., Goran Levačić, dipl.ing.el, Boško Milešević, dipl.ing.el., mr. sc. Srećko Bojić, dipl.ing.el.
- [19] IEC 60099-4, Edition 2.2, 2009-05: Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems
- [20] Modelovanje atmosferskih prenapona nanadzemnim vodovima, Mladen Banjanin, Milan S. Savić, Jovana Tuševljak
- [21] <https://www.fer.unizg.hr/> Predavanje Tehnika visokog napona 2024.
- [22] Primena programskog alata ATP/EMTP u analizi atmosferskih prenapona, Jovan Mrvić, Ranko Jasika, Petar Vukelja, Goran Lepović, Ninoslav Simić.
- [23] Modeling of Transmission Line and Substation for Insulation Coordination Studies, Prof. Ivo Uglešić
- [24] Computer-aided design in power engineering – Application of software tools, Z. Stojković, Springer Berlin Heidelberg, Academic Mind, Belgrade, 2012, p. 436, DOI:10.1007/978-3-642-30206-0
- [25] www.scribd.com Atmosferski Prenaponi Prof.dr.sc. IvoUglešić, dipl.ing.

- [26] Working group IEEE Report (1985, July). A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-104, pp 918-932.]
- [27] "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 6, July 1991, pp. 1327–1335, M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Shiokawa, K. Murotani, and T. Higuchi
- [28] Prenaponi u mrežama Prof.dr.sc. Ivo Uglešić, dipl.ing. Doc.dr.sc. Viktor Milardić, dipl.ing
- [29] IEEE Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 302-309; 1992
- [30] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 2, pp. 393-398, Apr 1999. doi: 10.1109/61.754079
- [31] F. Fernandez, R. Diaz, "Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations", paper 144, International Conference On Power System Transients, IPST'01, 20-24 June. 2001.
- [32] www.emtp.com
- [33] IEEE Std C62.22.1 (Reaffirmed 2003): IEEE Guide for the Connection of Surge Arresters to Protect Insulated, Shielded Electric Power Cable Systems
- [34] Shindo, Takatoshi; Suzuki, Toshio (CRIEPI) " New Calculation Method of Breakdown Voltage-Time Characteristics of Long Air Gaps" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, June 1985, pp 1556-1563.
- [35] DARVENIZA(M.); POPOLANSKY (F.); WHITEHEAD (E.R.) "Lightning protection of UHV transmission lines", CIGRE report 1975-41.
- [36] Protection against lightning – Part 1: General principles, International Standard IEC 62305-1, First edition, 2006-01.
- [37] IEC standard 60137