Smanjenje broja ispada nadzemnih visokonaponskih vodova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima primjenom odvodnika prenapona.

Piliškić, Silvia

Doctoral thesis / Disertacija

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:824444

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory







Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Silvia Piliškić

SMANJENJE BROJA ISPADA NADZEMNIH VISOKONAPONSKIH VODOVA UZROKOVANIH ATMOSFERSKIM PRAŽNJENJIMA PRIMJENOM ODVODNIKA PRENAPONA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Silvia Piliškić

SMANJENJE BROJA ISPADA NADZEMNIH VISOKONAPONSKIH VODOVA UZROKOVANIH ATMOSFERSKIM PRAŽNJENJIMA PRIMJENOM ODVODNIKA PRENAPONA

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Ivo Uglešić

Zagreb, 2020.



University of Zagreb
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Silvia Piliškić

REDUCING NUMBER OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINE OUTAGES CAUSED BY LIGHTNING APPLYING LINE SURGE ARRESTERS

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Professor Ivo Uglešić, Ph.D.

Zagreb, 2020

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za visoki napon i energetiku.

Mentor: prof. dr. sc. Ivo Uglešić, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb

Doktorski rad ima: 185 stranica

Doktorski rad br.:_____

Životopis mentora

Ivo Uglešić radi kao profesor na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Djelujući kao redoviti profesor, surađivao je s većim brojem institucija i tvrtki u Hrvatskoj, regiji i u svijetu, rješavajući složene tehničke probleme i uspješno primjenjujući rezultate svojih istraživanja i rješenja u praksi. Njegov znanstveni i stručni rad uključuje područja visokonaponske tehnike, prenaponske zaštite, prijenosa električne energije i električne vuče. Voditelj je Laboratorija visokog napona na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, koji je akreditiran od strane Hrvatske akreditacijske agencije. Autor je brojnih znanstvenih i stručnih radova, kao i mnogih studija i tehničkih rješenja koja su implementirana u praksi. Član je tehničkog odbora Međunarodne konferencije o tranzijentima u elektroenergetskom sustavu (IPST), te recenzent u više časopisa. Uspješnu međunarodnu suradnju uspostavio je sa stručnjacima iz područja električne energije u Francuskoj (EDF), kao i sa znanstvenicima s Tehničkog sveučilišta u Grazu.

Međunarodno vijeće za velike električne sustave – CIGRE dodijelilo je 2018. profesoru Uglešiću visoko priznanje „Fellow“ za njegov izuzetan doprinos i rad. Prof. Uglešić je 2012. nagrađen Zlatnom plaketom "Josip Lončar" za svoj izvanredan nastavni i istraživački rad na Sveučilištu u Zagrebu, na Fakultetu elektrotehnike i računarstva. Profesor Uglešić je tijekom nastavnih aktivnosti uspješno prenosio znanje studentima, mladim istraživačima i stručnjacima. Pod njegovim su mentorstvom diplomirali brojni magistri i doktori znanosti, od kojih su mnogi danas ugledni znanstvenici i stručnjaci u industriji, na institutima i sveučilištima.

Supervisor curriculum vitae

Ivo Uglešić works as a professor at the Faculty of Electrical Engineering and Computing Zagreb. Acting as a full professor, he has cooperated with several institutions and companies in Croatia, throughout the region and along the world, solving complex technical problems and successfully applying the results of his researches and solutions in practice. His scientific and professional work includes areas of high voltage engineering, overvoltage protection, electric power transmission and electric traction. In addition, he is the head of the High Voltage Laboratory at the Faculty of Electrical Engineering and Computing Zagreb, which is accredited by the Croatian Accreditation Agency. He is the author of numerous scientific and professional papers as well as many studies and technical solutions that have been implemented in the practice. He is a member of the technical committee of the International Conference on Power System Transients (IPST) and a reviewer for the more scientific journals. Successful international cooperation has been established with experts from Electricity in France (EDF) as well as with scientists from the Technical University of Graz (Institute of High Voltage Engineering and System Management).

Prof. Uglešić was granted by the International Council on Large Electric Systems – CIGRE in 2018 for his remarkable work in the study committee „System Technical Performance“ with the title of Fellow, assigned to the most prominent members. In 2012. professor Uglešić was awarded with the Golden Plaque "Josip Lončar" for his outstanding teaching and research work at the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing. Throughout the teaching activities, professor Uglešić successfully transferred knowledge to students, young researchers and professionals. Numerous master's and doctorate students graduated under his mentorship, many of which are now prominent scientists and experts in the industry, institutes and universities.

Zahvale

Svojem mentoru prof.dr.sc. Ivi Uglešiću zahvaljujem na pomoći i savjetima pri izradi doktorskog rada. Veliko Vam hvala na strpljenju i podršci tijekom svih godina mentorstva!

Zahvaljujem članovima povjerenstva za obranu doktorskog rada dr.sc. Bruni Jurišiću, prof.dr.sc. Viktoru Milardiću i prof.dr.sc. Ivici Paviću na čitanju rada te kritičnim napomenama i vrijednim sugestijama.

Zahvaljujem dr.sc. Bojanu Francu, doc.dr.sc. Božidaru Filipoviću-Grčiću i ostalim kolegama sa Zavoda za visoki napon i energetiku na pomoći i podršci tijekom doktorskog istraživanja i izrade rada.

Hvala kolegama iz Hrvatskog operatora prijenosnog sustava na razumijevanju i podršci.

Svim svojim dragim prijateljima i obitelji, a posebno suprugu Draganu i mojoj majci Maji Sinčić zahvaljujem na strpljenju i potpori. Posebno sam zahvalna mojim kćerima Luciji i Mariji, koje su mi motivacija, ponos, ljubav i veselje.

Rad posvećujem uspomeni na mojeg oca Franu Sinčića, koji me je uvijek i u svemu podržavao.

Sažetak

Pojava povratnih preskoka na izolatorskim lancima stupa uslijed atmosferskih prenapona jedan je od najčešćih uzroka ispada nadzemnih visokonaponskih vodova iz pogona te u velikoj mjeri utječe na pouzdanost pogona elektroenergetskog sustava i kvalitetu opskrbe električnom energijom.

U okviru doktorskog rada predložena je metoda za smanjenje broja ispada nadzemnih visokonaponskih vodova uzrokovanih atmosferskim prenaponima primjenom odvodnika prenapona na nadzemnom vodu koja podrazumijeva korištenje podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja. Broj odvodnika prenapona koji će se ugraditi određuje se ili na temelju rezultata tehno-ekonomske analize ili prema zahtijevanoj razini prenaponske zaštite pojedinog nadzemnog voda. Raspored odvodnika prenapona na dalekovodu određuje se prema indeksu relativne ugroženosti stupa, koji predstavlja razinu ugroženosti pojedinog stupa u odnosu na sve ostale stupove istog nadzemnog voda. Kriteriji za ugradnju odvodnika prenapona u jednu ili više faza pojedinog stupa nadzemnog voda određuju se na temelju rezultata simulacija atmosferskih pražnjenja kojima se izračunava vjerojatnost pojave povratnog preskoka za različite kombinacije vrijednosti otpora uzemljivača stupa i amplitude struje atmosferskog pražnjenja. Opisani postupci provedeni su na primjeru odabrane dionice 110 kV prijenosnog dalekovoda.

U radu je razvijen frekvencijski ovisni model uzemljivača stupa modeliran kao RLC strujni krug uz poznate izraze za parametre R, L i C za zadanu geometriju uzemljivača stupa i za frekvencijski ovisne parametre specifičnog otpora i permitivnosti zemlje. Vrijednosti amplitude i kuta impulsne impedancije uzemljivača izmjerene impulsnim strujama odgovaraju vrijednostima izračunatim korištenjem frekvencijski ovisnog modela impedancije uzemljivača pri čemu se vrijednosti amplitude impedancije uzemljivača smanjuju s porastom frekvencije.

Ključne riječi: odvodnik prenapona, nadzemni visokonaponski vod, sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja, atmosferski prenaponi, povratni preskok, proračun elektromagnetskih prijelaznih pojava, frekvencijska ovisnost, impedancija uzemljivača stupa.

Extended abstract

REDUCING NUMBER OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINE OUTAGES CAUSED BY LIGHTNING APPLYING LINE SURGE ARRESTERS

Lightning strikes are one of the most common causes of the high voltage overhead lines' outages which are often followed by the electricity supply interruptions. Consequences of the lightning overvoltages can be power system's equipment damages due to the high lightning current amplitudes or due to the high number of switching operations and decrease of the electricity supply quality, which is one of the key elements for end electricity users. The issue of the high number of the high voltage overhead lines' outages caused by lightning is in particular emphasised in areas with high lightning density and high low-frequency specific soil resistivity.

Faults of the high voltage overhead line due to lightning can be caused by the overvoltages induced in case of a direct lightning stroke to one or more phase conductors or in case of a lightning stroke to the tower or to the shielding wire followed by a backflashover.

Backflashovers on the overhead lines insulators caused by lightning are complex electromagnetic phenomena which include air discharge processes, fast changes of the electromagnetic field, non-linear effects caused by the corona effect on the conductors or on the overhead line's tower and high frequencies.

Lightning stroke to the phase conductor in the most cases causes backflashover on the insulator string of the phase hit by the lightning on one or more overhead line's towers. In case of the direct lightning stroke to the phase conductor, the probability of the backflashover occurrence depends on the lightning current amplitude and polarity and on the phase voltage in the moment of lightning stroke.

Lightning stroke to the shielding wire or to the overhead line's tower top can also cause the backflashover on one or more phase conductors. The backflashover occurrence probability depends on the amplitude, polarity and front steepness of the lightning current impulse, on the grounding resistance of the tower hit by the lightning stroke or of the two adjacent towers in case when lightning stroke hits the overhead line's span between the

towers, on the tower's construction type and dimensions, and on the phase voltage in the moment of the lightning stroke.

Systems for lightning location detection and monitoring of lightning activities in real time have been in use as a support in the power system operation control and management in the last decades. Statistical data obtained from the lightning location systems can be used for determination of the lightning activities parameters in the area where the overhead line is located, in particular of the lightning density and lightning current amplitude, which are used as the input data for the calculations of the overvoltage performance of the overhead line. Lightning density data for the relevant area have been previously calculated based on the isokeraunic maps, which shows number of the lightning days for the certain area. In the latest period it is possible to determine the lightning density data for the exact location of each of the towers by using the high resolution lightning density maps, which are obtained from the lightning location system's data. Lightning location system's data in correlation with the data on the overhead line's fault obtained from the relay protection system are used to determine the number of the faults of the overhead line caused by the lightning, as well as to determine the faults' locations; in particular, the towers on which the backflashovers occur due to the lightning overvoltages.

Methods which significantly influence the overvoltage protection of the high voltage overhead lines and decrease the number of the backflashovers are improving the tower's grounding resistance, increasing the insulation level of the overhead line, line surge arresters application and shielding wires application.

Shielding wires are commonly used to protect high voltage overhead lines in the phase of designing and construction. Increasing the number of shielding wires to reduce the number of backflashover is almost impossible to implement to the already constructed overhead lines.

Increase of the insulation level of the overhead line is difficult to implement due to the spatial limitations and set safety limits for the heights and distances.

Depending on the local soil characteristics, it is possible to decrease the tower grounding resistance. Overhead lines which are significantly exposed to the lightning activities influence in particular are usually located at high altitudes and very often on the rocky soil with very high specific soil resistivity and it is not possible to implement this method in such terrain conditions.

In recent years the network operators started to apply the line surge arresters (LSA) in order to improve the overvoltage protection of the high voltage overhead line. The first experiences with the LSAs' application have proved their efficiency in reducing the number of the overhead line outages due to lightning. Manufacturing technology development of the metal oxide surge arresters with polymer housing which do not significantly put on weight on the tower construction, has enabled the installation of the surge arresters to the overhead line. Low purchase costs and simple installation of the line surge arresters are of particular importance when they are applied to the existing overhead lines.

Within the scope of the PhD thesis, the method for the reducing number of high voltage overhead line's outages caused by lightning, applying line surge arresters has been developed. The method uses the lightning location system statistical data, statistical data on the overhead line's outages analysis, overhead line's overvoltage performance analysis, selection and installation of the adequate line surge arresters and determination of the criteria to one or more phases on the overhead line tower.

The number of the line surge arrester which will be installed to improve the overvoltage performance of the overhead line and to reduce the number of the outages needs to be determined based on the techno-economic assessment. The installation of the line surge arrester is economically feasible if the costs of the investments and maintenance of the installed equipment are not higher of the expected economic benefits due to the decreased costs caused by the outages and damages of the particular overhead line. In exceptional cases in which the overhead line is of particular importance for the security of supply for the certain part of the power system, investment costs which are higher than expected finance benefits are acceptable.

Line surge arresters' parameters are selected in order to limit the lightning and switching overvoltages as much effective as possible below the withstand voltage, and in the same time not to exceed the range of energy stress handling capability due to temporary overvoltages.

In order to configure the surge arresters distribution along the overhead line and to determine the number of line surge arresters to be installed to the particular tower, the lightning density and tower grounding resistivity data are taken into account since the probability of the backflashover occurrence on the tower insulator string depends on these data. The relative severity level of the backflashover occurrence of the particular tower in

relation to all other towers along the observed overhead line can be determined using the lightning density data, electrical and dimensioning overhead line data and tower grounding resistivity data.

Software tool Sigma slp has been used to calculate the lightning performance of the overhead line. In the determination of line lightning performance, a Monte Carlo statistical method is used for the simulation of the high number of lightning strokes and a three dimensional Electro geometric model is adopted for the determination of the lightning stroke's termination to the overhead line.

In order to determine the number of the line surge arresters to be installed to the particular tower of the overhead line, the probability of the backflashover occurrence is calculated for the different values of the tower grounding resistance and of lightning current amplitude. The probability of the backflashover occurrence on the insulator string of the overhead line's tower can be determined by using software tool EMTP for the electromagnetic transients' simulations. The simulation results depend on the different input parameters such as lightning current parameters, electrical and dimensioning overhead line data, tower grounding impedance and if the line surge arrester has been applied to one or more phases on the tower.

The latest researches have shown that the tower grounding impedance is frequency-dependent and that the value of the impedance amplitude decreases with the frequency increase for high resistivity soils. It is a direct consequence of the frequency dependence of the specific soil resistivity and permittivity. Since the lightning current frequency varies in a wide frequency range from few Hertz to few MHz, the frequency-dependent model of the grounding tower impedance has been developed in the thesis. The impedance has been modelled as the RLC electrical circuit with the given expressions for the RLC parameters which take into account the tower grounding geometry and the frequency dependence of the specific soil resistivity and permittivity. The frequency-dependent grounding impedance behaviour calculated using the RLC electrical circuit, corresponds well with the experimental measurements, in terms of amplitude and phase angle.

The thesis consists of eight chapters. The introduction considerations include the main objectives and the overview of the research. In the second chapter the parameters of the lightning activities and the influence of the lightning overvoltages to the high voltage overhead lines' operation have been described on the basis of the recent knowledge which is

available in the scientific literature. The performance of the lightning location system and possibilities in usage of its data in correlation with the relay protection system data in order to determine the level of the exposure of the overhead line to the lightning activities, are described in the third chapter.

The selection of the line surge arresters has been described in the fourth chapter as well as the experience in the recent application of the line surge arresters to the 110 kV overhead line in order to reduce the number of outages due to lightning.

The elements and the input data of the model for the simulations of the lightning stroke to the overhead line's tower are described in the fifth chapter.

The frequency-dependent model of the tower grounding impedance is given in the sixth chapter. The model has been developed on the basis of the tower grounding impedance measurement's results for the configuration with the high soil resistivity. The influence of the tower grounding impedance model to the probability of the backflashover occurrence on the insulator string of the overhead line tower has been shown on the example of the 110 kV overhead line. It has been shown that the tower grounding impedance decreases when the lightning strikes the tower because the lightning is wide frequency range phenomena. Therefore, the probability of the backflashover occurrence in the case if the frequency-dependent tower grounding impedance model is used, is lower than in the case the tower grounding is modelled as constant resistance at low frequencies.

Method for reducing the number of high voltage overhead line outages caused by lightning applying line surge arresters has been described in the seventh chapter. The method uses lightning location system statistical data and data on overhead line's outages in order to assess the backflashover rate of the high voltage overhead line. The line surge arresters are selected for the given rated voltage and on the basis of the lightning stroke simulations' results and backflashover occurrence probability. The number of the line surge arresters in the configuration on the overhead line can be determined by performing the techno-economical assessment or by the given level of the overvoltage protection of the overhead line. The arrangement of the line surge arresters on the overhead line can be determined by using the severity index which represents the relative level of the severity of the backflashover occurrence of the particular tower in relation to all other towers of the observed overhead line. The example of the proposed method application on the selected section of the 110 kV overhead line has been described.

Concluding remarks are given in the eighth chapter. PhD thesis has shown that it is possible to reduce the number of high voltage overhead line outages caused by lightning applying line surge arresters. The more efficient overvoltage protection of the overhead line is achieved when the line surge arresters are selected and configured along the overhead line by taking into account the lightning parameters obtained by the lightning location system and frequency dependence of the tower grounding impedance.

The frequency-dependent model of the tower grounding impedance has been developed as the RLC electrical circuit taking into account the frequency dependence of the specific soil resistivity and permittivity. Tower grounding impedance was measured on the overhead line tower with disconnected shield wire using an impulse generator and injecting current impulses of different amplitudes and rise time. When compared to the measurements of the impulse grounding impedance, the RLC model gives similar values both in terms of amplitude and phase angle. The tower grounding impedance amplitude decreases with frequency for high low-frequency resistivity soils. Based on the results of the impulse impedance measurements the frequency-dependent tower grounding impedance was modelled. The state space representation was used to interact with an EMTP-type software program. The simulations of the 110 kV overhead line tower stroke by the lightning have shown that the tower grounding impedance decreases with the high frequencies and that the probability of the backflashover on the insulator string is lower when taking into account the frequency dependence of the tower grounding impedance. Therefore, it is important to take into account the frequency dependence of the tower grounding impedance when analysing the overvoltage performance of the overhead lines' towers with a high low-frequency grounding resistance.

Key words: surge arrester, high voltage overhead line, lightning location system, lightning overvoltages, backflashover, electromagnetic transients simulations, frequency dependence, tower grounding impedance

Sadržaj

1. Uvod ... 1
2. Atmosferska pražnjenja ... 7
   2.1. Atmosferski prenaponi ... 7
      2.1.1. Prenaponi uslijed izravnog udara munje u fazni vodič ... 10
      2.1.2. Prenaponi uslijed udara munje u stup ili zaštitni vodič ... 10
      2.1.3. Prenaponi uslijed udara munje u objekt u blizini ... 11
      2.1.4. Prenaponi uslijed porasta potencijala uzemljivača ... 12
   2.2. Vrste atmosferskih pražnjenja ... 13
   2.3. Energija atmosferskog pražnjenja ... 16
   2.4. Parametri struje atmosferskog pražnjenja ... 16
      2.4.1. Valni oblik atmosferskog pražnjenja ... 17
      2.4.2. Strmina struje atmosferskog pražnjenja ... 20
   2.5. Višestrukost atmosferskih pražnjenja ... 21
   2.6. Gustoća atmosferskih pražnjenja ... 22
   2.7. Broj atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod ... 23
   2.8. Elektro-geometrijski model nadzemnog voda ... 24
3. Izloženost nadzemnih vodova atmosferskim pražnjenjima ... 27
   3.1. Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja ... 27
      3.1.1. Princip rada sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja ... 28
      3.1.2. Programska podrška Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja ... 31
   3.2. Relejna zaštita nadzemnih vodova ... 42
      3.2.1. Lokacija mjesta kvara ... 44
   3.3. Korelacija podataka SLAP-a i sustava relejne zaštite ... 47
4. Primjena odvodnika prenapona na dalekovodu ... 59
   4.1. Odvodnici prenapona ... 59
   4.2. Odabir parametara odvodnika prenapona ... 63
   4.3. Trajni radni napon i nazivni napon odvodnika prenapona ... 64
   4.4. Energetska sposobnost odvodnika prenapona ... 66
   4.5. Zaštitna razina odvodnika prenapona ... 71
   4.6. Iskustva u primjeni odvodnika prenapona ... 71
5. Simulacija atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod ... 83
   5.1. Model struje atmosferskog pražnjenja ... 83
   5.2. Model stupa nadzemnog voda ... 85

5.3. Model faznih vodiča i zaštitnog vodiča ... 87
5.4. Model preskoka na izolatorskim lancima ... 88
5.5. Model odvodnika prenapona ... 90
5.5.1. Frekvencijski ovisni model odvodnika prenapona ... 93
5.6. Model otpora uzemljivača stupa ... 100
5.6.1. Efekt ionizacije tla ... 102
5.6.2. Mjerenje otpora uzemljivača stupa strujama niskih frekvencija ... 103
6. Model frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa ... 109
6.1. Impulsna impedancija uzemljivača stupa ... 109
6.2. Mjerenje impulsne impedancije uzemljivača stupa ... 111
6.3. Model frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa ... 119
6.4. Frekvencijski odziv uzemljivača stupa ... 121
7. Metoda za odabir i određivanje rasporeda odvodnika prenapona ... 129
7.1. Odabir i određivanje rasporeda odvodnika prenapona ... 129
7.2. Tehno-ekonomska analiza ugradnje odvodnika prenapona ... 132
7.3. Određivanje rasporeda odvodnika prenapona na nadzemnom vodu ... 136
8. Zaključak ... 159
Literatura ... 162
Popis oznaka i kratica ... 171
Životopis ... 181
Popis objavljenih radova ... 182
Curriculum Vitae ... 185

1. Uvod

Atmosferska pražnjenja u nadzemni vod uzrokuju visoke prenapone i prekide u napajanju. Atmosferski prenaponi najčešći su razlog ispada i kvarova nadzemnih visokonaponskih vodova. Posljedice atmosferskih prenapona mogu biti oštećenje opreme uslijed velikih struja kvara ili velikog broja sklopnih operacija te smanjenje kvalitete opskrbe električnom energijom, što je važan faktor za korisnike električne energije. Problem velikog broja ispada nadzemnih vodova uslijed atmosferskih prenapona posebno je izražen u područjima za koje je karakteristična velika gustoća udara munja u tlo i visok specifični otpor tla.

Do pojave prenapona koji uzrokuju kvarove na nadzemnim visokonaponskim vodovima može doći u slučaju izravnog udara munje u fazni vodič, udara munje u stup ili zaštitni vodič praćeno preskokom na fazne vodiče [1].

Preskoci na izolatorskim lancima na stupovima nadzemnih vodova, nastali uslijed atmosferskih pražnjenja, složene su elektromagnetske pojave koje obuhvaćaju fizikalni proces pražnjenja u zraku, brze promjene elektromagnetskih polja, nelinearne efekte uslijed nastajanja korone na vodičima i stupu te pojavu visokih frekvencija.

Udar munje u fazni vodič u najvećem broju slučajeva uzrokuje preskok na izolatorskom lancu pogođene faze, jednog ili više stupova. Vjerojatnost pojave preskoka u slučaju izravnog udara munje u fazni vodič ovisi o amplitudi struje munje i polaritetu te o vrijednostima faznih napona u trenutku udara.

Udar munje u zaštitni vodič ili vrh stupa također može izazvati preskok na jednom ili više faznih vodiča. Vjerojatnost pojave preskoka ovisi o amplitudi, polaritetu i strmini struje atmosferskog pražnjenja, otporu rasprostiranja uzemljivača pogođenog stupa, ili susjednih stupova u slučaju udara munje u zaštitni vodič u rasponu, izvedbi odnosno geometriji stupa te vrijednosti faznog napona u trenutku udara munje.

Sustavi za praćenje i lociranje atmosferskih pražnjenja u stvarnom vremenu u svijetu se koriste već više desetaka godina kao pomoć u vođenju elektroenergetskih sustava [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Statistički podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja koriste se za određivanje karakteristika atmosferskih pražnjenja u području u kojem je lociran promatrani nadzemni vod, prvenstveno gustoće udara munja te amplitude struje atmosferskog

pražnjenja, što su ulazni podaci za analizu prenaponskih karakteristika nadzemnog voda. Podaci o gustoći udara munja za promatrano područje uobičajeno su se određivali pomoću podataka iz izokerauničkih karata koje prikazuju broj grmljavinskih dana u godini na određenom području, a u novije vrijeme gustoću udara munja moguće je odrediti precizno za svako stupno mjesto pomoću visokorezolucijskih karata gustoće udara munja izrađenih korištenjem podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja. Podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja u korelaciji s podacima relejnog sustava o kvarovima promatranog nadzemnog voda koriste se za određivanje broja kvarova nadzemnog voda uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima kao i za određivanje lokacije kvarova, odnosno stupova na kojima dolazi do pojave povratnih preskoka na izolatoru uslijed atmosferskih prenapona [9], [10].

Mjere koje značajnije utječu na prenaponsku zaštitu nadzemnih visokonaponskih vodova i smanjenje broja preskoka su poboljšanje otpora uzemljivača stupova, povećanje razine izolacije nadzemnog voda, primjena odvodnika prenapona na nadzemnom vodu i primjena zaštitnih vodiča [11].

Primjena zaštitnih vodiča uobičajena je za nadzemne visokonaponske vodove i primjenjuje se u fazi projektiranja i izgradnje. Povećanje broja zaštitnih vodiča i uzemljenih vodiča u svrhu smanjenja broja preskoka na izgrađenim nadzemnim vodovima je mjera koju je gotovo nemoguće provesti.

Povećanje razine izolacije nadzemnog voda je mjera koju je teško provesti zbog prostornih ograničenja te propisanih sigurnosnih visina i udaljenosti.

Smanjenje otpora uzemljivača stupova je opravdana mjera u slučajevima kada se može provesti, što ovisi o lokalnim karakteristikama tla. Nadzemni vodovi koji su posebno izloženi djelovanju atmosferskih pražnjenja uobičajeno su locirani na višim nadmorskim visinama te vrlo često na stjenovitom tlu s visokim specifičnim otporom gdje nije moguće utjecati na otpor uzemljivača stupova.

Primjena odvodnika prenapona na nadzemnom vodu (*engl. Line Surge Arrester* - LSA) u svrhu poboljšanja prenaponske zaštite, je sve češća u novije vrijeme s obzirom na njihovu dokazanu učinkovitost. Zbog razvoja tehnologije metal oksidnih (MO) odvodnika prenapona s polimernim kućištem, odvodnici prenapona na nadzemnom vodu ne izazivaju značajnija dodatna mehanička naprezanja konstrukcije stupova. Niska nabavna cijena i

jednostavna ugradnja odvodnika prenapona je od posebne važnosti kada se ugrađuju na već postojeće nadzemne vodove.

U okviru doktorskog rada razvijena je metoda za smanjenje broja ispada nadzemnih visokonaponskih vodova uzrokovanih atmosferskim prenaponima primjenom odvodnika prenapona koja podrazumijeva korištenje statističkih podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja (SLAP), analizu statistike ispada i kvarova nadzemnog voda uzrokovanih atmosferskim prenaponima, analizu prenaponskih karakteristika nadzemnog voda, izbor i ugradnju odgovarajućih odvodnika prenapona te određivanje kriterija za ugradnju odvodnika prenapona u jednu ili više faza pojedinog stupa nadzemnog voda.

Broj odvodnika prenapona koji će se ugraditi na nadzemni vod u svrhu poboljšanja prenaponske zaštite i smanjenja broja kvarova, potrebno je odrediti temeljem tehno-ekonomske analize. Kako bi ugradnja odvodnika bila ekonomski opravdana, troškovi investicije te održavanja odvodnika prenapona ne bi trebali premašiti očekivanu korist zbog smanjenja troškova uzrokovanih ispadom i kvarovima promatranog nadzemnog voda. U slučajevima kada je promatrani nadzemni vod od važnosti za sigurnost opskrbe pojedinog dijela elektroenergetskog sustava, prihvatljivi su viši investicijski troškovi od očekivane financijske koristi.

Parametri odvodnika prenapona odabiru se na način da što učinkovitije ograničavaju atmosferske i sklopne prenapone ispod razine podnosivog napona opreme, a da se pri tome energetski ne preopterete uslijed privremenih prenapona.

Kriteriji koji se uzimaju u obzir pri određivanju razmještaja odvodnika prenapona na nadzemnom vodu, odnosno stupova koji će biti opremljeni odvodnikom prenapona u jednoj ili više faza, su gustoća udara munja i iznos otpora uzemljivača stupa s obzirom na to da se radi o parametrima koji utječu na vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatoru. Pomoću podataka o gustoći udara munja, električnih i geometrijskih parametara nadzemnog voda i podataka o otporu uzemljivača stupa moguće je odrediti razinu ugroženosti pojedinog stupa u odnosu na sve ostale stupove istog nadzemnog voda.

Proračun prenaponske (preskočne) karakteristike nadzemnog voda u ovom radu proveden je programskim alatom Sigma slp, kojim se korištenjem statističke metode Monte Carlo i trodimenzionalnog elektrogeometrijskog modela simulira velik broj atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod [12].

Kriteriji za ugradnju odvodnika prenapona u jednu ili više faza pojedinog stupa nadzemnog voda određuju se prema vjerojatnosti pojave povratnog preskoka za različite kombinacije vrijednosti otpora uzemljivača stupa i amplitude struje atmosferskog pražnjenja. Vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu na stupu određuje se korištenjem programskog alata za simulacije elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP, a ovisi o parametrima struje atmosferskog pražnjenja, geometriji stupa i nadzemnog voda, impedanciji uzemljivača stupa te primijenjenim zaštitnim mjerama, odnosno broju faza na pojedinom stupu u koje su ugrađeni odvodnici prenapona.

Novija istraživanja su pokazala da je impedancija uzemljivača stupa ovisna o frekvenciji, odnosno da se iznos impedancije smanjuje s porastom frekvencije za tla s visokim specifičnim otporom što je izravna posljedica frekvencijske ovisnosti specifičnog otpora i permitivnosti tla [13], [14], [15]. S obzirom na to da frekvencija struje atmosferskih pražnjenja varira u širokom frekvencijskom spektru, od nekoliko Hertza do nekoliko MHz-a, u radu je razvijen frekvencijski ovisni model impedancije uzemljivača stupa kao RLC strujni krug uz poznate izraze za parametre R, L i C za zadanu geometriju uzemljivača stupa i za frekvencijski ovisne parametre specifičnog otpora i permitivnosti zemlje [16]. Vrijednosti amplitude i kuta impulsne impedancije uzemljivača stupa izmjerene impulsnim strujama odgovaraju vrijednostima izračunatim korištenjem frekvencijski ovisnog modela impedancije uzemljivača stupa pri čemu se vrijednosti amplitude impedancije smanjuju s porastom frekvencije.

U radu je pokazano da je uzimajući u obzir utjecaj atmosferskih pražnjenja te učestalost pojave povratnog preskoka na nadzemnom vodu u odnosu na broj atmosferskih pražnjenja registriranih u SLAP-u pri odabiru i određivanju razmještaja odvodnika prenapona, moguće smanjiti broj ispada i povećati pouzdanost pogona nadzemnog voda te je razvijena metoda za odabir i određivanje optimalnog razmještaja odvodnika prenapona na nadzemnim visokonaponskim vodovima.

Doktorski rad se sastoji od osam poglavlja. Nakon uvodnog razmatranja u kojem je iznesena motivacija za doktorsko istraživanje, u drugom poglavlju su opisane karakteristike atmosferskih pražnjenja temeljem dosadašnjih saznanja zabilježenih u literaturi te mogući utjecaji atmosferskih prenapona na rad nadzemnih visokonaponskih vodova. U trećem poglavlju opisane su karakteristike i mogućnosti korištenja podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja i sustava relejne zaštite nadzemnih vodova te način određivanja

izloženosti pojedinog nadzemnog voda utjecajima atmosferskih pražnjenja korelacijom podataka ta dva sustava.

U četvrtom poglavlju opisan je postupak odabira odvodnika prenapona kao i iskustva u primjeni odvodnika prenapona u svrhu smanjenja ispada nadzemnog voda iz pogona zbog utjecaja atmosferskih pražnjenja na primjeru 110 kV nadzemnog voda.

Priprema elemenata modela za provođenje simulacija atmosferskih pražnjenja u stup nadzemnog voda opisana je u petom poglavlju.

U šestom poglavlju opisan je frekvencijski model impedancije uzemljivača stupa razvijen na temelju rezultata mjerenja impulsne impedancije uzemljivača stupa za tla s visokim specifičnim otporom. Na primjeru 110 kV stupa nadzemnog voda pokazan je utjecaj modela impedancije uzemljivača na vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskim lancima. S obzirom na to da je atmosfersko pražnjenje pojava širokog spektra frekvencija, uključujući i one vrlo visoke, pokazano je da se pri atmosferskom pražnjenju impedancija uzemljivača stupa smanjuje te da je vjerojatnost pojave povratnog preskoka manja za frekvencijski ovisan model uzemljivača stupa, nego u slučaju ako se uzemljivač stupa modelira kao konstantni otpor pri niskim frekvencijama.

Metoda za smanjenje broja ispada nadzemnih visokonaponskih vodova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima primjenom odvodnika prenapona opisana je u sedmom poglavlju. Odabir odvodnika prenapona provodi se na temelju rezultata proračuna vjerojatnosti pojave povratnog preskoka, ukupan broj odvodnika prenapona koji će se ugraditi određuje se ili na temelju rezultata tehno-ekonomske analize ili prema zahtijevanoj razini prenaponske zaštite pojedinog nadzemnog voda, dok se razmještaj odvodnika prenapona određuje prema indeksu relativne ugroženosti stupa, kojim je određena razina ugroženosti pojedinog stupa u odnosu na sve ostale stupove istog nadzemnog voda. Opisani postupci provedeni su na primjeru odabrane dionice 110 kV nadzemnog voda.

Zaključna razmatranja doktorskog istraživanja iznesena su u osmom poglavlju.

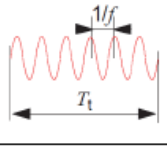
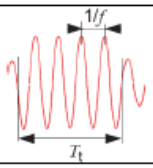
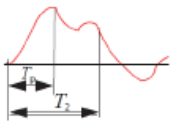
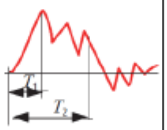
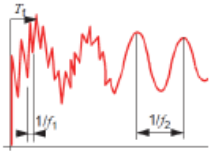
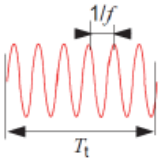
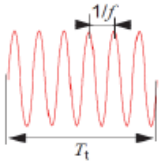
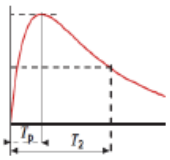
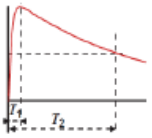
2. Atmosferska pražnjenja

2.1. Atmosferski prenaponi

Osim pogonskog napona u mreži se pojavljuju i prenaponi čije amplitude mogu dostići značajne vrijednosti. Prenapon je svaki napon između faznog vodiča i zemlje ili između dva fazna vodiča, čija je vršna vrijednost veća od odgovarajuće vršne vrijednosti najvišeg napona opreme [17]. Prema normi IEC 60071-1 o usklađivanju izolacije [18] vrste prenapona su (tablica 2.1):

- Trajni napon pogonske frekvencije ima stalnu efektivnu vrijednost i trajno je priključen na stezaljke opreme.
- Privremeni prenapon je prenapon pogonske frekvencije relativno dugog trajanja. Može biti neprigušen ili slabo prigušen. U nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije.
- Prijelazni prenapon je kratkotrajni prenapon trajanja nekoliko milisekundi ili kraći, oscilatoran ili neoscilatoran, obično jako prigušen. Prijelazni prenaponi podijeljeni su na:
  - Prenaponi polaganog porasta čela su prijelazni prenaponi obično jednog polariteta s vremenom trajanja čela od 20 μs $< T_p <$ 5000 μs, i vremenom trajanja hrpta od $T_2 <$20 ms,
  - Prenaponi brzog porasta čela su prijelazni prenaponi obično jednog polariteta s vremenom trajanja čela od 0.1 μs $< T_i <$ 20 μs, i vremenom trajanja hrpta od $T_2 <$ 300 μs,
  - Prenaponi vrlo brzog porasta čela su prijelazni prenaponi obično jednog polariteta s vremenom trajanja čela od $T_f <$ 0.1 μs, ukupnog trajanja $<$ 3 ms te su obično superponirani oscilacijama frekvencija 30 kHz $< f <$ 100 MHz.
- Kombinirani (privremeni, polaganog porasta čela, brzog porasta čela, vrlo brzog porasta čela) prenaponi sastoje se od dviju ili više komponenti istovremeno, a opterećuju izolaciju opreme priključenu između zemlje i faze.

Tablica 2.1: Vrste prenapona [17]

Vrsta napona	Niska frekvencija		Prijelazni		
	Trajni	Privremeni	Polagani (sklopni)	Brzi (atmosferski)	Vrlo brzi
Valni oblik napona					
Karakteristike valnih oblika napona	f=50 Hz ili 60 Hz $T_t \geq 3600$ s	10 Hz$<f<$500 Hz 0,03 s$\leq T_t \leq$3600 s	20 µs$<T_p \leq$5000 µs $T_2 \leq$20 ms	0,1 µs$<T_1 \leq$20 µs $T_2 \leq$ 300 µs	3 ns$<T_f \leq$100 ns 0,3 MHz$<f_1<$100 MHz 30 kHz$<f_2<$300 kHz
Standardni oblici napona	 f=50 Hz ili 60 Hz T_t *	 48 Hz$\leq f \leq$62 Hz T_t = 60 s	 T_p=250 µs T_2=2500 µs	 T_1=1,2 µs T_2=50 µs	*
Standardno ispitivanje podnosivosti	*	Ispitivanje kratkotrajnim naponom industrijske frekvencije	Ispitivanje sklopnim udarnim naponom	Ispitivanje atmosferskim udarnim naponom	*
* Potrebno definirati unutar radnih grupa za VN opremu					

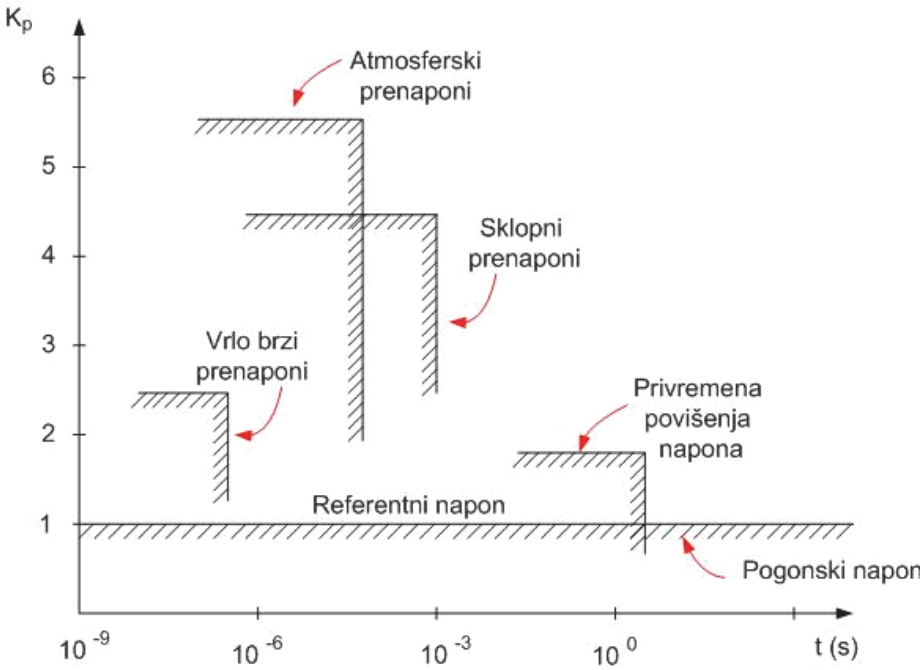
Na slici 2.1 su prikazani prenaponi prema iznosu i dužini trajanja:

- najviši pogonski napon, izražen kao efektivna vrijednost odgovarajuće naponske razine,
- privremena povišenja napona,
- prijelazni prenaponi polaganog porasta čela (sklopni prenaponi),
- prijelazni prenaponi brzog porasta čela (atmosferski prenaponi),
- vrlo brzi prijelazni prenaponi (*engl. very fast transients* - VFT).

Na ordinati je prikazan koeficijent prenapona K_p kao omjer amplitude prenapona i fazne vrijednosti maksimalnog pogonskog napona:

$$K_p = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}\frac{U}{\sqrt{3}}} = 1.125\frac{U_{MAX}}{U} \tag{2.1}$$

gdje je: U_{MAX} amplituda prenapona, a U efektivna vrijednost pogonskog napona (linijski napon).



Slika 2.1: Klasifikacija prenapona prema trajanju i faktoru prenapona [17]

Sklopni, atmosferski i ultra brzi prenaponi imaju prijelazni karakter. Oni dostižu amplitudu poslije kratkog vremena, naklon čega se prigušuju i nestaju. Privremena povišenja napona traju znatno dulje, a njihovo trajanje ima red veličine sekundi ili čak sati.

Prijelazni naponi i struje u izgrađenim objektima i sustavima uzrokovani atmosferskim pražnjenjima nazivaju se atmosferskim prenaponima. Atmosferski prenaponi su prenaponi prijelaznog karaktera i brzog porasta čela koji dostižu amplitudu u kratkom vremenu, nakon čega se prigušuju i nestaju. Do pojave atmosferskih prenapona koji uzrokuju ispade i kvarove na nadzemnim visokonaponskim vodovima može doći u slučaju izravnog udara munje u fazni vodič, udara munje u stup ili zaštitni vodič praćenog povratnim preskokom na fazne vodiče [1]. Preskoci uzrokovani atmosferskim prenaponima najčešći su razlog ispada i kvarova nadzemnih visokonaponskih vodova, a mogu uzrokovati oštećenje opreme u postrojenjima elektroenergetskog sustava te ugroziti sigurnost opskrbe krajnjih kupaca električne energije. Utjecaj atmosferskih pražnjenja na rad nadzemnih vodova posebno je izražen u područjima za koje je karakteristična velika gustoća udara munja u tlo i visok specifični otpor tla.

Koordinacija izolacije predstavlja izbor izolacijskih svojstava opreme obzirom na napone koji se mogu pojaviti na mjestu ugradnje, uzimajući u obzir atmosferske uvjete i karakteristike prenaponske zaštite. Prenaponska zaštita za ograničavanje utjecaja atmosferskih prenapona može se ostvariti na jedan od sljedećih načina ili u kombinaciji:

– primjenom zaštitnih vodiča,

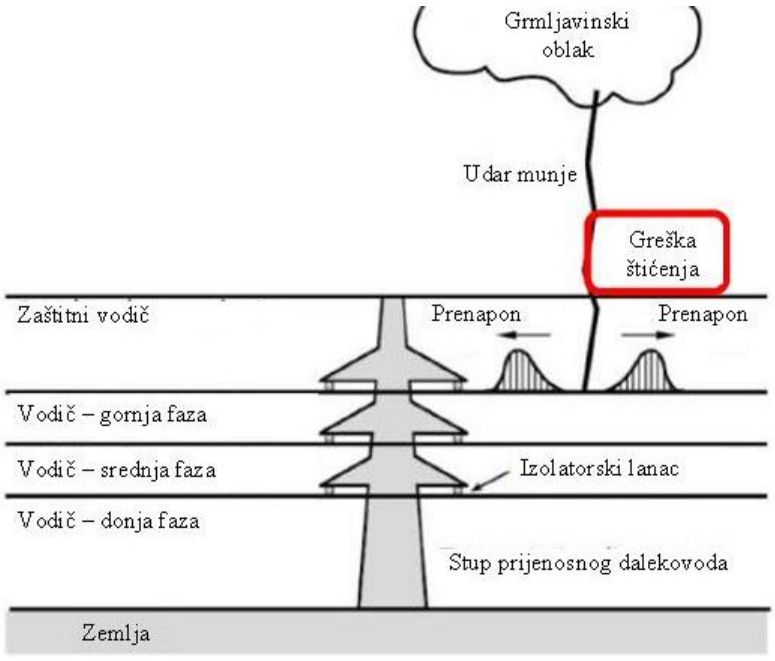
- smanjenjem otpora uzemljivača stupova nadzemnih vodova,
- povećanjem razine izolacije,
- ugradnjom odvodnika prenapona.

Atmosferski prenaponi prema načinu nastanka mogu biti kako slijedi [19]:

- prenaponi uslijed izravnog udara munje u fazni vodič,
- prenaponi uslijed udara munje u stup ili zaštitni vodič,
- prenaponi uslijed udara munje u objekt u blizini,
- prenaponi uslijed porasta potencijala uzemljenja.

2.1.1. Prenaponi uslijed izravnog udara munje u fazni vodič

Zaštitni vodič djeluje kao zaštita od atmosferskih pražnjenja na način da sprječava izravne udare munja u fazne vodiče. Prema elektro-geometrijskom modelu udara munje, samo atmosferska pražnjenja struja manjih amplituda mogu pogoditi izravno fazne vodiče u slučaju ako je nadzemni vod opremljen zaštitinim vodičem. S obzirom na to da udar munje pogađa fazni umjesto zaštitni vodič, ovakav kvar se naziva još i greškom štićenja (slika 2.2).

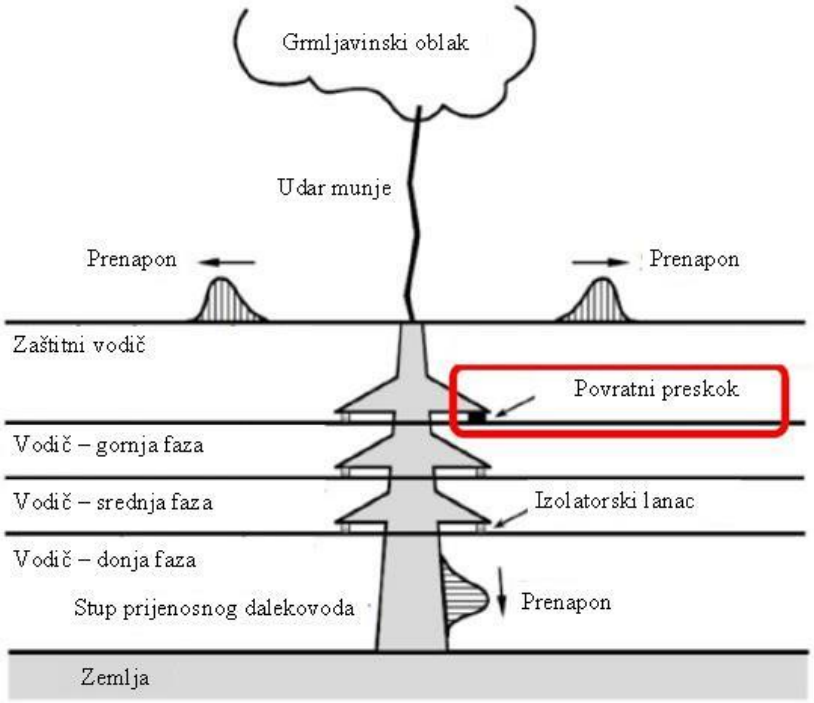


Slika 2.2: Prenapon uslijed greške štićenja

2.1.2. Prenaponi uslijed udara munje u stup ili zaštitni vodič

Najveći dio atmosferskih pražnjenja, i većih i manjih amplituda struje, pogađa zaštitni vodič ili vrh stupa. Udarom munje u vrh stupa, ili zaštitni vodič u rasponu, struja

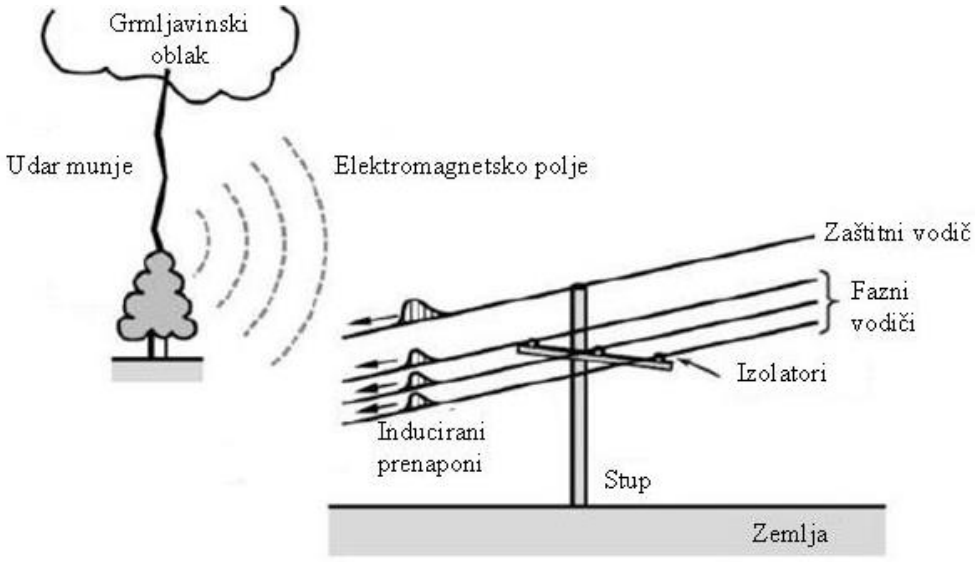
atmosferskog pražnjenja teče kroz stup i zaštitni vodič u oba smjera, kao što je prikazano na slici 2.3., te dolazi do prijelaznog porasta napona pogođenog stupa, ili prvih susjednih stupova ako je riječ o udaru u raspon. Između stupa (konzole kod ovjesišta izolatora) i faznih vodiča dolazi do porasta potencijala stupa koji je uobičajeno na potencijalu zemlje. Ako je rezultanti prenapon na stupu veći od preskočnog napona izolatorskog lanca, dolazi do preskoka koji uzrokuje zemljospojni kvar. Ova pojava se još naziva i povratni preskok, a ovisi o mnogo čimbenika kao što su amplituda i strmina struje atmosferskog pražnjenja, otpor uzemljenja pogođenog stupa, preskočni razmak izolatorskog lanca, atmosferski uvjeti koji utječu na preskočni napon izolatorskog lanca, vrijednost faznog napona u trenutku udara, te mjestu pražnjenja (vrh stupa ili raspon).



Slika 2.3: Prenapon uslijed udara munje u stup ili zaštitni vodič

2.1.3. Prenaponi uslijed udara munje u objekt u blizini

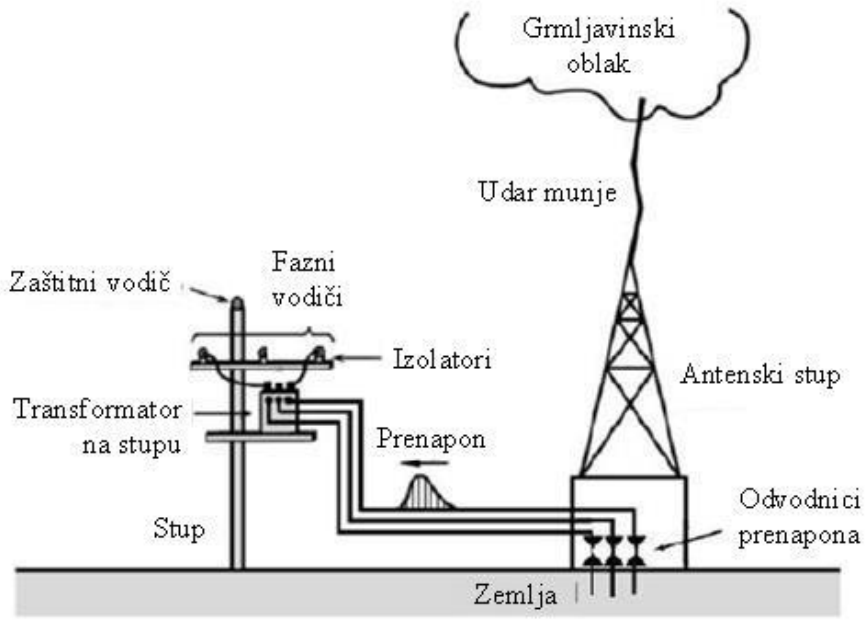
U slučaju udara munje u drvo ili neki drugi povišeni objekt u blizini distribucijskog nadzemnog voda, dolazi do stvaranja prijelaznih elektromagnetskih valova koji induciraju prenapone u vodičima nadzemnog voda kao što je prikazano na slici 2.4.



Slika 2.4: Prenaponi uslijed udara munje u objekt u blizini

2.1.4. Prenaponi uslijed porasta potencijala uzemljivača

U slučaju udara munje u metalnu konstrukciju u blizini distribucijskog nadzemnog voda, kao što je telekomunikacijski ili antenski toranj, u uvjetima lošeg odvođenja zbog visokog specifičnog otpora tla ili loše izvedenog sustava uzemljenja dolazi do porasta potencijala na uzemljenju konstrukcije što može rezultirati prenaponima koji ulaze u nadzemni vod kroz sustav uzemljenja.



Slika 2.5: Prenaponi uslijed porasta potencijala uzemljenja

2.2. Vrste atmosferskih pražnjenja

Atmosferska pražnjenja jedan su od najčešćih geofizičkih fenomena u prirodi. Zahvaljujući brojnim istraživanjima razumijevanje problematike atmosferskih pražnjenja znatno je napredovalo u novije vrijeme, ali zbog njihove slučajne prirode i složenog mehanizma pražnjenja još uvijek postoje područja koja je potrebno dodatno istražiti. Atmosfersko pražnjenje se može definirati kao prolazno električno pražnjenje u zraku s duljinom električnog luka koja se mjeri u kilometrima popraćeno visokom strujom čija vršna vrijednosti može iznositi od nekoliko kiloampera do nekoliko desetaka ili stotina kiloampera.

Atmosfersko pražnjenje često se opisuje pojmovima munja ili grom, a može biti između oblaka i zemlje (OZ) i između oblaka (OO). Iako atmosferska pražnjenja između oblaka i zemlje čine samo 10 % svih pražnjenja, za proračune zaštite objekata i sustava od atmosferskih prenapona od interesa su primarno takva pražnjenja. Pražnjenja između oblaka i zemlje prema polaritetu naboja u oblaku iz kojega je inicirano atmosfersko pražnjenje i smjeru stepenastog predvodnika dijele se na četiri vrste:

- negativno silazno atmosfersko pražnjenje,
- negativno uzlazno atmosfersko pražnjenje,
- pozitivno silazno atmosfersko pražnjenje,
- pozitivno uzlazno atmosfersko pražnjenje.

Približno 90% svih atmosferskih pražnjenja između oblaka i zemlje su negativna silazna atmosferska pražnjenja, dok su preostala, približno 10 %, pozitivna silazna atmosferska pražnjenja. Smatra se da se uzlazna atmosferska pražnjenja, bilo negativna ili pozitivna, događaju samo na objektima višim od 100 m ili nižim objektima koji su locirani na višim nadmorskim visinama, kao što su stupovi nadzemnih vodova ili tornjevi postavljeni na vrhovima planina [19].

Većina atmosferskih pražnjenja je višestruka, odnosno sastoji se od niza uzastopnih pražnjenja koja slijede u kratkim vremenskim razmacima pri čemu se razlikuje prvi udar od uzastopnih udara [17].

U grmljavinskom oblaku veće čestice su obično negativne, dok su manje pozitivne. Zbog toga je donji dio oblaka uglavnom negativno, a gornji dio pozitivno nabijen. Gledano u cijelosti oblak je neutralan. Također može postojati više mjesta unutar oblaka koja sadrže naboj. Tipično negativna središta naboja mogu biti bilo gdje između 500 i 10 000 metara

iznad zemlje. Izbijanja prema zemlji uglavnom počinju na rubovima negativnih središta naboja.

Pri negativnom silaznom atmosferskom pražnjenju udar započinje u području središta negativnog naboja kada vrijednost polja poprima vrijednost polja potrebnog za ionizaciju (≅ 30 kV/cm u zraku, ≅ 10 kV/cm ako su prisutne kapljice vode).

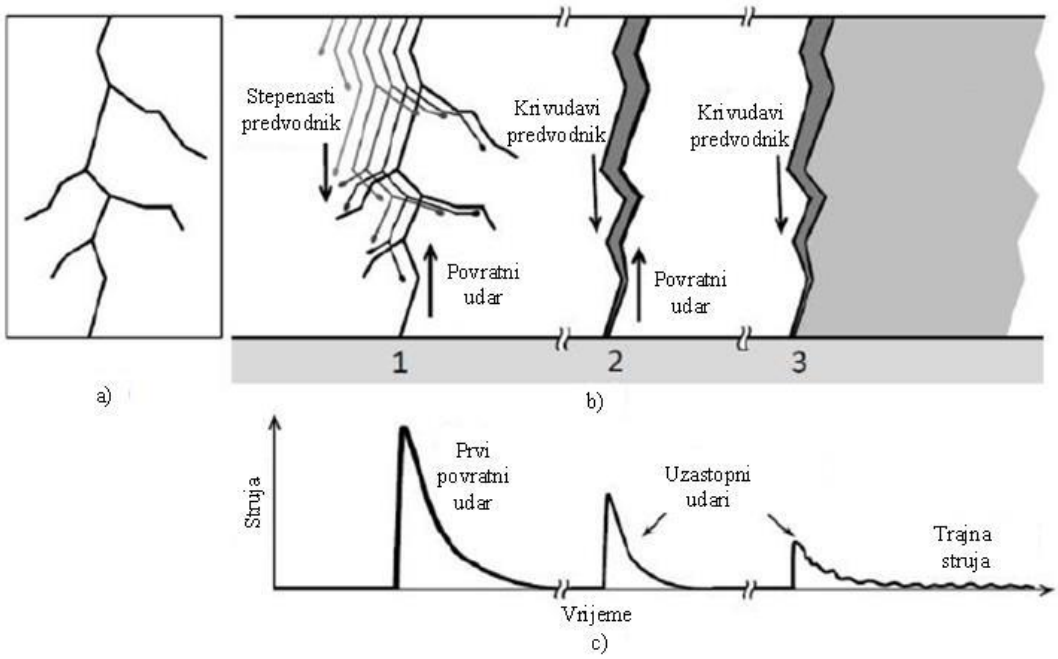
U prvoj fazi stepenasti predvodnik naboja se brzo pomiče prema zemlji u koracima od 50 do 100 metara, i miruje nakon svakog koraka nekoliko desetinki mikrosekundi. Ovisno o tipu izbijanja, predvodnici izbijanja tzv. grane niskog sjaja i struja od nekoliko ampera se širi u još neprobijeni i malo ionizirani zrak brzinom od 1 x 10^5 metara u sekundi. Stepenasti predvodnik brzine od 5 x 10^5 metara u sekundi i struje od nekoliko stotina ampera stvara vodljivi kanal u ioniziranom zraku između središta negativnog naboja u oblaku i zemlje. Vodljivom kanalu treba 60 milisekundi da prijeđe put do zemlje od oblaka udaljenog 3 kilometra. Kako se glava groma primiče zemlji, razlika potencijala inducira naboj na površini zemlje [17].

Naboj se povećava izbijanjima s objekata na zemlji kao npr. visokih zgrada, drveća, itd. Nakon nekog vremena je koncentracija naboja na nekom objektu na zemlji dovoljno velika da prouzroči povratni udar koji po uspostavljenom vodljivom kanalu putuje uzlazno od zemlje prema oblaku. U trenutku kada se ta dva predvodnika spoje, počinje glavno pražnjenje.

Povratni udar je praćen s nekoliko uzastopnih udara u vremenskom intervalu od 10 do 300 milisekundi. Uzastopna pražnjenja od zemlje prema oblaku putuju mnogo brže (~50 x 10^6 m/s) po već prije uspostavljenom ioniziranom kanalu. Struje povratnog udara iznose od nekoliko do 250 kiloampera i temperature unutar kanala iznose od 15,000 do 20,000 stupnjeva Celzija te su uzrok razarajućih učinaka groma, svjetlosti i eksplozivne ekspanzije zraka koja se manifestira kao zvuk. Povratni udari zapravo imaju destruktivne učinke koje se uobičajeno pripisuju munjama.

Predvodnik drugog i ostalih uzastopnih udara zbog svoje krivudave putanje se naziva krivudavi predvodnik. Krivudavi predvodnik ima putanju po vodljivom kanalu prvog udara, ali s 10 puta većom brzinom. Njegova putanja najčešće nije razgranata i vrlo je svijetla.

Brzine povratnih udara su uobičajeno u rasponu od 1/3 do 1/2 brzine svjetlosti. Srednja vrijednost amplitude struje povratnog udara za prvi udar je 2 do 3 puta viša od one za uzastopne udare, ali je strmina struje uzastopnih povratnih udara 3 do 4 puta viša [19].



Slika 2.6:Negativno silazno atmosfersko pražnjenje oblak-zemlja [19]

Na slici 2.6 je prikaz a) opažanja negativnog silaznog atmosferskog pražnjenja oblak-zemlja koje se sastoji od tri uzastopna udara, b) faza razvoja atmosferskog pražnjenja i c) odgovarajućih struja udara munje.

Iako broj pozitivnih atmosferskih pražnjenja iznosi samo oko 10% svih pražnjenja između oblaka i zemlje, u posljednje vrijeme im se pridaje sve veća pozornost. Pozitivna atmosferska pražnjenja imaju više amplitude struje i pri njima se oslobađaju veće količine energije te stoga mogu prouzročiti ozbiljnija oštećenja na različitim objektima i sustavima od negativnih atmosferskih pražnjenja.

Prema izvještajima o mjerenjima parametara struja za pozitivna i negativna atmosferska pražnjenja, 5% vrijednosti vršnih struja za pozitivna pražnjenja iznosi značajno više nego za prvi negativni povratni udar, odnosno iznose 250 kA prema 80 kA, dok se srednja vrijednost vršne struje za pozitivna pražnjenja ne razlikuje značajno u odnosu na prvi negativni povratni udar, odnosno iznose 35 kA prema 30 kA. Srednja vrijednost iznosa prenesenog naboja za pozitivna pražnjenja je za red veličine veća od negativnog pražnjenja [20].

Uz negativna i pozitivna atmosferskih pražnjenja, istraživanja su potvrdila pojavu bipolarnih udara munja [21]. Bipolarne munje višestruki su udari munja koji se sastoje od više atmosferskih pražnjenja oba polariteta. Prilikom uspostave vodljivog kanala između oblaka i zemlje dolazi do pražnjenja grupa naboja u oblaku. Iako su munje većinom unipolarne, u

nekim slučajevima dogodi se da se po istom vodljivom kanalu isprazni više skupina naboja različitih polariteta nakupljenih u oblaku.

2.3. Energija atmosferskog pražnjenja

Uz pretpostavljenu razliku potencijala od 10 MV za proboj između oblaka i zemlje i ukupni naboj od 20 C, energija tipičnog atmosferskog pražnjenja iznosi 100 MWs ili otprilike 27,8 kWh u jednom ili više udara koji čine pražnjenje. Oslobođena energija u zračnom kanalu se troši na nekoliko procesa. Male količine energije se troše na ionizaciju molekula, pobuđivanje molekula, radijaciju, itd. Najveći dio energije se troši na naglo širenje zračnog kanala, a dio uzrokuje zagrijavanje pogođenih objekata na zemlji. Energija oslobođena tijekom atmosferskog pražnjenja odgovara onoj potrošenoj za stvaranje naboja unutar oblaka [17].

2.4. Parametri struje atmosferskog pražnjenja

Struja atmosferskog pražnjenja je osnovni uzrok svih mehaničkih oštećenja, poremećaja u radu i kvarova [22]. Kako bi se elektroenergetski sustav odgovarajuće zaštitio od utjecaja atmosferskih pražnjenja, potrebno je poznavati valni oblik struje atmosferskog pražnjenja. Prema normi IEC 62305-1 [23] parametri kojima je određeno atmosfersko pražnjenje su kako slijedi:

- vršna vrijednost struje atmosferskog pražnjenja i_{max},
- maksimalna strmina struje $(di/dt)_{max}$,
- preneseni naboj

$$Q = \int i \cdot dt, \tag{2.2}$$

- specifična energija

$$W/R = \int i^2 \cdot dt. \tag{2.3}$$

U izrazima (2.2) i (2.3) i je struja atmosferskog pražnjenja, a t je vrijeme.

Vršna vrijednost amplitude struje određuje maksimalni pad napona na impedanciji uzemljenja uzrokovan prolaskom struje atmosferskog pražnjenja kroz uzemljenje. Vršna

struja određuje i maksimalnu silu između metalnih vodiča u slučajevima kada struja atmosferskog pražnjenja prolazi kroz dva ili više krugova.

Maksimalna strmina struje $(di/dt)_{max}$ određuje maksimalne inducirane napone u otvorenim petljama. Stoga se prema maksimalnoj strmini struje određuje potreban razmak između donjeg faznog vodiča i električnih instalacija unutar građevine koja se štiti.

Preneseni naboj Q je usko povezan s efektom taljenja na mjestima udara atmosferskog pražnjenja. Preneseni naboj je također uzrok taljenja i zagrijavanja uređaja za zaštitu od prenapona.

Specifična energija W/R uzrokuje zagrijavanje metalnih vodiča kada struja atmosferskog pražnjenja prolazi kroz njih. Također, specifična energija uzrokuje mehanički stres kada struja atmosferskog pražnjenja ili jedan njezin dio prolazi kroz metalne vodiče.

Točnost parametara atmosferskih pražnjenja od ključne je važnosti pri projektiranju prenaponske zaštite, a na njih mogu utjecati lokalni uvjeti i uvjeti iz okoline kao što su geografski položaj i temperatura [24].

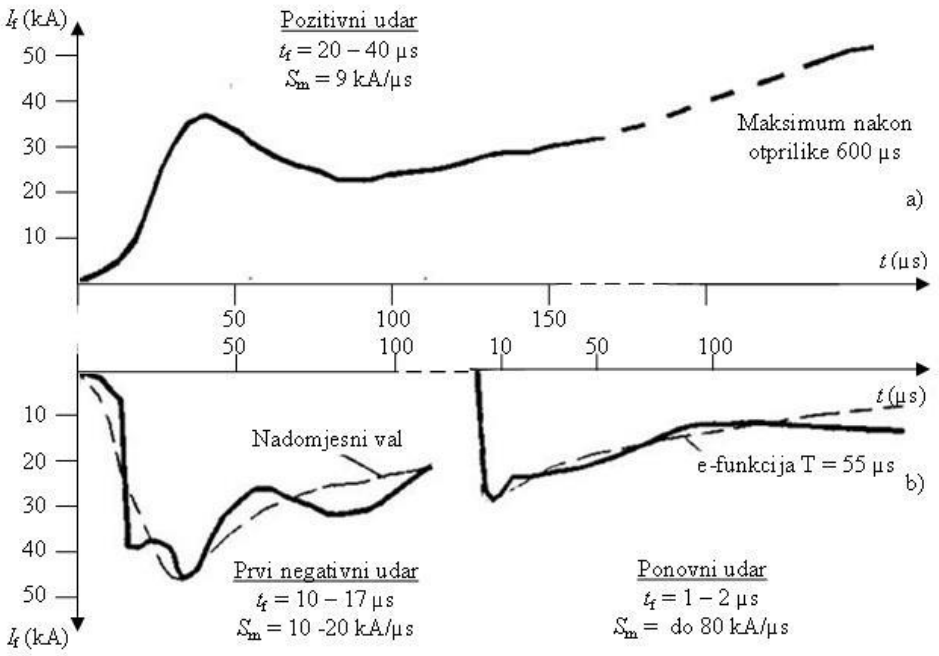
Većina današnjih standarda za zaštitu od atmosferskih pražnjenja usvojila je raspodjele parametara atmosferskih pražnjenja koje se temelje na rezultatima mjerenja struja atmosferskih pražnjenja na tornjevima opremljenima mjernom opremom [23], [25], [26], [27], [28], [29]. Također, procjena vršnih struja atmosferskih pražnjenja izvodi se iz mjerenja električnih i magnetskih polja. Struje se mjere i za izazvana atmosferska pražnjenja koja su slična uzastopnim udarima pri prirodnim atmosferskim pražnjenjima.

2.4.1. Valni oblik atmosferskog pražnjenja

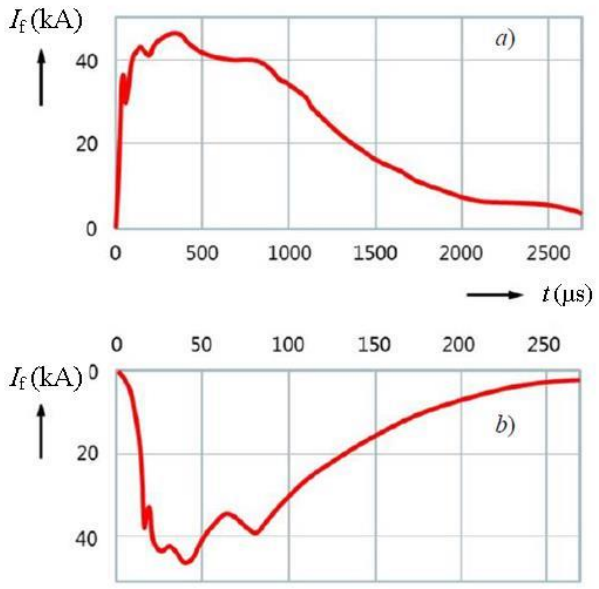
Valni oblik struje atmosferskog pražnjenja određuju vršna vrijednost, vrijeme trajanja čela, vrijeme trajanja hrpta i trajanje. Vrijeme trajanja čela, vrijeme trajanja hrpta i trajanje moguće je odrediti samo iz mjerenja, odnosno ako je snimljen valni oblik struje. Za potrebe provođenja simulacija prenaponskih karakteristika nadzemnih vodova, ovi parametri se određuju prema preporukama CIGRÉ [25], [26], IEEE [27], [28] i IEC [23], [29]. Parametri valnog oblika struje atmosferskog pražnjenja ponašaju se prema log-normalnoj raspodjeli. Parametri raspodjela dani su za negativne i pozitivne, te za prve i uzastopne udare u [26] i [27], a određeni su na temelju izmjerenih podataka objavljenih u literaturi [20] i [30].

Na osnovu mjerenja Berger je dao oscilograme tipičnih struja atmosferskog pražnjenja [20] prikazane na slikama 2.7 i 2.8. Najčešća su pražnjenja negativnog polariteta. Njihov prvi udar dostiže maksimum u vremenu između 10 i 20 μs (slike 2.7 b i 2.8 b). Najčešće strmine struje pri tome su između 10 i 20 kA/μs. Nakon prvog negativnog udara može u vremenu između 10 i 100 ms uslijediti ponovni udar. Ponovni udar je obično većih strmina, a maksimum se postiže nakon 1-2 μs. Najčešće strmine dostižu vrijednost od 80 kA/μs (slika 2.7 b).

Pražnjenja pozitivnog polariteta su rijetka. Struje pozitivnog polariteta imaju trajanje čela 20 do 40 μs, a strmine su im oko 9 kA/μs (slike 2.7 a i 2.8 a).

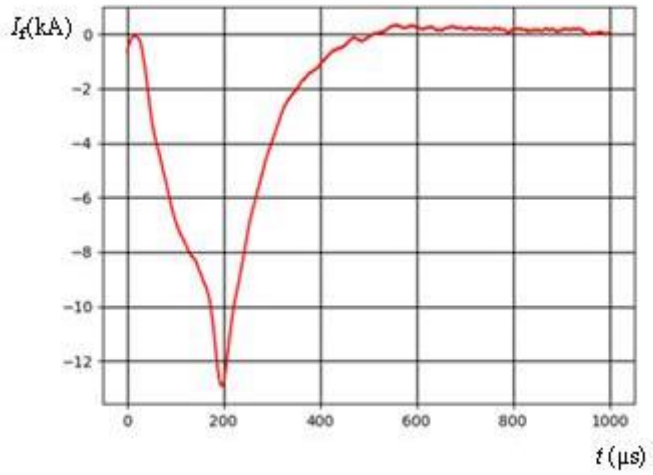


Slika 2.7: Oscilogram tipičnih struja groma [20]



Slika 2.8: Oscilogram struja a) prvog pozitivnog i b) prvog negativnog povratnog udara [22]

Na slici 2.9 prikazan je valni oblik struje atmosferskog pražnjenja izmjeren u ožujku 2016. godine [31] sustavom za praćenje atmosferskih pražnjenja na telekomunikacijskom tornju na planini Lovćen u Crnoj Gori [32].



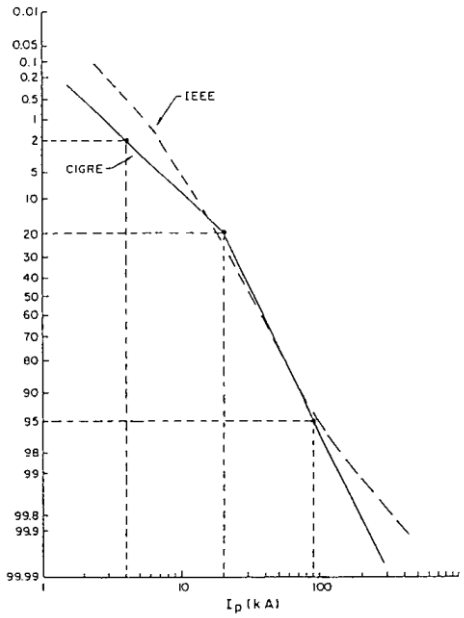
Slika 2.9: Izmjereni valni oblik struje negativnog silaznog udara munje

Vjerojatnost učestalosti amplituda struja groma statistički su procijenjene na osnovi velikog broja mjerenja na različitim lokacijama u svijetu i mogu se naći u literaturi [20], [21], [26], [28], [30], [33]. Prihvaćen je i najčešće se koristi pojednostavljeni izraz za log - normalnu raspodjelu koju je predložio Anderson i koju je prihvatio IEEE [26]:

$$P(I_f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_f}{31}\right)^{2,6}} \tag{2.4}$$

gdje je P vjerojatnost pojave amplitude struje munje veće ili jednake od I_f, a I_f amplituda struje munje.

Ova raspodjela slijedi trend CIGRE raspodjele, koja predstavlja aproksimaciju izmjerene raspodjele pojave amplitude struje atmosferskog pražnjenja negativnog polariteta kako je prikazano na slici 2.10.



Slika 2.10: Vjerojatnost pojave struje atmosferskog pražnjenja negativnog polariteta [26]

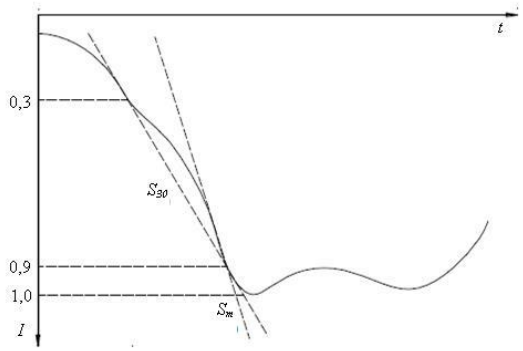
Podaci dobiveni temeljem mjerenja sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja upućuju da je veći broj pojava atmosferskih pražnjenja malih amplituda te novija istraživanja predlažu izraze koji su fizikalno prihvatljiviji od log - normalne aproksimacija raspodjele vršne struje [33].

2.4.2. Strmina struje atmosferskog pražnjenja

Odnos između strmine S i amplitude struje munje I zadan je općom jednadžbom:

$$S = \alpha \cdot I^{\beta} \tag{2.5}$$

gdje su α i β koeficijenti za prve i uzastopne udare te su dani u tablici 2.2 za strmine definirane na slici 2.11 kao S_{30} i S_m [26], [27]. Prvi udar ima obično veću amplitudu i manju strminu struje od uzastopnog udara.



Slika 2.11: Izgled čela struje munje i strmine vala

Tablica 2.2: Iznosi koeficijenata α i β u ovisnosti o vrsti i tipu strmine struje groma

	Strmina	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\beta}$
Prvi udar	S_{30}	3,2	0,25
	S_m	3,9	0,55
Uzastopni udar	S_{30}	6,9	0,42
	S_m	3,8	0,93

2.5. Višestrukost atmosferskih pražnjenja

Višestrukost je pojam kojim se određuje broj pojedinih atmosferskih pražnjenja u jednom višestrukom udaru munje. Velika većina atmosferskih pražnjenja, približno 80%, sastoji se od više od jednog pražnjenja. Prema [26] višestruki udari munje u manje od 5% slučajeva sadrže više od 10 atmosferskih pražnjenja, a u prosjeku sadrže 3 pražnjenja. Prema [21] svako se atmosfersko pražnjenje sastoji od 3 do 5 pražnjenja, a najveći zabilježeni broj pražnjenja u jednom višestrukom udaru munje je 26. Vremenski interval između uzastopnih povratnih udara najčešće iznosi nekoliko desetaka milisekundi, iako može iznositi od jedne milisekunde do nekoliko stotina milisekundi. Više od 80% pozitivnih atmosferskih pražnjenja su jednostruka [26].

Na temelju zapisa 6000 munja iz raznih dijelova svijeta, razdioba broja atmosferskih pražnjenja po munjama za negativna silazna pražnjenja predstavljena je u tablici 2.3 [34].

Tablica 2.3: Broj pražnjenja u munji za negativne silazne udare

Pražnjenja / munja	Vjerojatnost	Kumulativna vjerojatnost
1	0,45	1,00
2	0,14	0,55
3	0,09	0,41
4	0,08	0,32
5	0,07	0,24
6	0,04	0,17
7	0,03	0,13
8	0,02	0,10
9	0,02	0,08
≥10	0,06	0,06

Svojstvo višestrukosti atmosferskog pražnjenja može se odrediti pomoću faktora višestrukosti udara munja (*engl. flash multiplicity factor* – FMF), koji predstavlja omjer broja pojedinačnih atmosferskih pražnjenja, odnosno ukupnog broja pojedinačnih udara munja, u odnosu na broj višestrukih udara munja. Faktor višestrukosti predstavlja srednji broj pojedinačnih atmosferskih pražnjenja za pripadajući broj višestrukih udara munja [35].

Sustavi za lociranje atmosferskih pražnjenja uobičajeno registriraju svako pojedinačno atmosfersko pražnjenje te ih grupiraju u višestruke udare munja na temelju vremenskih i prostornih kriterija te maksimalnog broja pojedinačnih atmosferskih pražnjenja unutar jednog višestrukog udara munje [21].

2.6. Gustoća atmosferskih pražnjenja

Gustoća atmosferskih pražnjenja predstavlja ugroženost neke lokacije od atmosferskih pražnjenja i računa se kao broj pražnjenja po jedinici površine tijekom razdoblja od jedne godine. Gustoću atmosferskih pražnjenja najpouzdanije je moguće odrediti korištenjem brojača atmosferskih pražnjenja, a u novije vrijeme gustoća atmosferskih pražnjenja se određuje korištenjem podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja.

U nedostatku mjerenih vrijednosti, srednja gustoća udara munja uz rasipanje 95% može se procijeniti empirijskom relacijom koja je predložena nakon statističke obrade velikog broja podataka dobivenih nizom mjerenja na raznim lokacijama u svijetu [17]:

$$N_g = 0{,}04 \cdot T_d^{1{,}35} \text{ [km}^{-2} \text{ god}^{-1}\text{]} \tag{2.6}$$

pri čemu je T_d prosječni broj grmljavinskih dana u godini, odnosno keraunička razina, za promatrano područje. Keraunička razina se određuje iz iskustvenih izokerauničkih karata s prosječnim brojem grmljavinskih dana u godini zabilježenim kroz duži period i na širem području u kojem je registriran zvuk grmljavine. U novije vrijeme podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja omogućavaju preciznije određivanje broja grmljavinskih dana i gustoće udara munja. Podatak o prosječnom broju grmljavinskih dana u godini mijenja se ovisno o lokaciji, a posebno o nadmorskoj visini.

Na osnovu gustoće udara munja moguće je procijeniti učestalost udara munje u elemente elektroenergetskog sustava. Pri proračunu izloženosti objekata atmosferskim pražnjenjima uobičajeno se koriste podaci o gustoći udara munja, pri čemu je važno razlikovati gustoću atmosferskih pražnjenja, odnosno pojedinačnih atmosferskih pražnjenja (*engl. lightning stroke density*) od gustoće udara munja, odnosno atmosferskih pražnjenja grupiranih u (višestruke) udare munja (*engl. flash density*).

2.7. Broj atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod

Broj atmosferskih pražnjenja N_L po kilometru nadzemnog voda u jednoj godini [km^{1} god^{-1}] računa se iz empirijske relacije predložene od strane radne grupe IEEE:

$$N_L = N_g \cdot \left(w + 4 \cdot h_z^{1{,}09}\right) \cdot 10^{-3} \tag{2.7}$$

pri čemu je w prosječni razmak između zaštitnih vodiča u metrima [m], a h_z prosječna visina zaštitnog vodiča iznad tla u metrima [m], koja se dobije kao razlika prosječne visine stupa te i 2/3 provjesa vodiča:

$$h_z = H_z - \frac{2}{3} \cdot p \tag{2.8}$$

gdje je H_z prosječna visina stupa, a p provjes vodiča.

Prema gornjem izrazu broj atmosferskih pražnjenja u pojedini nadzemni ovisi o prosječnoj visini vodiča iznad zemlje h_z i o srednjoj gustoći udara munja.

2.8. Elektro-geometrijski model nadzemnog voda

Struje atmosferskih pražnjenja najvećih amplituda u pravilu pogađaju zaštitni vodič nadzemnog voda koji štiti fazne vodiče. Kritična struja je maksimalna amplituda struje munje koja može izravno pogoditi fazni vodič, a ovisi o geometrijskim dimenzijama stupa nadzemnog voda te se računa za vodič gornje faze za različite visine stupa dalekovoda (od temelja do donje konzole) prema elektro-geometrijskom modelu [17].

Atmosfersko pražnjenje se razvija kroz nekoliko faza pri čemu se prema zemlji širi stohastički i skokovito. Udaljenost R na kojoj nastaje proboj između kanala atmosferskog pražnjenja i bilo koje najbliže točke na objektu na zemlji predstavlja probojnu udaljenost. Istraživanja su pokazala da probojna udaljenost ovisi, između ostalog, izravno o amplitudi struje munje, te se može odrediti iz izraza:

$$R = a \cdot I^b \tag{2.9}$$

gdje je R probojna udaljenost u metrima [m], I amplituda struje atmosferskog pražnjenja u kiloamperima [kA], a empirijski utvrđena konstanta [3,3; 10,6] te b empirijski utvrđena konstanta [0,5; 0,85].

Od strane IEEE prihvaćena je relacija:

$$R = 8 \cdot I^{0,65}. \tag{2.10}$$

Izraz (2.9) povezuje električnu i geometrijsku veličinu gdje probojna udaljenost geometrijska veličina u funkciji električne, što predstavlja osnovu za elektro-geometrijski model udara munje u trasu nadzemnog voda.

Zaštićeno područje je prostor u kojem ne može doći do izravnog udara uslijed određene amplitude struje atmosferskog pražnjenja I. Probojna udaljenost koristi se za konstrukciju krivulje zaštićenog prostora. Probojna udaljenost je statistička veličina i izraz (2.10) predstavlja njegovu srednju vrijednost. Kako bi se izbjegli udari u štićeni objekt za struju I kojoj odgovara probojna udaljenost manja od R, gromobransku zaštitu treba dimenzionirati za vrijednost probojne udaljenosti za 2σ manja od srednje vrijednosti, gdje je σ standardna devijacija. Za $\sigma = 5\%$ slijedi:

$$R = 7{,}2 \cdot I^{0{,}65}. \tag{2.11}$$

Iz izraza (2.11) slijedi da zaštitni vodič učinkovito štiti fazne vodiče nadzemnog voda od atmosferskih pražnjenja čije su amplitude struje veće ili jednake od kritične struje I_K:

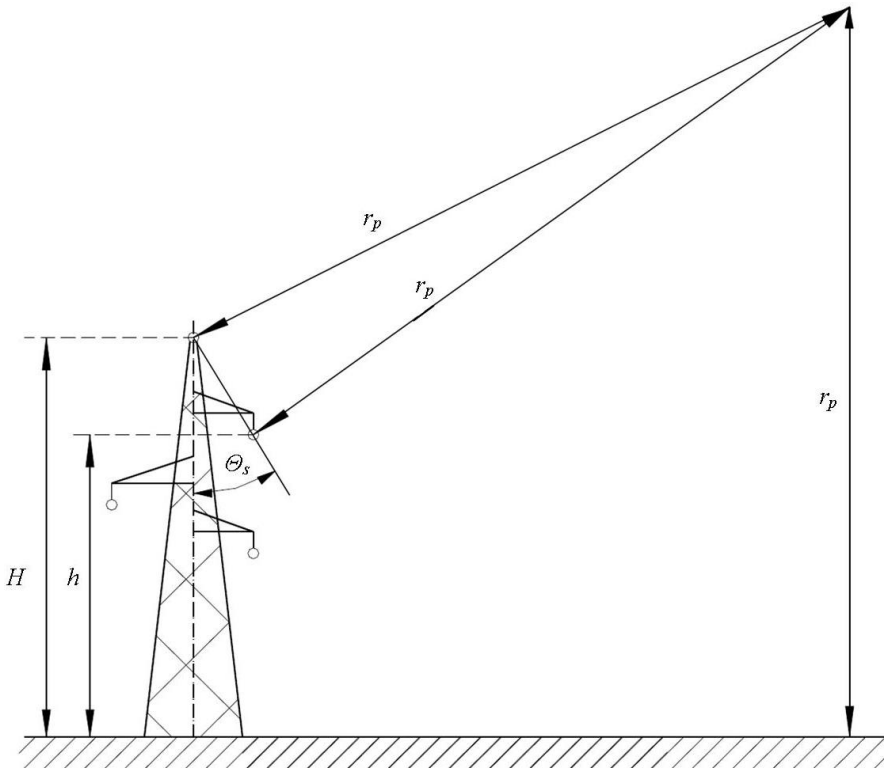
$$I_K = \sqrt[0{,}65]{\frac{R}{7{,}2}} \tag{2.12}$$

gdje je I_K iznos kritične amplitude struje atmosferskog pražnjenja u kiloamperima, a R probojna udaljenost u metrima.

Probojna udaljenost je geometrijska veličina i može se izraziti kao funkcija dimenzija glave stupa:

$$R \cong \frac{H + h}{2 \cdot (1 - \sin\theta_s)} \tag{2.13}$$

za $(H - h < \frac{R}{2})$ gdje su dimenzije stupa označene na slici 2.12 kako slijedi: H visina stupa, h visina faznog vodiča, θ_s kut štićenja, odnosno kut između osi stupa i pravca koji spaja vrh stupa i fazni vodič.



Slika 2.12: Određivanje probojne udaljenosti

3. Izloženost nadzemnih vodova atmosferskim pražnjenjima

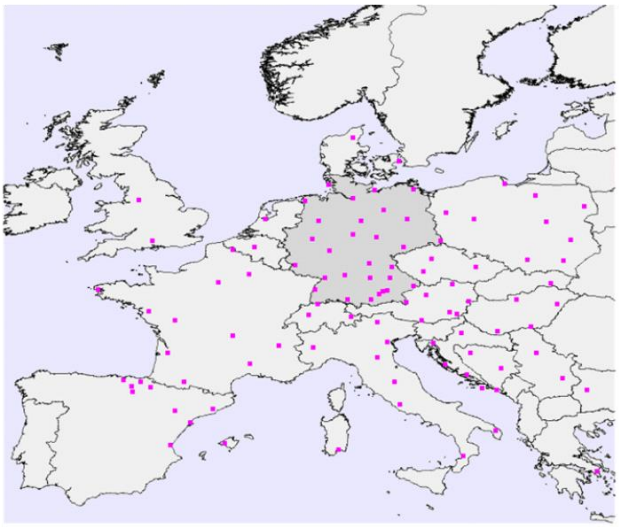
3.1. Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja

Sustavi za praćenje i lociranje atmosferskih pražnjenja u stvarnom vremenu u svijetu se koriste već više desetaka godina kao sredstvo i pomoć pri vođenju elektroenergetskih sustava [36], [37]. Primjena sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja u prijenosnim i distribucijskim mrežama i sustavima moguća je u sljedećim područjima:

- korelacija ispada i kvarova u mrežama s atmosferskim pražnjenjima,
- projektiranje, održavanje i nadzor elektroenergetskih sustava,
- sustavi upozorenja o pojavi i nailasku grmljavinskih nevremena,
- projektiranje trasa nadzemnih vodova i primjena mjera zaštite od prenapona uzrokovanih grmljavinskim aktivnostima.

Europski sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja LINET razvijen je na Sveučilištu u Münchenu u Njemačkoj. Nakon što su u razdoblju od 2003. do 2005. godine provedene usporedbe rezultata s tada postojećim komercijalnim sustavom za detekciju udara munja u Njemačkoj, sustav LINET je započeo s radom 2006. godine pokrivajući područje Njemačke i susjednih zemalja [38], [39].

Početkom 2011. godine mreža LINET senzora proširena je diljem Europe s više od 125 senzora čime je ostvarena pokrivenost velikog dijela Europe (slika 3.1).

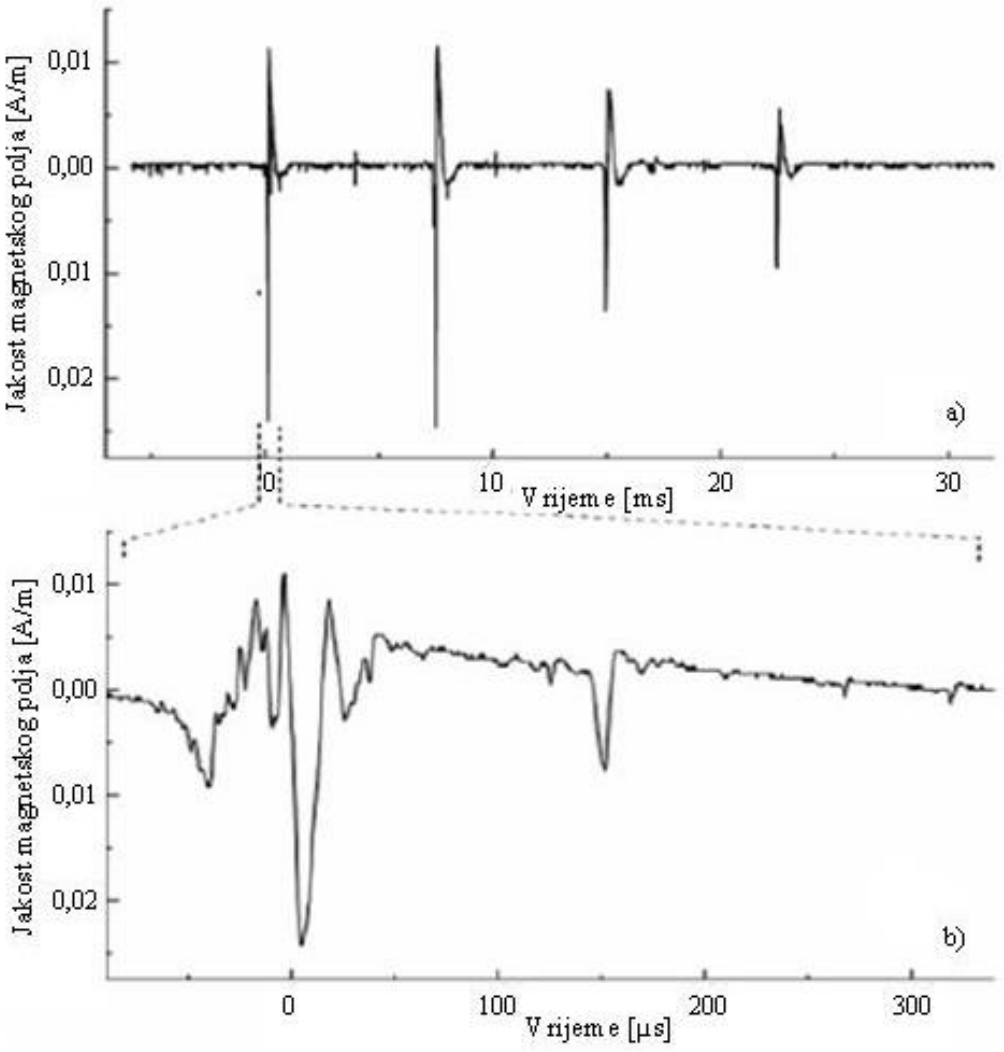


Slika 3.1: Položaj senzora LINET sustava u Europi [8]

3.1.1. Princip rada sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja

Svaka pojedina senzorska stanica sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja sastoji se od tri komponente: antene za mjerenje magnetskog polja, GPS antene i staničnog računala.

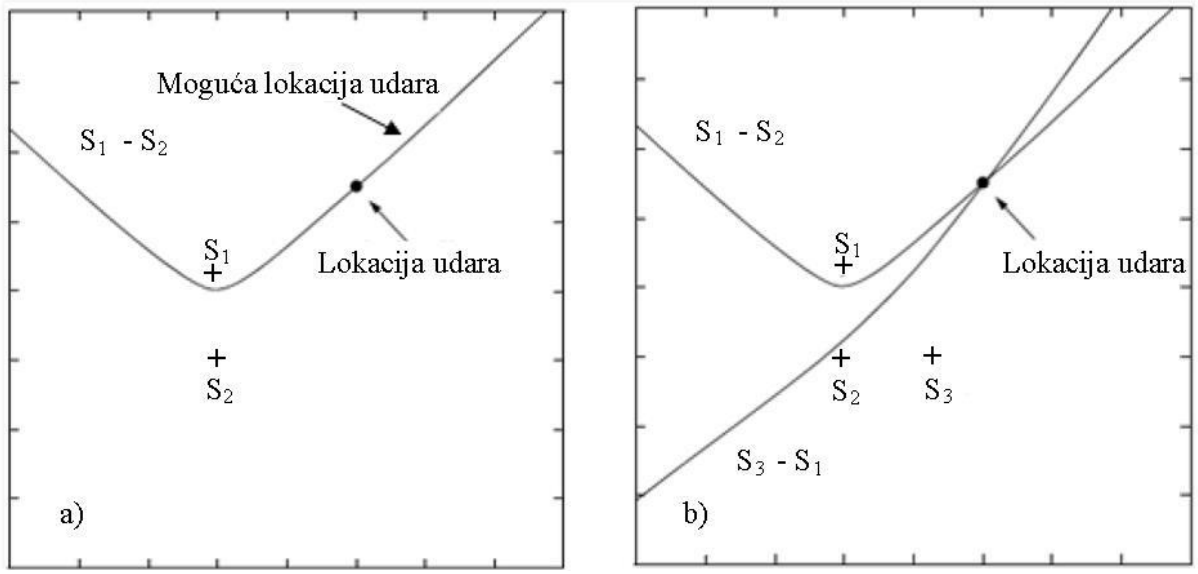
LINET senzori koriste vrlo niski (*engl. Very Low Frequency* - VLF) i niski frekvencijski (*engl. Low Frequency - LF*) opseg za detekciju promjene magnetske indukcije u zraku pri atmosferskom pražnjenju pomoću dvije međusobno okomito postavljene prstenaste antene na senzoru. Sustav mjeri vremensku ovisnost komponenti $B_x(t)$ i $B_y(t)$ u frekvencijskom rasponu 1 kHz – 200 kHz [40].



Slika 3.2: Vremenska ovisnost jakosti magnetskog polja a) ukupnog atmosferskog pražnjenja i b) prvog udara [40]

Za detekciju atmosferskih pražnjenja i razlikovanje pražnjenja u zemlju od pražnjenja između oblaka sustav koristi posebno razvijeni 3D postupak [39].

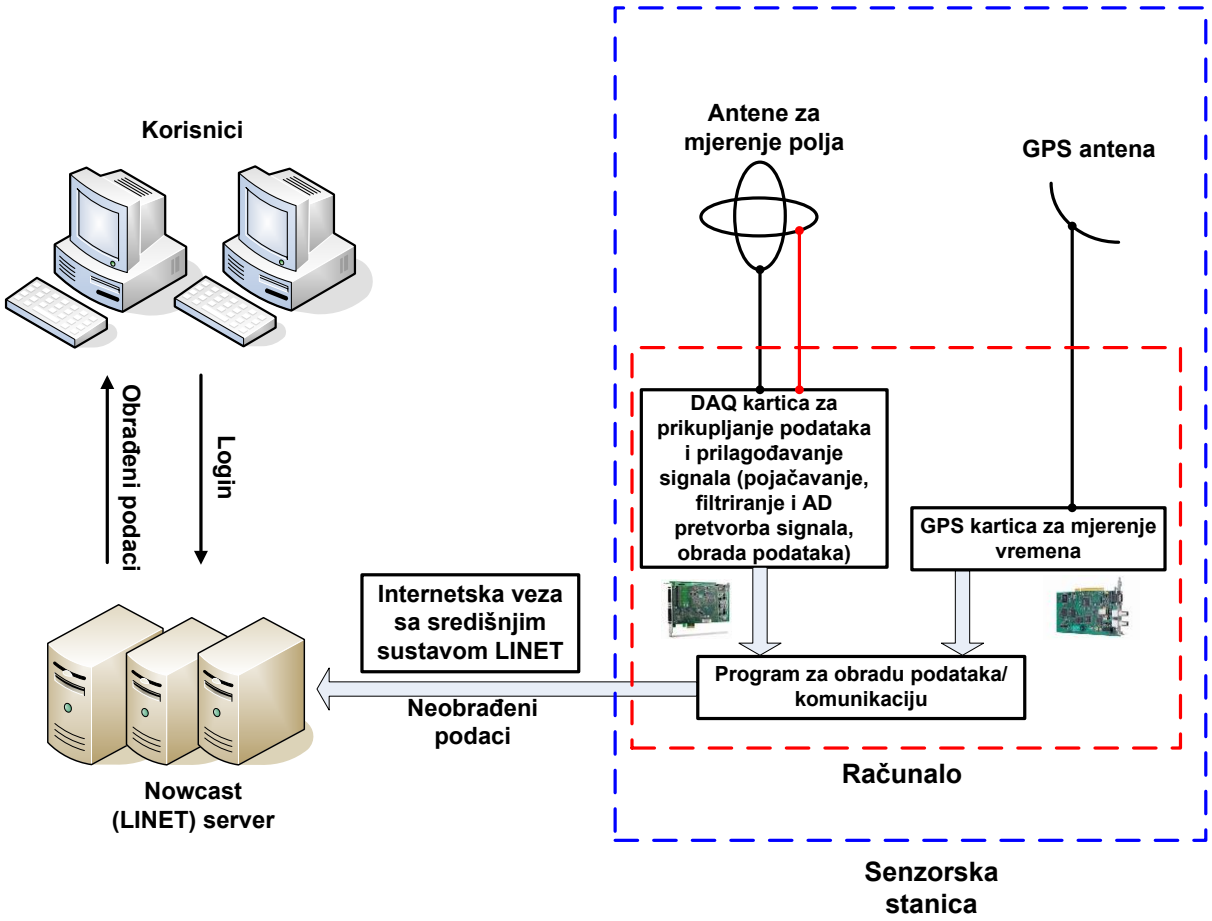
Sustav LINET za određivanje lokacije atmosferskog pražnjenja koristi metodu vremena pristizanja (*engl. Time of Arrival* - TOA) [41]. Za određivanje lokacije metodom vremena pristizanja potrebne su najmanje četiri detekcije senzora koji mjere relativne razlike u vremenu dolaska događaja atmosferskog pražnjenja do senzora. Preporučena udaljenost između susjednih senzora iznosi 250 km ili manje [2]. Svaki par senzora daje hiperboličnu krivulju koja predstavlja moguća mjesta koje zadovoljavaju mjerenja vremenske razlike (slika 3.3 a). Sjecište dvije takve krivulje iz tri ili više senzora predstavlja lokaciju udara munje (slika 3.3 b). U nekim slučajevima kada se koriste tri senzora, moguća je pojava dva sjecišta hiperboličnih krivulja koja predstavljaju dva moguća mjesta udara. Stoga se pri određivanju lokacije udara munje koriste detekcije četiri ili više senzora.



Slika 3.3:. Određivanje lokacije atmosferskih pražnjenja metodom TOA

Za točno mjerenje vremena LINET sustav koristi mjerače vremena sinkronizirane u GPS sustavu (*engl. Global Positioning System*). Deklarirana preciznost GPS sustava u mjerenju vremena je vrlo visoka, reda veličine 100 nanosekundi, što omogućava proračun lokacije atmosferskog pražnjenja s greškom lociranja manjom od 100 metara.

Detektirani signali se sakupljaju u pojedinoj senzorskoj stanici i automatski prosljeđuju u paketima u centralnu procesorsku jedinicu u LINET centar u Münchenu gdje se vrši kombinirana analiza svih detektiranih signala dobivenih iz različitih senzora. Podaci se povezuju i obrađuju, sortiraju prema vremenu detektiranja i uspoređuju prema vremenu nastanka i valnom obliku. Podaci se nakon obrade u centralnoj procesnoj jedinici svakih 10 sekundi dostavljaju korisnicima. Prikaz toka podataka u sustavu za lociranje atmosferskih pražnjenja opisan je na slici 3.4 [8].



Slika 3.4: Shema toka podataka u LINET sustavu [8]

Izlazni podaci sustava LINET su:

- vrijeme pražnjenja, lokacija pražnjenja,
- vrijednost amplitude struje pražnjenja u kiloamperima (uključujući i polaritet),
- podjela na pražnjenja između oblaka (OO) i pražnjenja oblak – zemlja (OZ),
- visina za pražnjenja između oblaka (OO) i
- 2D statistička greška pri određivanju lokacije pražnjenja.

Amplitude struja atmosferskih pražnjenja variraju u velikom rasponu, dosežući i nekoliko stotina kiloampera. Sustav LINET registrira atmosferska pražnjenja manjih i većih amplituda struja, pri čemu obično pražnjenja oblak – zemlja imaju veće amplitude struje, dok pražnjenja među oblacima imaju manje amplitude struje.

Učinkovitost detekcije (*engl. Detection Efficiency* – DE) sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja definira se kao postotak atmosferskih pražnjenja koja je sustav zabilježio u odnosu na ukupna atmosferska pražnjenja. Na učinkovitost detekcije utječu prvenstveno razmak između senzora, ali i topologija sustava, osjetljivost senzora, način

otklanjanja smetnji, način uzorkovanja, obrada signala, način razlikovanja, postupci povezivanja signala koji dolaze od istog atmosferskog pražnjenja te numerički postupak lociranja [2].

Točnost lociranja atmosferskih pražnjenja (*engl. Detection Accuracy* – DA) parametar je recipročan parametru greške lociranja sustava:

$$DA = \frac{1}{L_{stat}} \tag{3.1}$$

gdje je L_{stat} statistička greška lociranja (*engl. Statistical Locating Error*).

Ukupna greška lociranja atmosferskih pražnjenja u zemlju L_{uk} određena je izrazom [42]:

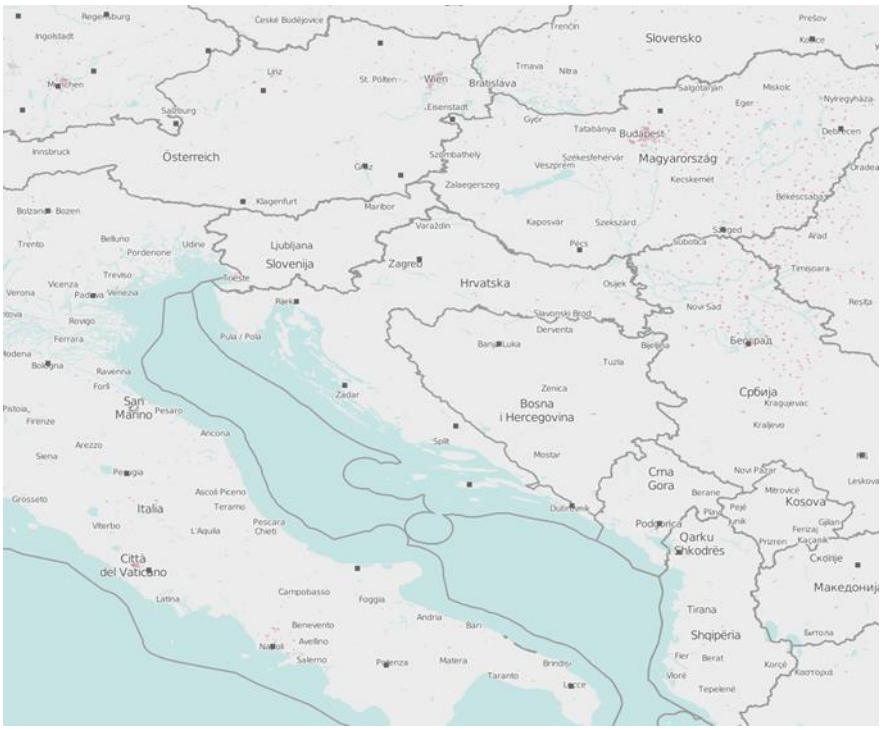
$$L_{uk} = L_{stat} + L_{sust} \tag{3.2}$$

gdje je L_{stat} statistička greška lociranja, a L_{sust} sustavna greška određivanja lokacije atmosferskog pražnjenja u zemlju.

Statistička greška odnosi se na rad algoritma za lociranje sustava te kvalitetu pokrivenosti nekog područja mrežom senzora, a iskazuje se kao polumjer područja unutar kojega postoji 50 postotna vjerojatnost određivanja točne lokacije atmosferskog pražnjenja. Sustavna greška lociranja očituje se kao prostorni pomak između stvarnog 3D svijeta i georeferenciranog svijeta unutar kojeg se lociraju atmosferska pražnjenja.

3.1.2. Programska podrška Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja

Krajem 2008. godine u Hrvatskoj je uspostavljen sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja kao dio europskog sustava LINET [8]. Mreža senzora sustava LINET na području Hrvatske prikazana je na slici 3.5. Za detekciju atmosferskih pražnjenja na području Hrvatske LINET sustav koristi podatke izmjerene senzorima koji su instalirani na šest lokacija na području Hrvatske u blizini gradova Zagreb, Rijeka, Nin, Sinj, Blato (otok Korčula) i Dubrovnik, kao i podatke sa senzora lociranih u susjednim zemljama. Pri određivanju optimalnih lokacija senzora u Hrvatskoj u obzir je uzeta preporučena međusobna udaljenost senzora kako bi se postigla visoka učinkovitost detekcije atmosferskih pražnjenja, ali i zahtjevi za osiguravanjem pouzdanog rada i smještaja senzora.



Slika 3.5: Položaj senzora LINET sustava na području Hrvatske i susjednih zemalja

S obzirom na to da je teritorij Hrvatske vrlo dobro pokriven mrežom senzora, statistička greška lociranja svedena je na minimum koji trenutna tehnologija omogućuje. Krajem 2017. godine utvrđena je, za većinu (90%) detektiranih atmosferskih pražnjenja oblak-zemlja, statistička pogreška L_{stat} određivanja lokacija atmosferskih pražnjenja manja od 150 metara i sustavna pogreška L_{sust} na području Hrvatske od otprilike 350 metara, odnosno ukupna pogreška lociranja L_{uk} od približno 500 metara [42].

Posebno razvijena programska podrška Sustav za lokaciju atmosferskih pražnjenja omogućuje integraciju, razmjenu, arhiviranje i obradu podataka sustava LINET. Funkcionalnosti SLAP-a koje operator prijenosnog sustava može koristiti u svrhu vođenja elektroenergetskog sustava su:

- arhiviranje podataka o atmosferskim pražnjenjima od 1. siječnja 2009. godine nadalje,
- praćenje nailaska grmljavinskih aktivnosti na području Hrvatske,
- analiza i statistička obradu podataka o atmosferskim pražnjenjima,
- vizualna prezentacija rezultata prostorne obrade podataka,
- prostorna korelacija udara munja i alarmnih zona prijenosnih vodova,
- vremensko – prostorna korelacija ispada nadzemnih vodova i kvarova u prijenosnoj mreži s atmosferskim pražnjenjima.

Programska podrška SLAP omogućuje izradu godišnjih statističkih analiza [42] kako slijedi:

- statistička analiza podataka o atmosferskim pražnjenjima koja daje pregled godišnjih grmljavinskih aktivnosti na području prijenosne mreže Republike Hrvatske,
- statistička analiza prostorne i vremenske korelacije podataka o atmosferskim pražnjenjima, podataka o položaju prijenosnih vodova u prostoru te podataka o proradi relejne zaštite prijenosnih vodova i isklopa prekidača u mreži preuzetih iz liste događaja SCADA sustava koja daje pregled događaja u prijenosnoj mreži uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima.

Vizualna prezentacija atmosferskih pražnjenja u stvarnom vremenu omogućuje neposredno opažanje nailaska grmljavinskog nevremena u centrima vođenja elektroenergetskog sustava, što uz rezultate korelacije ispada i kvarova u prijenosnoj mreži s atmosferskim pražnjenjima pridonosi bržoj identifikaciji uzroka isklopa prekidača. Uz korištenje sustava za praćenje atmosferskih pražnjenja u stvarnom vremenu moguće je utvrditi je li isključenje posljedica trajnog kvara ili prijelazne pojave uzrokovane atmosferskim pražnjenjem, što može biti korisno pri ponovnom uključenju voda i u minimiziranju potrebnog vremena i troškova za to.

Sposobnost sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja da pruži pouzdanu informaciju o nailasku grmljavinskog nevremena doprinosi brzom i učinkovitom rasporedu i angažmanu ekipa za održavanje u područjima kojima se približavaju jake grmljavinske fronte. Jednako je važna sposobnost sustava da pruži pouzdanu informaciju o prestanku grmljavinskih aktivnosti u zoni obavljanja radova. Izvođenje radova na popravcima i održavanju dugih prijenosnih vodova bez rizika od ozljeda uslijed atmosferskih pražnjenja te poznavanje pravca približavanja grmljavinskih aktivnosti prilikom radova na vodovima ili ispitivanjima u mreži, predstavlja važan aspekt zaštite sigurnosti na radu.

Vizualna prezentacija prostorne obrade podataka o atmosferskim pražnjenjima na geografskim kartama može biti niske rezolucije (0,1 stupanj geografske širine i dužine), visoke rezolucije (0,01 stupanj geografske širine i dužine) i vrlo visoke rezolucije (0,001 stupanj geografske širine i dužine).

Podaci o atmosferskim pražnjenjima koja predstavljaju mogući uzrok kvarova nadzemnih vodova te utječu na njegovu prenaponsku karakteristiku prate se u prostoru

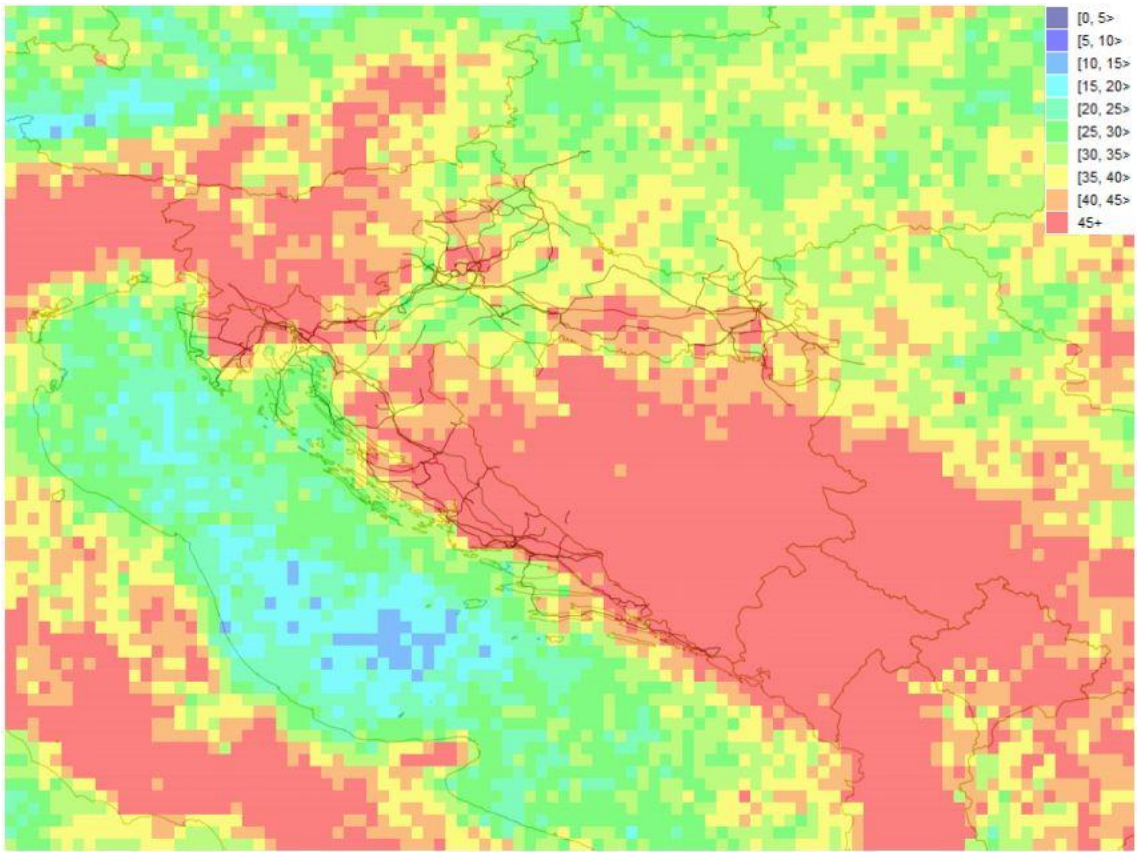
alarmnih zona oko promatranih nadzemnih vodova. Širine alarmnih zona određuju se na osnovi ukupne greške lociranja atmosferskih pražnjenja u zemlju sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja.

Podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja u korelaciji s prostornim podacima elemenata elektroenergetskog sustava omogućavaju određivanje karakteristika atmosferskih pražnjenja, kao što su gustoća atmosferskih pražnjenja i vjerojatnost pojave određene amplitude struje, za svaku pojedinu lokaciju (trasu nadzemnog voda, stupno mjesto i sl.). Izloženost pojedinog stupa nadzemnog voda atmosferskim pražnjenjima ovisi o gustoći atmosferskih pražnjenja na lokaciji stupa, dok vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu stupa nadzemnog voda znatno ovisi o karakteristikama struje atmosferskih pražnjenja na lokaciji pojedinog stupa. Podaci o karakteristikama atmosferskih pražnjenja za pojedinu lokaciju dobiveni obradom velikog broja podataka izmjerenih sustavom za lociranje atmosferskih pražnjenja preciznije opisuju karakteristike atmosferskih pražnjenja od onih dobivenih na temelju mjerenja i empirijskih izraza opisanih u prethodnom poglavlju. Stoga se u nastavku rada rezultati obrade podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja koriste kao ulazni podaci pri proračunima prenaponskih karakteristika nadzemnih vodova.

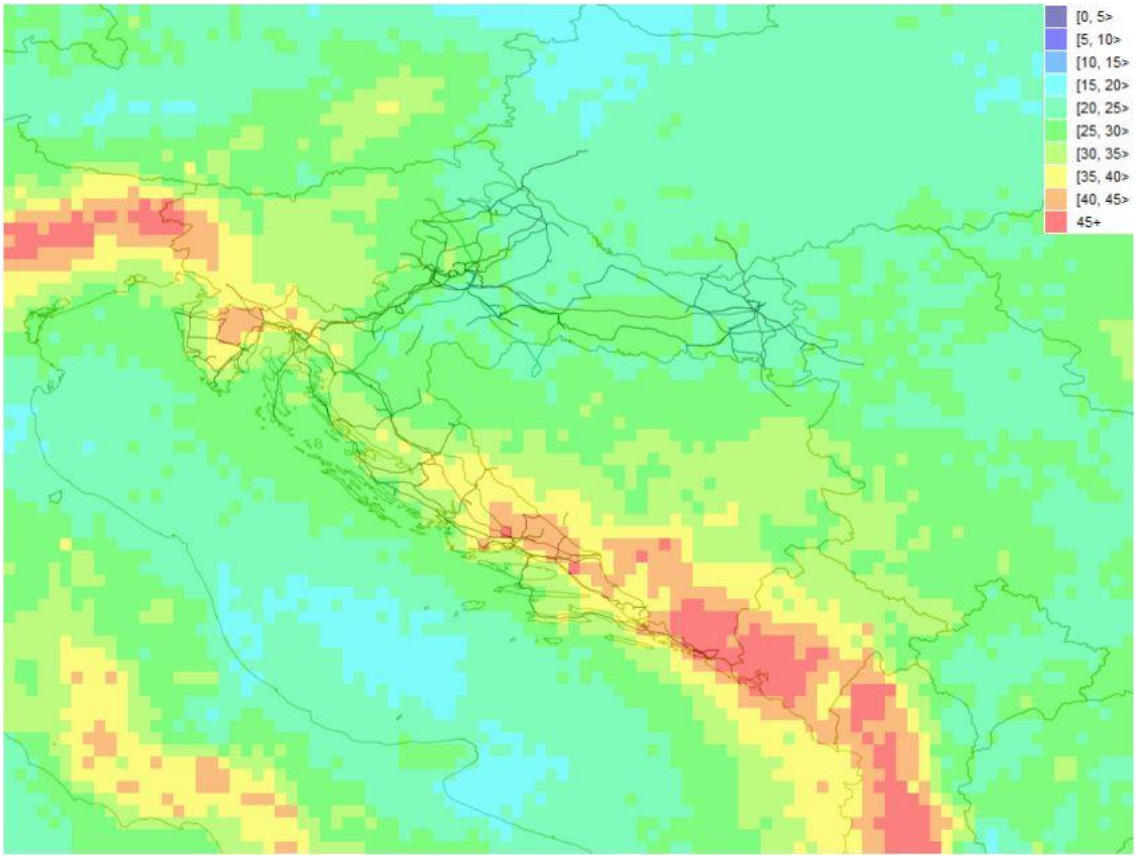
U nastavku su prikazani primjeri korištenja programske podrške SLAP.

Primjer 3.1.1 Izrada nisko-rezolucijskih karata s podacima o izloženosti atmosferskim pražnjenjima za šire geografsko područje temeljem podataka SLAP-a

Na slikama 3.6 i 3.7 prikazane su karte s brojem grmljavinskih dana za područje Hrvatske za razdoblje od jedne kalendarske godine (2018.), odnosno s prosječnim brojem grmljavinskih dana za razdoblje od 10 godina (2009.-2018.). Karta grmljavinskih dana, odnosno izokeraunička karta, prikazuje broj dana u godini na nekom području u kojima je postojala grmljavinska aktivnost, odnosno u kojima je u sustavu za lociranje atmosferskih pažnjenja registrirano barem jedno atmosfersko pražnjenje na zadanom području, čija je površina određena ovisno o rezoluciji u kojoj je karta izrađena. Izokeraunička razina je područje jednakog broja grmljavinskih dana u godini.



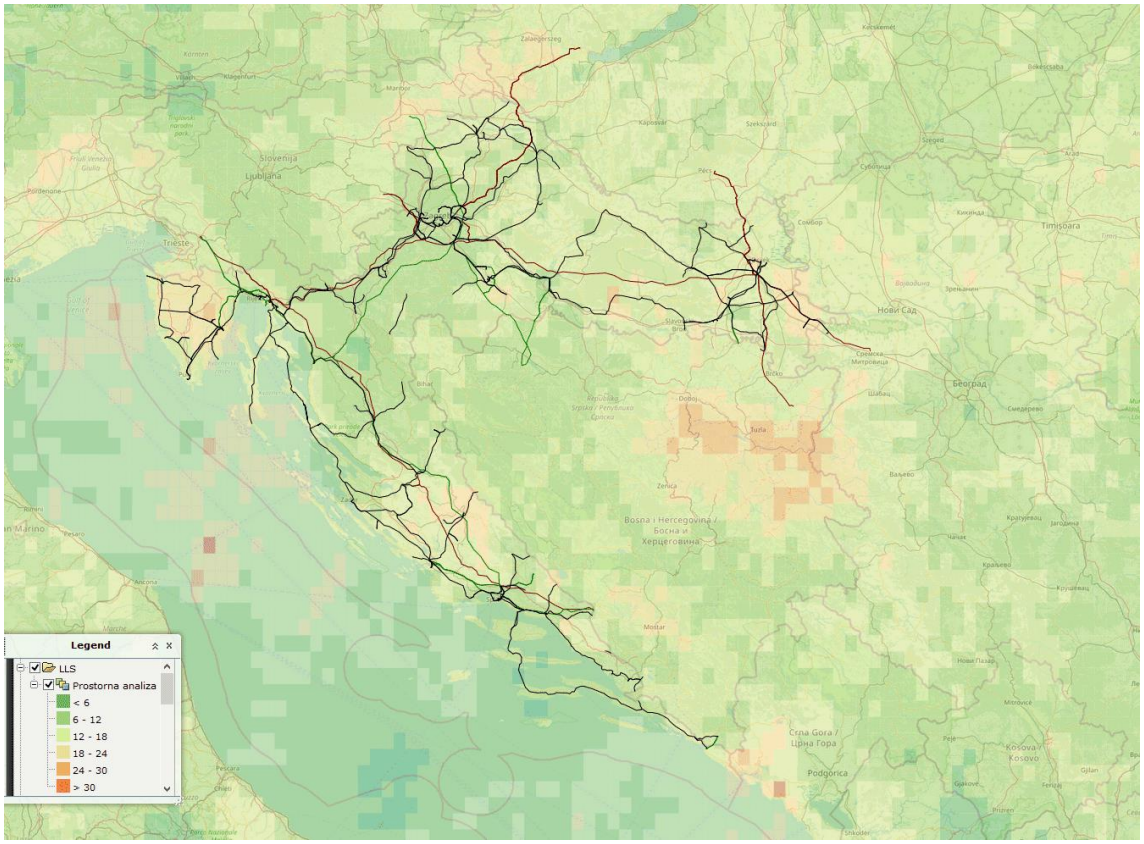
Slika 3.6: Broj grmljavinskih dana na području Hrvatske (2018)



Slika 3.7: Broj grmljavinskih dana na području Hrvatske (2009-2018)

Iz karata prikazanih na slikama 3.6 i 3.7 može se uočiti da je u 2018. godini u sustavu za lociranje atmosferskih pražnjenja na području Hrvatske zabilježen značajno veći broj grmljavinskih dana u odnosu na prosječan broj grmljavnisnkih dana u prethodnom desetogodišnjem razdoblju. Za dobivanje statistički relevantnog podatka, potrebno je praćenje podataka kroz veći niz godina. Što je vrijeme praćenja duže, podaci su statistički vjerodostojniji. Smatra se da se nakon otprilike 8 godina promatranja mogu dobiti prvi statistički relevantni podaci [42].

Jedan od primjera primjene podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja prikupljenih tijekom više godina je izrada karata gustoće grmljavinskih aktivnosti za šire geografsko područje. Karte gustoće atmosferskih pražnjenja širokog područja daju statistički pregled grmljavinskih aktivnosti na širem području i uobičajeno su niske rezolucije. Na slici 3.8 prikazana je karta gustoće atmosferskih pražnjenja oblak-zemlja u 2018. godini.



Slika 3.8: Gustoća atmosferskih pražnjenja oblak-zemlja u 2018. godini

Primjer 3.1.2 Statistička obrada podataka o karakteristikama atmosferskih pražnjenja

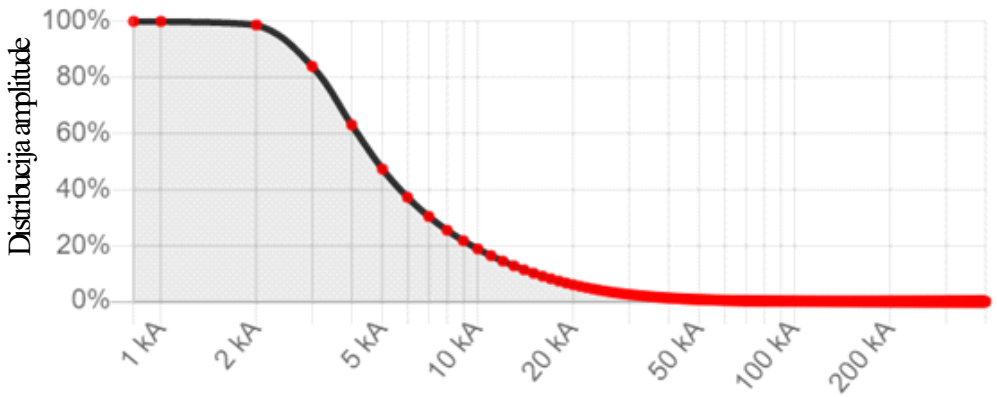
Primjeri statističke obrade podataka o atmosferskim pražnjenjima prikazani su na slikama 3.9.-3.12. U godišnjem izvješću o atmosferskim pražnjenjima naveden je ukupan broj atmosferskih pražnjenja na području te podjela na pražnjenja između oblaka (*engl. intra cloud* – IC) i pražnjenja u zemlju (*engl. cloud to ground* – CG), na pozitivna i negativna pražnjenja između oblaka te na negativna i pozitivna pražnjenja u zemlju (slika 3.9). Za svaku od kategorija naveden je podatak o prosječnoj, srednjoj i maksimalnoj vrijednosti amplitude struje pražnjenja te o prosječnoj i srednjoj vrijednosti greške lociranja.

Izvješće za vremenski period od **01.01.2019. 00:00:00** do **01.01.2020. 00:00:00**.

Tip	Broj Udara	Srednja Struja [kA]	Medijan Struje [kA]	Maximum Struje [kA]	Srednja Greška [m]	Medijan Greške [m]	
Sve	15.812.526	7,1	4,5	400,4	128	73	⊕
CG	12.429.730	7,6	4,7	400,4	144	78	⊕
IC	3.382.796	5,2	3,9	356,7	70	53	⊕
CG+	5.372.240	5,9	4,1	400,4	140	78	⊕
CG-	7.057.490	8,9	5,6	382,5	146	77	⊕
IC+	1.920.178	4,8	3,8	356,7	67	52	⊕
IC-	1.462.618	5,8	4,1	286,8	73	55	⊕

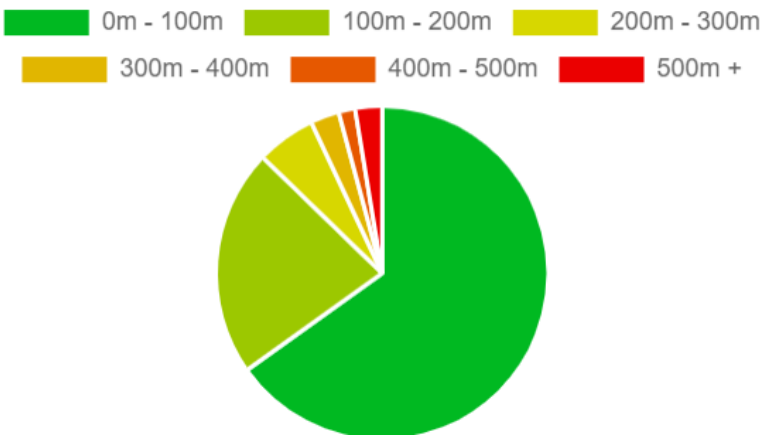
Slika 3.9: Godišnje izvješće o atmosferskim pražnjenjima (2019.)

Na slici 3.10 je prikazana kumulativna distribucija amplitude struje atmosferskog pražnjenja u zemlju za jednu kalendarsku godinu.



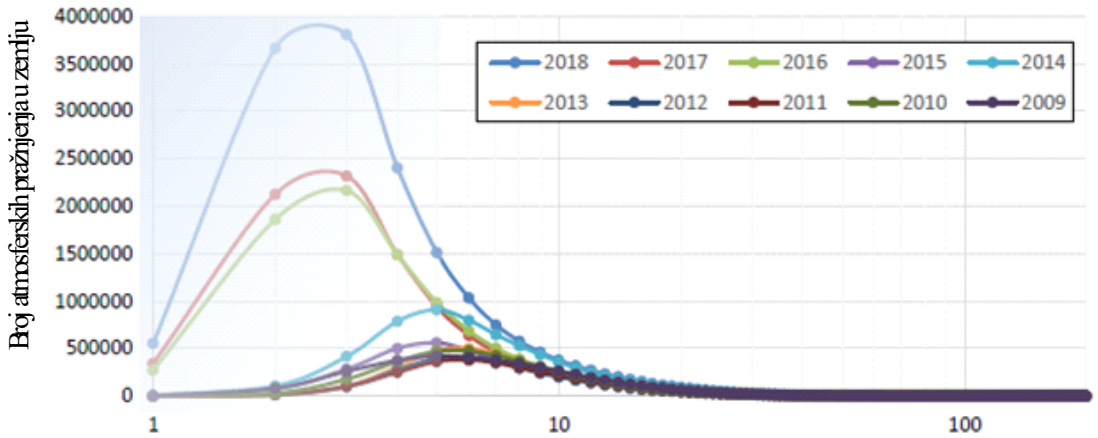
Slika 3.10: Kumulativna raspodjela amplituda struje atmosferskih pražnjenja (2019.)

Na slici 3.11. prikazana je godišnja raspodjela srednje statističke greške pri određivanju lokacije atmosferskih pražnjenja.



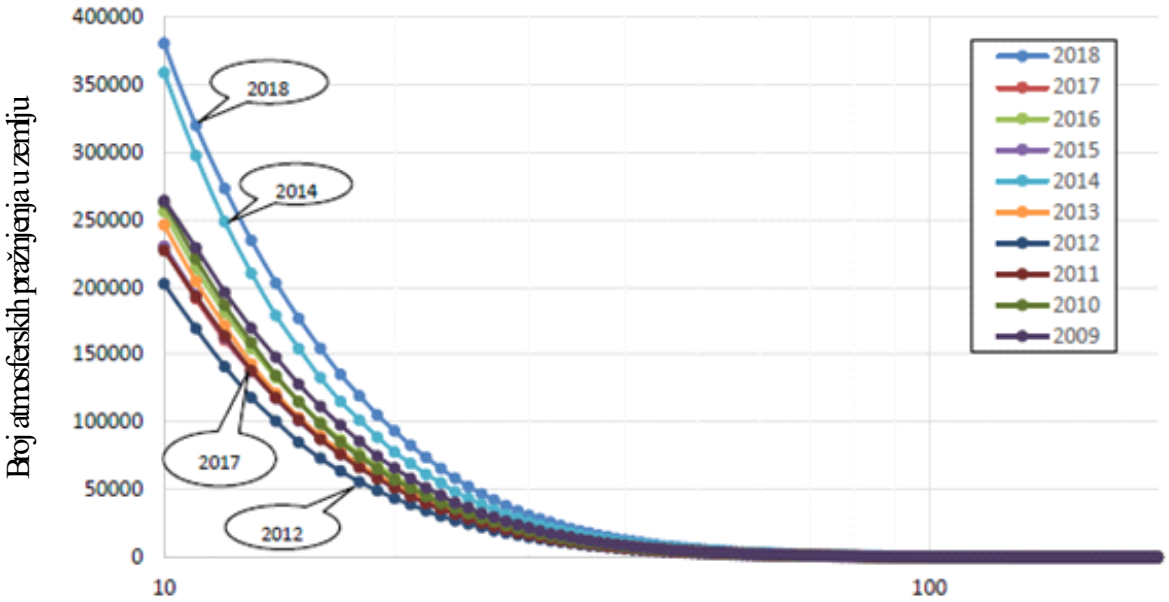
Slika 3.11: Godišnja raspodjela srednje greške lociranja atmosferskih pražnjenja

Na slici 3.12 prikazane su godišnje raspodjele amplitude struje atmosferskih pražnjenja u zemlju za period od 8 kalendarskih godina. Broj registriranih atmosferskih pražnjenja s malim amplitudama struja povećao se u dva navrata, 2016. i 2018. godine što je posljedica povećane učinkovitosti detekcije LINET sustava, odnosno poboljšanja algoritma za detekciju, prvenstveno za male amplitude struja atmosferskih pražnjenja.



Slika 3.12: Broj detektiranih atmosferskih pražnjenja po amplitudi struje (2009.-2018.)

Na slici 3.13 prikazana je raspodjela atmosferskih pražnjenja u zemlju za struje amplitude iznad 10 kA.

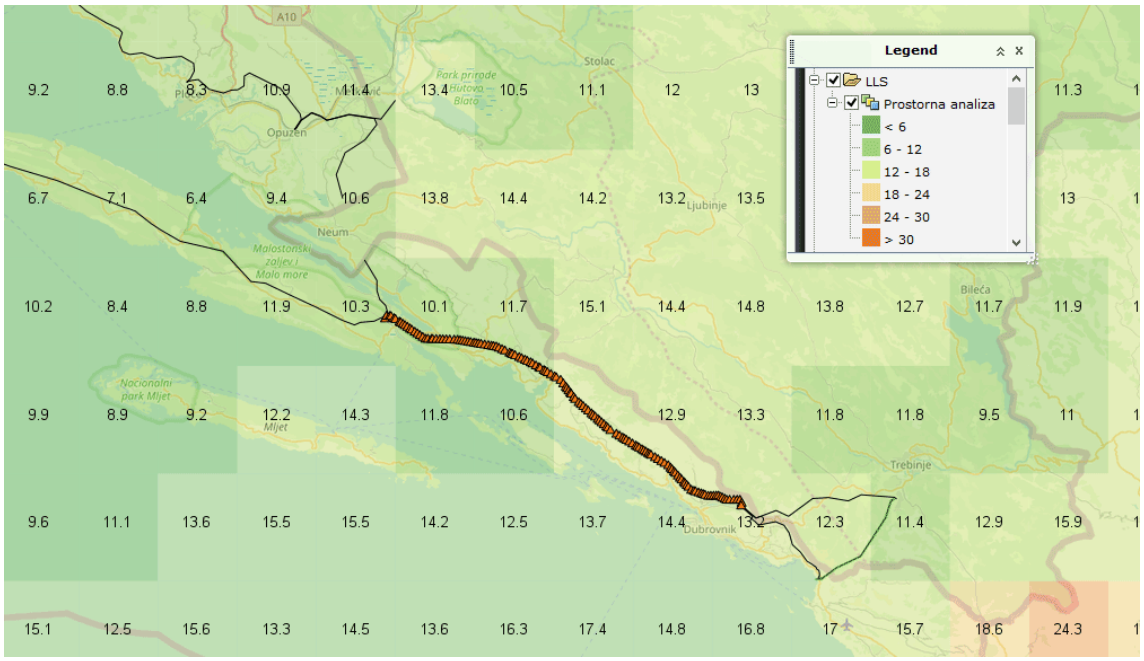


Slika 3.13: Broj atmosferskih pražnjenja za struje amplitude ≥ 10 kA (2009.-2018.)

Primjer 3.1.3 Izrada karata gustoće udara munja i statistička obrada podataka SLAP-a za promatrani 110 kV prijenosni nadzemni vod

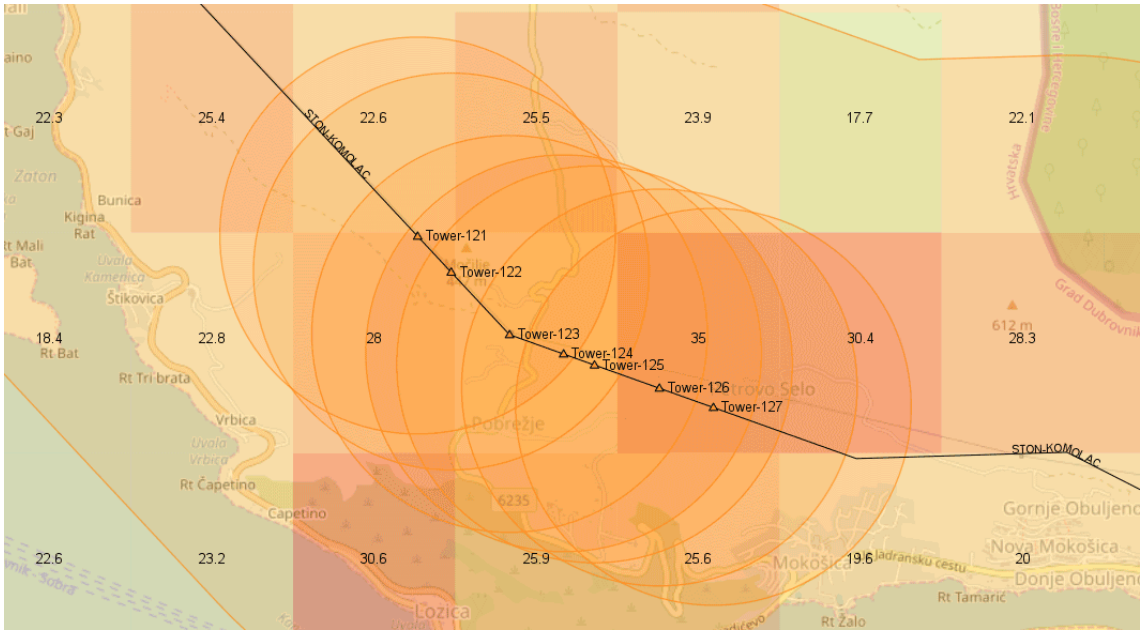
Korištenjem SLAP-a moguće je statistički obraditi i na kartama prikazati različite podatke o atmosferskim pražnjenjima, kao što su gustoća atmosferskih pražnjenja, gustoća udara munja, ukupni broj atmosferskih pražnjenja, podjela prema vrsti i polaritetu pražnjenja, broj grmljavinskih dana te maksimalne, prosječne i srednje vrijednosti amplitude struje atmosferskih pražnjenja za pojedine objekte elektroenergetskog sustava. Karte s podacima SLAP-a za pojedine objekte mogu biti niske ili visoke rezolucije, a koriste se pri proračunu prenaponskih karakteristika nadzemnih vodova te odabiru mjera prenaponske zaštite.

Na slici 3.14. prikazana je nisko-rezolucijska karta gustoće udara munja za vremenski period od deset godina (2009.-2018.). Na karti je ucrtana trasa i lokacija pojedinih stupova promatranog 110 kV nadzemnog voda. Razdoblje od 10 godina može se smatrati odgovarajuće dugačkim periodom za prikupljanje podataka za izradu pouzdanih statistika i odabir ulaznih podataka za proračun prenaponskih karakteristika nadzemnog voda.



Slika 3.14: Nisko-rezolucijska karta gustoće udara munja OZ (2009.-2018.)

Na slici 3.15 prikazana je visoko-rezolucijska karta gustoće atmosferskih pražnjenja za dionicu trase promatranog nadzemnog voda izrađena temeljem podataka o atmosferskim pražnjenjima zabilježenim u vremenskom periodu od 9 godina (2009.-2017.)



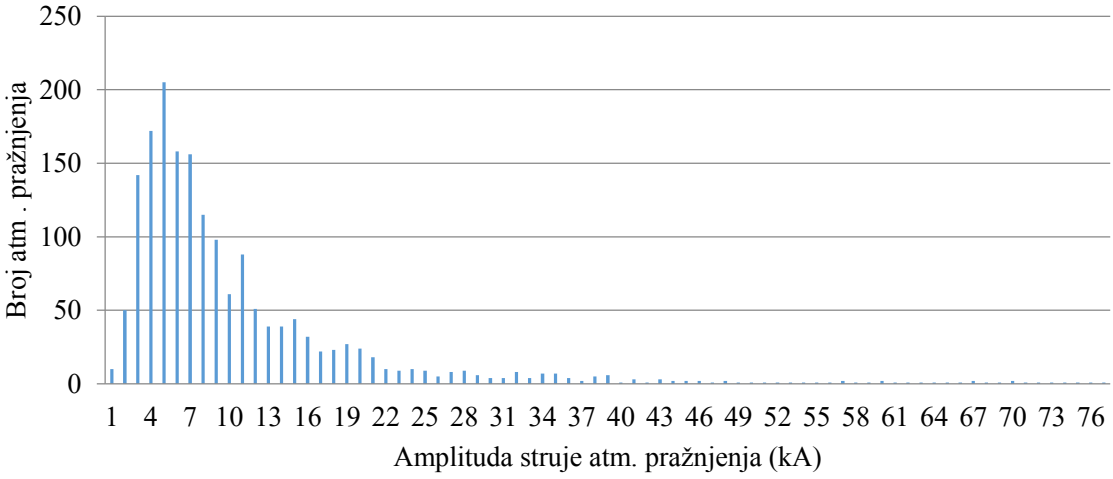
Slika 3.15: Visoko-rezolucijska karta gustoće atmosferskih pražnjenja OO i OZ (2009.–2017.)

Na slici 3.15 su označene lokacije za odabrane stupove promatranog 110 kV nadzemnog voda. Radijus kružnica koje predstavljaju prostor alarmnih zona pojedinih stupova iznosi 1 km. Kako bi se kompenzirala greška lociranja sustava za atmosferska pražnjenja i osigurala pouzdanost provođenja prostorne korelacije, u primjerima u ovom radu širina alarmne zone određena je kao dvostruka greška lociranja. Na temelju atmosferskih pražnjenja registriranih sustavom za lociranje atmosferskih pražnjenja u prostoru alarmnih zona stupova moguće je odrediti karakteristike atmosferskih pražnjenja za svaki pojedini stup (tablica 3.1). Podaci o gustoći udara munja za lokaciju određenog stupa određeni su na temelju ukupnog broja atmosferskih pražnjenja u prostoru alarmne zone stupa, površine alarmne zone stupa i faktora višestrukosti atmosferskog pražnjenja FMF=1.44 i koriste se kao ulazni podaci u proračunu za određivanje razine izloženosti pojedinog stupa atmosferskim pražnjenjima u nastavku ovog rada.

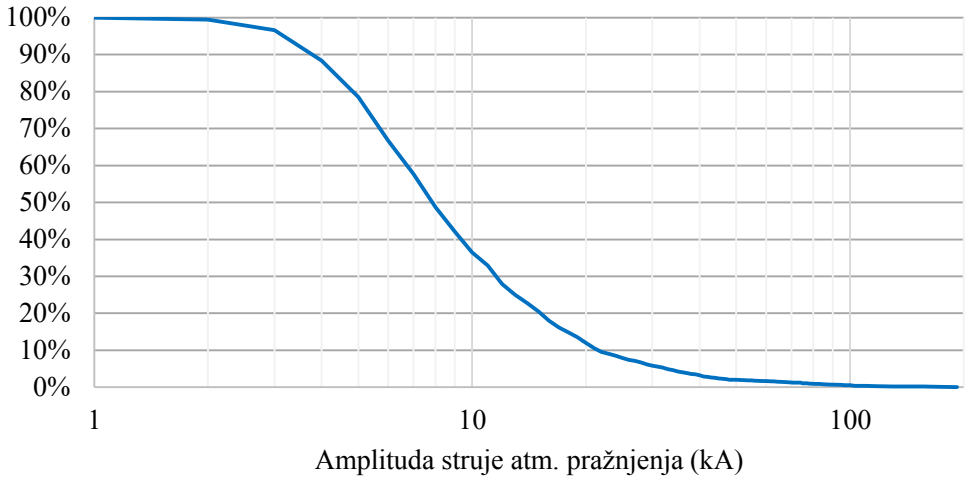
Tablica 3.1: Karakteristike atmosferskih pražnjenja za lokacije promatranih stupova

Stup	Broj udara OO	Broj udara OZ	Ukupni broj udara	Gustoća atmosferskih pražnjenja [udara/(km^2*god)]	Gustoća udara munja [munja/(km^2*god)]
S1	524	449	973	28,17	19,57
S2	532	455	987	28,58	19,85
S3	584	489	1073	31,07	21,58
S4	592	508	1100	31,85	22,12
S5	613	505	1118	32,37	22,48
S6	596	505	1101	31,88	22,14
S7	581	528	1109	32,11	22,30

Na slikama 3.16 i 3.17 prikazana je raspodjela, odnosno kumulativna raspodjela amplituda struja atmosferskih pražnjenja zabilježenih sustavom za lociranje atmosferskih pražnjenja u prostoru alarmnih zona stupova na promatranoj dionici trase 110 kV nadzemnog voda.



Slika 3.16: Raspodjela amplituda struja atmosferskih pražnjenja



Slika 3.17: Kumulativna raspodjela amplituda struja atmosferskih pražnjenja

Podaci o raspodjeli amplituda struja atmosferskih pražnjenja u prostoru alarmnih zona koriste se kao ulazni podaci u simulacijama udara munja u stupove nadzemnih vodova i proračunima za dimenzioniranje prenaponske zaštite nadzemnih vodova.

3.2. Relejna zaštita nadzemnih vodova

Uloga sustava relejne zaštite je pravovremeno otkriti stanja u elektroenergetskom sustavu pri kojima su prekoračene granične vrijednosti pogonskih veličina i postoji rizik od širenja poremećaja na veće područje [43] te odgovarajućim postupcima eliminirati takvo stanje uz što manje posljedice za elektroenergetski sustav u cjelini.

Sustav relejne zaštite je u okviru sustava daljinskog upravljanja i nadzora elektroenergetskog sustava povezan sa staničnim računalom koje u sebi objedinjava funkcije obrade podataka i komunikacije prema nadređenom centru daljinskog vođenja. Pouzdan i kvalitetan rad relejne zaštite utječe na kvalitetu pogona elektroenergetskog sustava u cjelini i stoga su zahtjevi koje mora zadovoljiti funkcija zaštite prijenosnog voda: brzina, osjetljivost i selektivnost.

Pouzdan i kvalitetan rad relejne zaštite postiže se odgovarajućim ispravnim odabirom postavki uređaja relejne zaštite. Odabir postavki uređaja relejne zaštite određen je preporukama za proračun i odabir od strane proizvođača zaštitnih uređaja, ali i mnogim vanjskim utjecajima obzirom na mjesto ugradnje uređaja, kao što su vrsta tla, geometrija elemenata stupova i konfiguracija okolne mreže, pri čemu je iskustvo u primjeni uređaja relejne zaštite od velike važnosti.

Za zaštitu prijenosnih vodova najčešće se koristi distantna zaštita. Distantni relej priključuje se na strujne i naponske mjerne transformatore štićenog voda. Osnovna funkcija distantnog releja je određivanje udaljenosti mjesta nastanka kratkog spoja na dalekovodu na temelju mjerene impedancije. Mjerena impedancija je proporcionalna udaljenosti kratkog spoja na prijenosnom vodu od mjesta ugradnje mjernih transformatora. Relejni uređaj detektira kvar na vodu, određuje vrstu kvara i u što kraćem vremenu šalje nalog za odgovarajući jednopolni ili tropolni isklop [44].

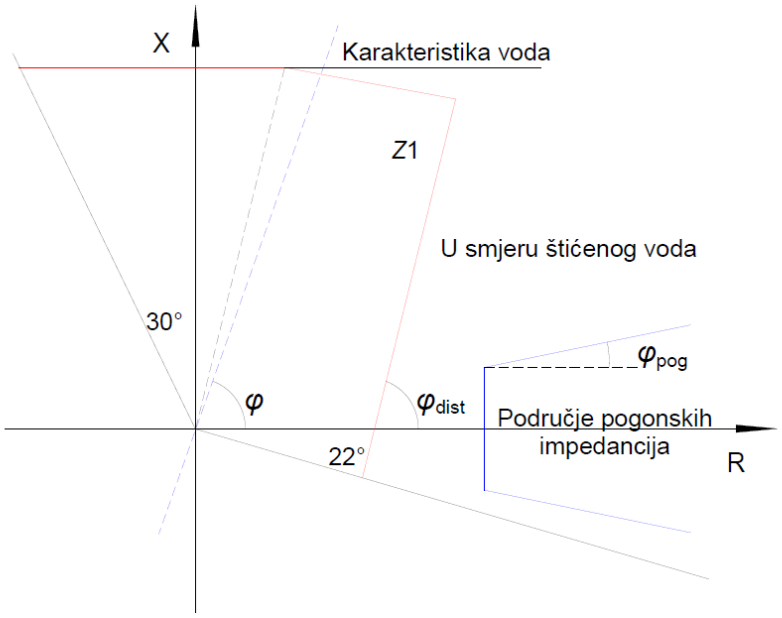
Važne karakteristike distantne zaštite su neovisnost o komunikacijskoj vezi između dva kraja prijenosnog voda i selektivnost, odnosno mogućnost da djeluje kao rezervna zaštita za ostale elemente prijenosne mreže.

Distantna zaštita ima šest zona štićenja s tri mjerne petlje pri pojavi međufaznog kvara i tri mjerne petlje pri pojavi kvara faznog vodiča sa zemljom za svaku pojedinu zonu. Mjerenja i postavke svih šest zona štićenja izvedena su potpuno neovisno, čime je osigurana visoka pouzdanost štićenja za sve vrste vodova. Distantna zaštita neovisno po zonama može biti u usmjerenom (natrag, naprijed) ili neusmjerenom režimu rada.

Poligonalna radna karakteristika predstavlja grafički prikaz područja djelovanja pojedine zone štićenja distantne zaštite u R - X dijagramu. Područje djelovanja zaštitne funkcije određeno je impedancijom kvara i minimalnom pogonskom impedancijom. Zbog razlike u iznosima impedancija kvara razlikujemo poligonalnu radnu karakteristiku štićenja

pri pojavi međufaznog kvara od poligonalne radne karakteristike pri pojavi kvara faznog vodiča sa zemljom. Na slici 3.18 prikazan je primjer poligonalne radne karakteristike za međufazni kvar sa smjerom štićenja prema naprijed. Oznake na slici 3.18 predstavljaju sljedeće:

- *Z1* – impedancija prve zone štićenja,
- φ – kut voda,
- φ_{dist} – kut nagiba radne karakteristike,
- φ_{pog} – maksimalni kut opterećenja voda.



Slika 3.18: Poligonalna radna karakteristika uređaja distantne relejne zaštite

Osim funkcija distantne zaštite relejni uređaji imaju mogućnost vršenja i sljedećih funkcija: nadstrujna zaštita (dva stupnja), termička zaštita (samo za kabelske vodove), usmjerena dozemna zaštita, komunikacijska shema za distantnu zaštitu, komunikacijska shema za dozemnu zaštitu, zaštita od uključenja na kvar, automatsko ponovno uključenje, provjera sinkronih uvjeta i kontrola uključenja, detekcija njihanja snage, lokacija kvara, gubitak sinkronizma, blokade distantnih stupnjeva, nadzorne funkcije, mjerne funkcije.

3.2.1. Lokacija mjesta kvara

Mjerenje udaljenosti kvara od mjesta ugradnje releja važan je dodatak zaštitnim funkcijama uređaja distantne relejne zaštite obzirom da se brzim lociranjem i otklanjanjem kvara povećava raspoloživost dalekovoda u elektroenergetskom sustavu. Poznavanje mjesta kvara omogućava lakšu i bržu provjeru je li riječ o kvaru prolaznog karaktera ili trajnom

oštećenju prijenosnog voda, kao i postoji li opasnost od ponovljenih kvarova na tom mjestu na prijenosnom vodu. Pouzdan podatak o mjestu nastanka kvara koristan je pri pogonu i održavanju, posebno ako se radi o kvaru na dugačkom prijenosnom vodu.

Funkcija distantne zaštite može ukazati na zonu u kojoj je kvar detektiran, ali takva gruba procjena mjesta nastanka kvara nije dovoljna da bi bila od pomoći pri radovima na popravcima i održavanju prijenosnog voda. Također, moguće je utvrditi mjesto kvara primjenom posebnih metoda i specijalizirane opreme kojom se injektiraju putujući valovi u nadzemni vod koji nije pod naponom, te se temeljem vremena potrebnog za refleksiju putnih valova na mjestu diskontinuiteta vodiča uzrokovanog kvarom određuje udaljenost mjesta nastanka kvara. Takva metoda je skupa i zahtijeva previše vremena da bi se primjenjivala za sve kvarove, te se najčešće koristi za lociranje mjesta kvara na kabelima, gdje su kvarovi najčešće trajni i gdje su opravdani primjena posebne opreme i s time povezani troškovi.

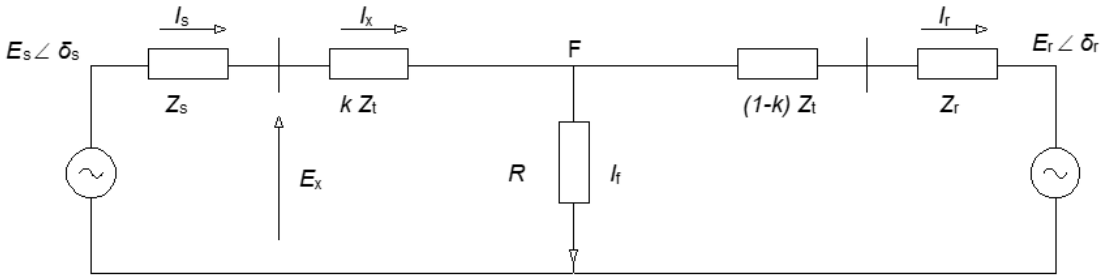
Za određivanje mjesta nastanka kvara na prijenosnim vodovima primjenjuju se metode koje koriste struje i napone kvara. Na temelju izračunate impedancije kvara i poznate jedinične impedancije prijenosnog voda moguće je odrediti mjesto nastanka kvara. Metoda poput ove ne zahtijeva korištenje posebne opreme niti posebne ispitne postupke na vodu koji nije pod naponom. Isto tako, ako je riječ o prolaznom kvaru, mjesto nastanka kvara može se odrediti iz pohranjenih podataka o struji i naponu kvara.

Postupak određivanja mjesta nastanka kvara uobičajeno se provodi pomoću pohranjenih prijelaznih zapisa struja i napona tijekom kvara. Zapisi mogu biti analogni oscilografski, digitalni ili raspoloživi iz numeričkih uređaja relejne zaštite. U slučaju analognih snimaka, izračun se temelji na fazorima struja i napona iz analognih zapisa, dok se iz digitalnih zapisa mogu vršiti izravni izračuni fazorskih veličina iz dostupnih podataka. Prikladna metoda za određivanje fazora osnovne frekvencije iz jednog ciklusa vala odabranog u N uzoraka po ciklusu je korištenje diskretne Fourierovu transformacije [44]:

$$X = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N} x_k \left\{ \cos\frac{2k\pi}{N} - j \cdot \sin\frac{2k\pi}{N} \right\}, \tag{3.3}$$

gdje X predstavlja fazor komponente osnovne frekvencije valnog oblika s uzorcima x_k, a N broj uzoraka. Prilikom određivanja fazora struje na ovakav način, potrebno je prije izračuna fazora ukloniti istosmjernu komponentu struje, ako postoji. Fazori određeni iz istovremeno uzetih uzoraka nekoliko unosa koriste se za izračun udaljenosti mjesta nastanka kvara.

Problem određivanja udaljenosti do kvara može se prikazati u uvjetima jednofaznog kruga Theveninovim prikazom izvora na dva kraja prijenosnog voda (slika 3.19), gdje E_r i E_s predstavljaju napone, δ_r i δ_s fazne kutove napona, I_s i I_r struje te Z_r i Z_s impedancije izvora. Razlika između faznih kutova napona izvora je primarno odgovorna za tok snage u prijenosnom vodu u uvjetima prije nastanka kvara. Impedancija voda je Z_t, a R nepoznati otpor kvara. Potrebno je što točnije odrediti udaljenost do mjesta nastanka kvara k uz poznate samo iznose struja I_x i napona E_x na analognim ulazima relejnog uređaja.



Slika 3.19: Kvar sa zemljom preko otpora u jednofaznom krugu [44]

Za struju kvara I_f napon na mjestu ugradnje releja zadan je izrazom:

$$E_x = k \cdot Z_t \cdot I_x + R \cdot I_f. \tag{3.4}$$

S obzirom na to da je iznos I_f nepoznat, može se pretpostaviti da je R jednak nuli te se k može izravno odrediti, što može prouzročiti značajnu pogrešku k ako je R različit od nule i razlika između δ_r i δ_s značajna. Mnogo je bolji postupak uz pretpostavku da je nepoznata struja kvara proporcionalna promjeni struje na mjestu ugradnje relejnog uređaja:

$$I_x - I_{x0} \equiv \Delta I_x = d \cdot I_f \tag{3.5}$$

gdje je I_{x0} struja na mjestu ugradnje releja prije nastanka kvara, a d faktor distribucije koji opisuje kvarom prouzrokovanu superpoziciju struje na mjestu nastanka kvara. Pri tome d ovisi o impedancijama ekvivalenata mreže s dvije strane kvara gledano s mjesta nastanka kvara:

$$d = [Z_r + (1-k) \cdot Z_t] / (Z_r + Z_s + Z_t). \tag{3.6}$$

Zamjena I_f iz izraza (3.5) u izrazu (3.4) daje:

$$E_x = k \cdot Z_t \cdot I_x + R \cdot (I_x - I_{x0})/d. \quad (3.7)$$

Uz poznati faktor distribucije *d*, u gornjoj jednadžbi jedine nepoznanice su *k* i *R*. Kako je (3.6) kompleksna jednadžba, može se razdvojiti na dvije realne jednadžbe iz kojih se mogu odrediti nepoznanice.

Zemljospojni kvar, odnosno kratki spoj sa zemljom, je najčešća vrsta kvara u elektroenergetskom sustavu. Kod takvih kvarova prijelazni otpor kvara može biti značajan te unosi pogrešku u izračun udaljenosti do mjesta nastanka kvara. Korištenjem preciznijih izraza za struju i napon na mjestu nastanka kvara može se provesti točniji proračun udaljenosti do mjesta nastanka kvara [44].

Na točnost izračuna mjesta nastanka kvara utječe više faktora. Greška u struji i naponu mjernih transformatora izravno utječe na proračun udaljenosti. Isto tako, nesigurnost konstanti voda ili djelovanje neprepletenih prijenosnih vodova unose pogrešku. Također, faktor distribucije *d* je rijetko poznat i konstantan u prijenosnoj mreži, obzirom da ekvivalent impedancije sustava ovisi o promjenjivoj konfiguraciji mreže [44].

3.3. Korelacija podataka SLAP-a i sustava relejne zaštite

Uređaj relejne zaštite registrira kvar na dalekovodu, određuje vrstu kvara i pokreće odgovarajući jednopolni ili tropolni isklop prekidača dalekovoda. Budući da su i SLAP i uređaji relejne zaštite sinkronizirani putem GPS-a, moguće je korelirati podatke o vremenu udara munje i vremenu nastanka kvara na dalekovodu. Kao polazni podatak o vremenu nastanka kvara za vremensku korelaciju s udarom munje uzima se podatak uređaja relejne zaštite o vremenu nastanka kvara. Vrijeme nastanka kvara određeno je signalom pobude (opći poticaj) releja koje odgovara vremenu detekcije kvara, odnosno detekcije poremećaja u elektroenergetskom sustavu. Do pobude relejnog uređaja dolazi nakon što uređaj registrira događaj na dalekovodu i prijeđe iz neaktivnog načina rada u aktivni te započinje postupak obrade podataka nužnih za selektivno odvajanje kvara iz elektroenergetskog sustava. Vrijeme signala pobude relejnog uređaja raspoloživo je iz liste događaja u arhivi staničnog računala.

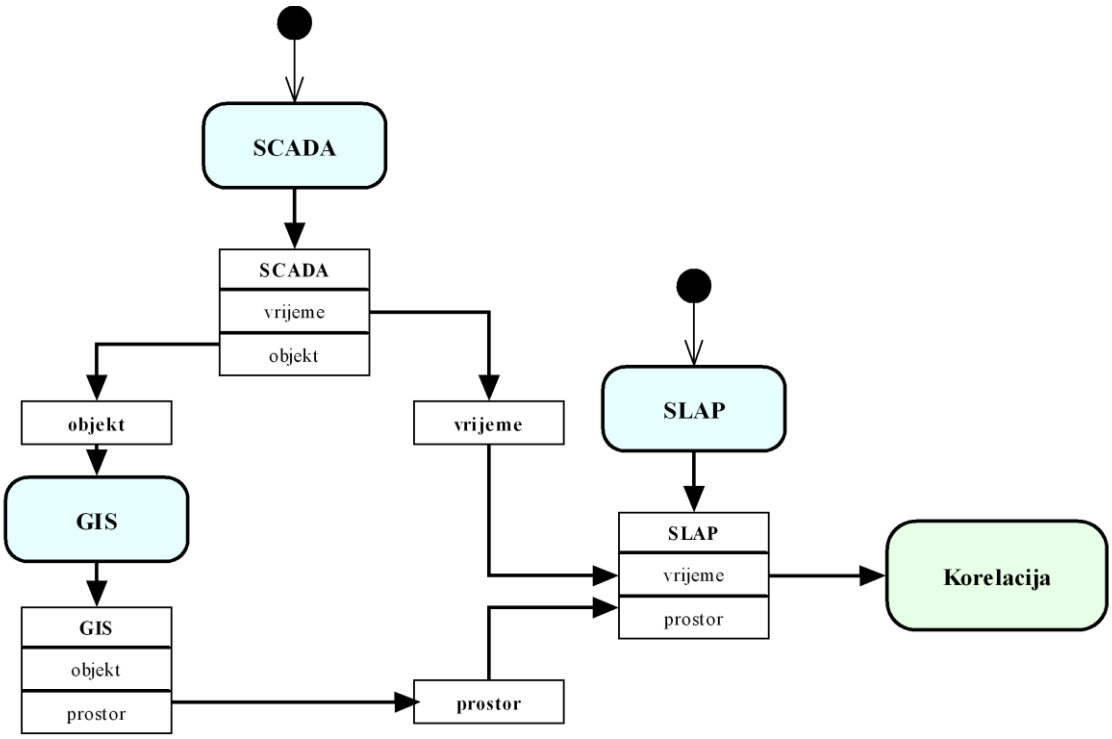
Određivanje vrste kvara slijedi nakon signala pobude, nakon čega uređaj relejne zaštite, ovisno o štićenoj zoni dalekovoda unutar koje je došlo do kvara, o trajanju i vrsti

kvara te ostalim parametrima izdaje ili ne izdaje nalog za isklop prekidača dalekovoda. Nakon zaprimanja signala za isklop, prekidaču je potrebno dodatno vrijeme kako bi razdvojio kontakte i ugasio električni luk između kontakata te na taj način isključio dalekovod iz pogona i odvojio mjesto kvara od ostatka mreže. Signal pobude releja ima znatno kraću vremensku odgodu od signala naloga za isklop prekidača u odnosu na događaj koji je uzrokovao isklop prekidača. Stoga je vrijeme signala pobude releja prikladno za vremensku korelaciju s podacima o vremenu nastanka udara munje registriranim u SLAP sustavu.

Tri su vrste podataka potrebne za provođenje postupka korelacije udara munja s isklopima u prijenosnoj mreži u SLAP sustavu [45]:

- podaci o atmosferskim pražnjenjima (SLAP),
- podaci o događajima u mreži iz sustava vođenja elektroenergetskog sustava (SCADA),
- geografski (GIS) podaci o prijenosnoj mreži.

Pojednostavljena shema postupka korelacije u sustavu SLAP prikazana je na slici 3.20.



Slika 3.20: Pojednostavljena shema procesa korelacije u sustavu SLAP [45]

SLAP sustav u približno stvarnom vremenu prikuplja podatke o atmosferskim pražnjenjima i podatke o događajima u mreži.

Po primitku podataka sustav provodi postupak korelacije kojim se utvrđuje je li događaj u prijenosnoj mreži povezan s atmosferskim pražnjenjem. Dva su glavna postupka u tom procesu:

- prostorna korelacija atmosferskog pražnjenja (lokacija atmosferskog pražnjenja) i prijenosnog voda (geografski podaci o prijenosnom vodu) u prostoru i
- vremenska korelacija atmosferskog pražnjenja (vrijeme udara) i događaja u prijenosnoj mreži (vrijeme nastanka signala).

Preduvjet za prostornu korelaciju je poznavanje geoprostornih podataka objekata prijenosne mreže. SLAP koristi podatke geografskog informacijskog sustava (GIS) koji daju prostorne informacije o položaju stupova i obliku dalekovoda. Prostorni podaci o prijenosnim vodovima (GIS podaci) uneseni su ručno u SLAP sustav te se ne ažuriraju automatski tijekom rada, već se redovito ažuriraju od strane korisnika. Prostorni filter koristi se kao prvi korak u korelacijskom postupku.

Preduvjet za vremensku korelaciju je istovremenost mjerenja vremena sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja i uređaja relejne zaštite. Senzori sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja za točno mjerenje vremena koriste GPS sustav. Uređaji relejne zaštite vremenski su sinkronizirani sa staničnim računalom, koje također koristi GPS sustav mjerenja vremena. Deklarirana točnost GPS sustava mjerenja vremena je ±100 ns, zbog čega je međusobno vremensko odstupanje ova dva sustava u granicama prihvatljivim za vremensku korelaciju podataka.

U [10] je potvrđena učinkovitost vremenske i prostorne korelacije podataka relejne zaštite i podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja. Na primjeru 110 kV nadzemnog voda uspješno je vremenski korelirano 53 događaja, od čega je za 48 događaja (91%) razlika u vremenima između udara munje i detekcije kvara uređajem relejne zaštite iznosila manje od 18 ms. Rezultati usporedbi vremena udara munje i vremena detekcije kvara uređaja relejne zaštite usporedivi su s rezultatima mjerenja vremena pobude uređaja relejne zaštite istog proizvođača [46].

Mjerenje vremena pobude relejnog uređaja provedeno je metodom generacije događaja u poznatom trenutku, pri čemu je testni uređaj korišten kao točni izvor signala, a GPS mjerač točnog vremena za postizanje istovremenosti mjerenja. Rezultati mjerenja vremena pobude relejnog uređaja prikazani su u tablici 3.2.

Tablica 3.2: Rezultati mjerenja vremena pobude

	Δt [ms]
Minimalna vrijednost	5
Maksimalna vrijednost	28
Prosjek	17
Srednja vrijednost	17
Razlika (Maks-Min)	23

Rezultati mjerenja za 21 generirani događaj pokazali su da se vrijeme pobude relejnog uređaja kreće u intervalu 5 do 28 ms nakon nastanka poznatog događaja. Prosječna izmjerena vrijednost vremena pobude iznosi 17,05 ms od poznatog događaja, što odgovara podatku koji deklarira proizvođač uređaja relejne zaštite prema kojemu najkraće vrijeme od nastanka kvara do naloga za isklapanje prekidača (*engl. tripping time*) iznosi približno 17 ms.

Iz provedenih mjerenja može se zaključiti da se atmosfersko pražnjenje, koje uzrokuje djelovanje uređaja relejne zaštite, u najvećem broju slučaja mora dogoditi u vremenu od 5 ms (minimum) i 28 ms (maksimum) prije nastanka pobude relejnog uređaja.

Automatizirani proces vremenske korelacije u SLAP-u ovisi o [42]:

- uspješno provedenoj prostornoj korelaciji,
- preciznosti određivanja vremena udara munje sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja,
- preciznosti određivanja vremena signala relejne zaštite i prekidača,
- valjanosti definiranih signala u SCADA sustavu,
- ispravnosti pridruženih relacija između vodnih polja i geometrija prijenosnih vodova,
- ispravnom preuzimanju događaja iz SCADA sustava,
- parametru najvećeg vremenskog odmaka između udara munje i poticaja zaštitnog releja u vodnom polju i
- parametru najvećeg vremenskog odmaka između poticaja zaštitnog releja i signala uspješnog isklopa prekidača.

S obzirom na sve navedeno, u korelacijskom postupku SLAP-a odabran je parametar vremenskog razmaka od atmosferskog pražnjenja do poticaja zaštitnog releja od 1 sekunde, što se pokazalo kao dovoljno za identifikaciju pojedinačnog atmosferskog pražnjenja kao kandidata za uzrok kvara na vodu. Parametar je postavljen dovoljno široko da pokrije moguća

vremenska odstupanja svih navedenih sustava čiji se podaci koreliraju te kompenzira vrijeme potrebno za djelovanje zaštite.

Parametri prostorne korelacije u SLAP-u postavljeni su na stranu sigurnosti. Širina alarmne zone dva je puta veća od greške lociranja SLAP-a uz postojeću preciznost SLAP i GIS podataka, što osigurava vrlo visoku pouzdanost izvođenja prostorne korelacije.

Primjer 3.3.1 Postupak korelacije podataka o ispadima nadzemnog voda s podacima SLAP-a na primjeru 110 kV nadzemnog voda [10]

Vremenska i prostorna korelacija podataka relejne zaštite i podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja provedena je na primjeru 110 kV nadzemnog voda, čija je trasa zbog specifične geografske lokacije izložena učestalom utjecaju atmosferskih pražnjenja. Uslijed atmosferskih pražnjenja dolazi do čestih ispada promatranog 110 kV nadzemnog voda iz pogona te poremećaja pogona elektroenergetskog sustava i prekida opskrbe električnom energijom. U području u kojem se nalazi trasa promatranog dalekovoda izokeraunička razina iznosi 30-40 grmljavinskih dana.

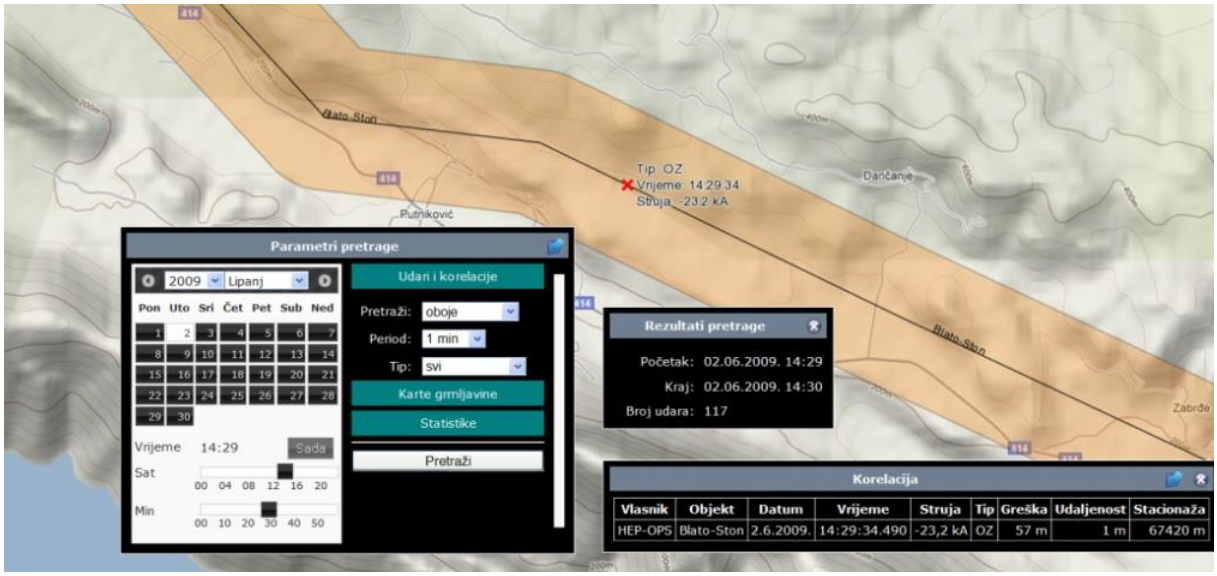
Za potrebe postupka korelacije iz izvještaja o radu relejne zaštite preuzeti su podaci o vremenima nastanka svih događaja, odnosno isključenja i automatskih ponovnih uključenja na promatranom nadzemnom vodu za promatrani vremenski period od 3 godine tijekom kojeg su zabilježene ukupno 82 prorade uređaja relejne zaštite. Iz postupka korelacije izuzeti su oni kvarovi za koje nije bio raspoloživ podatak o točnom vremenu detekcije kvara ili je pretraživanjem u sustavu za lociranje atmosferskih pražnjenja utvrđeno da u vremenu nastanka kvara nisu zabilježena atmosferska pražnjenja u području alarmne zone promatranoga prijenosnog voda. Postupak vremenske korelacije proveden za ukupno 58 kvarova za koje je pretpostavljeno da su uzrokovani atmosferskim pražnjenjima.

Kao preduvjet za prostornu korelaciju određena je alarmna zona s radijusom od 2 km uz trasu nadzemnog voda kako bi se osiguralo da su uzeta u obzir sva atmosferska pražnjenja koja su relevantni kandidati za korelaciju s nastankom kvara. Atmosferska pražnjenja koja su prostorno korelirana unutar alarmne zone dalekovoda, dodatno se analiziraju u odnosu na zadani uvjet vremenske korelacije.

Preduvjet za provođenje vremenske korelacije događaja prorade distantne relejne zaštite na promatranome prijenosnom vodu i atmosferskih pražnjenja je poznavanje točnog vremena nastanka kvara. Za potrebe provođenja vremenske korelacije korištena su vremena

nastanka kvara prema signalima pobude s relejnog uređaja zabilježena u listi događaja u arhivi staničnog računala. Kao kriterij za potvrdu vremenske korelacije između kvara i atmosferskog pražnjenja određena je vremenska razlika od maksimalno 1 sekunde između vremena signala pobude releja i vremena nastanka atmosferskog pražnjenja zabilježenog SLAP-om.

Primjer postupka korelacije za jedan događaj, odnosno ispad promatranog nadzemnog voda iz pogona prikazan je na slici 3.21 i opisan u nastavku.



Slika 3.21: Primjer korelacije između udara munje i prorade relejne zaštite, SLAP

Prema podacima iz relejnog uređaja zabilježenim u listi staničnog računala u transformatorskoj stanici na jednom kraju promatranog 110 kV dalekovoda, kvar koji je prouzrokovao definitivno isključenje u trajanju od 2 minute, detektiran je 02.06.2009. s vremenom signala općeg poticaja releja 14:29:34,521, te je prema signalu funkcije lokacije kvara nastao na 67,508 km promatranog nadzemnog voda. Prema rezultatima pretraživanja sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja u arhivi sustava zabilježeno je atmosfersko pražnjenje u alarmnoj zoni promatranog nadzemnog voda koje je prema zadanom kriteriju moguće korelirati s predmetnom proradom uređaja relejne zaštite. Korelirano pražnjenje je tipa oblak-zemlja, amplitude struje -23,2 kA, s vremenom nastanka 14:29:34,49 na udaljenosti 1 m od linije dalekovoda i locirano na 67,420 km promatranog nadzemnog voda, s mjernom greškom sustava od 57 m. Daljnjom analizom je utvrđena razlika u vremenu između atmosferskog pražnjenja i vremena detekcije kvara od 30 ms te razlika između mjesta nastanka kvara na vodu određenog funkcijom lokacije kvara relejnog uređaja i lokacije

atmosferskog pražnjenja na prijenosnom vodu od 88 m, odnosno 0,1% ukupne duljine promatranoga nadzemnog voda. Rezultati korelacije prikazani su tablici 3.3.

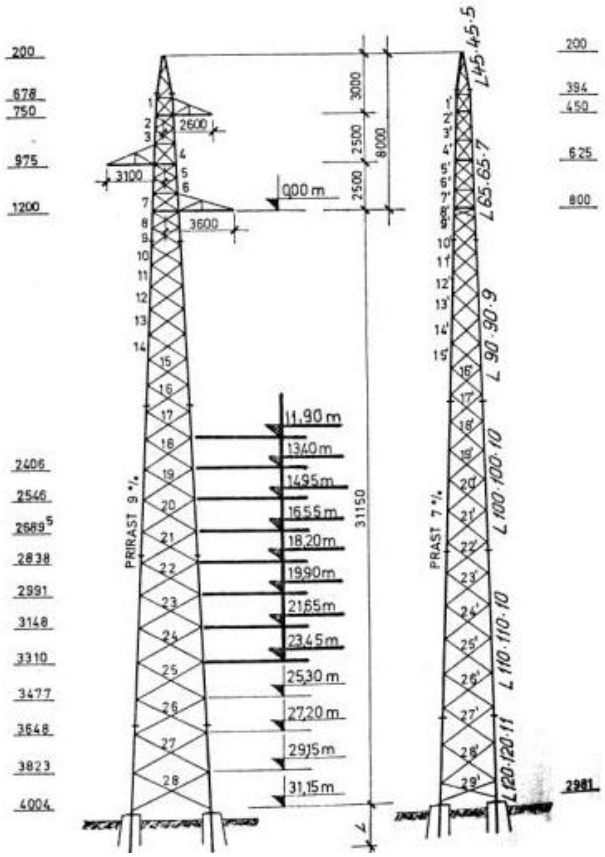
Tablica 3.3: Rezultati korelacije

Datum događaja	02.06.2009.
Vrijeme pražnjenja	14:29:34,490
Opći poticaj releja	14:29:34,521
Δt (pražnjenje – poticaj)	30 ms
Amplituda struje pražnjenja	-23,2 kA
Mjerna greška sustava	57 m
Udaljenost od linije dalekovoda	1 m
Lokacija pražnjenja	67,420 km
Lokacija kvara	67,508 km
Δl (SLAP – relejna zaštita)	0,088 km

Tablica 3.4: Podaci 110 kV promatranog nadzemnog voda

Dalekovod	Jednostruki
Stup	Čelično rešetkasti, tipa "jela"
Duljina	78,573 km
Vodiči	240/40 - Al/Fe
Zaštitni vodič	ACS – OPGW
$\boldsymbol{R_{d1}}$	0,118 Ω/km
$\boldsymbol{X_{d1}}$	0,414 Ω/km
$\boldsymbol{R_{01}}$	0,349 Ω/km
$\boldsymbol{X_{01}}$	1,108 Ω/km

Podaci promatranog nadzemnog voda prikazani su u tablici 3.4. Nosivi 110 kV stup (tipa Nc7-T) prikazan je na slici 3.22. Kritična struja se računa prema izrazu (2.12) i za stup promatranog nadzemnog voda, za koji je iz podataka o nadzemnom vodu utvrđeno da je najbliži udaru munje, iznosi 15,44 kA. S obzirom na to da je amplituda struje munje registrirane sustavom za praćenje atmosferskih pražnjenja veća od izračunate kritične struje, može se pretpostaviti udar munje u zaštitni vodič ili vrh stupa.



Slika 3.22: Nosivi stup Nc7-T

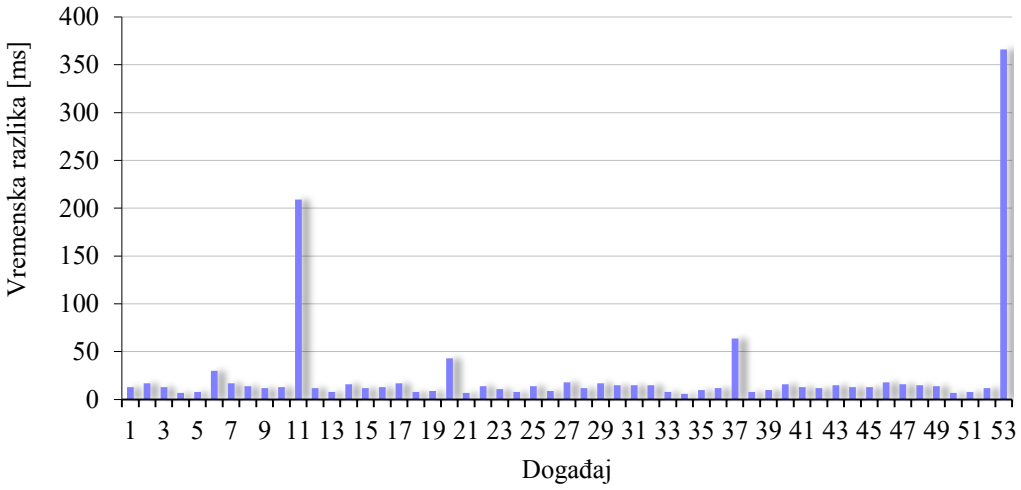
Isti postupak vremenske i prostorne korelacije je ponovljen za sve prorade uređaja relejne zaštite na promatranom nadzemnom vodu za kvarove nastale u promatranom vremenskom razdoblju u trajanju od tri godine.

Postupak vremenske korelacije proveden je za ukupno 58 kvarova zabilježenih na promatranom dalekovodu u promatranome razdoblju prema pogonskim izvještajima relejne zaštite za koje je pretpostavljeno da su uzrokovani atmosferskim pražnjenjima te su analizirani na način opisan u prethodnom poglavlju.

Kriterij maksimalne vremenske razlike od 1 sekunde između vremena u kojem je uređaj relejne zaštite zabilježio kvar, odnosno signal općeg poticaja, i vremena atmosferskog pražnjenja u alarmnoj zoni promatranog dalekovoda nije zadovoljilo 5 analiziranih događaja.

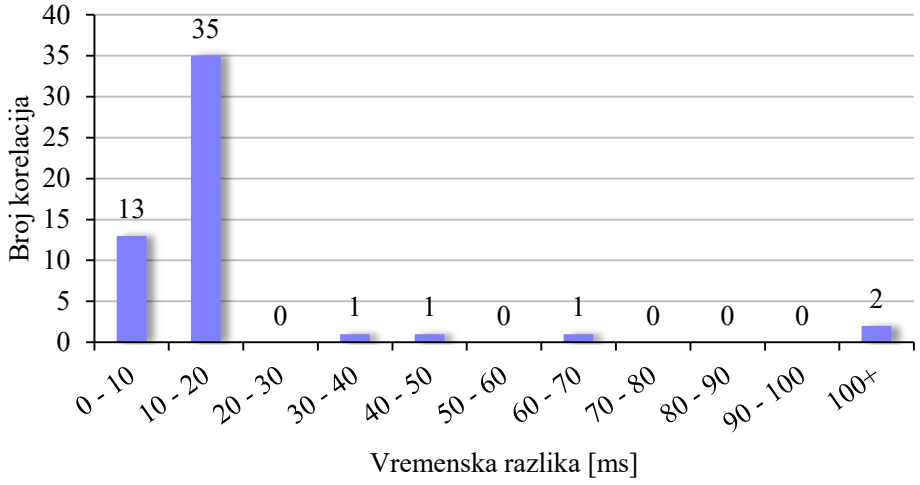
Uspješno je vremenski korelirano 53 događaja prorade uređaja relejne zaštite na promatranom nadzemnom vodu i atmosferskih pražnjenja, što znači da je za te događaje zadovoljen zadani kriterij maksimalne razlike vremena između detekcije kvara na promatranom nadzemnom vodu i vremena nastanka atmosferskog pražnjenja.

Razlike u vremenima od nastanka atmosferskog pražnjenja do registracije kvara uređajima relejne zaštite na nadzemnom vodu na kojemu je došlo do kvara uzrokovanog atmosferskim pražnjenjem iznose od 6 ms do 366 ms pri čemu su samo tri vrijednosti razlike u vremenima iznad 50 ms (slika 3.23). Srednja vrijednost razlike u vremenima iznosi 13 ms.



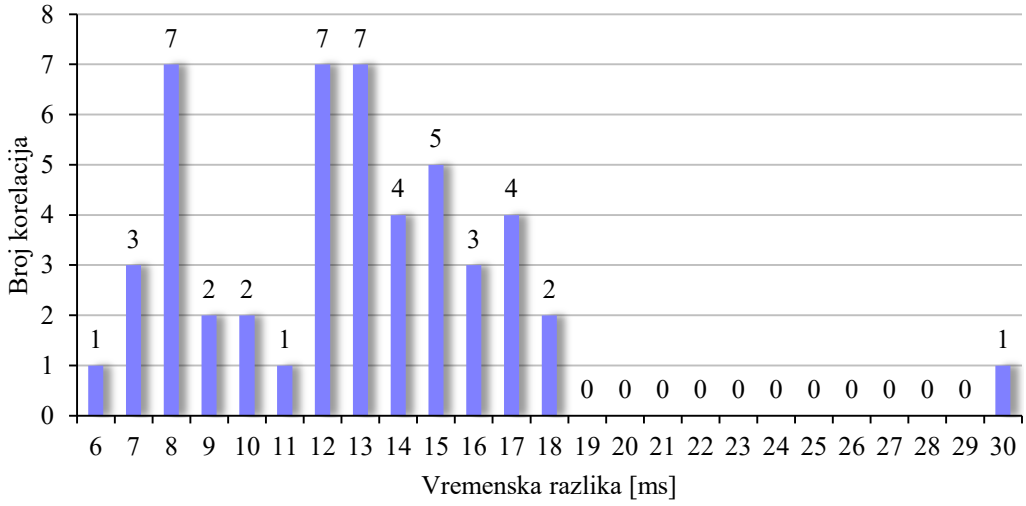
Slika 3.23: Razlike u vremenima koreliranih atmosferskih pražnjenja i kvarova

Raspodjela koreliranih događaja prema razlikama u vremenima prikazana je na slici 3.24 na kojoj se vidi da većina koreliranih događaja ima razliku u vremenima nastanka atmosferskog pražnjenja i vremena registracije kvara između 10 ms i 20 ms.



Slika 3.24: Broj korelacija prema razlikama u vremenima atmosferskih pražnjenja i kvarova

Na slici 3.25 prikazana je raspodjela koreliranih događaja prema razlikama u vremenima do 30 ms.



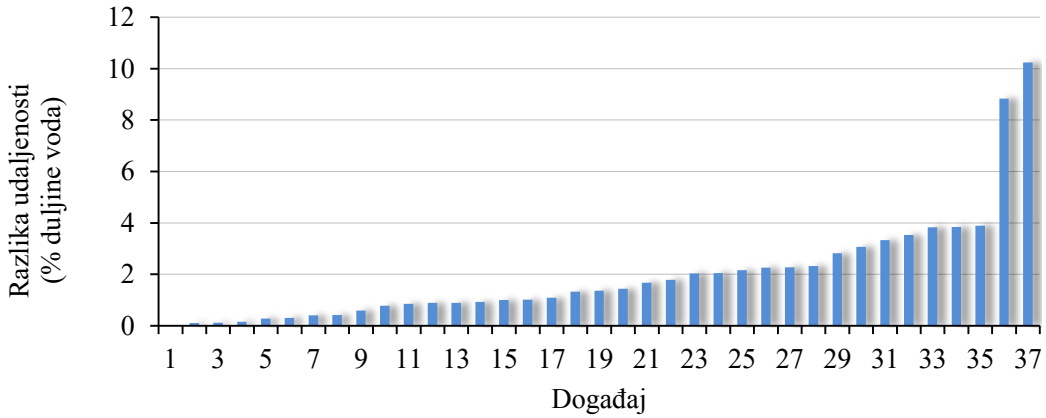
Slika 3.25: Broj korelacija prema razlikama u vremenima atmosferskih pražnjenja i kvarova

Može se zaključiti da za 48 od 53 uspješno vremenski korelirana događaja (91%) razlika u vremenima između nastanka atmosferskog pražnjenja i registracije kvara uređajem relejne zaštite iznosi do 18 ms.

Rezultati usporedbi vremena nastanka atmosferskih pražnjenja i registracije kvarova uređajem relejne zaštite usporedivi su s prethodno opisanim mjerenjima vremena pobude uređaja relejne zaštite istog proizvođača [46].

Za 37 vremenski koreliranih atmosferskih pražnjenja i kvarova, za koje je u listama staničnog računala bio dostupan podatak rezultata funkcije lokacije kvara uređaja relejne zaštite o udaljenosti kvara na promatranom nadzemnom vodu, izvršen je postupak prostorne korelacije. Prostorna korelacija je provedena usporedbom udaljenosti mjesta kvara na vodu određene funkcijom lokacije kvara relejnog uređaja i mjesta udara munje na promatranom nadzemnom vodu određenog Sustavom za lociranje atmosferskih pražnjenja.

Rezultati prostorne korelacije, kao postotne razlike udaljenosti mjesta kvara na prijenosnom vodu određenog funkcijom lokacije kvara i mjesta udara munje na vodu određenog Sustavom za lociranje atmosferskih pražnjenja u odnosu na ukupnu duljinu voda, su pokazali da razlika udaljenosti mjesta kvara i atmosferskog pražnjenja na vodu iznosi od 0,01 % do 10,2%, dok za najveći broj vremenski koreliranih kvarova razlika udaljenosti iznosi 1-2 % ukupne duljine promatranoga nadzemnog voda, pri čemu je srednja vrijednost razlike udaljenosti 1,37% ukupne duljine voda. Rezultati prostorne korelacije prikazani su na slici 3.26.



Slika 3.26: Razlike udaljenosti mjesta nastanka kvara i atmosferskog pražnjenja

Postupak prostorne korelacije atmosferskih pražnjenja i kvarova na nadzemnom vodu proveden je uz određena ograničenja te rezultati prikazani kao razlika udaljenosti između mjesta kvara i udara munje u sebi sadrže grešku funkcije lokacije kvara relejnog uređaja i grešku sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja. Na točnost izračuna mjesta nastanka kvara funkcijom lokacije kvara relejnog uređaja utječe više faktora kao što su greška u struji i naponu mjernih transformatora, nesigurnost konstanti voda, djelovanje neprepletenih nadzemnih vodova ili promjenjiva konfiguracija mreže [44]. Promatran nadzemni vod i najbliži senzori sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja locirani su u priobalnom području. Obzirom da senzori mjere magnetski tok kao funkciju vremena [2], na rezultate lociranja mjesta atmosferskih pražnjenja utječu različite vodljivosti (kopna i mora) i s tim povezane brzine rasprostiranja elektromagnetskog vala.

Rezultati postupka prostorne korelacije, odnosno utvrđena srednja vrijednost razlike udaljenosti između rezultata funkcije lokacije kvara uređaja relejne zaštite i podatka o mjestu nastanka atmosferskog pražnjenja iz SLAP-a, potvrdili su međusobnu povezanost vremenski koreliranih atmosferskih pražnjenja i kvarova. Provedenim postupkom korelacije potvrđeno je da podatak o lokaciji atmosferskog pražnjenja može poslužiti kao informacija o mjestu nastanka kvara na nadzemnom vodu. U primjeru je pokazano kako je postupak vremenske i prostorne korelacije između podataka o ispadima nadzemnih vodova iz sustava relejne zaštite i podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja moguće koristiti za potrebe analize ispada nadzemnog voda uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima odnosno za utvrđivanje stvarnog broja ispada nadzemnog voda uslijed atmosferskih pražnjenja.

4. Primjena odvodnika prenapona na dalekovodu

4.1. Odvodnici prenapona

Odvodnici prenapona su značajno sredstvo prenaponske zaštite u elektroenergetskom sustavu. Koriste se za zaštitu opreme od prenapona u elektroenergetskim postrojenjima, a u novije vrijeme sve više i na nadzemnim vodovima.

Prenaponi koji se javljaju uslijed atmosferskih pražnjenja mogu uzrokovati preskoke, oštetiti opremu u postrojenjima elektroenergetskog sustava te ugroziti sigurnost opskrbe krajnjih kupaca električne energije.

Koordinacija izolacije predstavlja izbor izolacijskih svojstava opreme obzirom na napone koji se mogu pojaviti na mjestu ugradnje, uzimajući u obzir atmosferske uvjete i karakteristike prenaponske zaštite. Mjere koje se mogu koristiti za smanjenje broja povratnih preskoka na izolatorskim lancima uslijed atmosferskih pražnjenja i poboljšanje prenaponskih karakteristika visokonaponskih vodova, kako već izgrađenih, tako i na novim vodovima u fazi projektiranja i izgradnje [47]:

- smanjenje otpora uzemljivača stupa i izbor odgovarajućih uzemljivačkih sustava,
- povećanje izolacijske razine voda,
- ugradnja odvodnika prenapona na stupove nadzemnog voda paralelno izolatorskim lancima.

Smanjenje otpora uzemljivača stupova značajno utječe na smanjenje broja povratnih preskoka zbog efekta reflektiranih valova suprotnog predznaka na smanjenje početnog naponskog vala, a postiže se:

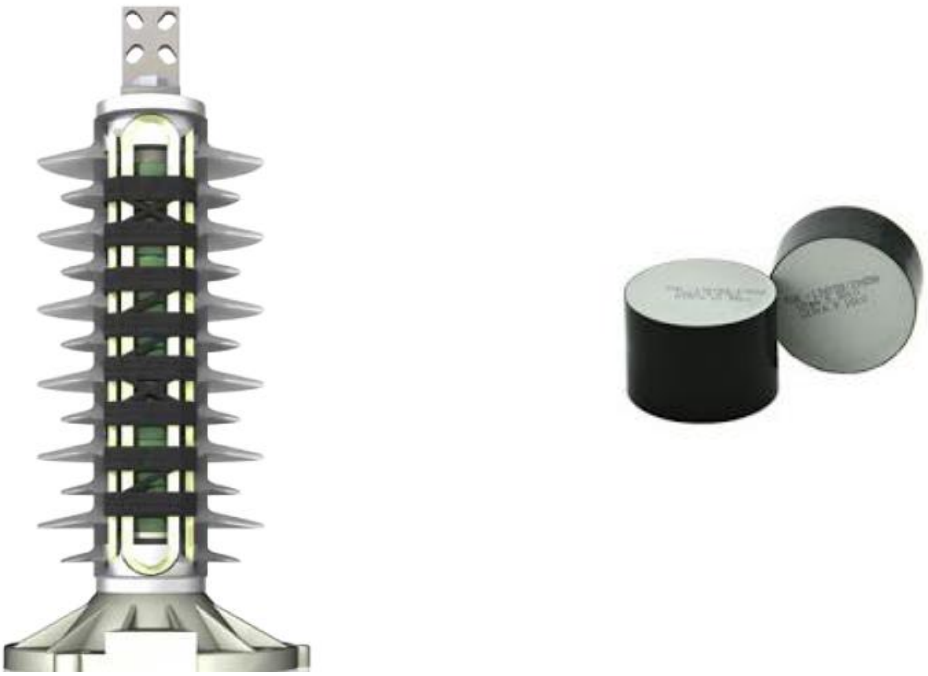
- zahvatima na konstrukciji uzemljivača stupa kao što su dodavanje dodatnih štapnih uzemljivača, ukapanje uzemljivačkih vodiča koji se zrakasto šire od stupa, izvedba odgovarajuće uzemljivačke mreže ili povezivanje uzemljivača stupova,
- dodavanjem različitih emulzija ili materijala u cilju smanjenja specifičnog otpora tla.

Stupovi koji su najviše izloženi atmosferskim pražnjenjima najčešće su locirani u područjima s vrlo visokim specifičnim otporom tla, gdje je vrlo teško ili nemoguće postići zadovoljavajući otpor uzemljivača stupova.

Povećanje izolacijske razine postojećeg nadzemnog voda moguće je izvesti prilikom rekonstrukcije, a postiže se dodavanjem određenog broja novih izolatorskih članaka ili kompletnom zamjenom izolatora, odnosno ugradnjom polimernih izolatora. Ova mjera ima relativno ograničen efekt i teško je izvediva zbog prostornih ograničenja te propisanih sigurnosnih visina i udaljenosti.

Razvojem tehnologije metal oksidnih odvodnika prenapona s polimernim kućištem u novije vrijeme postignuto je da odvodnici prenapona zbog svoje težine ne izazivaju značajnija dodatna mehanička naprezanja konstrukcije stupova čime je omogućena primjena odvodnika prenapona na stupovima u svrhu poboljšanja prenaponske karakteristike nadzemnih vodova.

Odvodnici prenapona na nadzemnom vodu imaju funkciju smanjenja broja preskoka na izolatorskim lancima, poboljšanja prenaponske zaštite transformatorskih stanica, ograničenja sklopnih prenapona te kompaktiranja nadzemnih vodova i iskorištenja postojećih trasa za prelazak na višu naponsku razinu. Odvodnici na nadzemnom vodu eliminiraju ili bitno smanjuju broj trajnih ispada što rezultira većom raspoloživošću i pouzdanošću pogona elektroenergetskog sustava, produženjem životnog vijeka opreme u elektroenergetskom sustavu te boljom kvalitetom električne energije.



a) b)

Slika 4.1: Metal oksidni odvodnik prenapona: a) presjek i b) metal oksidni blok

Metal oksidni (MO) ili cink oksidni (ZnO) odvodnici sadrže cilindrične metal oksidne blokove o čijem broju ovisi nazivni napon odvodnika, a smješteni su u hermetički zatvorenom

porculanskom ili polimernom, odnosno silikonskom kućištu (slika 4.1). Na nadzemne vodove ugrađuju se odvodnici prenapona s kućištem od silikonske gume zbog manje mase i bolje otpornosti na onečišćenja i ostale utjecaje iz okoliša. Metal oksidni blok je najvažniji dio svakog odvodnika prenapona, a sastoji se 90 % od zrnaca cink-oksida i približno 10 % aditiva, poput bizmut-oksida Bi_2O_3, magnezij-oksida i drugih, ukupno 9 aditiva. Metal oksidni blokovi imaju izrazito nelinearnu strujno-naponsku karakteristiku.

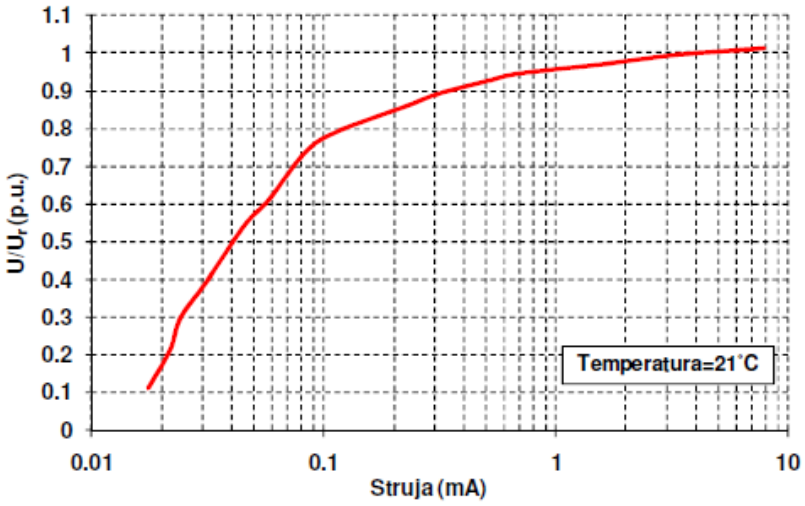
Odvodnike prenapona moguće je klasificirati na različite načine, prema nazivnom naponu sustava, vrsti kućišta, primjeni itd. Odvodnici prenapona koji se ugrađuju na nadzemne vodove dijele se na odvodnike prenapona bez iskrišta i odvodnike prenapona s vanjskim serijskim iskrištem.

Odvodnik prenapona s vanjskim iskrištem (*engl. externally gapped line arrester* - EGLA) sastoji se od dva dijela: aktivnog dijela, odnosno metal oksidnog odvodnika prenapona s polimernim ili porculanskim kućištem i vanjskim iskrištem spojenim u seriju. U normalnom pogonu, aktivni dio je odspojen od napona nadzemnog voda pomoću serijskog iskrišta te nije trajno izložen djelovanju nazivnog napona. U slučaju prenapona uzrokovanog atmosferskim pražnjenjem, bilo izravno u nadzemni vod ili u sustav uzemljenja, odvodnik prorađuje i dolazi do preskoka na iskrištu.

Odvodnik prenapona bez iskrišta (*engl. gapless line arrester* - NEGLA) s metal oksidnim blokovima je fizički spojen na fazni vodič. Metal oksidni blokovi ograničavaju prenapon na izolatorskom lancu. U slučaju kvara odvodnika prenapona, prorađuje diskonektor, naprava za vidljivo odvajanje strujnog mosta od odvodnika. Za odvodnike prenapona bez iskrišta karakteristična je jednostavna ugradnja i pouzdanost u pogonu. Ovisno o izvedbi stupa nadzemnog voda i rasporedu vodiča i izolatorskih lanaca, odvodnici prenapona mogu se ugraditi ili na stup ili na izolatorske lance.

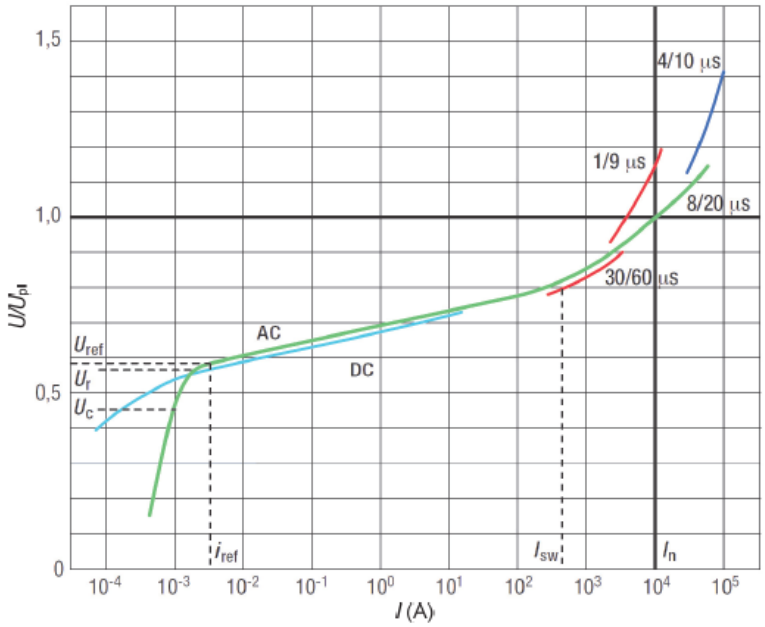
Odvodnici prenapona se ponašaju kao nelinearni otpornici čija se vrijednost mijenja ovisno o amplitudi narinutog napona. Odvodnici prenapona trebaju štititi opremu na način da što učinkovitije ograničavaju atmosferske i sklopne prenapone ispod razine podnosivog napona opreme, a da se pri tome energetski ne preopterete uslijed privremenih prenapona.

Prosječna U-I_R karakteristika odvodnika prenapona određena je vršnim vrijednostima dinamičkih U-I_R karakteristika pri različitim vrijednostima napona (slika 4.2).



Slika 4.2: Prosječna U-I_R karakteristika odvodnika prenapona

Na slici 4.3 prikazane su nelinearne naponsko-strujne (U-I) karakteristike odvodnika prenapona snimljene pri različitim strujnim impulsima. Karakteristike odvodnika snimaju se pri izmjeničnom i istosmjernom naponu, te strujnim impulsima kojima se simuliraju uvjeti atmosferskih (8/20 μs i 4/10 μs) i sklopnih (30/60 μs) prenapona. Karakteristiku odvodnika je moguće snimiti i pri strmom strujnom impulsu (1/9 μs) kojim se simuliraju pojave povratnog preskoka i sklopne operacije vakuumskim prekidačima ili rastavljačima.



Slika 4.3: U-I karakteristike odvodnika prenapona [48]

Na slici 4.3 označeni su osnovni parametri odvodnika:

- U_c - trajni radni napon, maksimalno dozvoljena efektivna vrijednost napona nazivne frekvencije koji može biti trajno narinut između priključaka odvodnika,
- U_r - nazivni napon predstavlja maksimalno dozvoljenu efektivnu vrijednost napona, nazivne frekvencije, ograničenog trajanja (10 s), koji se može narinuti između priključaka odvodnika prenapona nakon što je odvodnik apsorbirao dozvoljeni (nazivni) iznos energije,
- I_n - nazivna struja odvodnika prenapona, tjemena vrijednost impulsne (udarne) struje oblika 8/20 μs,
- U_{pl} - amplituda preostalog napona pri nazivnoj struji odvodnika prenapona,
- I_{ref} - referentna struja, vršna vrijednost radne komponente struje u radnoj točki koja se nalazi iznad koljena *U-I* karakteristike, a u kojoj je radna komponenta struje veća od kapacitivne,
- U_{ref} - referentni napon, tjemena vrijednost napona pogonske frekvencije pri kojem kroz odvodnik teče referentna struja.

4.2. Odabir parametara odvodnika prenapona

Da bi se učinkovito ograničili prenaponi u elektroenergetskom sustavu potrebno je odabrati odgovarajuće parametre odvodnika prenapona, tj. nazivni napon i energetsku klasu, odnosno energetsku podnosivost, te odrediti lokaciju ugradnje odvodnika. Odvodnici prenapona trebaju štititi opremu na način da što učinkovitije ograničavaju atmosferske i sklopne prenapone ispod razine podnosivog napona opreme, a da se pri tome energetski ne preopterete uslijed privremenih prenapona.

Izbor parametara odvodnika prenapona predstavlja kompromis u zadovoljenju sljedećih zahtjeva: što veća otpornost u odnosu na privremene prenapone, što bolje zaštitne karakteristike (niži preostali napon), što veća sposobnost apsorpcije energije (veća energetska podnosivost) i što niža cijena. Povećanjem energetske podnosivosti i otpornosti odvodnika na privremene prenapone smanjuje se vjerojatnost da dođe do uništenja odvodnika, ali odvodnik slabije štiti opremu (veći preostali napon).

Pojednostavljeni iterativni postupak odabira električnih parametara odvodnika prenapona obuhvaća sljedeće postupke [49], [50]:

- određivanje trajnog radnog napona odvodnika prenapona U_c prema najvišem naponu mreže,
- određivanje nazivnog napona odvodnika prenapona U_r na temelju privremenih prenapona koji se mogu javiti u mreži na mjestu ugradnje odvodnika prenapona,
- odabir nazivne odvodne struje odvodnika prenapona I_n i energetske sposobnosti odvodnika prenapona prema IEC standardima,
- provjera zaštitne razine obzirom na sklopne i atmosferske prenapone,
- izračun energetskog opterećenja odvodnika prenapona obzirom na atmosferski i sklopni podnosivi napon,
- ako su rezultati izračuna energetskog opterećenja zadovoljavajući, postupak odabira je završen, u suprotnom je potrebno odabrati odvodnik prenapona više energetske sposobnosti i ponoviti postupak.

Odabir mehaničkih karakteristika odvodnika prenapona podrazumijeva odabir strujne staze obzirom na očekivanu razinu onečišćenja i atmosferskih utjecaja iz okoline, odabir dimenzija odvodnika obzirom na očekivanu struju kvara te dozvoljenog mehaničkog opterećenja obzirom na težinu spojne opreme i očekivane posebne uvjete na lokaciji na kojoj će odvodnici biti instalirani, kao što su jak vjetar ili seizmičke aktivnosti.

4.3. Trajni radni napon i nazivni napon odvodnika prenapona

Trajni radni napon odvodnika prenapona se odabire prema nazivnom naponu sustava na način da bude viši ili jednak stvarnom trajnom radnom naponu odvodnika, odnosno mrežnom faznom naponu [49]:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \tag{4.1}$$

gdje je U_m najviši dopušteni trajni radni napon sustava prema nazivnom stupnju izolacije Si. U praksi se uobičajeno odabire:

$$U_c = 1{,}05\ \frac{U_m}{\sqrt{3}} \tag{4.2}$$

Pri određivanju nazivnog napona odvodnika prenapona posebnu pažnju treba obratiti na energetsko opterećenje odvodnika kako pri privremenim, tako i pri atmosferskim te pri sklopnim prenaponima. Aktivni metal oksidni dio odvodnika prenapona mora izdržati privremene, sklopne i atmosferske prenapone koji se mogu pojaviti u mreži. Za optimalan odabir nazivnog napona odvodnika potrebno je što je moguće točnije poznavati vrijednosti i trajanje privremenih prenapona koji se mogu pojaviti na mjestu ugradnje odvodnika prenapona.

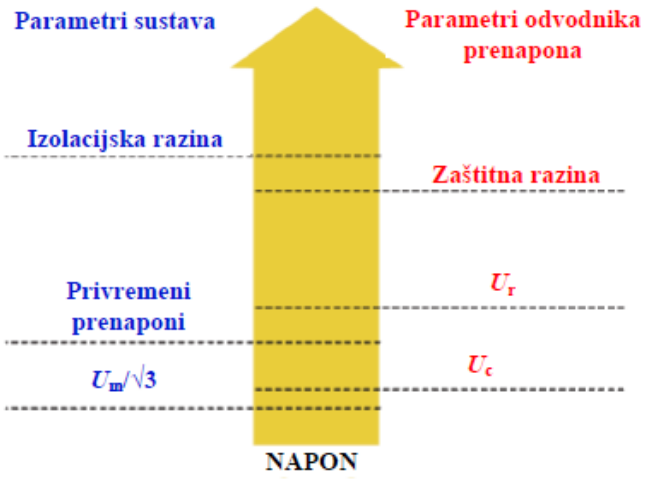
Za odvodnike prenapona na nadzemnom vodu, budući da su bliže mjestu pražnjenja, struje atmosferskih pražnjenja i odgovarajuća energija pražnjenja mogu biti značajno više nego za odvodnike u postrojenjima, dok su struje sklopnih impulsa nižih iznosa. Struje kroz odvodnike prenapona ovise o efikasnosti štićenja voda i uvjetima uzemljenja stupova.

Prema normi [49] nazivni napon odvodnika U_r treba biti jednak ili veći od najvećeg ekvivalentnog privremenog prenapona koji se može pojaviti u mreži. U praksi se uobičajeno odabire:

$$U_r = 1{,}25\, U_c \tag{4.3}$$

Moguće je izabrati i odvodnik s nižim nazivnim naponom u slučaju kada je potrebno ostvariti bolju prenaponsku zaštitu. U tom slučaju je potrebno napraviti proračun energetskog opterećenja odvodnika pri privremenim prenaponima. Potrebno je izabrati odvodnik s minimalnim nazivnim naponom i energetskom klasom koji će učinkovito ograničiti sklopne i atmosferske prenapone, a da se pri tome energetski ne preoptereti uslijed privremenih prenapona [51]. U slučajevima kada je povećana opasnost od atmosferskih prenapona, posebno je važno postići što je moguće nižu zaštitnu razinu odvodnika.

Slika 4.4 prikazuje odnos parametara odvodnika i elektroenergetskog sustava u ovisnosti o naponu gdje je U_c trajni radni napon odvodnika, U_r nazivni napon odvodnika, a U_m nazivni napon mreže [50].



Slika 4.4: Prikaz parametara odvodnika i sustava u ovisnosti o veličini napona

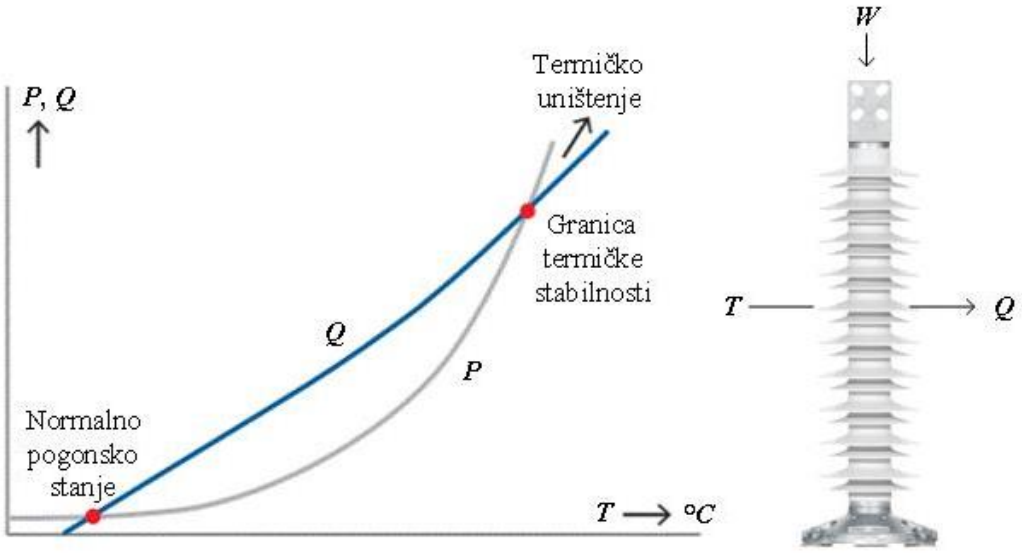
4.4. Energetska sposobnost odvodnika prenapona

Energetska sposobnost (eng. energy capability) odvodnika odnosi se na energiju koju odvodnik može apsorbirati u jednom ili više strujnih impulsa bez oštećenja i bez gubitka termičke stabilnosti. Energetska sposobnost odvodnika prenapona ovisi o vrsti, trajanju i broju strujnih impulsa. Postoje dvije vrste energetske sposobnosti MO odvodnika prenapona [52]:

- energetska sposobnost jednog impulsa,
- termička energetska sposobnost.

Energetska sposobnost jednog impulsa definira se kao maksimalna energija koju odvodnik može podnijeti u trajanju od 4 ms ili duže, a da pri tom ostane termički stabilan na nazivnom naponu U_r u trajanju od 10 s i trajnom radnom naponu U_c u trajanju od 30 min. Injektirana energija uzrokuje vrlo brzi porast temperature MO blokova, pojavu velikih vlačnih i tlačnih sila te „vrućih vodljivih kanala“ koji se formiraju na mjestima najveće gustoće struje. Ovo može dovesti do vanjskog preskoka ili mehaničkih oštećenja MO blokova. Navedeni efekti posljedica su nehomogenosti MO blokova koja se u tehnološkom procesu proizvodnje ne može izbjeći. Energija jednog impulsa je karakteristika MO blokova, a ne ostalih dijelova odvodnika kao što su konstrukcija ili kućište.

Termička energetska sposobnost (eng. thermal energy handling capability) definira se kao maksimalna energija pri kojoj se odvodnik može ohladiti na normalnu pogonsku temperaturu, a određena je granicom termičke stabilnosti odvodnika (slika 4.5).



Slika 4.5: Termička stabilnost odvodnika [48]

Oznake na slici 4.5 predstavljaju kako slijedi: W energija, P snaga električnih gubitaka, Q disipacija topline, te T temperatura.

Slika 4.5 prikazuje krivulje zagrijavanja, odnosno snage električnih gubitaka, i hlađenja, odnosno disipacije topline, odvodnika prenapona. Pri trajnom radnom naponu U_c odvodnik se nalazi u stabilnoj radnoj točki (normalno pogonsko stanje). Nakon pojave prenapona dolazi do zagrijavanja i porasta temperature odvodnika. Ako je temperatura veća od granice termičke stabilnosti (nestabilna radna točka), hlađenje nije dovoljno da disipira zagrijavanje pa se odvodnik nastavlja zagrijavati, nakon čega dolazi do termičkog uništenja. Termička energetska sposobnost ovisi o konstrukciji odvodnika prenapona te električnim karakteristikama i starosti MO blokova, kao i električnim naprezanjima u stvarnom pogonu, materijalu kućišta (porculan ili silikon) i dimenzijama.

Klasifikacija odvodnika prenapona prema najnovijem izdanju međunarodne norme za odvodnike prenapona [53] izmijenjena je u odnosu na prethodna izdanja norme. Proizvođači opreme u katalozima najčešće specificiraju odvodnike prenapona u skladu s oba načina klasifikacije [50].

Prema prethodnom izdanju norme definirana je energetska klasa odvodnika s obzirom na termičku stabilnost.

Izraz za energiju odvodnika prenapona pri sklopnim operacijama glasi:

$$E = 2 \cdot U_{ps} \cdot \left(U_s - U_{ps}\right) \cdot \frac{t_v}{Z_v} \tag{4.4}$$

gdje je E energetsko opterećenje odvodnika prenapona, U_{ps} preostali napon odvodnika s obzirom na sklopne prenapone, U_s amplituda očekivanog sklopnog prenapona na mjestu ugradnje odvodnika (može se procijeniti prema normi [54]), Z_v valna impedancija nadzemnog voda i t_v vrijeme širenja putnog vala.

Vrijeme širenja putnog vala se računa iz izraza:

$$t_v = \frac{l}{v} \tag{4.5}$$

gdje je l duljina dalekovoda i v brzina širenja putnog vala.

Energetsko opterećenje odvodnika prenapona pri atmosferskim prenaponima može se procijeniti iz izraza [49]:

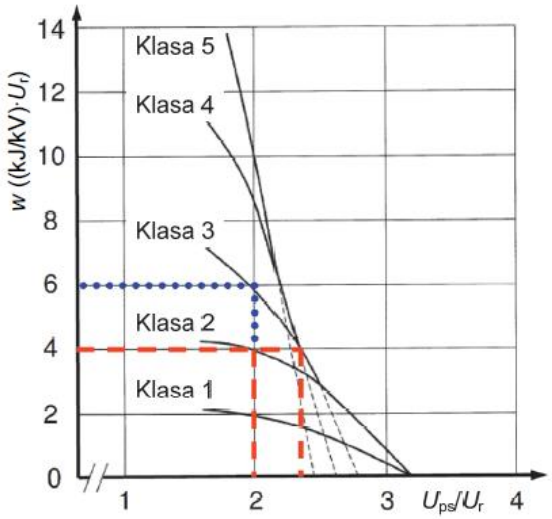
$$E = \left[2 \cdot U_{pr} - N \cdot U_{pl} \cdot \left(1 + \ln\left(\frac{2 \cdot U_{pr}}{U_{pl}}\right)\right)\right] \cdot \frac{U_{pl} \cdot T_l}{Z_v} \tag{4.6}$$

gdje je U_{pl} preostali napon odvodnika s obzirom na atmosferske prenapone, U_{pr} negativni preskočni napon izolatorskog lanca, N broj nadzemnih vodova u točki priključka odvodnika i T_l ekvivalentno trajanje struje atmosferskog pražnjenja (uključuje prvi udar i uzastopne udare).

Ovaj izraz može se koristiti samo kao gruba procjena energetskog opterećenja odvodnika prenapona. Za točnije određivanje energetskog opterećenja potrebno je detaljno modelirati odvodnik prenapona i okolnu mrežu te provesti opsežne proračune atmosferskih prenapona. Metode odabira prenaponske zaštite temeljene na modelu odvodnika prenapona za proračun energetskog opterećenja pri privremenim prenaponima i detaljnim proračunima prenapona i energetskog opterećenja odvodnika prenapona predložene su u [55], [56], [57], [58], [59].

Energetska klasa odvodnika prenapona određena prema prethodnom izdanju norme predstavlja procjenu naprezanja odvodnika uslijed sklapanja, odnosno očekivane vrijednosti

energije koju odvodnik može apsorbirati. Slika 4.6 prikazuje specifično energetsko opterećenje w (u kJ/kV od nazivnog napona U_r) odvodnika u ovisnosti o omjeru preostalog sklopnog napona U_{ps} i efektivne vrijednosti nazivnog napona odvodnika U_r.



Slika 4.6: Specifično energetsko opterećenje w [kJ/kV] odvodnika prenapona

Energetsko opterećenje nije konstantno nego ovisi o preostalom naponu odvodnika prenapona U_{ps} pri sklopnim prenaponima. Što je viši preostali napon na odvodniku, manje je energetsko opterećenje odvodnika. Odvodniku prenapona s određenim specifičnim energetskim opterećenjem w odgovaraju različite energetske klase ovisno o preostalom naponu, što predstavlja problem vezan uz definiciju energetske klase iz razloga što „bolji“ odvodnik, odnosno odvodnik više energetske klase može biti lošiji izbor zbog lošije zaštitne razine i višeg preostalog napona.

Klasifikacija odvodnika prenpona prema specifičnom energetskom opterećenju i nazivnoj struji prikazana je u tablici 4.1 [49].

Tablica 4.1: Klasifkacija odvodnika prenapona

Klasa	**-/-**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
I_n [kA]	5	10	10	10	20	20
I_{hc} [kA]	65	100	100	100	100	100
I_{sw} [A]	-/-	125 i 500	125 i 500	250 i 1000	500 i 2000	500 i 2000

Oznake u tablici 4.1 su I_n nazivna struja odvodnika prenapona, I_{hc} kratkotrajna udarna podnosiva struja (4/10 µs) i I_{sw} udarna podnosiva struja dugog trajanja (2000 µs).

Važeće izdanje norme [53] odvodnike prenapona klasificira prema namjeni i prema nazivnoj struji odvođenja. Prema namjeni odvodnici prenapona mogu biti:

- distribucijski (*engl. Distribution*) odvodnici prenapona (IEC oznake: DL, DM, DH) čija je namjena zaštita opreme od utjecaja astmosferskih pražnjenja u sustavima nazivnog napona distribucijske razine, uobičajeno nazivnog napona ≤ 52 kV,
- prijenosni (*engl. Station*) odvodnici prenapona (IEC oznake: SL, SM, SH) čija je namjena zaštita opreme od utjecaja astmosferskih pražnjenja u sustavima viših naponskih razina, uobičajeno nazivnog napona ≥ 72,5 kV.

Prijenosni odvodnici prenapona nazivne struje odvođenja 10 i 20 kA dalje se klasificiraju prema energetskoj sposobnosti koja je određena sljedećim karakteristikama [53]:

- sposobnost uzastopnih provođenja naboja (*engl. Repetitive charge transfer rating*) Q_{rs}, - maksimalni preneseni naboj odvodnika prenapona, u formi jednog ili više impulsa, koji odvodnik prenapona može provesti, a da se pritom ne ošteti mehanički niti da dođe do degradacije električnih karakteristika MO otpornika,
- termička energetska sposobnost (*engl. Thermal energy rating*) W_{th} – maksimalna energija zadana u kJ/kV od nazivnog napona U_r koja može biti injektirana u odvodnik prenapona ili MO blok u trajanju od 3 minute pri testiranju termalnog oporavka bez da uzrokuje termičko uništenje.

S obzirom na energetsku sposobnost, prijenosni odvodnici mogu biti tipa SL, SM ili SH, a slova „L“, „M“ i „H“ označavaju nisku (*engl. Low*), srednju (*engl. Medium*) i visoku (*engl. High*) energetsku sposobnost [50].

Primjer klasifikacije odvodnika prenapona prema energetskoj sposobnosti i naponskoj razini sustava od strane proizvođača prikazan je u tablici 4.2 [50].

Tablica 4.2: Klasifikacija odvodnika prenpona

Klasa odvodnika	**Energetska podnosivost**		**Napon sustava**
	W_{th} **[kJ/kV(U_r)]**	Q_{rs} **[C]**	
SL	5	1,2	≤ 170 kV
	5	1,2	≤ 145 kV
SM	8	2,0	≤ 245 kV
	8	2,0	170 – 420 kV
	8	2,0	≤ 420 kV
	8	2,0	123 – 420 kV
SH	11	3,2	≤ 550 kV
	11	3,2	≤ 420 kV
	11	3,2	300 – 500 kV
	11	3,2	245 – 550 kV
	15	5,2	245 – 800 kV

4.5. Zaštitna razina odvodnika prenapona

U svrhu koordinacije izolacije potrebno je provjeriti prihvatljivost zaštitne razine odvodnika prenapona s obzirom na atmosferske (U_{pl}) i sklopne (U_{ps}) prenapone. Zaštitna razina s obzirom na atmosferske prenapone provjerava se za struju odvođenja 10 kA za naponske razine do 362 kV i za 20 kA za više naponske razine. Zaštitna razina s obzirom na sklopne prenapone provjerava se za struje od 0.5 kA (za naponske razine do 170 kV) do 2 kA (za naponske razine iznad 362 kV). Prihvatljive zaštitne razine odvodnika prenapona navedene su u katalozima proizvođača ili se računaju u odnosu na nazivni napon odvodnika prenapona prema uputama proizvođača [50].

4.6. Iskustva u primjeni odvodnika prenapona

S ciljem poboljšanja prenaponske zaštite te smanjenja razine učestalosti ispada iz pogona zbog djelovanja atmosferskih pražnjenja u novije vrijeme nadzemni vodovi se opremaju odvodnicima prenapona [60], [61], [62], [63], [64]. U nastavku su opisana dva primjera primjene odvodnika prenapona te iskustva u pogonu nadzemnih vodova nakon ugradnje odvodnika prenapona. Posebno je od interesa usporedba podataka o broju ispada

nadzemnog voda iz pogona u odnosu na broj atmosferskih pražnjenja u neposrednoj okolini nadzemnog voda prije i nakon ugradnje odvodnika prenapona na temelju koje se može zaključiti o efikasnosti prenaponske zaštite.

Primjer 4.6.1 Analiza broja ispada 110 kV nadzemnog voda s ugrađenim odvodnicima prenapona

U okviru pilot projekta primjene odvodnika prenapona u svrhu smanjenja broja ispada iz pogona i povećanja pouzdanosti opskrbe električnom energijom, 110 kV nadzemni vod, ukupne duljine 44 km, opremljen je odvodnicima prenapona [65]. Zbog svoje specifične lokacije u blizini mora, predmetni nadzemni vod je znatno izložen utjecaju klimatskih i grmljavinskih djelovanja. Prema raspoloživim iskustvenim kartama izokeraunička razina za promatrano područje iznosi 40 grmljavinskih dana godišnje. Tlo u okolini je pretežno stjenovito i karakteriziraju ga visoke vrijednosti specifičnog otpora tla, što dodatno otežava učinkovitost prenaponske zaštite nadzemnog voda.

Prema nazivnom naponu opreme i očekivanom energetskom opterećenju s obzirom na atmosferske prenapone odabrani su metal oksidni odvodnici prenapona sa silikonskim polimernim kućištem i karakteristikama navedenim u tablici 4.3.

Tablica 4.3: Karakteristike metal oksidnih odvodnika prenapona

Trajni radni napon U_c (IEC)	86 kV
Nazivni napon U_r	108 kV
Nazivna struja (8/20 μs)	10 kA
Kratkotrajna podnosiva struja (4/10μs)	100 kA
Termička energetska sposobnost (IEC)	5 kJ/ kV (U_r)
Klasa odvođenja prema IEC	2

Broj i raspored ugrađenih odvodnika prenapona na nadzemnom vodu određeni su temeljem rezultata proračuna [65] pri čemu su kao ulazni podaci korišteni podaci o geometriji stupova nadzemnog voda te izmjereni otpor uzemljivača stupova nadzemnog voda.

Inicijalna konfiguracija od 110 komada odvodnika prenapona ugrađena je u srpnju 2007. godine na promatrani 110 kV nadzemni vod. Temeljem zapažanja iz stalnog nadzora pogona nadzemnog voda i učinkovitosti prenaponske zaštite, tijekom prvih šest godina pogona odvodnika prenapona, inicijalna konfiguracija je promijenjena dva puta. Također, u

deset godina pogona odvodnika prenapona ugrađenih na nadzemnom vodu, šest odvodnika prenapona je demontirano zbog mehaničkih oštećenja.

Konačna konfiguracija sastoji se od 104 ugrađenih odvodnika prenapona kako slijedi: na 50 stupova ugrađen je po jedan odvodnik prenapona u donjoj fazi, na 24 stupova ugrađena su po dva odvodnika prenapona, u donjoj i srednjoj fazi po jedan, te su na dva stupa ugrađena po tri odvodnika prenapona, po jedan u svakoj od faza, donjoj, srednjoj i gornjoj. Na slici 4.7 prikazana je fotografija stupa 110 kV nadzemnog voda na kojemu su ugrađeni odvodnici prenapona u dvije faze.



Slika 4.7: Stup 110 kV nadzemnog voda s ugrađenim odvodnicima prenapona

Prema podacima o zabilježenim ispadima promatranog nadzemnog voda iz pogona bilo je moguće utvrditi učinkovitost odvodnika prenapona već nakon nekoliko prvih godina nakon ugradnje [66]. Podaci o ispadima promatranog nadzemnog voda iz pogona zabilježeni uređajima relejne zaštite analizirani su u razdoblju prije i nakon ugradnje odvodnika prenapona. U tablici 44 prikazan je broj ispada nadzemnog voda iz pogona za razdoblje od 1995. do 2008. godine.

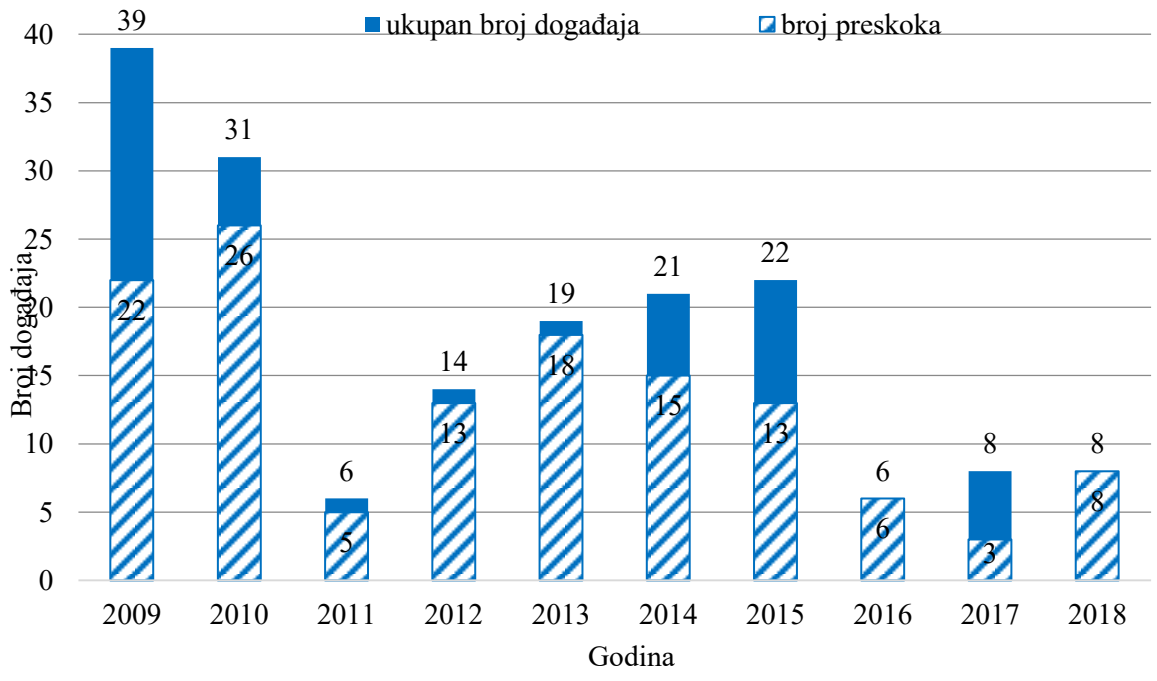
Tablica 4.4: Broj ispada 110 kV dalekovoda (1995-2008) [67]

Godina	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	06/ 2007	07/ 2007	2008
Broj ispada	23	25	24	21	30	14	13	24	12	14	18	17	4	4	12

U tablici 4.4 nisu raspoloživi podaci o broju ispada koji su uzrokovani atmosferskim pražnjenjima. Na temelju podataka iz tablice možemo utvrditi da je prosječan godišnji broj

ispada za promatrani nadzemni vod u razdoblju prije ugradnje odvodnika prenapona iznosio 18,7 ispada godišnje što višestruko premašuje prihvatljivi broj ispada nadzemnog voda iz pogona. U razdoblju od dvije godine nakon ugradnje odvodnika prenapona, za koje su prikazani podaci o ispadima u tablici 4.4, učestalost ispada iznosi 10 ispada godišnje, što je značajno manje od prosječnog godišnjeg broja ispada u razdoblju prije ugradnje odvodnika prenapona na promatranom nadzemnom vodu. Podaci o broju ispada nakon ugradnje odvodnika prenapona analizirani su samo za razdoblje od 18 mjeseci, a za to promatrano razdoblje nisu raspoloživi podaci o atmosferskim pražnjenjima u području nadzemnog voda pa nije poznato koliki udio ispada je bio uzrokovan preskokom uslijed atmosferskih pražnjnja prije i nakon ugradnje odvodnika prenapona. Stoga na temelju ove analize nije moguće donijeti pouzdane zaključke o učinkovitosti odvodnika prenapona.

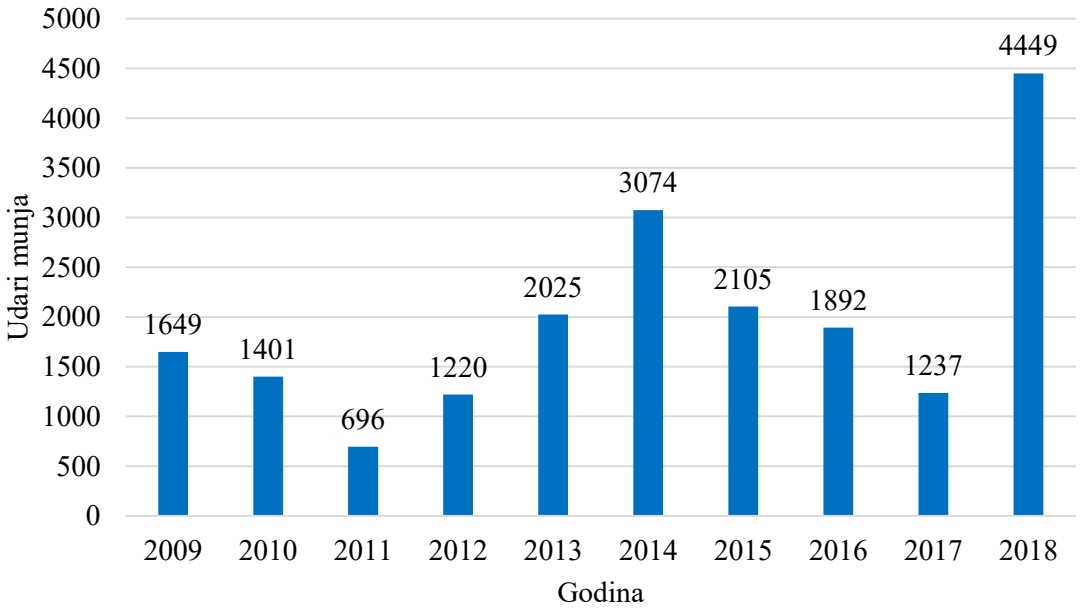
Za razdoblje od 2009. do 2018. godine provedena je vremenska i prostorna korelacija podataka o ispadima iz pogona (uključujući i automatske ponovne uklope - APU) promatranog 110 kV nadzemnog voda s podacima sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja [68]. Podaci SLAP-a u korelaciji s podacima o djelovanju relejne zaštite korišteni su pri utvrđivanju broja ispada nadzemnog voda iz pogona uzrokovanih atmosferskih pražnjenja sa ciljem utvrđivanja utjecaja atmosferskih pražnjenja na pogon promatranog nadzemnog voda, odnosno broja ispada iz pogona uslijed atmosferskih pražnjenja u odnosu na ukupan broj ispada.



Slika 4.8: Broj događaja na promatranom 110 kV nadzemnog voda (2009. - 2018.)

Na slici 4.8 prikazana je godišnja raspodjela ukupnog broja ispada iz pogona promatranog nadzemnog voda i onih uzrokovanih preskocima uslijed atmosferskim pražnjenja. Od ukupno 174 ispada nadzemnog voda iz pogona, 129 ispada, odnosno 74%, uzrokovano je atmosferskim pražnjenjima. U promatranom desetgodišnjem razdoblju, prosječan broj ispada iznosi 17,4 ispada godišnje, a učestalost preskoka 12,9 preskoka godišnje.

Na slici 4.9 prikazani su statistički podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja, odnosno godišnja raspodjela broja atmosferskih pražnjenja u alarmnu zonu promatranog nadzemnog voda za razdoblje od 2009. - 2018. godine.



Slika 4.9: Broj udara u alarmnu zonu promatranog 110 kV nadzemnog voda (2009. - 2018.)

Usporedbom raspodjela broja kvarova na slici 4.8 i broja atmosferskih pražnjenja na slici 4.9 moguće je zaključiti da je broj ispada uzorkovan atmosferskim pražnjenjima u korelaciji s brojem atmosferskih pražnjenja zabilježenim u promatranom području. Nakon poboljšanja učinkovitosti detekcije sustava za praćenje atmosferskih pražnjenja 2016. i 2018. godine, sustav bilježi znatno veći broj atmosferskih pražnjenja manje amplitude struje i veći broj pojedinačnih atmosferskih pražnjenja unutar jednog višestrukog udara munje, a time i veći broj atmosferskih pražnjenja općenito. Zbog opisanog poboljšanja sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja, u usporedbi s prethodnim godinama za veći broj registriranih udara munja u alarmnu zonu promatranog nadzemnog voda zabilježen je manji broj ispada iz pogona uzrokovan grmljavinskim aktivnostima.

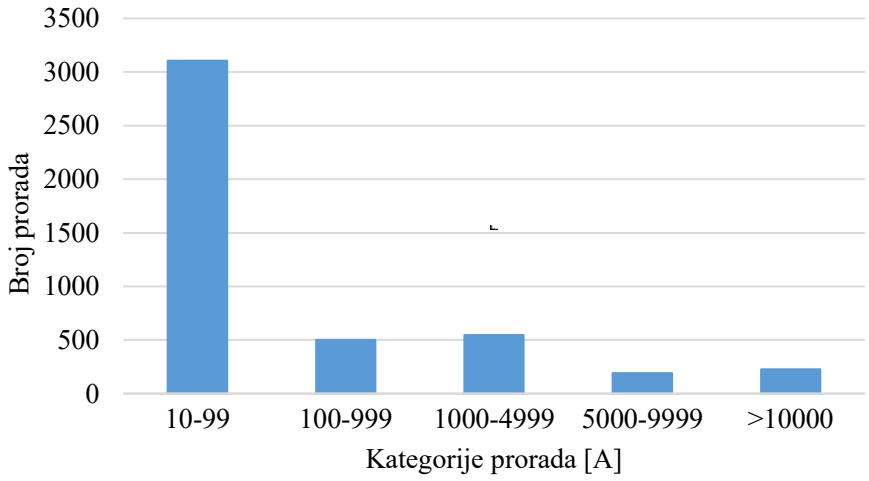
Interpolacijom transformatorske stanice 20/110 kV za potrebe priključka nove vjetroelektrane, promatrani 110 kV nadzemni vod je 2015. godine podijeljen na dva 110 kV nadzemna voda. Za potrebe ove analize razmatrana je inicijalna konfiguracija promatranog dijela prijenosne mreže.

U okviru pilot projekta, 49 odvodnika prenapona ugrađenih na predmetni nadzemni vod opremljeno je uređajima za nadzor odvodnika prenapona, odnosno brojačima prorada koji bilježe vrijeme i amplitudu struje provođenja odvodnika prenapona (slika 4.10). Uređaji mjere struju pražnjenja u 5 mogućih kategorija: 10 – 99 A, 100 – 999 A, 1000 – 4999 A, 5000 – 9999 A i iznad 10000 A.



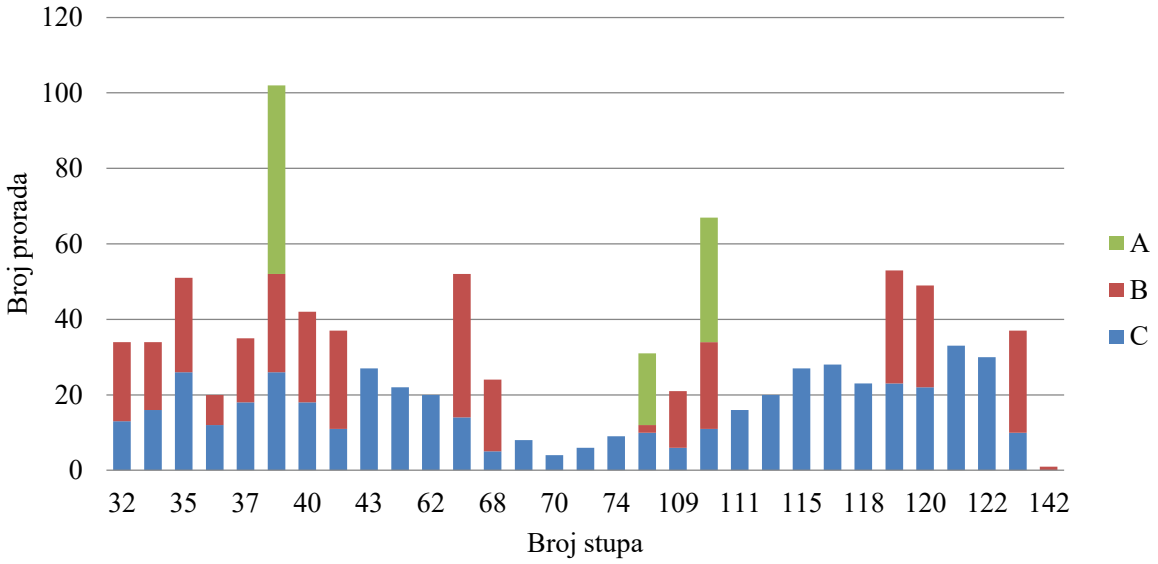
Slika 4.10: Brojač prorada odvodnika prenapona

Na slici 4.11. prikazana je raspodjela amplituda struja provođenja koje su zabilježene brojačima prorada odvodnika prenapona instaliranim na promatranom 110 kV nadzemnom vodu.



Slika 4.11: Broj prorada odvodnika prenapona zabilježen brojačima prorada (2007.-2018.)

Na slici 4.11 se može vidjeti da je zabilježen najveći broj prorada odvodnika prenapona (70%) sa strujom provođenja amplitude u rasponu 10-99 A. Prorade odvodnika prenapona sa strujama amplituda u rasponima 10-99 A i 100-999 A moguće su uzrokovane sklopnim prenaponima ili prenaponima induciranim atmosferskim pražnjenjima između oblaka ili oblaka i zemlje. Prorade sa strujama provođenja amplituda većih od 1000 A najvjerojatnije su uzrokovane atmosferskim pražnjenjima.



Slika 4.12: Broj prorada odvodnika prenapona po fazama (2007.-2018.)

Na slici 4.12 prikazan je broj prorada odvodnika prenapona za struje provođenja amplituda iznad 1000 A po fazama. Oznake na slici predstavljaju A - gornju, B - srednju i C - donju fazu. Na stupovima na kojima je instalirano više od jednog brojača prorada, veći broj prorada odvodnika prenapona zabilježen je u srednjoj, odnosno gornjoj i srednjoj fazi, nego u donjoj fazi. Pri atmosferskim pražnjenjima u nadzemni vod koji nije opremljen odvodnicima prenapona, vjerojatnost pojave povratnog preskoka je najveća u donjoj fazi. S obzirom na to da je najveći broj odvodnika prenapona na promatranom nadzemnom vodu ugrađen u donju fazu, dolazi do drugačije raspodjele struje atmosferskog pražnjenja te većeg broja prorada odvodnika prenapona u srednjoj i gornjoj fazi.

Prema broju prorada odvodnika prenapona, može se utvrditi da su atmosferskim pražnjenjima posebno izložene dionice nadzemnog voda od stupa broj 34 do stupa broj 44 te od stupa broj 115 do stupa broj 122, dok je dionica od stupa broj 68 do stupa broj 109 izložena u manjoj mjeri.

Primjer 4.6.2 Analiza ispada 110 kV nadzemnog voda prije i nakon ugradnje odvodnika prenapona

Odvodnicima prenapona opremljene su nadzemne dionice dva susjedna 110 kV prijenosna voda koja povezuju transformatorsku stanicu 110/35 kV s dva energetska transformatora snage 20 MVA, kojima se napaja konzum na otoku, s transformatorskim stanicama na kopnu i na susjednom otoku. Svaki od prijenosnih vodova se sastoji od po dvije dionice nadzemnog voda i kabelske dionice. Odvodnicima prenapona opremljene su nadzemne dionice na otoku kako bi im se poboljšala prenaponska zaštita te smanjila razina učestalosti broja ispada prijenosnog voda iz pogona i prekida napajanja konzuma električnom energijom uslijed djelovanja atmosferskih pražnjenja. Duljina promatranih nadzemnih dionica opremljenih odvodnicima prenapona iznosi 5,929 km (DV 1) i 8,228 km (DV 2).

Prema nazivnom naponu opreme i očekivanom energetskom opterećenju s obzirom na atmosferske prenapone odabrani su metal oksidni odvodnici prenapona sa silikonskim kućištem i karakteristikama navedenim u tablici 4.5.

Tablica 4.5: Karakteristike metal oksidnih odvodnika prenapona

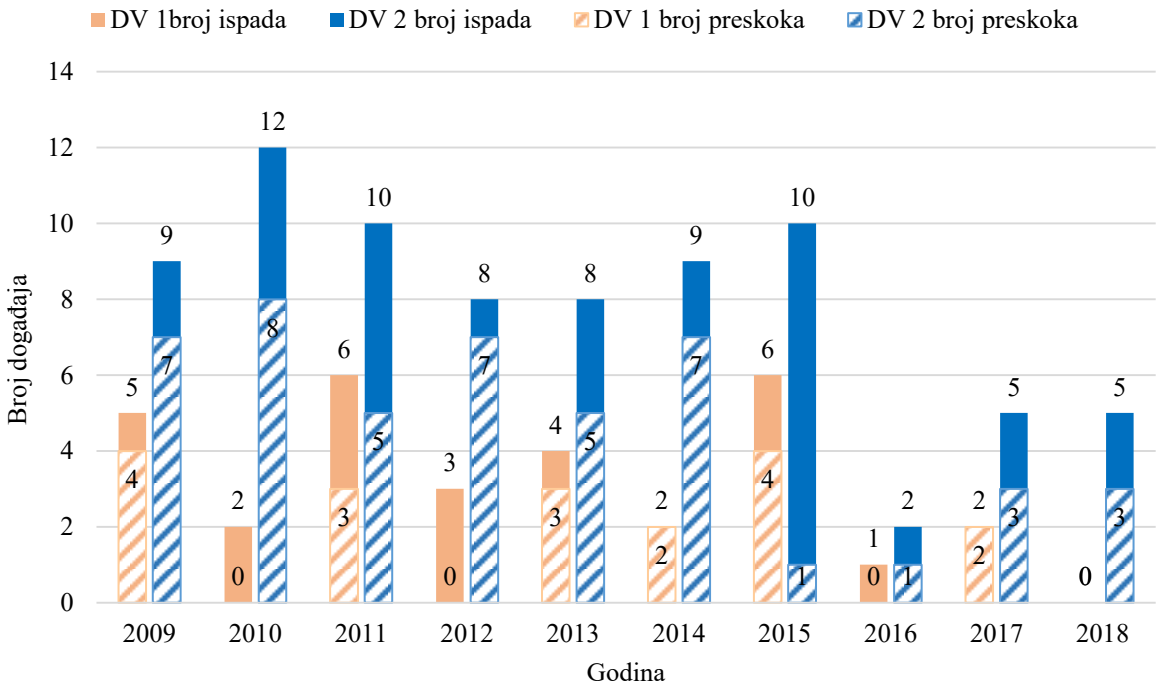
Trajni radni napon U_c (IEC)	78 kV
Nazivni napon U_r	108 kV
Nazivna struja (8/20 μs)	10 kA
Kratkotrajna podnosiva struja (4/10μs)	100 kA
Termička energetska sposobnost (IEC)	5 kJ/kV (U_r)
Klasa odvođenja prema IEC	2

Konfiguracija odvodnika prenapona ugrađenih na promatranim 110 kV prijenosnim vodovima određena je pomoću simulacija korištenjem specijaliziranog računalnog programa Sigma slp za simulaciju atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod te uzimajući u obzir ograničenja u instalaciji zbog nepristupačnosti lokacijama pojedinih stupova [69]. Rezultati računalnih simulacija pokazali su da se za odabranu konfiguraciju ugradnje odvodnika prenapona na promatranim dionicama prijenosnih vodova ukupna učestalost preskoka smanjila na prihvatljivu razinu od približno 4 preskoka/100km godišnje.

Odvodnici prenapona su na pojedine stupove ugrađivani na sljedeće načine: u sve tri faze, u donju i srednju fazu i samo u donju fazu.

Na prvi promatrani prijenosni vod ugrađeno je ukupno 20 odvodnika prenapona i to po dva na prvom i zadnjem stupu nadzemne dionice u svrhu prenaponske zaštite elemenata prijenosne mreže na krajevima dionice te po jedan na svakom od preostalih stupova s iznimkom onih sa zadovoljavajućim iznosom izmjerenog otpora uzemljivača. Na drugi promatrani prijenosni vod ugrađeno je ukupno 25 odvodnika prenapona, po tri na prvom i zadnjem stupu nadzemne dionice te po jedan ili dva na jedanaest stupova u blizini transformatorske stanice za koje su izmjerene više vrijednosti otpora uzemljivača stupa.

Podaci SLAP-a u korelaciji s podacima sustava relejne zaštite korišteni su pri određivanju broja ispada 110 kV prijenosnih vodova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima prije i nakon ugradnje odvodnika prenapona s ciljem procjene njihova utjecaja na prenaponsku zaštitu prijenosnih vodova. Analizirani su podaci za promatrano razdoblje od 10 godina, od čega približno 5 godina prije ugradnje te 5 godina nakon ugradnje odvodnika prenapona na prijenosne vodove. Rezultati korelacija prikazani su na slici 4.13.

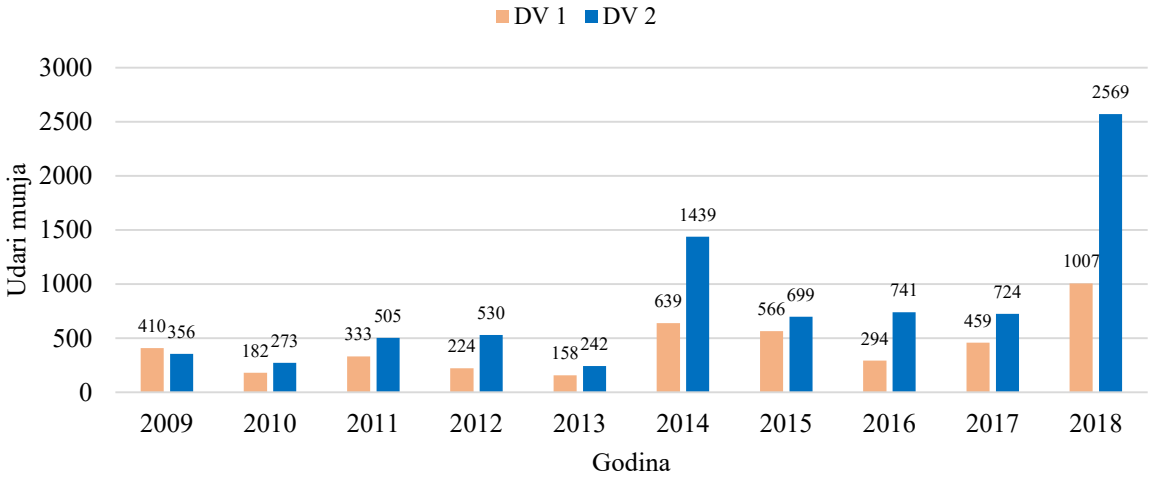


Slika 4.13: Broj ispada i preskoka prijenosnih vodova DV1 i DV2

Na slici 4.13 može se vidjeti da je u razdoblju od deset godina na dva promatrana dalekovoda 65 ispada od ukupno registriranih 109 kvarova, uključujući definitivna isključenja i automatska ponovna uključenja, odnosno približno 60 % ukupnih ispada, uzrokovano atmosferskim pražnjenjima. U petogodišnjem razdoblju prije ugradnje odvodnika prenapona prosječan broj ispada je iznosio 4 ispada godišnje za DV1 i 9,4 ispada godišnje za DV 2, a

prosječan broj preskoka 2 preskoka godišnje za DV1 i 6,4 preskoka godišnje za DV2. U petogodišnjem razdoblju nakon ugradnje odvodnika prenapona prosječan broj ispada je 2,2 ispada godišnje za DV1 i 6,4 ispada godišnje za DV2, a prosječan broj preskoka 1,6 preskoka godišnje za DV1 i 3 preskoka godišnje za DV2. Usporedbom broja ispada i preskoka prije i nakon ugradnje odvodnika prenapona na promatrane dalekovode, možemo zaključiti da je primjena odvodnika prenapona povoljno utjecala na prenaponsku karakteristiku oba promatrana voda, odnosno da se za oba voda nakon ugradnje odvodnika prenapona smanjio broj ukupnih ispada i broj ispada uzrokovanih preskokom uslijed atmosferskog pražnjenja. Detaljnjijom analizom moguće je utvrditi da iako je prosječan broj ispada na DV1 gotovo upola manji nakon ugradnje odvodnika prenapona, ugrađeni odvodnici prenapona imali su veći utjecaj na poboljšanje prenaponske karakteristike DV2 što se može zaključiti na temelju prosječnog broja preskoka koji je za DV2 više nego upola manji nakon ugradnje odvodnika prenapona. Mogući uzrok velikog broja ispada koji nisu uzrokovani atmosferskim pražnjenjima je onečišćenje izolatorskih lanaca morskom soli nošenom jakim vjetrom (bura) koji je uobičajen za područje u kojem su locirani promatrani dalekovodi.

Na slici 4.14 prikazani su statistički podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja o ukupnom broju atmosferskih pražnjenja u alarmne zone promatranih dalekovoda po godinama.

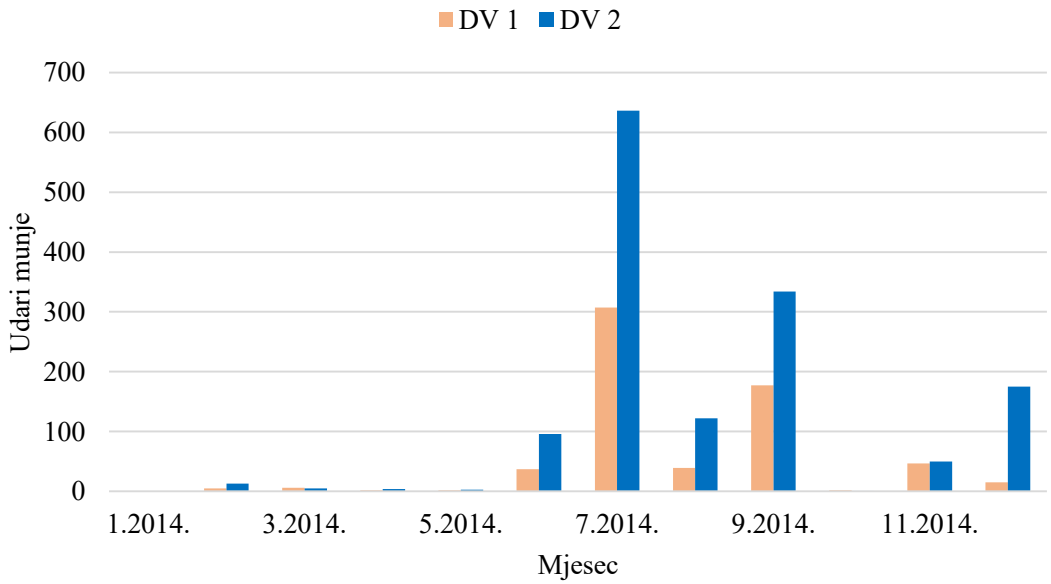


Slika 4.14: Broj atmosferskih pražnjenja u alarmne zone prijenosnih vodova DV1 i DV2

Promatrajući samo utvrđeni broj ispada promatranih dalekovoda uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem u periodu neposredno nakon ugradnje odvodnika prenapona (slika 4.13) moglo bi se pogrešno zaključiti da ugrađeni odvodnici prenapona nisu utjecali na poboljšanje prenaponske zaštite dalekovoda. Međutim, usporedbom broja ispada uzrokovanih

atmosferskim pražnjenjem te ukupnim brojem atmosferskih pražnjenja zabilježenih u alarmnim zonama, odnosno u neposrednoj blizini promatranih dalekovoda u promatranom periodu (slika 4.14.), može se zaključiti da je broj ispada uzrokovan atmosferskim pražnjenjima u korelaciji s ukupnim brojem atmosferskih pražnjenja. Iz podataka prikazanih na slici 4.14 se može se utvrditi da je u neposrednoj blizini promatranih nadzemnih vodova u periodu nakon ugradnje odvodnika prenapona zabilježen iznadprosječan broj udara munja pri čemu je prva godina nakon ugradnje odvodnika prenapona bila ekstremno grmljavinski aktivna. Godine 2016., 2017. i 2018. bile su prosječne godine po broju atmosferskih pražnjenja, ali je zbog prethodno spomenutog poboljšanja učinkovitosti algoritma za detekciju atmosferskih pražnjenja, sustav zabilježio veći broj atmosferskih pražnjenja manjih amplituda. Stoga je u usporedbi s prethodnim godinama za te godine manji broj ispada uzrokovan atmosferskim pražnjenjima u odnosu na broj registriranih atmosferskih pražnjenja.

Na slici 4.15 prikazana je mjesečna raspodjela broja registriranih atmosferskih pražnjenja u alarmne zone promatranih dalekovoda u godini ugradnje odvodnika prenapona. Veći broj kvarova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjim na promatranim dalekovodima u periodu nakon ugradnje odvodnika prenapona nastao je upravo tijekom ljetne sezone 2014. godine.



Slika 4.15: Mjesečna raspodjela broja atmosferskih pražnjenja (2014. godina)

5. Simulacija atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod

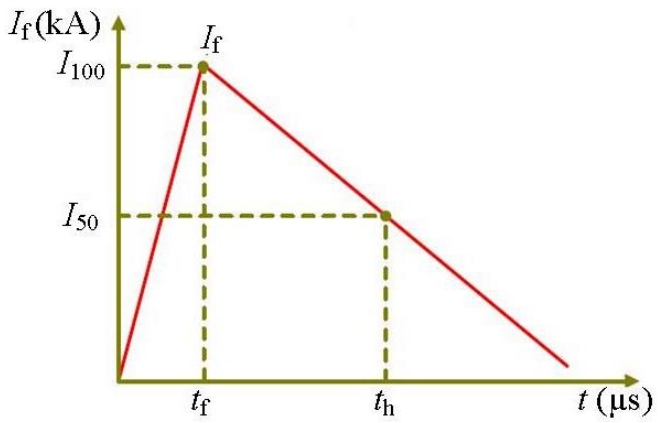
Simulacije udara munje u nadzemne vodove provode se sa ciljem utvrđivanja utjecaja prenapona uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem na rad visokonaponskih nadzemnih vodova te elektroenergetskog sustava u cjelini kao i za utvrđivanje potrebe za primjenom odgovarajuće prenaponske zaštite te potvrđivanje učinkovitosti odabrane prenaponske zaštite. Za provođenje simulacija u ovom radu korišten je računalni program za analizu elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP.

Na vjerojatnost pojave preskoka na izolatorskom lancu pri atmosferskom pražnjenju u stup ili fazni vodič nadzemnog voda utječu sljedeći parametri: amplituda i strmina struje atmosferskog pražnjenja, napon preskoka na izolatorskom lancu, izvedba odnosno geometrija stupa nadzemnog voda, impedancija uzemljivača stupa, vrijednost faznog napona u trenutku udara te karakteristike odvodnika prenapona u slučajevima ako je isti primijenjen na promatranom stupu nadzemnog voda u svrhu zaštite od prenapona. Za potrebe provođenja simulacija atmosferskog pražnjenja u nadzemni vod u računalnom programu modeliraju se sljedeći elementi modela: udar munje, stup, fazni vodiči i zaštitni vodič, uzemljivač stupa, odvodnik prenapona.

Pri izradi modela udara munje uobičajeno se koriste podaci o parametrima struje atmosferskog pražnjenja prema preporukama iz literature, a u novije vrijeme se sve više koriste podaci raspoloživi u sustavima za lociranje atmosferskih pražnjenja. Za pripremu modela elemenata nadzemnog voda kao što su stupovi te fazni i zaštitni vodič koriste se podaci o geometriji i električnim karakteristikama dalekovoda koji su uobičajeno raspoloživi iz projektne dokumentacije. Za model uzemljivača stupa važan ulazni podatak je izmjereni otpor uzemljivača.

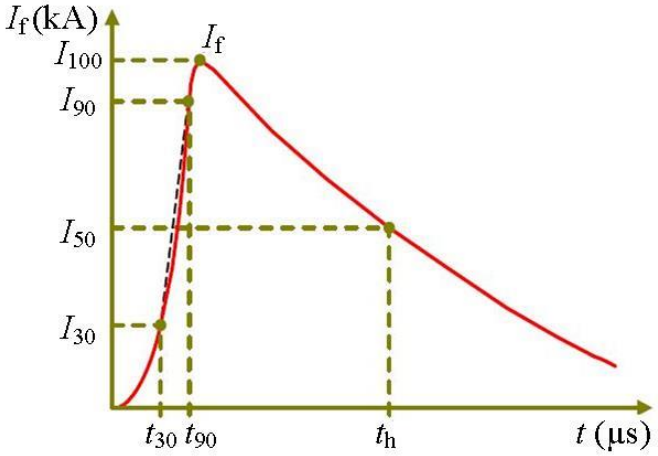
5.1. Model struje atmosferskog pražnjenja

Valni oblik struje atmosferskog pražnjenja može se najjednostavnije opisati pomoću funkcije rampe i parametrima sa slike 5.1: I_f vršna vrijednost struje atmosferskog pražnjenja, t_f vrijeme trajanja čela vala i t_h vrijeme trajanja polovice hrpta vala.



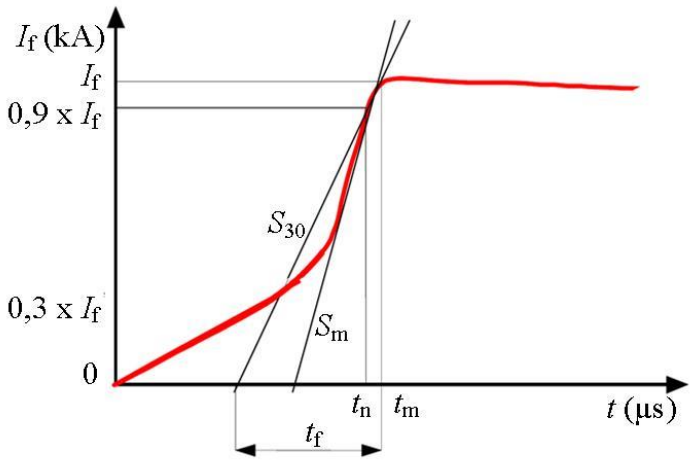
Slika 5.1: Valni oblik rampe struje atmosferskog pražnjenja

Preciznije se valni oblik struje atmosferskog pražnjenja može opisati pomoću parametara sa slike 5.2: I_f vršna vrijednost struje, t_{30} vrijeme potrebno za postizanje 30% vršne vrijednosti struje, t_{90} vrijeme potrebno za postizanje 90% vršne vrijednosti struje i t_h vrijeme trajanja polovice hrpta vala.



Slika 5.2: Valni oblik struje atmosferskog pražnjenja

U simulacijama se udar munje koji je pogodio stup nadzemnog voda najčešće modelira kao strujni izvor od nekoliko do iznad 200 kiloampera. Koristi se CIGRÉ valni oblik struje atmosferskog pražnjenja s konkavnim čelom prikazan na slici 5.3 gdje je: I_f vršna vrijednost struje, S_m maksimalna strmina čela, t_f ekvivalentno trajanje čela i t_n vrijeme potrebno za dostizanje 90% amplitude vala.



Slika 5.3: Valni oblik struje atmosferskog pražnjenja prema [25], [70]

Amplituda struje atmosferskog pražnjenja i vrijeme trajanja hrpta znatno utječu na energetsko opterećenje odvodnika prenapona, dok vrijeme trajanja čela vala značajno utječe na pojavu preskoka na izolatorskom lancu.

Parametri struje atmosferskog pražnjenja određuju se na temelju statističkih podataka uzimajući u obzir gustoću udara munje na lokaciji stupa dalekovoda. Vjerojatnost da će određena vršna struja biti jednaka ili veća od struje I_f moguće je izračunati pomoću izraza (2.4). U ovom radu se za potrebe proračuna vjerojatnost pojave određene amplitude struje atmosferskog pražnjenja određuje na temelju stvarne raspodjele amplituda struja zabilježenih sustavom za lociranje atmosferskih pražnjenja.

U proračunima se uobičajeno simulira prvi udar munje, čija je strmina vala manja nego pri ponovnom (uzastopnom) udaru. Maksimalna strmina čela S_m računa se pomoću izraza (2.5) i koeficijenata α i β iz tablice 2.2. Ekvivalentno trajanje čela odabire se najčešće t_f = 2 μs prema preporukama iz literature [71].

5.2. Model stupa nadzemnog voda

Stupovi nadzemnog voda modeliraju se valnim impedancijama čiji je iznos određen izrazom [25], [70]:

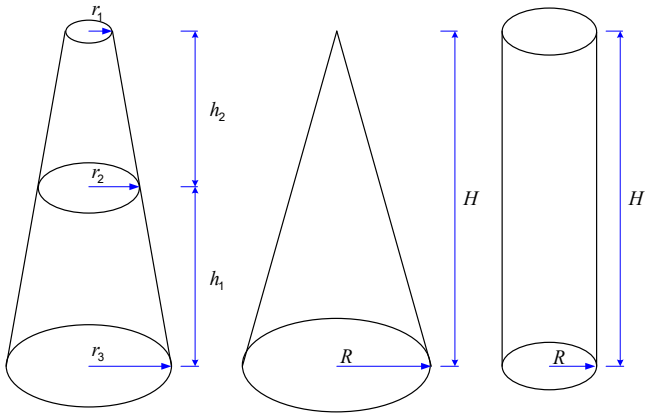
$$Z = 60 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{H}{R}\right) - 1 \right\} \tag{5.1}$$

za $R \ll H$ gdje je H visina stupa, a R ekvivalentni polumjer baze stupa.

Ekvivalentni polumjer baze stupa R u gornjem izrazu je određen nadomještanjem stupa cilindrom (slika 5.4). Srednji polumjer R je definiran sljedećim izrazom:

$$R = \frac{r_1 h_2 + r_2 H + r_3 h_1}{2H} \tag{5.2}$$

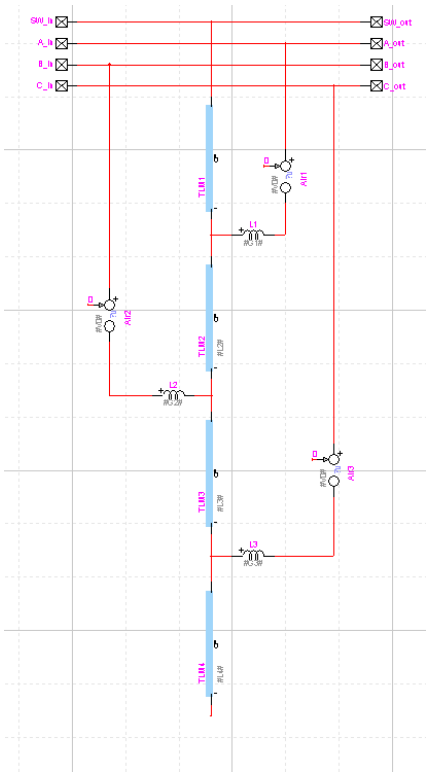
gdje je r_1 radijus vrha stupa, r_2 radijus na sredini stupa, r_3 radijus baze stupa, H visina stupa, h_1 visina od baze do sredine stupa i h_2 visina od sredine stupa do vrha, pri čemu su sve veličine u metrima [m].



Slika 5.4: Ekvivalentni polumjer stupa stupa

Kako bi bilo moguće odrediti prijelazni napon pojedinih konzola, odnosno ovjesišta izolatorskih lanaca pri udaru munje, svaki je stup modeliran s četiri dijela, odnosno valne impedancije: prva od vrha stupa do gornje konzole, druga od gornje do srednje konzole, treća od srednje do donje konzole te četvrta od donje konzole do uzemljivača stupa. Svaki dio je modeliran kao idealni vod bez gubitaka s valnom impedancijom izračunatom prema (5.1). Konzole se modeliraju kao induktiviteti od 1 μH/m.

Kao brzina gibanja prenaponskog vala duž stupa može se usvojiti brzina jednaka brzini svjetlosti. Posljedica rešetkaste struktura stupa i konzole je određeno vremensko kašnjenje te je zbog toga vrijeme refleksije od baze stupa (zemlje) duže nego što bi se dobilo dijeljenjem visine stupa i brzine svjetlosti. Kako bi se opisani efekt uzeo u obzir, u modelu se uobičajeno usvaja brzina gibanja prenaponskog vala 240 m/μs (80% brzine svjetlosti).



Slika 5.5: Model stupa nadzemnog voda (EMTP)

5.3. Model faznih vodiča i zaštitnog vodiča

Fazni vodiči i zaštitni vodič nadzemnog voda modeliraju se u EMTP programu korištenjem frekvencijski ovisnog modela [72]. U frekvencijski ovisnom modelu parametri se modeliraju kao distribuirani i frekvencijski ovisni, što predstavlja prirodni model nadzemnog voda. Frekvencijski ovisni parametri nadzemnog voda računaju se za zadani raspon između stupova frekvencija korištenjem realne transformacijske matrice pri čemu optimalna frekvencija može biti zadana ili određena programski. U modelu je u obzir uzet skin efekt.

Kao ulazni podaci koriste se geometrijski i električni parametri faznih i zaštitnog vodiča, stvarne visine i razmaci između vodiča, duljina modeliranog raspona nadzemnog voda te specifični otpor zemlje.

Kada se analiziraju preskoci na izolatorskim lancima, uobičajno se modelira po nekoliko raspona nadzemnog voda, uobičajeno tri do sedam, sa svake strane od mjesta udara munje. Kako bi se eliminirao utjecaj refleksije putnih valova koji mogu utjecati na rezultate simulacije, oba kraja nadzemnog voda modeliraju se s duljim segmentima voda s jednakom valnom impedancijom.

5.4. Model preskoka na izolatorskim lancima

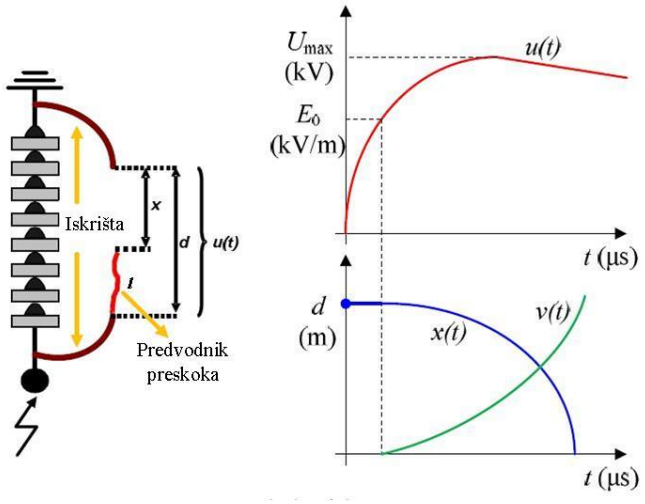
Izolator na stupu nadzemnog voda predstavlja kapacitet s vrlo malim utjecajem na prenapone. Najvažniji parametar kojim se opisuje djelovanje izolacije nadzemnog voda u slučaju izloženosti atmosferskim prenaponima je napon preskoka, koji ovisi o naponskoj razini, odnosno udaljenosti između zaštitnih armatura izolatora (preskočni razmak). Kritični preskočni napon (*engl. Critical Flashover Voltage* – CFO) je vršna vrijednost udarnog napona pri kojem vjerojatnost pojave preskoka na izolatoru iznosi 50%.

U slučaju kada je odvodnik prenapona ugrađen u paraleli s izolatorskim lancem, preostali napon na odvodniku prenapona je značajno niži od probojne čvrstoće izolatorskog lanca, čak i za najviše iznose amplituda struja atmosferskog pražnjenja te ne dolazi do pojave preskoka ako je odvodnik prenapona dobro dimenzioniran.

Napon preskoka izolatorskog lanca je vremenski ovisan i može se opisati diferencijalnom jednadžbom nastanka preskoka (*engl. Leader Propagation Model*) [26]:

$$v(t) = k_{\mathrm{L}} \cdot u(t) \cdot \left[\frac{u(t)}{x} - E_0\right] \tag{5.3}$$

gdje su $v(t)$ brzina predvodnika preskoka [m/s], $u(t)$ napon na iskrištu izolatorskog lanca u ovisnosti o vremenu [kV], x udaljenost nepremoštenog razmaka između iskrišta izolatorskog lanca [m] i računa se kao razlika duljine preskočnog razmaka d i duljine predvodnika preskoka l (slika 5.6), E_0 kritična vrijednost električnog polja pri kojoj počinje pojava preskoka [kV/m] i k_{L} konstanta predvodnika preskoka [$\mathrm{m^2/(V^2s)}$].



Slika 5.6: Preskok na izolatorskom lancu [73]

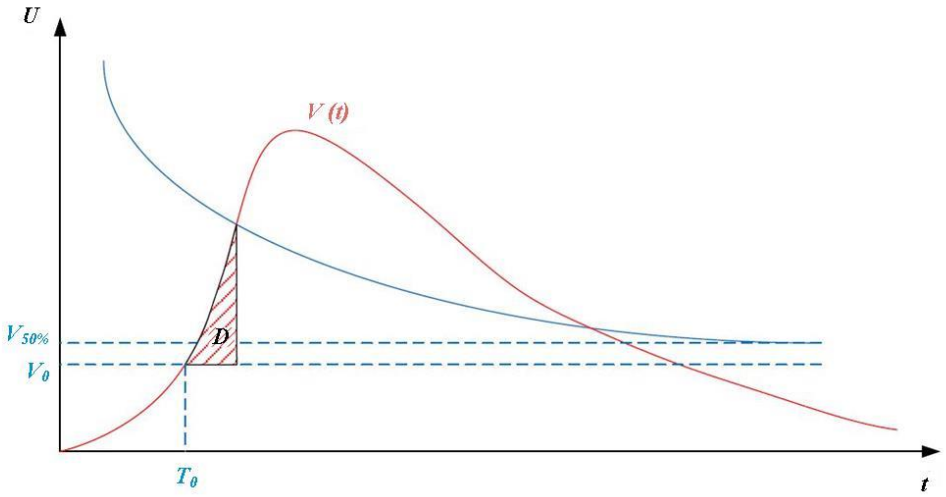
U postupku izračuna određuje se brzina predvodnika preskoka $v(t)$ u svakom trenutku, povećanje duljine predvodnika preskoka u tom trenutku, ukupna duljina predvodnika preskoka i preostala udaljenost nepremoštenog dijela preskočnog razmaka između iskrišta izolatorskog lanca x. Postupak se ponavlja sve dok razmak između iskrišta izolatorskog lanca nije premošten. Ako vrijednost jakosti električnog polja u nepremoštenom dijelu preskočnog razmaka padne ispod E_0, prestaje širenje predvodnika preskoka. Konstante E_0 i k_L su ovisne o vrsti izolatora i konfiguraciji iskrišta, a mogu se odrediti iz literature [74], [75].

Preskočna karakteristika izolatorskog lanca je funkcija preskočnog udarnog napona u ovisnosti o vremenu potrebnom da dođe do preskoka i utvrđuje se mjerenjima.

Za potrebe provođenja simulacija razmak između iskrišta izolatorskog lanca se modelira kao idealna sklopka koja je otvorena do trenutka nastanka preskoka, a zatvorena nakon toga. Trenutak nastanka preskoka se može odrediti pomoću modela jednakih površina [26]:

$$\int_{T_0}^{t} (|V(t)| - V_0)^k \cdot dt \geq D \tag{5.4}$$

gdje su $V(t)$ napon na iskrištu izolatorskog lanca u ovisnosti o vremenu [kV], V_0 konstanta koja predstavlja minimalnu vrijednost napona pri kojem proces pojave preskoka započinje ili se nastavlja [kV], T_0 vrijeme od kojeg je napon na iskrištu postao veći od napona V_0, a k i D konstante. Preskok nastupa kada vrijednost integrala postane veća ili jednaka D (slika 5.7).



Slika 5.7: Model preskočne karateristike izolatorskog lanca

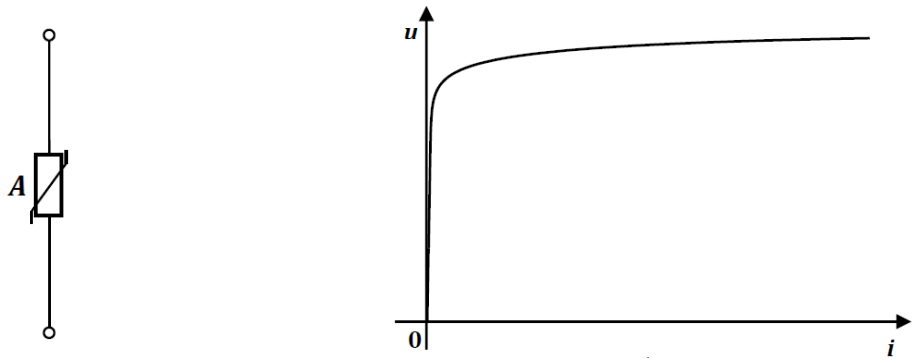
Vrijednosti konstanti k, V_0 i D ovise o preskočnom razmaku i polaritetu prenapona [70] i moguće ih je odrediti iz preskočne karakteristike izolatorskog lanca, a u simulacijama se određuju prema preprukama iz literature [26]. U modelu se za minimalnu vrijednost napona pri kojem započinje proces pojave preskoka usvaja:

$$V_0 = 0{,}9 \cdot V_{50\%}, \tag{5.5}$$

gdje je $V_{50\%}$ kritični preskočni napon koji je uobičajeno specificiran od strane proizvođača izolatorskih lanaca. Konstanta D predstavlja površinu integrala iz izraza (5.4), a u modelu se određuje u odnosu na duljinu preskočnog razmaka d [26].

5.5. Model odvodnika prenapona

Odvodnik prenapona predstavlja nelinearni otpornik čija je otpornost veoma velika u području radnog napona, a opada u prenaponskim stanjima odnosno pri povišenim naponima. Jednostavni model odvodnika prenapona, kao nelinearnog otpornika određenog odgovarajućom *U-I* karakteristikom prikazan je na slici 5.8.



a) b)

Slika 5.8: Model (a) i nelinearna *U-I* karakteristika odvodnika prenapona (b)

Preostali napon na odvodniku prenapona je funkcija amplitude narinute struje kroz odvodnik prenapona i bitno ovisi o valnom obliku struje koja se injektira u odvodnik.

U modelu za simulaciju udara munje u stup dalekovoda nelinearna *U-I* karakteristika odvodnika prenapona se modelira eksponencijalnom funkcijom oblika kojom se aproksimira skup izmjerenih podataka $(i,\ u)$ [76]:

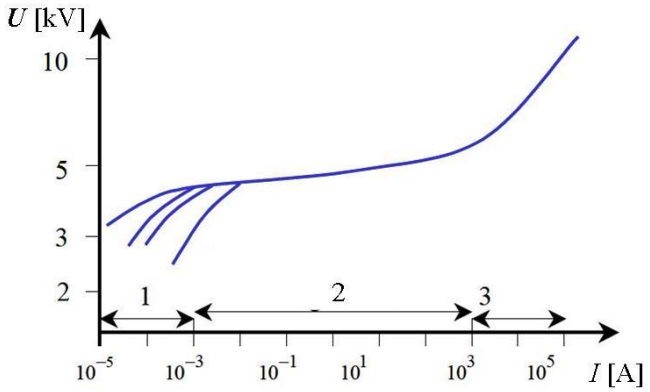
$$i = k \cdot u^{\alpha}. \tag{5.6}$$

Podaci izmjerene prenaponske *U-I* karakteristike odvodnika prenapona uobičajeno su raspoloživi u katalogu proizvođača odvodnika prenapona. Budući su izmjerene vrijednosti struja i napona rasute, kako bi se smanjila pogreška postupka aproksimacije, polazni izraz (5.6) se normalizira uvođenjem izraza:

$$i = p \cdot \left(\frac{u}{U_{ref}}\right)^{q} \tag{5.7}$$

U izrazu (5.7) prametrima p i q se aproksimira skup izmjerenih podataka. Parametar U_{ref} predstavlja proizvoljno izabrani referentni napon, uobičajeno vrijednosti U_r do 2 U_r ili neke druge vrijednosti, gdje je U_r nazivni napon odvodnika.

Parametar nelinearnosti odvodnika prenapona se mijenja, odnosno smanjuje, kako se radna točka kreće od koordinatnog ishodišta po karakteristici odvodnika prema velikim vrijednostima struje odvodnika (slika 5.9).



Slika 5.9: Područja karakteristike odvodnika prenapona

Područje nelinarne karakteristike MO odvodnika prenapona može se podijeliti na tri karakteristična područja:

- u području maksimalnog trajnog radnog napona (*engl. Maximum continuous operating voltage* – MCOV) struja odvodnika prenapona je manja od 1 mA i uglavnom je kapacitivnog karaktera,
- u području privremenih prenapona (*engl. Temporary overvoltage* - TOV) struja odvodnika iznosi između 1 mA i 2 kA te je većinom radnog karaktera,
- u području atmosferskih prenapona struja odvodnika prenapona je čistog radnog karaktera i može iznositi od 1 kA do 100 kA.

Da bi se povećala točnost modela odvodnika često se odvodnik prenapona modelira skupom eksponencijalnih segmenata prema relaciji:

$$i = p_k \cdot \left(\frac{u}{U_{ref}}\right)^{q_k} \tag{5.8}$$

U izrazu (5.8) parametri p_k i q_k opisuju *k*-ti eksponencijalni segment karakteristike odvodnika prenapona kojim se aproksimira skup poznatih izmjerenih podataka iz kataloga proizvođača. Parametri p_k i q_k se algoritamski određuju iz skupa mjerenih podataka karakteristike (i_1, u_1), (i_2, u_2), …, (i_n, u_n) pri čemu je kriterij točnosti za svaki segment:

$$\frac{|i(u_j) - i_j|}{i_j} \leq \varepsilon \tag{5.9}$$

gdje je ε zadana točnost aproksimacije modela, i_j izmjerena točka nelinearne karakteristike odvodnika prenapona i $i\ (u_j)$ izračunata točka nelinearne karakteristike odvodnika prenapona.

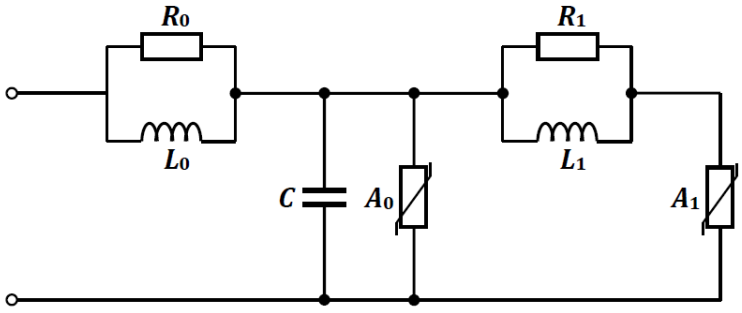
Jednostavni, frekvencijski neovisni model odvodnika prenapona, određen nelinearneom *U-I* karakteristikom nelinearnog otpornika primjenjiv je u proračunima niskofrekvencijskih i sklopnih (sporih) prelaznih pojava. Takav model za strujni val s većom strminom čela, a jednake amplitude, rezultira jednakim preostalim naponom na odvodniku.

5.5.1. Frekvencijski ovisni model odvodnika prenapona

Mjerenja su pokazala da se, u slučaju brzih i vrlo brzih prijelaznih pojava, preostali napon mijenja sa promjenom brzine porasta čela strujnog vala koji se injektira u odvodnik prenapona. Valni oblik struje kraćeg čela vala (brže strmine porasta vala) rezultira višim preostalim naponom na odvodniku. Stoga je u proračunima visokofrekvencijskih prelaznih pojava, odnosno za brze i vrlo brze prijelazne pojave više frekvencije kao što su atmosferski prenaponi, potrebno provjeriti utjecaj frekvencijsko ovisnog modela odvodnika prenapona na rezultate.

Frekvencijski ovisni modeli odvodnika prenapona koji se koriste u simulacijama brzih prijelaznih pojava su IEEE model, Pincetijev model i Fernándezov model.

Frekvencijski ovisan model odvodnika prenapona predložen od strane IEEE radne grupe prikazan je na slici 5.10 [77]:

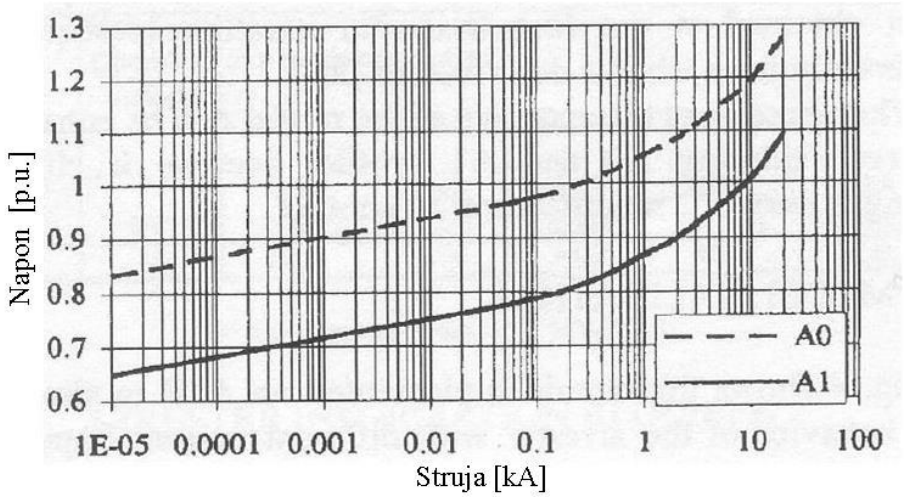


Slika 5.10: IEEE model odvodnika prenapona

Oznake na slici 5.10 predstavljaju R_0 [Ω] otpor za eliminiranje numeričke nestabilnosti (numeričkih oscilacija) pri provedbi simulacije, L_0 [μH] induktivitet koji je posljedica postojanja magnetskog polja u neposrednoj blizini odvodnika, C [pF] kapacitet između priključaka odvodnika, R_1 [Ω] i L_1 [μH] paralelni filter kojim se ostvaruje utjecaj čela vala na preostali napon odvodnika, a A_0 i A_1 nelinearne otpore razdijeljene filterom.

Osnova IEEE modela su nelinearni otpori A_0 i A_1. Na slici 5.11 prikazane su estimirane *U-I* karakteristike nelinearnih otpora A_0 i A_1 svedene na jedinični napon $1\,[p.u.] = u_{10,8/20}$, koji predstavlja preostali napon odvodnika izmjeren ispitivanjem strujnim valom amplitude 10 kA, oblika 8/20 μs prema [77]. Induktivitet filtera L_1 je dominantan linearni parametar modela kojim se realizira frekvencijska ovisnost modela odvodnika prenapona.

Pri pojavi strujnih valova niske strmine, odnosno dugog vremena trajanja čela vala, vrijednost impedancije filtera R_1 - L_1 je mala tako da su nelinearni otpornici A_0 i A_1 paralelno vezani i kroz njih protječe sumarna struja odvodnika.



Slika 5.11: *U-I* karakteristike nelinearnih otpornika A_0 i A_1

Nasuprot tome, pri pojavi strujnih valova velike strmine, odnosno kratkog vremena trajanja čela vala, impedancija filtera ima veliku vrijednost, zbog čega veći dio struje protječe kroz A_0 čija je karakteristika viša (slika 5.11) te dolazi do povećanja preostalog napona odvodnika.

Vrijednosti linearnih parametara odvodnika se procjenjuju na osnovu geometrijskih dimenzija odvodnika, prema jednadžbama [77]:

$$L_1 = 15\,\frac{d}{n} \tag{5.10}$$

$$R_1 = 65\,\frac{d}{n} \tag{5.11}$$

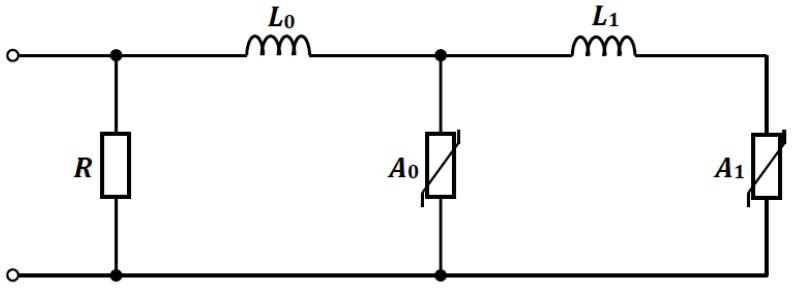
$$L_0 = 0{,}2\,\frac{d}{n} \tag{5.12}$$

$$R_0 = 100\,\frac{d}{n} \tag{5.13}$$

$$C = 100\,\frac{n}{d} \tag{5.14}$$

U izrazima (5.10) –(5.14) je d duljina odvodnika prenapona, a n broj paralelnih grana blokova odvodnika prenapona.

Pincetijev model odvodnika prenapona [78] predstavlja pojednostavljeni IEEE model. Za razliku od IEEE modela, ne sadrži kapacitet odvodnika C, a linearni otpori R_0 i R_1 u serijskim granama zamijenjeni su s jednim otporom R u paralelnoj grani koji služi za eliminiranje numeričke nestabilnosti (numeričkih oscilacija) (slika 5.12).



Slika 5.12: Pincetijev model odvodnika prenapona

Karakteristike nelinearnih otpora A_0 i A_1 određuju se jednako kao za IEEE model odvodnika prenapona (slika 5.11). Za razliku od IEEE modela, čiji se parametri određuju iterativnim postupcima, pojednostavljeni IEEE model odvodnika prenapona nije određen geometrijskim parametrima odvodnika prenapona, već se njegovi parametri određuju iz električnih parametara odvodnika prenapona raspoloživih od strane proizvođača [78].

Vrijednost otpora R u paralenoj grani za potrebe eliminacije numeričke nestabilnosti u proračunu uobičajeno se procjenjuje $R = 1$ ili 10 MΩ.

Procijenjene vrijednosti induktiviteta L_0 i L_1 [μH] određuju se prema izrazima:

$$L_0 = \frac{1}{12}(K-1) \cdot U_r \tag{5.15}$$

$$L_1 = \frac{1}{4}(K-1) \cdot U_r \tag{5.16}$$

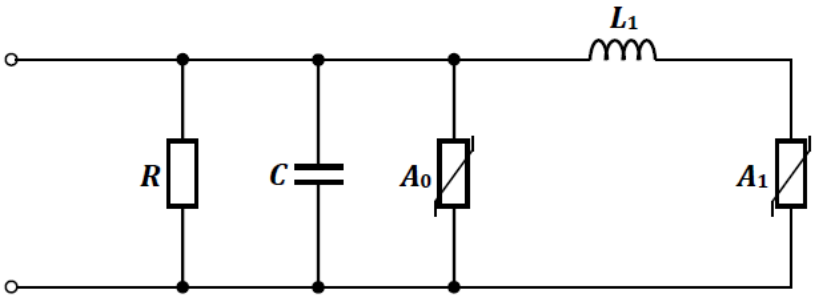
gdje je U_r nazivni napon odvodnika prenapona u kilovoltima. K je faktor zadan izrazom:

$$K = \frac{U_{r_{1/T_2}}}{U_{r_{8/20}}} \tag{5.17}$$

gdje su $U_{r_{8/20}}$ preostali napon za strujni val 10 kA, 8/20 μs, a $U_{r_{1/T_2}}$ preostali napon za strujni val 10 kA velike strmine, $T_f = 1$ μs, $2 \leq T_2 \leq 20$ μs. Vrijeme trajanja hrpta T_2 nema utjecaja s obzirom na to da vršna vrijednost preostalog napona ovisi o strmini vala.

Za slučajeve kada je vrijednost faktora K veća ili jednaka od 1,18 ili vrijednosti preostalog napona za strujne valove nisu poznate, moguće je odrediti parametre korištenjem modela prema [79].

Fernándezov model odvodnika prenapona [80], za razliku od IEEE i Pincetijevog modela, ne sadrži induktivitet L_0, a linearni otpori R_0 i R_1 u serijskim granama zamijenjeni su s jednim otporom R u paralelnoj grani koji služi za eliminiranje numeričke nestabilnosti (numeričkih oscilacija), jednako kao za Pincetijev model (slika 5.13).



Slika 5.13: Fernándezov model odvodnika prenapona

Za Fernándezov model odvodnika prenapona karakteristike nelinearnih otpora A_0 i A_1 ne određuju se jednako kao za IEEE model odvodnika prenapona, već je za svaku vrijednost napona odvodnika pretpostavljen konstantan odnos struja $\gamma = I_0/I_1$ kroz nelinearne otpore A_0 i A_1.

Mjerenja su pokazala da je povećanje preostalog napona na odvodniku $\Delta U_{res\%}$ funkcija induktiviteta L_1 te se iz izmjerenih krivulja na osnovu vrijednosti $\Delta U_{res\%}$ i vremena trajanja čela vala T_f može odrediti vrijednost induktiviteta L_1 [80].

Kapacitet između priključaka odvodnika se određuje prema izrazu:

$$C = \frac{100}{d} \tag{5.5.18}$$

gdje je d duljina odvodnika prenapona.

Vrijednost otpora R u Fernándezovom modelu je zadana $R = 1$ ili 10 MΩ, za mreže srednjeg ili visokog napona.

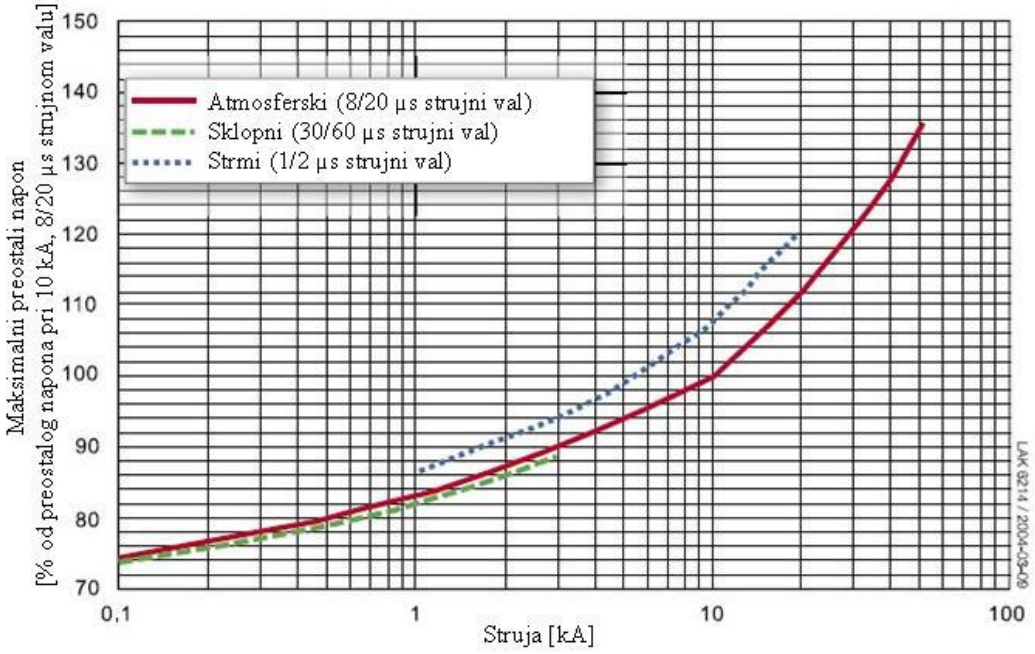
Primjer 5.5.1 Model odvodnika prenapona u programu za izračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP

Za metal oksidni odvodnik prenapona karakteristika navedenih u tablici 4.3 zadana je *U-I* karakteristika od strane proizvođača prema tablici 5.1.

Tablica 5.1: *U-I* karakteristika odvodnika prenapona

I [kA]	0,5	1	2	5	10	20	40
U [kV]	223	231	242	264	280	314	359

Na slici 5.14 prikazane su *U-I* karakteristike odvodnika prenapona izmjerene atmosferskim, sklopnim i strmim ispitnim strujnim valom od strane proizvođača. Na slici je maksimalni preostali napon iskazan kao postotak preostalog napona pri strujnom valu amplitude 10 kA, oblika 8/20 µs.



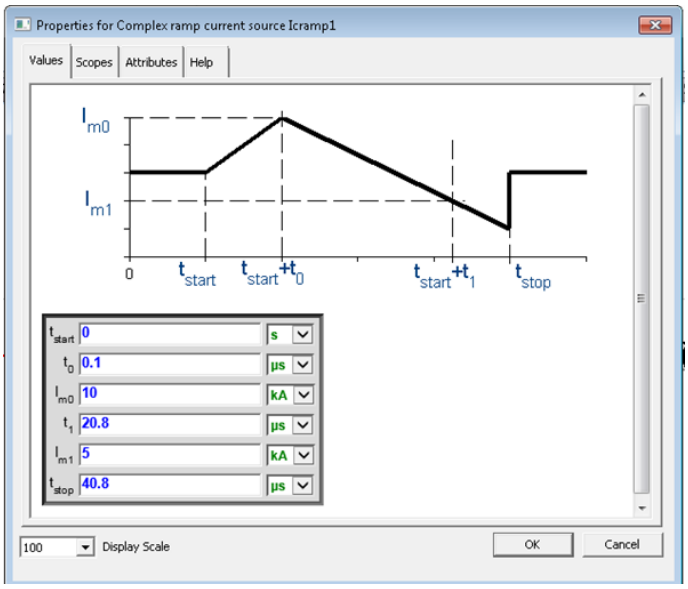
Slika 5.14: Maksimalni preostali napon odvodnika prenapona

Parametri pojednostavljenog IEEE modela L_0 i L_1 određeni su pomoću izraza (5.15.) – (5.17) i slike 5.14 te iznose L_0 = 0,72 µH i L_1 = 2,16 µH. Vrijednost otpora R u paralenoj grani za potrebe eliminacije numeričke nestabilnosti u proračunu odabrana je $R = 10$ MΩ.

Karakteristika nelinearnog otpora A_1 određena je nelinearnom *U-I* karakteristika zadanom od strane proizvođača (tablica 5.1), a karakteristika nelinearnog otpora A_0 prema karakteristici odvodnika prenapona izmjerenoj strmim strujnim valom oblika 1/2 µs u odnosu

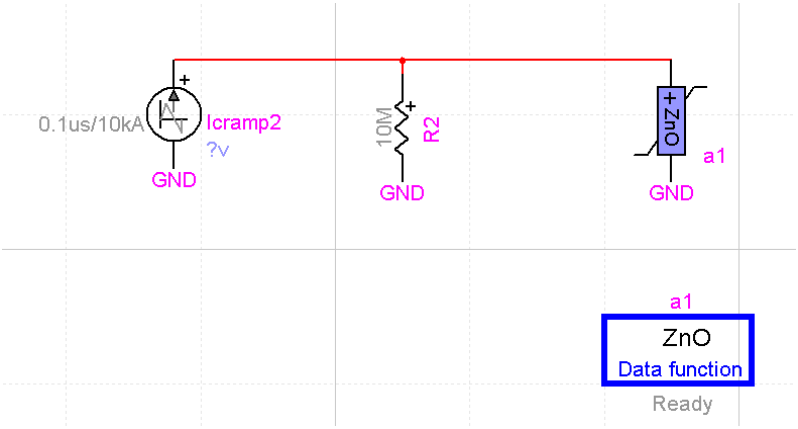
na karakteristiku pri atmosferskom strujnom valu 8/20 μs, odnosno karakteristiku nelinearnog otpora A_1.

Za potrebe simulacije korišten je strujni izvor valnog oblika složene rampe i vrlo strmog čela kako je prikazano na slici 5.15 iz razloga što je utjecaj frekvencije na vrijednost preostalog napona na odvodniku prenapona izražen pri vrlo strmim prenaponima.

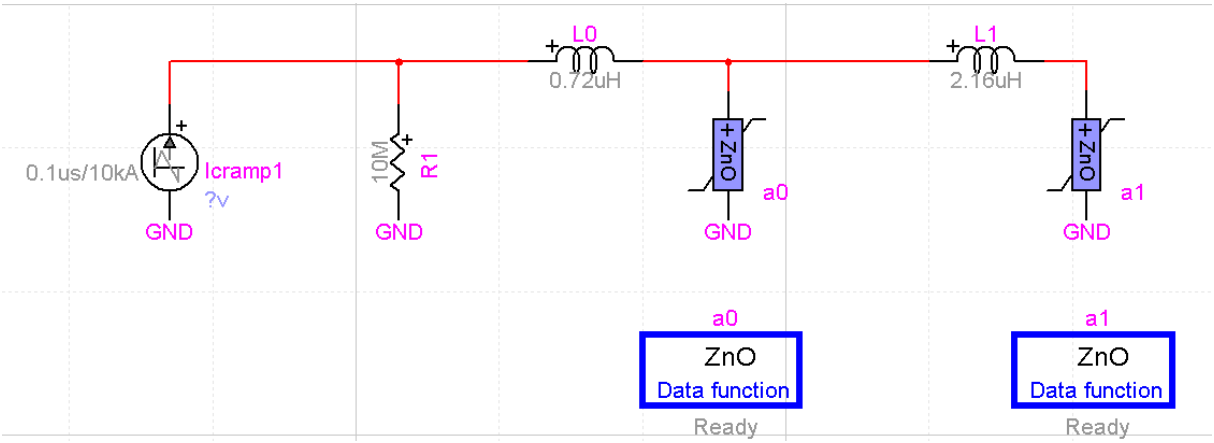


Slika 5.15: Strujni izvor valnog oblika složene rampe (EMTP)

Model odvodnika prenapona u EMTP-u prikazan je na slici 5.16, a frekvencijski ovisni, pojednostavljeni IEEE, model odvodnika prenapona prikazan je na slici 5.17.

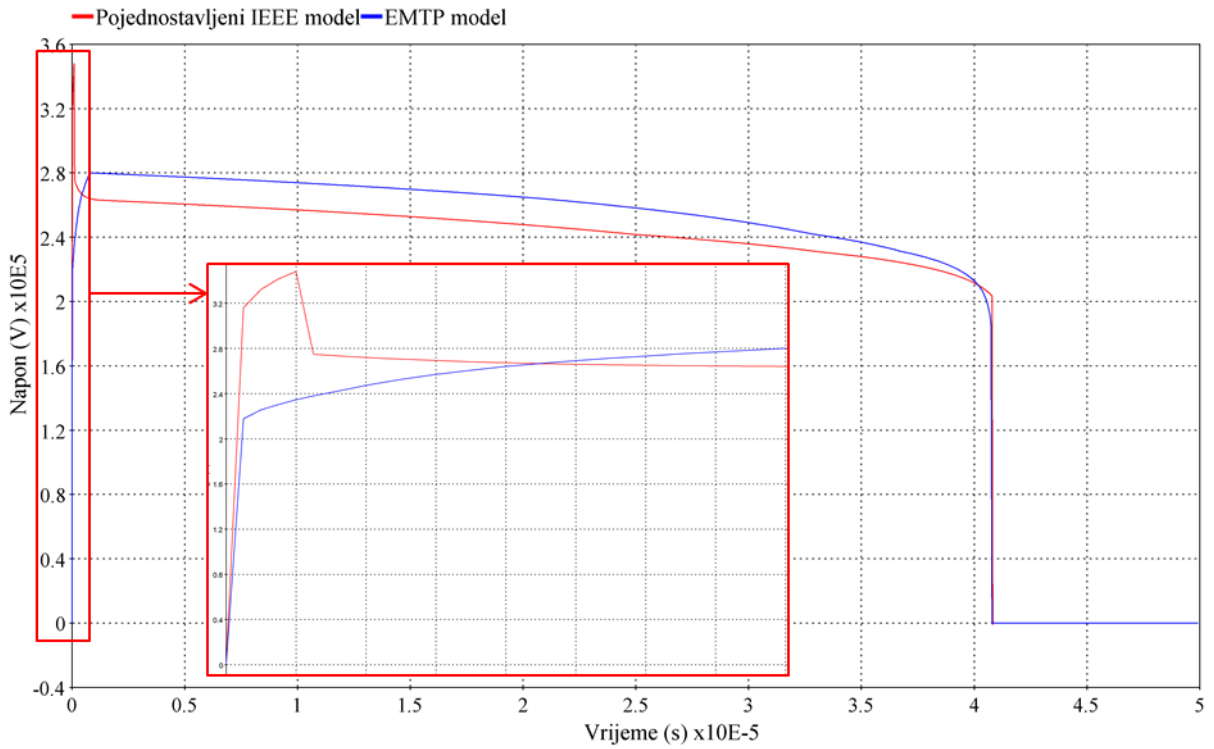


Slika 5.16: EMTP model odvodnika prenapona



Slika 5.17 : Pojednostavljeni IEEE model odvodnika prenpona (EMTP)

Na slici 5.18 prikazan je rezultat simulacije usporedbe preostalog napona na EMTP modelu odvodniku prenapona i na pojednostavljenom IEEE frekvencijski ovisnom modelu odvodniku prenapona pri strujnom valu oblika složene rampe i strmine 0,1/20,8 μs s obzirom na to da za strujne valove manje strmine razlika u preostalom naponu za ova dva modela nije izražena.



Slika 5.18: Preostali napon na odvodniku prenapona (EMTP)

Može se uočiti da je vršna vrijednost preostalog napona na odvodniku prenapona viša za frekvencijski ovisni, odnosno pojednostavljeni IEEE, model u odnosu na frekvencijski neovisni EMTP model, što izravno utječe na vjerojatnost pojave preskoka na izolatorskom lancu, ali samo za strujne impulse izrazito strmog čela (u primjeru vrijeme čela iznosi t_f = 0,1

μs). Za strujne impulse vremena trajanja čela t_f = 2 μs, koji se uobičajeno koriste pri simulacijama udara munje u nadzemni vod, utjecaj frekvencijski ovisnog modela odvodnika prenapona na pojavu preskoka na izolatorskom lancu ne dolazi do izražaja te se stoga u nastavku rada u simulacijama koristi jednostavni EMTP model odvodnika prenapona, bez frekvencijske ovisnosti.

5.6. Model otpora uzemljivača stupa

Vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu je veća što je veći otpor, odnosno impedancija uzemljivača stupa. Kako bi se postigla što bolja prenaponska karakteristika nadzemnog voda, odnosno smanjila vjerojatnost ispada nadzemnog voda zbog kvara uslijed pojave povratnog preskoka, u pravilu se pri projektiranju nadzemnog voda, nastoji postići što manji otpor, odnosno impedancija uzemljivača stupa. Osim odvođenja struja izazvanih atmosferskim pražnjenjima u zemlju, uzemljivač prvenstveno ima ulogu zaštite ljudi, odnosno ograničavanja pojave nedozvoljenih napona koraka i dodira koji se mogu pojaviti u sustavu uslijed kvara na nadzemnom vodu.

Prema načinu polaganja uzemljivači stupova nadzemnog voda mogu biti horizontalni ili vertikalni (sonde), a prema obliku prstenasti i zrakasti (radijalni) ovisno o uvjetima i strukturi okolnog tla [81]. Uobičajena izvedba uzemljivača na nadzemnim vodovima prijenosne mreže 110 kV u RH je ugradnja horizontalno položenih prstenastih i/ili zrakastih uzemljivača ili kombinacije istih:

- prsten (P),
- dva prstena (2P),
- zrakasti uzemljivač s 2, 3 i 4 kraka (2xL, 3xL, 4xL),
- kombinacija prstenastih i zrakastih uzemljivača (P+2xL, P+3xL, P+4xL, 2P+2xL, 2P+3xL, 2P+4xL).

Otpor uzemljivača ovisi o specifičnom otporu tla te dimenzijama i geometrijskom obliku uzemljivača, ponajviše o duljini uzemljivača i dubini ukapanja te u manjoj mjeri o njegovu presjeku.

Specifični otpor tla najvažniji je ulazni podatak pri proračunu otpora uzemljivača, a ovisi o kemijskom sastavu zemljišta, geološkim značajkama, sadržaju vlage i temperaturi. Problematika određivanja specifičnog otpora tla je vrlo složena zbog promjenjivosti svojstava

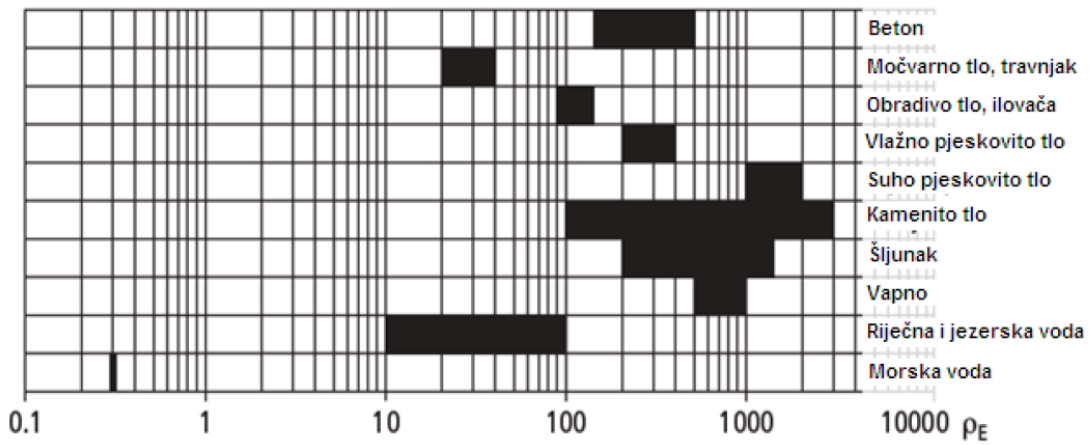
tla ovisno o području i atmosferskim prilikama. Specifični otpor tla se procjenjuje na osnovi izvida i analize strukture tla ili mjerenjem na površini i dubini u kojoj se polaže uzemljivač [82].

U homogenom tlu otpor uzemljivača R_u je funkcija specifičnog otpora tla [81]:

$$R_u = k \cdot \rho \cdot 10^{-2} \tag{5.19}$$

gdje su k konstanta uzemljivača, koja predstavlja otpor uzemljenja na 100 Ωm specifičnog otpora tla i ovisi isključivo o dimenzijama i geometrijskom obliku uzemljivača, a ρ specifični otpor tla u [Ωm], koji predstavlja otpor koji se suprotstavlja prolasku električne struje između dvije nasuprotne površine kocke homogenog tla, duljine stranice 1 m. Vrijednosti konstante k za standardizirane tipove uzemljivača dane su u [81].

Tipične vrijednosti specifičnog otpora za različite vrste tla raspoložive su u literaturi kako je prikazano na slici 5.19 [83].



Slika 5.19: Specifični otpor tla za neke vrste tla [83]

Primjer 5.6.1. Mjerenje specifičnog otpora tla na lokaciji stupa 110 kV nadzemnog voda [84]

Mjerenje specifičnog otpora tla na lokaciji stupa 110 kV nadzemnog voda je provedeno je na tri mjerne točke metodama geoelektričnog sondiranja, Schlumbergerovom i Wennerovom metodom, koje se razlikuju po međusobnom položaju elektroda. Obje metode koriste četiri elektrode postavljene na istoj liniji simetrično oko središta elektrodnog rasporeda, od kojih su dvije vanjske spojene na izvor izmjeničnog napona, a na dvije

unutarnje mjeri se napon. Na temelju izmjerenih vrijednosti napona U i struje I računa se električni otpor R između unutarnjih naponskih elektroda. Prividni specifični otpor tla ρ na određenoj dubini sondiranja određuje se množenjem s odgovarajućim faktorom ovisno o metodi [84], [85]. Wennerova metoda korištena je za manje dubine sondiranja (0,5 m), a Schlumbergerova metoda za veće dubine. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5.2.

Tablica 5.2: Rezultati mjerenja specifičnog otpora tla [84]

Dubina mjerenja [m]	**Mjerna točka 1**		**Mjerna točka 2**		**Mjerna točka 3**	
	Izmjereni otpor R [Ω]	**Prividni specifični otpor ρ [Ωm]**	**Izmjereni otpor R [Ω]**	**Prividni specifični otpor ρ [Ωm]**	**Izmjereni otpor R [Ω]**	**Prividni specifični otpor ρ [Ωm]**
0,5	1456,00	4574,17	891,00	2799,17	1397,00	4388,82
1	941,00	5542,96	515,00	3033,61	856,00	5042,27
2	285,10	7053,40	147,20	3641,74	212,80	5264,69
3	135,80	7626,00	75,40	4234,17	84,00	4717,11
5	112,70	8762,94	72,90	5668,31	49,60	3856,63
7,5	55,90	9834,46	31,70	5576,97	22,60	3976,01
10	61,10	9501,61	39,50	6142,61	24,70	3841,08
15	29,00	10203,92	21,60	7600,16	12,80	4503,80
Srednja vrijednost ρ za tri mjerne točke [Ωm]:	5724,44					

5.6.1. Efekt ionizacije tla

Stacionarne karakteristike uzemljivača pri mrežnoj frekvenciji 50 Hz u pravilu su dobro poznate i mogu se okarakterizirati radnim otporom.

Pri modeliranju otpora, odnosno impedancije uzemljivača stupa, za potrebe simulacije udara munje u nadzemni stup u obzir se uobičajeno uzima efekt ionizacije tla koju uzrokuje struja atmosferskog pražnjenja.

Pri struji atmosferskog pražnjenja otpor uzemljivača stupa ima nelinearnu karakteristiku određenu izrazom (5.22) [70]:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)}} \tag{5.20}$$

gdje je R_0 otpor uzemljivača stupa pri malim strujama i niskim frekvencijama (50 ili 60 Hz), I je amplituda struje atmosferskog pražnjenja koju odvodi uzemljivač stupa, a I_g je granična amplituda struje pražnjenja potrebna za iniciranje dovoljne ionizacije tla.

Struje pražnjenja malih amplituda u odnosu na graničnu struju ($I \ll I_g$) ne uzrokuju ionizacijski efekt i otpor uzemljivača stupa je $R_i = R_0$. Za struje pražnjenja velikih amplituda, većih od granične struje ($I > I_g$) otpor uzemljivača stupa varira prema zadanom izrazu. Iznos granične amplitude struje pražnjenja I_g određen je pomoću izraza (5.23):

$$I_g = \frac{\rho \cdot E_0}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2} \tag{5.21}$$

gdje je ρ specifični otpor tla, a E_0 jakost električnog polja potrebna za početak ionizacije tla. Pri simulacijama provedenim za potrebe ovog rada korištena je preporučena vrijednost 400 kV/m.

5.6.2. Mjerenje otpora uzemljivača stupa strujama niskih frekvencija

Pogonskim pravilnikom operatora prijenosnog sustava o održavanju dalekovoda propisano je periodičko mjerenje otpora uzemljivača stupova svakih 5 godina. U praksi se mjerenje otpora uzemljivača stupova dalekovoda provodi *U-I* metodom pri mrežnoj frekvenciji 50 Hz koja za cilj ima utvrditi da je svaki od stupova dalekovoda propisno uzemljen. Iznos otpora koji se izmjeri ovom metodom nije točan zbog utjecaja struje koja teče kroz zaštitni vodič. Podaci o otporu uzemljivača stupova izmjereni na taj način prikladni su za pogonske potrebe, ali ne i kao ulazni podaci za simulacije prenaponskih karakteristika i dimenzioniranje prenaponske zaštite nadzemnih vodova.

Eliminacija utjecaja zaštitnog vodiča i ostalih stupova pri mjerenju otpora uzemljivača stupa postiže se mjerenjima na frekvencijama višim od pogonske, uobičajeno do nekoliko kilohertza, pri čemu frekvencija mora biti dovoljno nisko ispod frekvencije rezonancije sustava uzemljenja i dovoljno visoko da eliminira utjecaj impedancije zaštitnog vodiča, odnosno njime priključenog sustava uzemljenja voda. Uzima se u obzir činjenica da je impedancija zaštitnog vodiča između stupova induktivnog karaktera, dok je impedancija

sustava uzemljenja stupa na ovim frekvencijama uglavnom čisti otpor. Korištenjem viših frekvencija, do nekoliko kHZ-a, pri mjerenju otpora uzemljivača postiže se da je impedancija zaštitnog vodiča značajno viša od otpora uzemljivača stupa te se može zanemariti utjecaj zaštitnog vodiča i drugih stupova pri mjerenju bez odspajanja zaštitnog vodiča. Ova metoda ne daje najtočnije rezultate u slučajevima visokih otpora uzemljivača i manjih razmaka između stupova. Iz tog razloga mjerenja se provode na različitim frekvencijama pri čemu rezultati mjerenja otpora uzemljivačapri niskim frekvencijama rastu s porastom frekvencije te konvergiraju prema konstantnoj vrijednosti pri najvišim mjernim frekvencijama [86], [87].

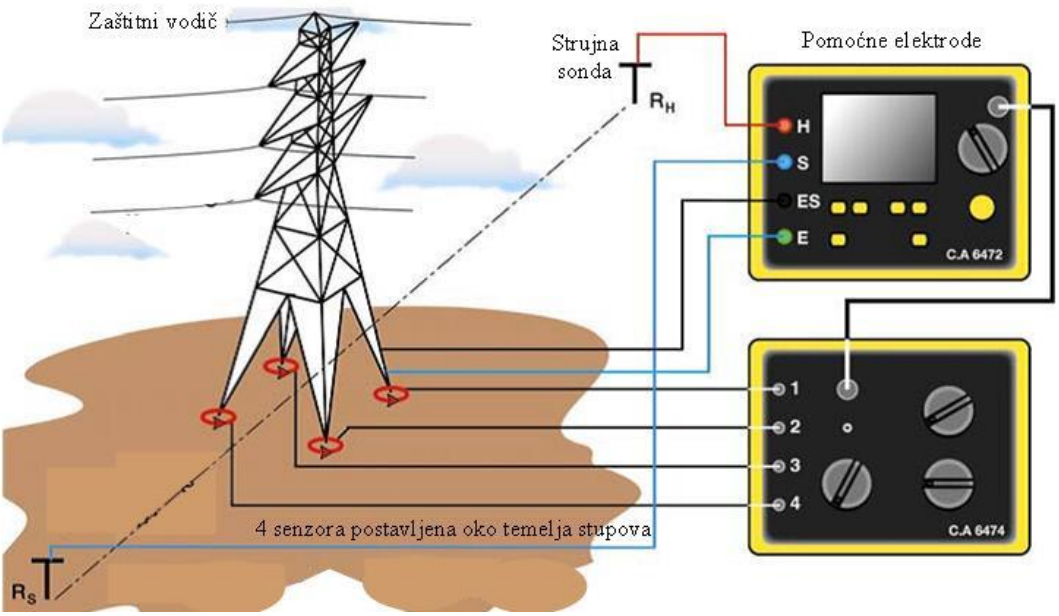
Metoda mjerenja injektiranih struja koristi dodatne ispitne sonde za izravno mjerenje dijela injektirane struje koja teče kroz uzemljivač stupa čiji se otpor mjeri. Mjerni uređaj s dodatkom za mjerenje otpora uzemljivača stupa bez odspajanja zaštitnog vodiča prikazan je na slici 5.20. Pri mjerenju se koriste senzori, odnosno Rogowski zavojnice, postavljeni oko temelja stupova (slika 5.21). Shema spoja mjernih uređaja pri mjerenju otpora uzemljivača bez odspajanja zaštitnog vodiča prikazana je na slici 5.22.



Slika 5.20: Mjerni uređaj i dodatak za mjerenje otpora uzemljivača stupa bez odspajanja zaštitnog vodiča

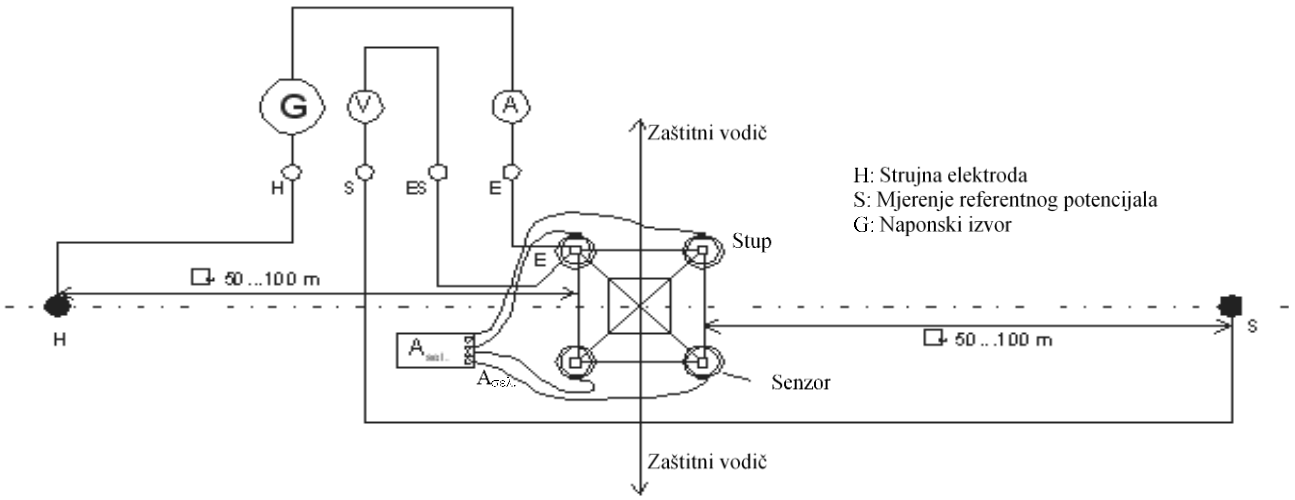


Slika 5.21: Rogowski zavojnica za mjerenje otpora uzemljivača stupa bez odspajanja zaštitnog vodiča



Slika 5.22: Shema spoja mjernih uređaja pri mjerenju otpora uzemljenja [88]

Na slici 5.23 prikazana je shema spoja mjernog uređaja na stup nadzemnog visokonaponskog voda pri mjerenju otpora uzemljivača metodom injektiranih struja stupa bez odspajanja zaštitnog vodiča. Izvor (G) injektira struju u stup (E) tijekom čega dio struje prolazi kroz zaštitni vodič i sustav uzemljenja stupa. Strujna petlja je spojena sa zemljom i pomoćnim sustavom uzemljenja (H). Suma preostalih struja u sustavu uzemljenja mjeri se adapterom (A) s Rogowski zavojnicama, kojima su obuhvaćena četiri spoja stupa s temeljima, spojenim na mjerni uređaj. Napon (V) se mjeri između priključaka "ES" na stupu i ispitne sonde "S". Pomoću na ovaj način izmjerenih vrijednosti struje i napona računa se otpor uzemljivača stupa [88].

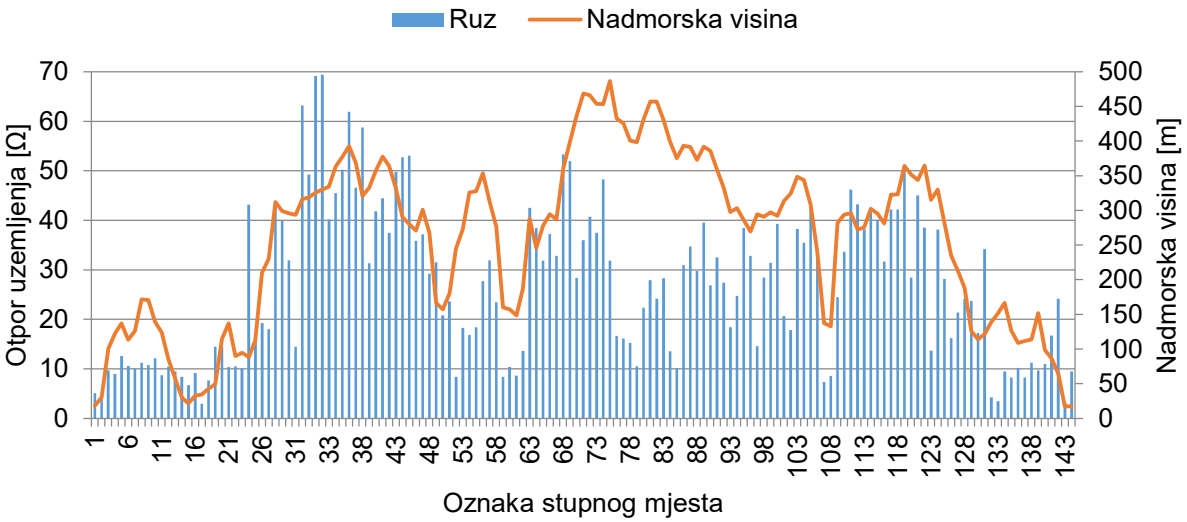


Slika 5.23: Shema mjerenja otpora uzemljivača bez odspajanja zaštitnog vodiča [88]

Primjer 5.6.2. Mjerenje otpora uzemljivača stupova niskim frekvencijama

Mjerenje otpora uzemljivača stupova na promatranom nadzemnom vodu provedeno je korištenjem uređaja za automatizirano mjerenje otpora uzemljenja metodom injektiranih struja, mjerenjem pada potencijala izvora ugrađenom u uređaj u konfiguraciji s dva pomoćna uzemljivačka šiljka (strujna i naponska sonda) i odgovarajućeg adaptera za stupove dalekovoda (slika 5.23) [88]. Izmjenični izvor napajanja ugrađen u instrument injektira preko strujne sonde struju kroz ispitivani uzemljivač kojom se postiže podizanje potencijala ispitivanog uzemljivača prema referentnoj zemlji, izražen kao napon mjeren između naponske sonde i ispitivanog uzemljivača. Iz omjera napona i struje uređaj automatski izračunava otpor na određenoj mjernoj frekvenciji. Pri mjerenju je korištena metoda injektirane struje frekvencije 5078 Hz kojom se simulira odvajanje zaštitnog vodiča od stupa te se eliminira njegov utjecaj na rezultate mjerenja. Na taj način se pri mjerenju uzima u obzir samo otpor tla i uzemljivača te konfiguracija uzemljivača što rezultira približno točnim otporom uzemljivača stupova. Pri mjerenju, udaljenost strujne sonde od stupa iznosila je do 100 m, a naponske sonde 90 m, ovisno o konfiguraciji okolnog terena, međusobno razmaknute pod kutom od 180°. Podaci o otporu uzemljivača stupova dobiveni tom metodom korišteni su u ovom radu kao ulazni podaci za simulacije atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod i proračune prenaponske zaštite.

Slika 5.24 prikazuje izmjerene vrijednosti otpora uzemljivača te nadmorsku visinu na kojoj se nalaze stupovi promatranog 110 kV dalekovoda te je moguće uočiti da je izmjereni otpor u korelaciji s nadmorskom visinom, odnosno da su za stupove na većoj nadmorskoj visini izmjereni veći iznosi otpora uzemljivača. Osim konfiguracije terena razlog tome je i taj što je na većim nadmorskim visinama veći specifični otpor tla odnosno prevladava stjenovito tlo. Vrijednosti otpora uzemljivača stupova mogu značajno varirati čak i ako su svi stupovi jednako uzemljeni. Izmjerene vrijednosti otpora uzemljivača stupova na slici 5.24 variraju duž trase dalekovoda u rasponu od 2,93 Ω do 69,44 Ω. Takvi rezultati mjerenja su u skladu s mjerenjima specifičnog otpora tla opisanim u primjeru 5.6.1 koja su pokazala da specifični otpor tla može iznositi od 56 Ωm do 7887 Ωm duž trase dalekovoda [84]. Zbog visokih otpora uzemljivača stupova, povećana je učestalost pojava povratnih preskoka na dionicama dalekovoda na višim nadmorskim visinama.



Slika 5.24: Vrijednosti otpora uzemljivača i nadmorska visina po stupnim mjestima

6. Model frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa

6.1. Impulsna impedancija uzemljivača stupa

U novije vrijeme sve je više istraživanja koja su potvrdila frekvencijsku ovisnost impedancije uzemljivača stupova, posebno za tla s visokim specifičnim otporom [13], [14], [15]. Pri atmosferskim pražnjenjima, kao i brzim sklapanjima u elektroenergetskom sustavu, uzemljivač treba učinkovito odvesti u zemlju udarne struje vrlo velikih amplituda i vrlo strmog čela strujnih valova. Stoga je poznavanje elektromagnetskog dinamičkog odziva uzemljivača ključno za funkcioniranje i dimenzioniranje prenaponske zaštite nadzemnih vodova.

Karakteristike zemlje, odnosno tla, na kojem su locirani elementi elektroenergetskog sustava utječu na pogon, a posebice za vrijeme trajanja kvara kada sustav uzemljenja provodi struju kvara u zemlju. Karakteristike tla značajno utječu na širenje elektromagnetskih polja duž trase nadzemnog voda uslijed prijelaznih pojava. Posebno je važan utjecaj karakteristika zemlje na prenaponsku karakteristiku visokonaponskih nadzemnih vodova.

Prolazak struje atmosferskog pražnjenja kroz sustav uzemljenja uzrokuje pojavu dva efekta u tlu, ionizaciju tla i frekvencijsku ovisnost električkih parametara tla. U prethodnom poglavlju je pokazano da efekt ionizacije tla utječe na iznos otpora uzemljivača samo za struje atmosferskih pražnjenja visokih iznosa amplituda.

U [14] je dan pregled rezultata istraživanja frekvencijske ovisnosti specifičnog otpora tla i permitivnosti u frekvencijskom opsegu atmosferskih prenapona, kao i utjecaj frekvencijske ovisnosti električnih parametara tla na prenaponsku karakteristiku sustava uzemljenja, na prenaponsku zaštitu visokonaponskih nadzemnih vodova te na inducirane prenapone. Pokazano je da je utjecaj efekta frekvencijske ovisnosti električnih parametara zemlje na prenaponsku karakteristiku sustava uzemljenja i dalekovoda posebno izražen za tla sa srednjim i visokim vrijednostima specifičnog otpora pri niskoj frekvenciji (50 Hz), odnosno za $\rho_0 > 500$ Ωm.

Atmosferski prenaponi predstavljaju prijelazne pojave širokog opsega frekvencija, uključujući i one vrlo visoke te se odziv karakteristika zemlje i sustava uzemljenja pri provođenju struje atmosferskih pražnjenja znatno razlikuje od odziva pri niskoj frekvenciji.

Utjecaj atmosferskih prenapona na odziv sustava uzemljenja određen je frekvencijskom ovisnošću impedancije uzemljivača.

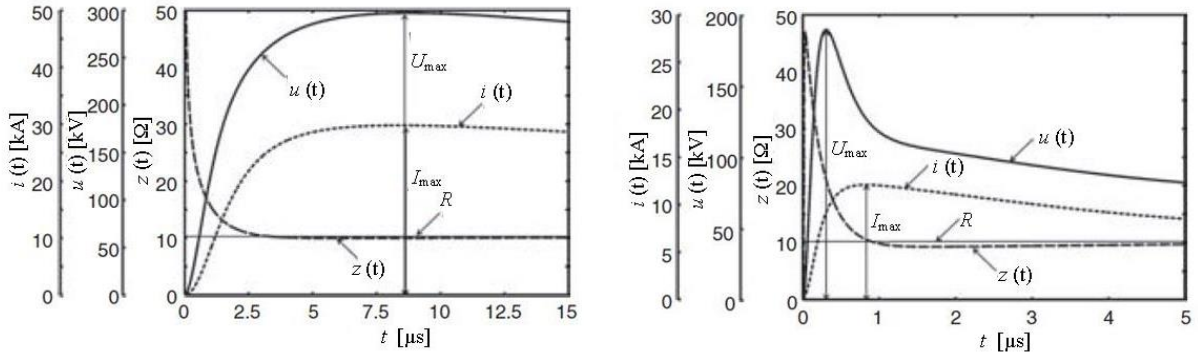
Pri višim frekvencijama koje odgovaraju strujama atmosferskih pražnjenja dolazi do izražaja frekvencijska ovisnost kapaciteta i induktiviteta pojedinih dijelova uzemljivača stupa, a isto tako i okolnog tla, pa se odnos napona i struje za potrebe simulacija atmosferskih pražnjenja u stup nadzemnog voda ne može uzeti kao konstantna vrijednost. Impulsna (udarna) impedancija uzemljivača stupa Z_{imp} pri odvođenju struje atmosferskog pražnjenja u zemlju može biti veća ili manja od stacionarnog otpora uzemljenja pri mrežnim frekvencijama ili istosmjernoj struji, ovisno o obliku i duljini uzemljivača, specifičnom otporu tla te o trajanju, amplitudi i obliku struje.

U ovom radu predložen je odgovarajući model frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača razvijen temeljem rezultata provedenog mjerenja impedancije uzemljivača stupova u uvjetima povišenog specifičnog otpora tla [84]. Ako se pri simulacijama atmosferskog pražnjenja u modelu impedancije uzemljivača stupa u obzir uzima frekvencijska ovisnost, uobičajeno se ne modelira utjecaj efekta ionizacije tla, posebice za amplitude struje pražnjenja manje od granične struje I_g.

Impedancija uzemljivača pri strujama visokih frekvencija ovisi o parametrima koji nemaju utjecaj na stacionarni otpor uzemljivača pri mrežnim frekvencijama: amplituda i trajanje čela strujnog vala atmosferskog pražnjenja, smanjenje aktivne duljine vodiča, ionizacija tla u okolini uzemljivača, prigušenje viših frekvencija uslijed svojstva tla te geometrija vodiča iznad tla [89].

Uslijed vremenski promjenjive struje $i(t)$, injektirane u jednoj točki uzemljivača koja uzrokuje porast potencijala te točke prema referentnoj zemlji $u(t)$, dinamički odziv uzemljivača (slika 6.1) okarakteriziran je prijelaznom impedancijom $z(t)$ prema izrazu:

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \tag{6.1}$$



a) b)

Slika 6.1: Strujni impuls $i(t)$, prijelazni napon $u(t)$ i impedancija uzemljivača $z(t)$
a) pri prvom udaru i b) pri uzastopnom udaru [90]

Oznake na slici 6.1 predstavljaju $z(t)$ prijelaznu impedanciju uzemljivača, $u(t)$ prijelazni napon uzemljivača, $i(t)$ vremenski promjenjivu struju, U_{max} maksimalnu amplitudu napona, I_{max} maksimalnu amplitudu struje i R stacionarni otpor uzemljivača.

U ovom radu Z_{imp} određena je kao omjer maksimalne amplitude napona U_{max} i vrijednosti struje u trenutku maksimalne amplitude napona, odnosno maksimalne amplitude struje I_{max} za strujni impuls prvog udara:

$$Z_{imp} = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \tag{6.2}$$

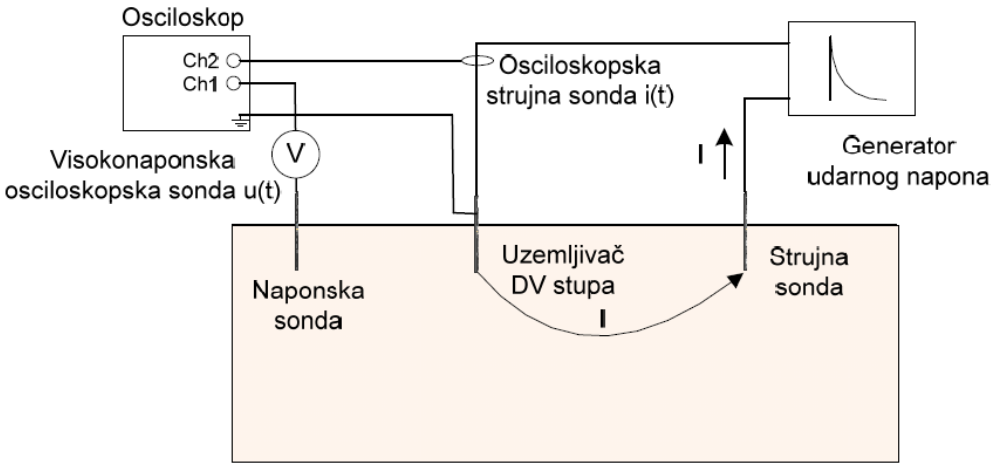
gdje je U_{max} maksimalna amplituda napona, a I_{max} maksimalna amplituda struje.

Impulsna impedancija Z_{imp} je frekvencijski ovisna veličina, koja značajno ovisi o vremenu trajanja čela udarnog vala. Stacionarni otpor uzemljivača R predstavlja vrijednost prijelazne impedancije uzemljivača u vremenskoj domeni na kraju prijelazne pojave.

6.2. Mjerenje impulsne impedancije uzemljivača stupa

Na izolatorskim lancima stupova s visokim vrijednostima otpora uzemljivača češće dolazi do pojave povratnih preskoka uslijed atmosferskih prenapona. Uzimajući u obzir da impedancija uzemljivača stupa ovisi o frekvenciji i da je pri visokim frekvencijama više impedancija nego otpor, provode se mjerenja impulsne impedancije uzemljivača stupa kako bi se odredio frekvencijski odziv uzemljivača stupa. Određivanje impulsnih karakteristika uzemljivača, provodi se strujama različitih amplituda i trajanja impulsa. Koristi se 4-polna U-I metoda sa dvije pomoćne sonde (strujna i naponska) prema shemi mjerenja prikazanoj na slici

6.2 [84]. Pokusi sa kraćim trajanjem čela vala udarne struje sadrže više frekvencije. Pomoćne sonde smještene su na istim pozicijama kao i pri mjerenju strujama niskih frekvencija.



Slika 6.2: Principna shema mjerenja impedancije uzemljivača impulsnim strujama [84]

Za mjerenje struje u mjernom krugu koristi se visokofrekvencijska osciloskopska strujna sonda (30 A_{rms}, 50 A_{peak}, 50 MHz). Za mjerenje napona između uzemljivača i naponske sonde koristi se visokonaponska osciloskopska sonda (4 kV, 400 MHz).

Iz snimljenih valnih oblika napona i struje, moguće je odrediti impulsnu impedanciju uzemljivača Z_{imp}, koja se računa prema izrazu (6.2).

Primjer 6.2.1 Mjerenje impulsne impedancije uzemljivača stupa

Mjerenje impulsne impedancije uzemljivača provedeno je za stup nadzemnog voda za koji je prethodno izmjeren visoki iznos stacionarnog otpora uzemljivača stupa. U primjeru 5.6.1 su prikazani rezultati mjerenja specifičnog otpora tla na lokaciji promatranog stupa. Srednja izmjerena vrijednost specifičnog otpora tla na lokaciji promatranog stupa iznosi 5724,44 Ωm. Zbog usporedbe na istoj lokaciji su provedena mjerenja impedancije uzemljivača stupa strujama niskih frekvencija, opisana u prethodnom poglavlju, i mjerenja strujama visokih frekvencija.

Mjerenja impedancije uzemljivača strujama niskih frekvencija te strujama visokih frekvencija provedena su za tri različite konfiguracije: na stupu sa spojenim uzemljivačem u zemlji i temeljnim uzemljivačem (ukupno), na stupu sa spojenim samo prirodnim temeljnim uzemljivačem (uzemljivač u zemlji je odspojen), na uzemljivaču u zemlji koji je odspojen od stupa (sva 4 kraka su međusobno povezana).

Rezultati mjerenja otpora uzemljenja strujama niskih frekvencija za zaštitni vodič odspojen od stupa i za sve tri konfiguracije prikazani su u tablici 6.1.

Tablica 6.1: Rezultati mjerenja otpora uzemljivača strujama niskih frekvencija za zaštitni vodič odspojen od stupa

Konfiguracija	Mjerna frekvencija [Hz]	Mjerna struja [mA]	Mjerni napon [V]	Otpor uzemljivača [Ω]
DV stup sa spojenim uzemljivačem u zemlji i temeljnim uzemljenjem (ukupno)	41			177,10
	128	15,4	2,69	174,90
	1270			166,10
	2539			161,10
	4102			155,80
	5078			151,90
DV stup sa spojenim samo temeljnim uzemljenjem	41			188,50
	128	15,4	2,83	185,90
	1270			176,40
	2539			171,10
	4102			165,60
	5078			162,40
Uzemljivač u zemlji	41			183,50
	128	15,3	2,78	181,60
	1270			172,10
	2539			166,10
	4102			161,40
	5078			158,80

U automatskom načinu rada, uređaj u području mrežne frekvencije posjeduje nekoliko mjernih frekvencija koje se automatski preklapaju. U ovom slučaju je 128 Hz mjerna frekvencija s najmanjim utjecajem smetnje.

Mjerenje impulsne impedancije uzemljivača provedeno je korištenjem strujnog valnog oblika s različitim vremenima trajanja čela, odnosno različite frekvencije, a rezultati mjerenja za zaštitni vodič odspojen od stupa i za sve tri konfiguracije prikazani su u tablici 6.2:

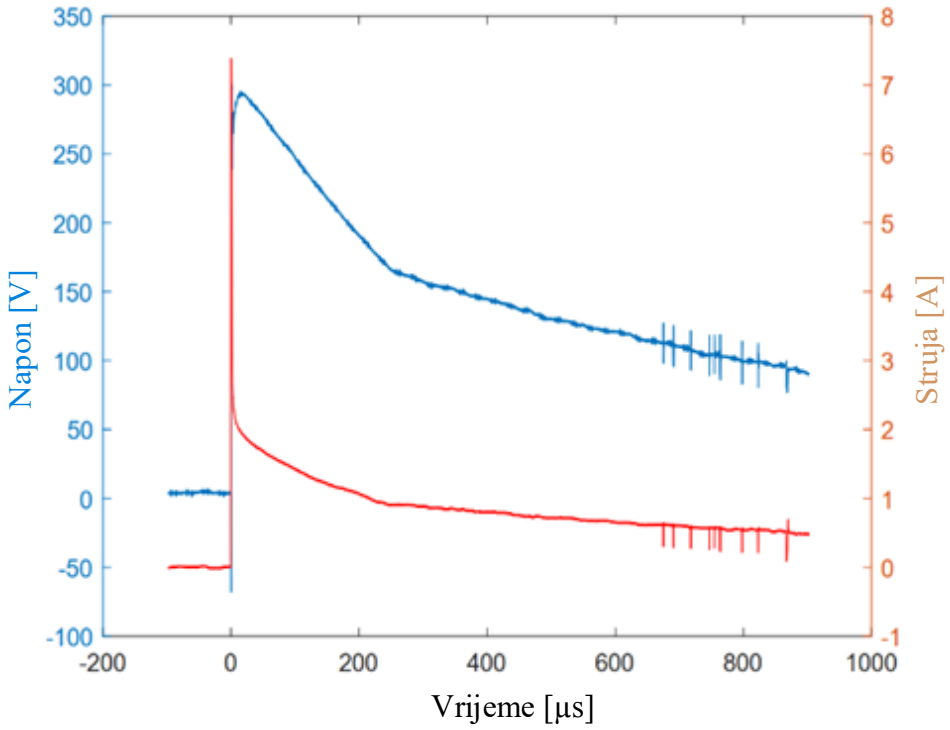
Tablica 6.2: Rezultati mjerenja strujama visokih frekvencija za odspojeni zaštitni vodič

Konfiguracija	Rezultati mjerenja					
DV stup sa spojenim uzemljivačem u zemlji i temeljnim uzemljenjem (ukupno)	t_f [μs]	1,22	7,23	12,04	18,16	25,52
	U_{max} [V]	300,38	330,95	421,55	400,20	340,25
	I_{max} [A]	4,60	2,56	3,10	2,78	2,30
	Z_{imp} [Ω]	**65,33**	**129,35**	**136,00**	**143,89**	**148,11**
DV stup sa spojenim samo temeljnim uzemljenjem	t_f [μs]	1,11	7,42	12,31	17,63	25,22
	U_{max} [V]	392,13	464,30	441,25	375,03	359,15
	I_{max} [A]	6,19	3,48	3,05	2,48	2,31
	Z_{imp} [Ω]	**63,33**	**133,44**	**144,88**	**150,99**	**155,68**
Uzemljivač u zemlji	t_f [μs]	1,28	7,31	11,53	18,41	24,66
	U_{max} [V]	315,53	376,13	314,50	399,55	310,53
	I_{max} [A]	4,37	2,87	2,27	2,75	2,07
	Z_{imp} [Ω]	**72,17**	**131,23**	**138,42**	**145,43**	**149,88**

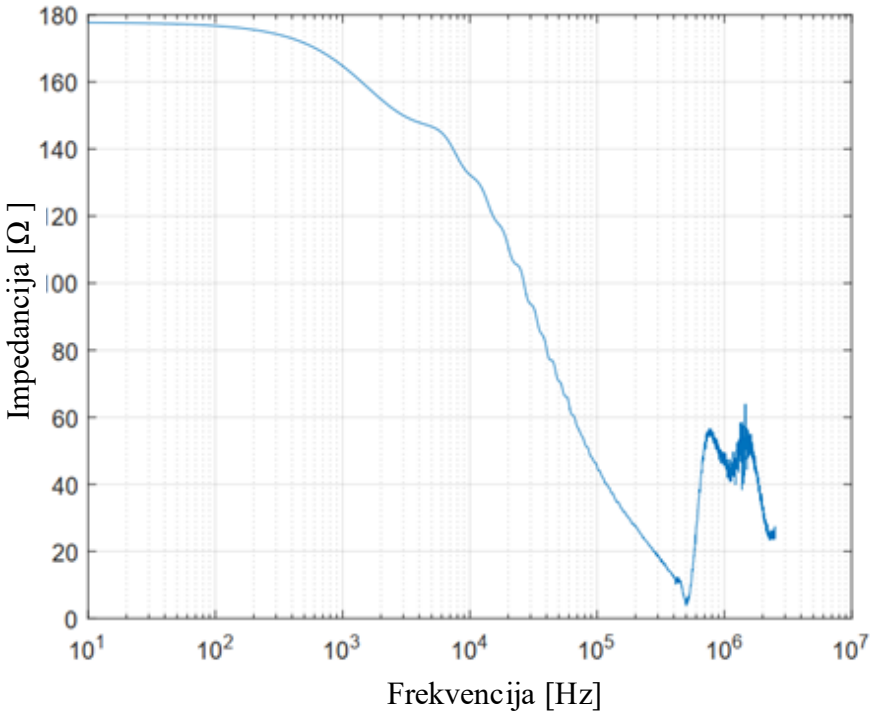
Na slici 6.3 a) prikazani su snimljeni oscilogrami napona i struje za mjerenje s najkraćim vremenom trajanja čela vala t_f = 1,22 μs, odnosno s najbržim strujnim impulsom, za konfiguraciju stupa sa spojenim uzemljivačem u zemlji i temeljnim uzemljenjem. Iz oscilograma napona i struja, pomoću Fourierove transformacije, određena je prijelazna impedancija uzemljivača u frekvencijskoj domeni prikazana grafom na slici 6.3 b).

Na slici 6.3. b) može se vidjeti da vrijednost amplitude impedancije uzemljivača stupa pada s porastom frekvencije za tlo s visokim specifičnim otporom, što je u skladu s [13], [14], [15]. Najviša frekvencija mjernog napona iznosila je 410 kHz te prikazane vrijednosti za

frekvencije iznad 410 kHz nisu valjane. Za mjerenja pri višim frekvencijama bilo bi potrebno generirati naponski val veće strmine.



a)

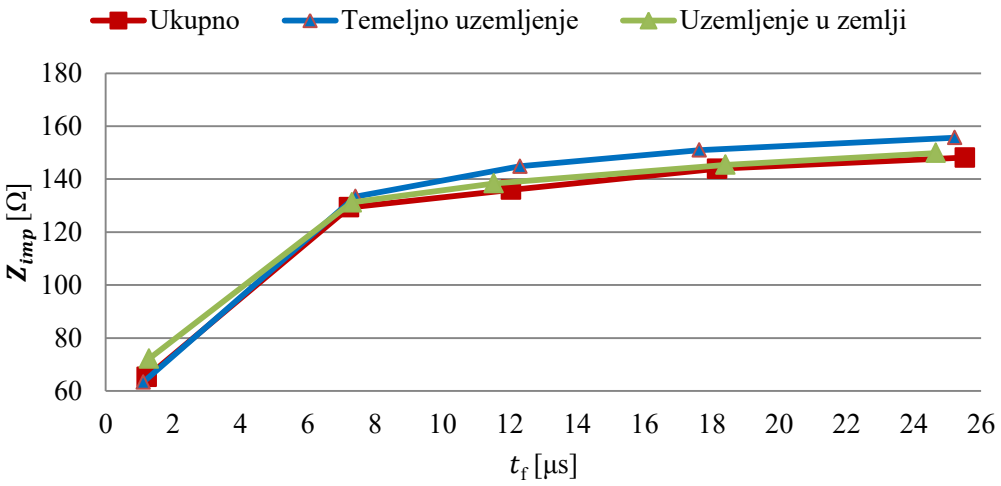


b)

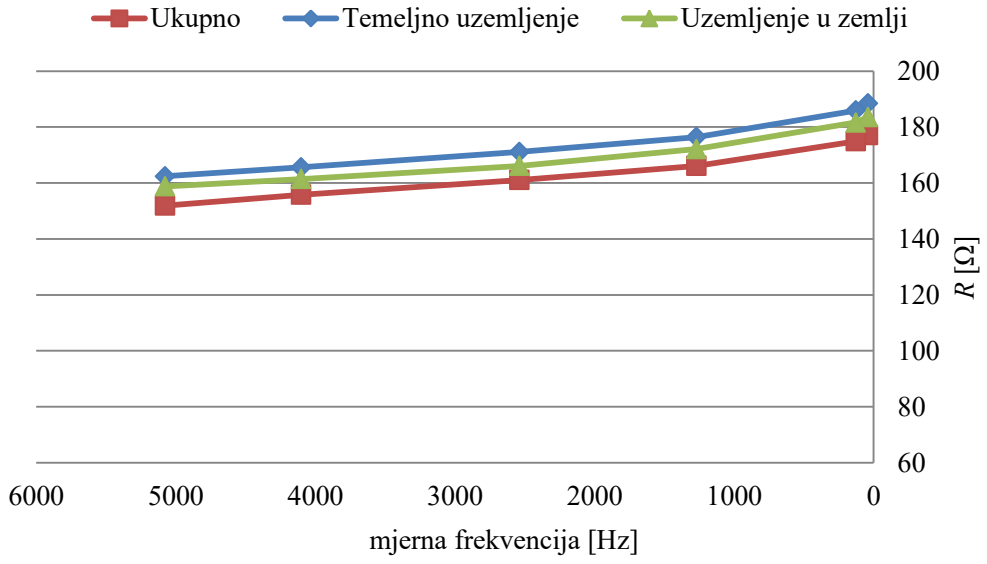
Slika 6.3: Oscilogrami a) izmjerene struje i napona i b) izmjerene impedancije

Vrijednost stacionarnog otpora uzemljivača R = 178,0 Ω određena je kao vrijednost prijelazne impedancije uzemljivača u vremenskoj domeni na kraju prijelazne pojave, odnosno kao vrijednost impedancije pri frekvenciji f = 50 Hz kako je prikazano na slici 6.3 b). Navedena vrijednost podudara se sa vrijednošću otpora uzemljivača izmjerenih u području niskih frekvencija R = 177,1 Ω, izmjereno pri f = 41 Hz (tablica 6.1), što potvrđuje točnost oba provedena mjerenja.

Vrijednost impulsne impedancije pada sa smanjivanjem trajanja čela vala udarnog napona, odnosno s povećanjem frekvencije, u sve tri konfiguracije mjerenja kako je prikazano na na slici 6.4 a, jednako kao i vrijednost otpora uzemljivača izmjerena u području niskih frekvencija s povećanjem frekvencije kako je prikazano na slici 6.4 b.



a)



b)

Slika 6.4: Ovisnost impedancije uzemljivača o frekvenciji (a) i ovisnost otpora uzemljivača o frekvenciji (b)

Na istom stupu provedena su mjerenja otpora uzemljivača niskim frekvencijama za sve tri navedene različite konfiguracije i za zaštitni vodič spojen na stup. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 6.3.

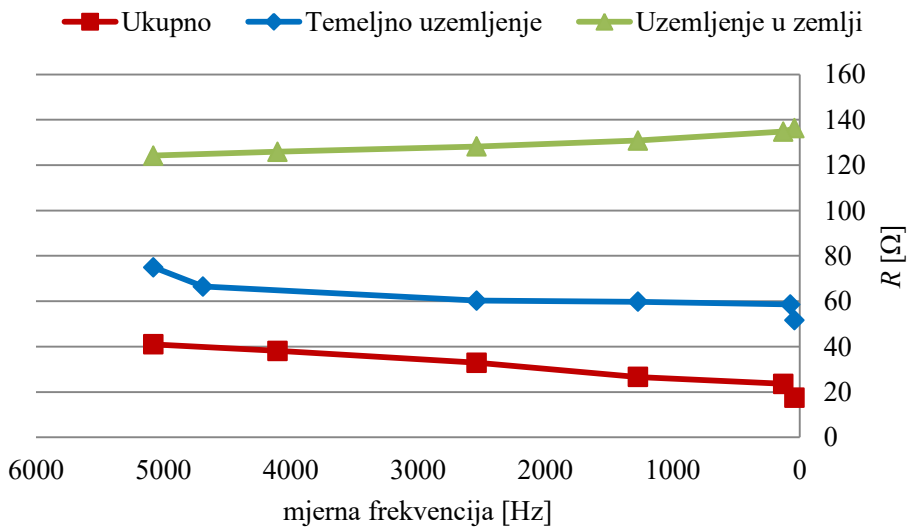
Tablica 6.3: Rezultati mjerenja otpora uzemljivača strujama niskih frekvencija za zaštitni vodič spojen na stup

Konfiguracija	Mjerna frekvencija [Hz]	Mjerna struja [mA]	Mjerni napon [V]	Otpor uzemljivača [Ω]
DV stup sa spojenim uzemljivačem u zemlji i temeljnim uzemljenjem (ukupno)	41			17,52
	128	16,6	0,392	23,60
	1270			26,65
	2539			32,87
	4102			38,14
	5078			41,03
DV stup sa spojenim samo temeljnim uzemljenjem	41			51,59
	73	16,2	0,947	58,61
	1270			59,80
	2539			60,26
	4688			66,49
	5078			74,95
Uzemljivač u zemlji	41			136,30
	128	15,7	2,11	134,80
	1270			130,80
	2539			128,20
	4102			125,90
	5078			124,20

Pri frekvenciji 128 Hz, što je mjerna frekvencija s najmanjim utjecajem smetnje, i konfiguraciji spojenog uzemljivača u zemlji i temeljnog uzemljenja te odspojenim zaštitnim vodičem, izmjerena je vrijednost otpora uzemljivača stupa 174,70 Ω (tablica 6.1), što je znatno više od izmjerenih 23,60 Ω u istoj konfiguraciji sa zaštitnim vodičem spojenim na stup (tablica 6.3).

Usporedbom rezultata mjerenja otpora uzemljivača sa zaštitnim vodičem spojenim na stup pri frekvenciji 5078 Hz za konfiguraciju sa spojenim uzemljivačem u zemlji i temeljnim uzemljenjem (ukupno) R = 41,04 Ω (tablica 6.3, slika 6.5) s rezultatom mjerenja otpora uzemljivača s odspojenim zaštitnim vodičem pri istoj frekvenciji i za istu konfiguraciju R = 151,90 Ω (tablica 6.1), može se zaključiti da vrijednost impedancije zaštitnog vodiča pri frekvenciji 5078 Hz nije dovoljno velika da eliminira utjecaj uzemljivača paralelno spojenih stupova na mjerni rezultat.

Navedene razlike u rezultatima mjerenja s obzirom na to je li zaštitni vodič spojen ili odspojen od stupa upućuju na to da metode mjerenja za zaštitni vodič spojen na stup ne daju točne rezultate te se rezultati takvih mjerenja mogu koristiti kao indikacija o stanju uzemljivača stupa, ali nisu prikladni kao ulazni podaci za provođenje proračuna prenaponske karakteristike.

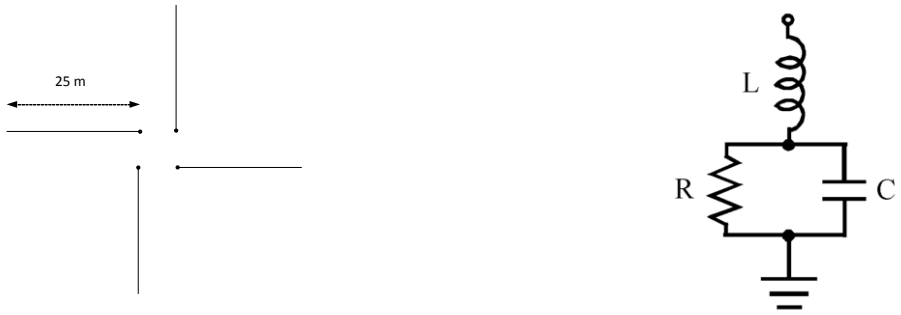


Slika 6.5: Ovisnost otpora uzemljivača o frekvenciji pri mjerenjima niskim frekvencijama za zaštitni vodič spojen na stup

Provedena mjerenja impulsne impedancije uzemljivača za zaštitni vodič odspojen od stupa pokazala su značajnu frekvencijsku ovisnost impedancije uzemljivača, pri čemu vrijednost otpora uzemljivača izmjerena pri niskim frekvencijama odgovara stacionarnoj vrijednosti impedancije uzemljivača. Vrijednost impedancije uzemljivača pada s porastom frekvencije iz razloga što se specifični otpor i permitivnost tla značajno smanjuju za tla sa specifičnim otporom pri niskim frekvencijama višim od 500 Ωm [13], [14], [15]. Zbog toga se prilikom modeliranja uzemljivača stupova s visokim vrijednostima impedancije za potrebe provođenja simulacija atmosferskih pražnjenja, u obzir uzima frekvencijska ovisnost impedancije.

6.3. Model frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa

Frekvencijska ovisnost i visokofrekvencijski odziv uzemljivača su razmatrani u [13], [91], [92], [93]. Model frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa temeljem provedenog mjerenja impulsne impedancije predložen je u [16].



a) b)

Slika 6.6: Konfiguracija uzemljivača stupa 4 x L (a) i nadomjesni model uzemljivača stupa (b)

Uzemljivač konfiguracije 4 x L prikazan na slici 6.6 a) može se modelirati pomoću RLC strujnog kruga prikazanog na slici 6.6 b) [90]. Uz pretpostavku da je tlo homogeno, parametri R, L i C računaju se korištenjem sljedećih izraza [15], [90], [93]:

$$R = \frac{\rho(f)}{\pi * d} * A2 \tag{6.3}$$

$$L = \frac{\mu_0 * d}{2 * \pi} * A2 \tag{6.4}$$

$$C = \frac{\pi * \varepsilon(f) * d}{A2} \tag{6.5}$$

$$A2 = \frac{1}{8} * \left(\ln\left(\frac{2 * d}{a}\right) + \ln\left(\frac{2 * d}{s}\right) + 2{,}912 - 1{,}071 * \frac{s}{d} + 0{,}645 * \frac{s^2}{d^2} - 0{,}145 * \frac{s^4}{d^4}\right) \tag{6.6}$$

gdje je $\rho(f)$ frekvencijski ovisan specifični otpor zemlje i računa se prema [14]:

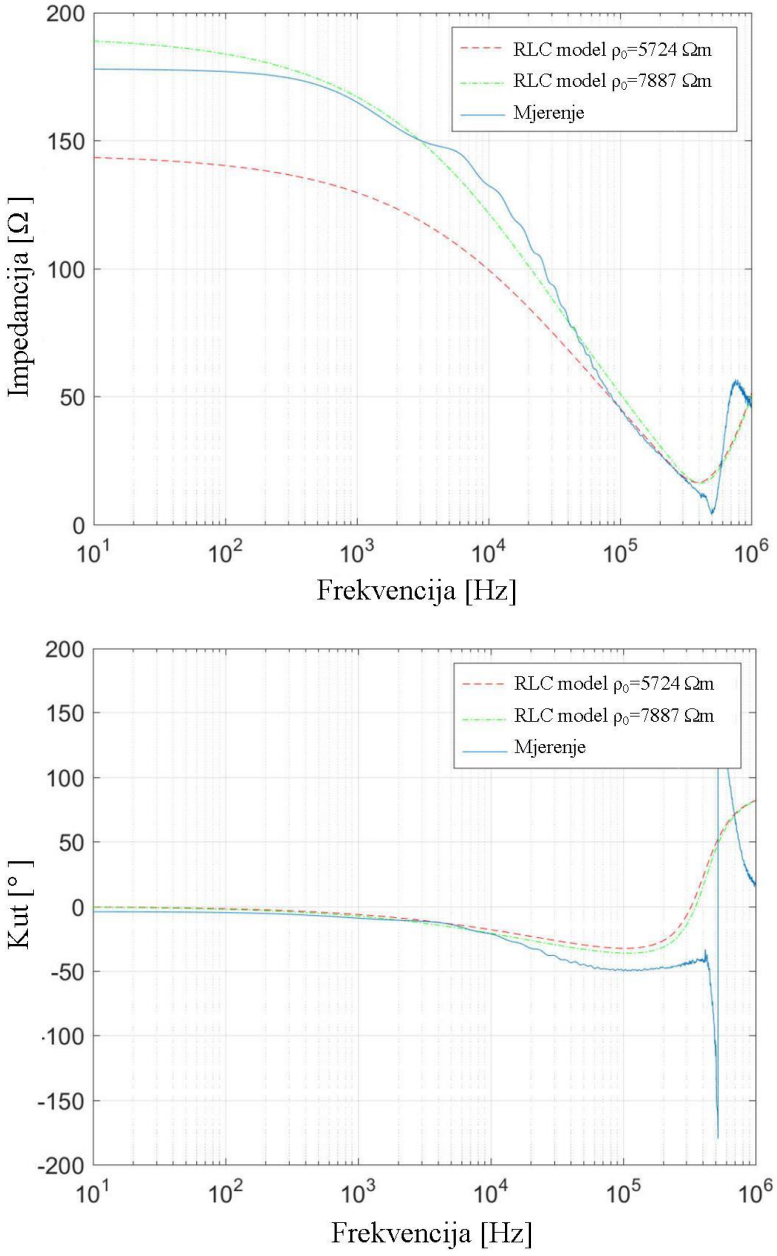
$$\rho(f) = \frac{\rho_0}{1 + 4{,}7 * 10^{-6} * {\rho_0}^{0{,}73} * f^{0{,}54}} \tag{6.7}$$

a $\varepsilon(f)$ frekvencijski ovisna permitivnost zemlje i računa se prema [14]:

$$\varepsilon(f) = 9{,}5 * 10^4 * {\rho_0}^{-0{,}27} * f^{-0{,}46} + 12 \tag{6.8}$$

U izrazima (6.3) – (6.6) d je duljina pojedine elektrode uzemljivača (25 m), a je ekvivalentni promjer elektrode (50 mm^2), a s je jednak dvostrukoj dubini na kojoj je položen uzemljivač (1,4 m). U izrazima (6.7) i (6.8) je ρ_0 specifični otpor tla pri niskoj frekvenciji, a f frekvencija.

Primjer 6.3.1 Usporedba rezultata mjerenja impulsne frekvencije i frekvencijski ovisnog modela impedancije uzemljivača



Slika 6.7: Usporedba amplitude i faznog kuta izmjerene i izračunate frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača

U usporedbi s rezultatima mjerenja impedancije, RLC model daje slične vrijednosti, kako amplitude tako i faznog kuta, kako je prikazano na slici 6.7. Može se vidjeti da je

frekvencijski odziv impedancije uzemljivača jednak za opisani model kao i pri provedenom impulsnom mjerenju, pri čemu se vrijednost impedancije uzemljivača smanjuje s porastom frekvencije, kako je za tla s visokim specifičnim otporom pokazano u literaturi [13], [14], [15]. Vrijednosti izmjerene pri frekvenciji višoj od 410 kHz nisu pouzdane jer je najviša frekvencija mjernog napona iznosila 410 kHz.

6.4. Frekvencijski odziv uzemljivača stupa

Za opis složenog frekvencijskog odziva impedancije uzemljivača stupa u programima za analizu elektromagnetskih prijelaznih pojava, kao što je EMTP, koriste se jednadžbe prostora stanja (*engl. state space representation*) temeljene na prijenosnim jednadžbama [92], [94], [95]. Varijable stanja predstavljaju minimalni broj unutrašnjih varijabli sustava kojima se može u potpunosti opisati ponašanje sustava. Opis sustava jednadžbama varijabli stanja sastoji se u tome da se ponašanje dinamičkog sustava umjesto diferencijalnom jednadžbom n-tog reda, prikaže sustavom od n diferencijalnih jednadžbi prvog reda.

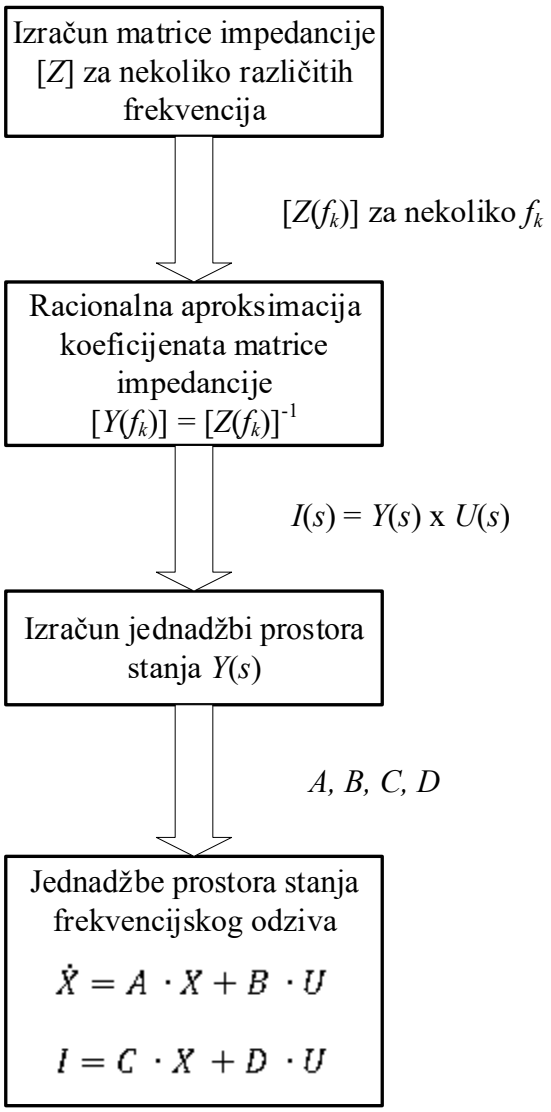
Prikaz postupka modeliranja impedancije uzemljivača pomoću jednadžbi stanja opisan je na slici 6.8. Pri implementaciji modela uzemljivača pomoću jednadžbi stanja frekvencijski ovisnu matricu admitancije uzemljivača potrebno je matematički aproksimirati racionalnim funkcijama. Racionalna aproksimacija podrazumijeva matematički opis mjerenih ili izračunatih elemenata matrice admitancije, $Y_{n,m}(s)$ racionalnim izrazima što manjeg stupnja, $Y_{n,m,fit}(s)$. Pomoću odgovarajućeg algoritma u prvom koraku se određuju racionalne funkcije i matrice A, B, C i D, koje se u drugom koraku koriste kao ulazni podatak za provjeru uvjeta pasivnosti te podešavanje nula i konstanti racionalnih funkcija.

Sustav uzemljenja moguće je modelirati kao dinamički sustav gdje su odnos struja I_n i napona U_n opisani jednadžbama prostora stanja [92]:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \tag{6.9}$$

$$I = C \cdot X + D \cdot U \tag{6.10}$$

gdje su I jednostupčana matrica struja I_n, U jednostupčana matrica napona U_n, X vektor stanja, a A, B, C, D matrice koje opisuju frekvencijski odziv uzemljenja.



Slika 6.8: Prikaz postupka modeliranja impedancije uzemljivača stupa

Matrica impedancije $Z_{m,n}$ predstavlja frekvencijski odziv uzemljenja koji povezuje sve napone U_n i sve struje na priključcima I_n pri svim frekvencijama. Elementi matrice $Z_{m,n}$ su međusobne (za $n \neq m$) i vlastite (za $n = m$) impedancije.

Impedanciju uzemljenja $Z_{m,n}\,(f_k)$ između stezaljki uzemljivača m i n za određenu frekvenciju f_k moguće je odrediti iz poznatog napona $U_n\,(f_k)$ na stezaljki n i struje $I_m\,(f_k)$ na stezaljki m [96]. Za uzemljivački sustav s N stezaljki moguće je modelirati odziv impedancije uzemljenja pri određenoj frekvenciji f_k kao N x N matricu impedancije $[Z\,(f_k)]$:

$$[Z(f_k)] = \begin{bmatrix} Z_{1,1}(f_k) & \cdots & Z_{1,\mathrm{N}}(f_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{\mathrm{N},1}(f_k) & \cdots & Z_{\mathrm{N},\mathrm{N}}(f_k) \end{bmatrix}. \tag{6.11}$$

Odziv impedancije uzemljenja moguće je izraziti kao odnos svake struje I_n i napona U_n:

$$I\ (f_k) = \ [Y(f_k)]\ \times U\ (f_k), \tag{6.12}$$

gdje je $[Y(f_k)]$ matrica admitancije:

$$[Y(f_k)] = \ [Z(f_k)]^{-1}. \tag{6.13}$$

Zamjenom elementa $Y_{n,m}$ matrice $[Y]$ iz izraza (6.12) je moguće dobiti funkciju u frekvencijskoj domeni:

$$I(s) = Y(s)\ * U(s), \tag{6.14}$$

gdje je s Laplaceova varijabla:

$$s = j\ 2\ \pi\ f, \tag{6.15}$$

a f frekvencija. U izrazu (6.14) $Y(s)$ predstavlja prijenosnu funkciju, pri čemu je U_n pobuda, a I_n odziv.

Koeficijente matrice admitancije moguće je odrediti metodom racionalne aproksimacije, što podrazumijeva matematički opis mjerenih ili izračunatih koeficijenata matrice admitancije, $Y_{n,m}(s)$ racionalnim izrazima što manjeg stupnja, $Y_{n,m,fit}(s)$, prema izrazu [94]:

$$Y_{n,m}(s) \approx Y_{n,m,fit}(s) = \sum_{i=1}^{Np} \frac{c_{n,m_i}}{s - a_{n,m_i}} + d_{n,m} \tag{6.16}$$

U izrazu (6.16) oznake predstavljaju a_{n,m_i} polove koji mogu biti ili realni ili kompleksno konjugirani parovi, c_{n,m_i} reziduume koji također mogu biti ili realni ili kompleksno konjugirani parovi, $d_{n,m}$ konstante, a Np broj polova korišten pri aproksimaciji.

Racionalne funkcije moraju zadovoljavati svojstva stabilnosti i pasivnosti. Stabilnost funkcija je osigurana izostavljanjem polova koji su nestabilni. Pasivnost je osigurana perturbacijama vrijednosti nula te konstanti kako bi funkcije zadovoljile uvjet pasivnost [95].

Zamjenom elemenata matrice Y u izrazu (6.14) odgovarajućim racionalnim izrazima prema (6.16), dobije se modalna matrica. Iz izraza (6.14), (6.9) i (6.10) slijedi:

$$\boldsymbol{I}(s) = \left[\frac{\boldsymbol{C} * \boldsymbol{B}}{(s[\boldsymbol{I}] - \boldsymbol{A})} + \boldsymbol{D}\right] \times \boldsymbol{U}(s) \tag{6.17}$$

Izraz (6.17), u kojem je $[I]$ jedinična matrica, predstavlja odnos struje i napona na priključcima uzemljivača i prikladan je za prikaz pomoću racionalnog izraza (6.16).

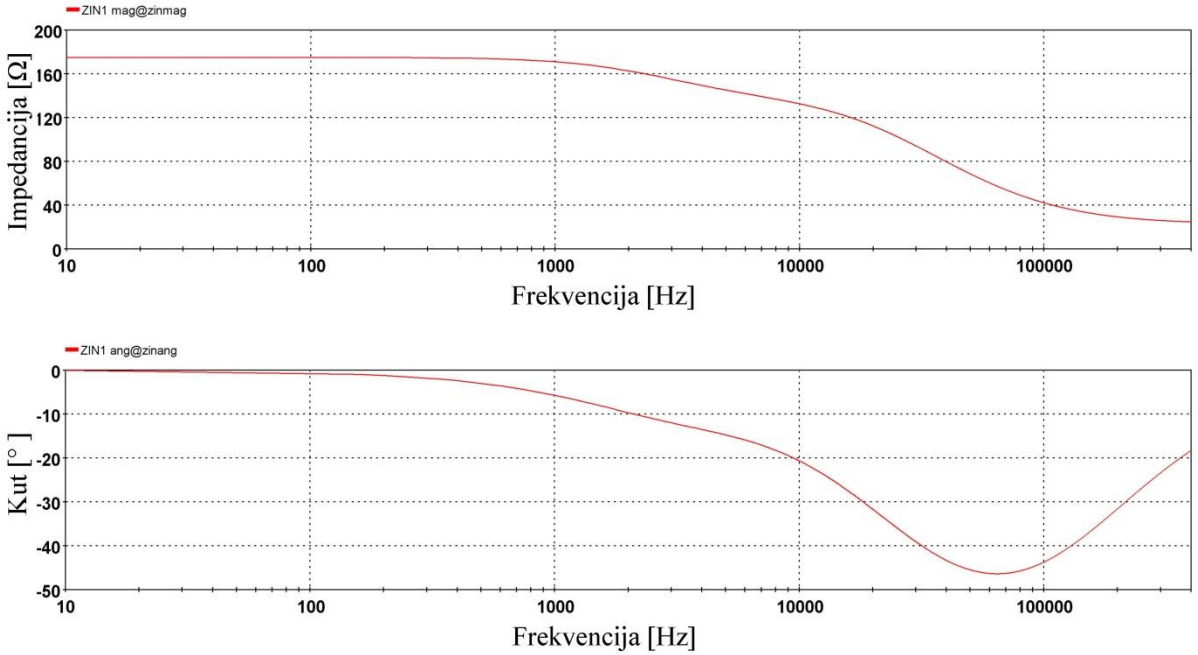
Korištenje ovih izraza omogućava jednostavnu transformaciju iz frekvencijske domene mjerenja u vremensku domenu programa za analizu prijelaznih pojava bez promjene vrijednosti matrica A, B, C i D.

Primjer 6.4.1 Implementacija jednadžbi stanja frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa u programu za analizu prijelaznih pojava EMTP

Kako bi se analizirao utjecaj načina modeliranja impedancije uzemljivača stupa na pojavu povratnog preskoka zbog atmosferskih prenapona, provedene su simulacije elektoromagnetskih prijelaznih pojava pri atmosfeskom pražnjenju u stup nadzemnog voda.

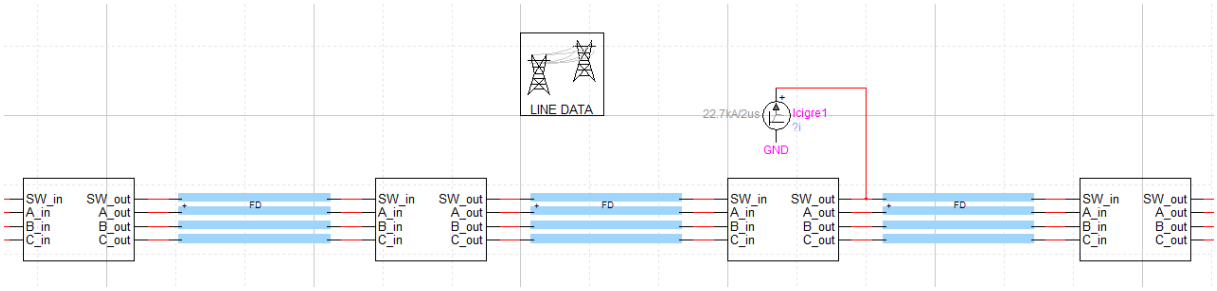
Rezultati mjerenja frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa u konfiguraciji s odspojenim zaštitnim vodičem iz *Primjera 6.2.1* korišteni su za implementaciju jednadžbi stanja frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača.

Na slici 6.9 prikazana je ulazna impedancija frekvencijski ovisnog modela uzemljivača stupa modelirana u frekvencijskom opsegu do 400 kHz, što odgovara većini atmosferskih prenapona.



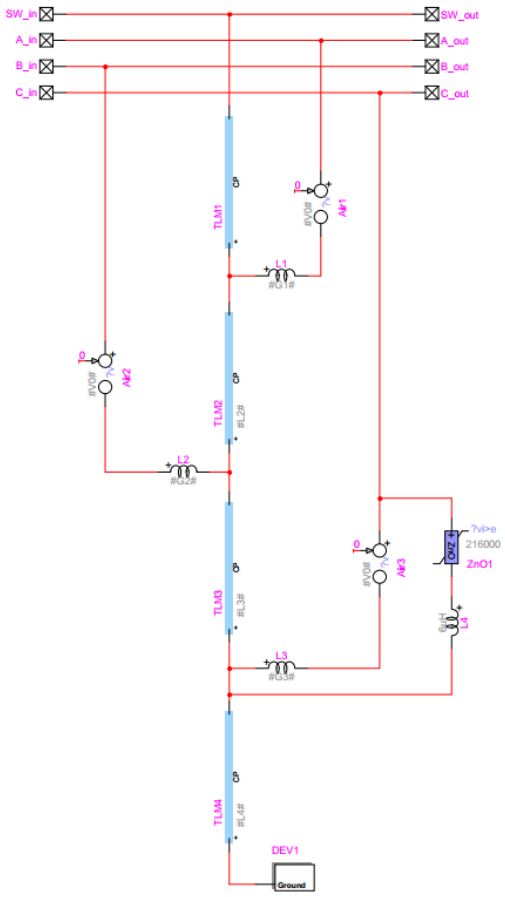
Slika 6.9: Amplituda i kut impedancije frekvencijski ovisnog uzemljivača stupa modeliran u programu tipa EMTP

Pri modeliranju su uzeta u obzir po sedam raspona sa svake strane stupa pogođenog udarom munje. Dio modela nadzemnog voda (tri raspona) prikazan je na slici 6.10.



Slika 6.10: Dio modela (3 raspona) udara munje u 110 kV nadzemni vod (EMTP)

Na slici 6.11 prikazan je model stupa nadzemnog voda. U donjoj fazi je modeliran odvodnik prenapona, korištenjem nelineranog modela odvodnika iz standardne EMTP baze.



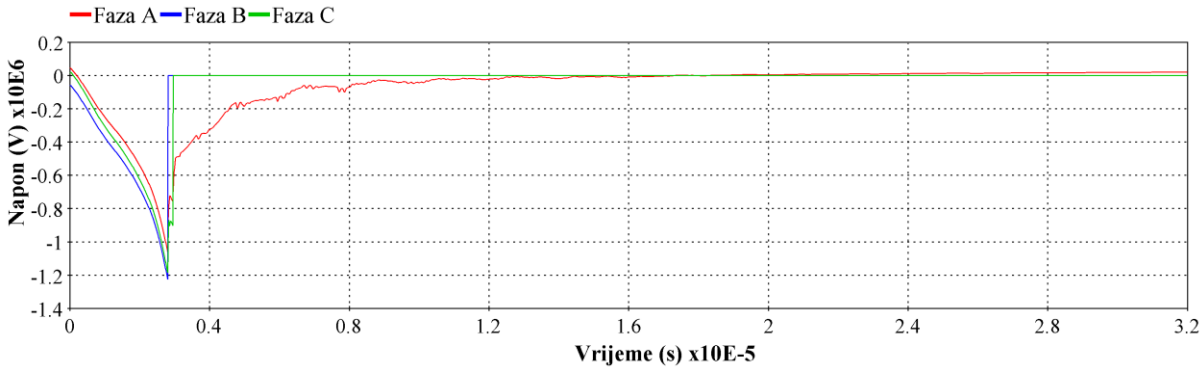
Slika 6.11: Model stupa nadzemnog voda u EMTP

Uzemljivači ostalih stupova su modelirani kao konstantni otpori, prema rezultatima mjerenja otpora uzemljivača na niskoj frekvenciji s obzirom na to da frekvencijska ovisnost impedancije uzemljivača ostalih stupova ne utječe značajno na rezultate simulacije. Efekt ionizacije tla u modelu nije uzet u obzir jer je iznos amplitude struje munje niži od granične struje potrebne za iniciranje dovoljne ionizacije tla. Svi ostali elementi modela za simulaciju udara munje u stup nadzemnog voda modelirani su kako je opisano u prethodnom poglavlju.

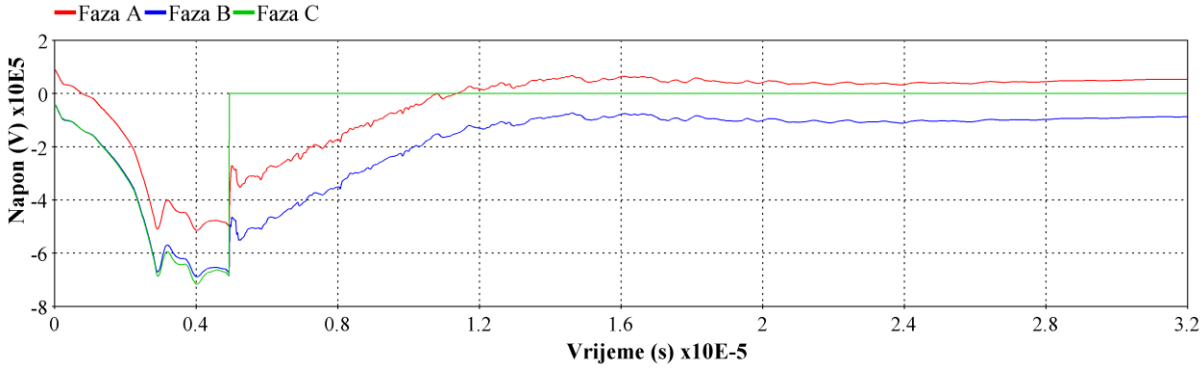
Udar munje koji je pogodio stup dalekovoda modelira se kao CIGRE valni oblik struje sa sljedećim parametrima S_m=21,72 kA/µs, t_f=2 µs, t_h=150 µs. Odabran je udar munje amplitude struje 22,7 kA s obzirom na to da je prema podacima SLAP-a došlo do udara munje odgovarajuće amplitude struje u promatrani nadzemni vod koji je uzrokovao ispad.

Na slici 6.12 prikazani su prenaponi na izolatorskim lancima na stupu koji je pogođen udarom munje za provedene simulacije za tri različita slučaja:

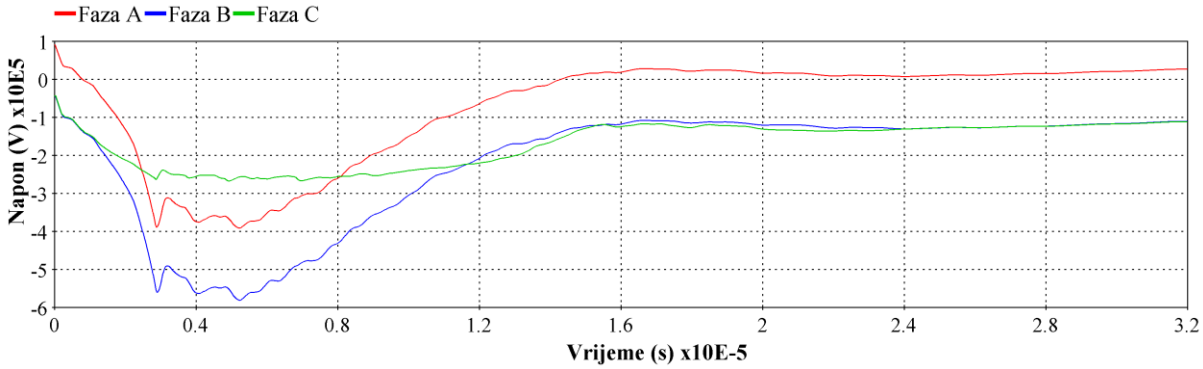
– za impedanciju uzemljenja uzemljivača stupa modeliranu kao konstantni otpor R = 175 Ω,
– za impedanciju uzemljivača stupa modeliranu kao frekvencijski ovisnu,
– za impedanciju uzemljivača stupa modeliranu kao frekvencijski ovisnu i odvodnik prenapona ugrađen u donju fazu (C).



a)



b)



c)

Slika 6.12: Prenaponi na izolatorskom lancu na promatranom stupu (I_f = 22,7 kA, R = 175 Ω u a) ili frekvencijski ovisan u b) i c))

U slučaju s konstantnim otporom uzemljenja stupa, do pojave povratnog preskoka dolazi na izolatorskim lancima u dvije faze, u srednjoj (B) i donjoj (C) fazi. U slučaju kada je model impedancije uzemljivača stupa nadograđen s frekvencijskom ovisnošću, do pojave povratnog preskoka dolazi samo na izolatorskom lancu u donjoj fazi (C). U tom slučaju ne dolazi do pojave povratnog preskoka u srednjoj fazi (B) jer u toj fazi ne dolazi do značajnijeg porasta napona na izolatorskom lancu zbog toga što je impedancija uzemljivača stupa niža za prenapone visokih frekvencija (slika 6.9). Rezultati simulacija za slučaj kada je u donjoj fazi (C) ugrađen odvodnik prenapona pokazuju da nema pojave povratnog preskoka ako je modelirana frekvencijski ovisna impedancija uzemljivača stupa.

Rezultati provedenih simulacija pokazali su utjecaj načina modeliranja impedancije uzemljivača stupa na prenaponsku karakteristiku nadzemnog voda. S obzirom na to da impedancija uzemljivača stupa značajno utječe na razinu porasta napona na izolatorskom lancu, odnosno na vjerojatnost pojave povratnog preskoka, te da se za konfiguracije s visokim specifičnim otporom tla iznos amplitude impedancije uzemljivača smanjuje s porastom frekvencije, prilikom simulacije prenaponske karakteristike nadzemnog voda, potrebno je u obzir uzeti frekvencijsku ovisnost impedancije uzemljivača stupa.

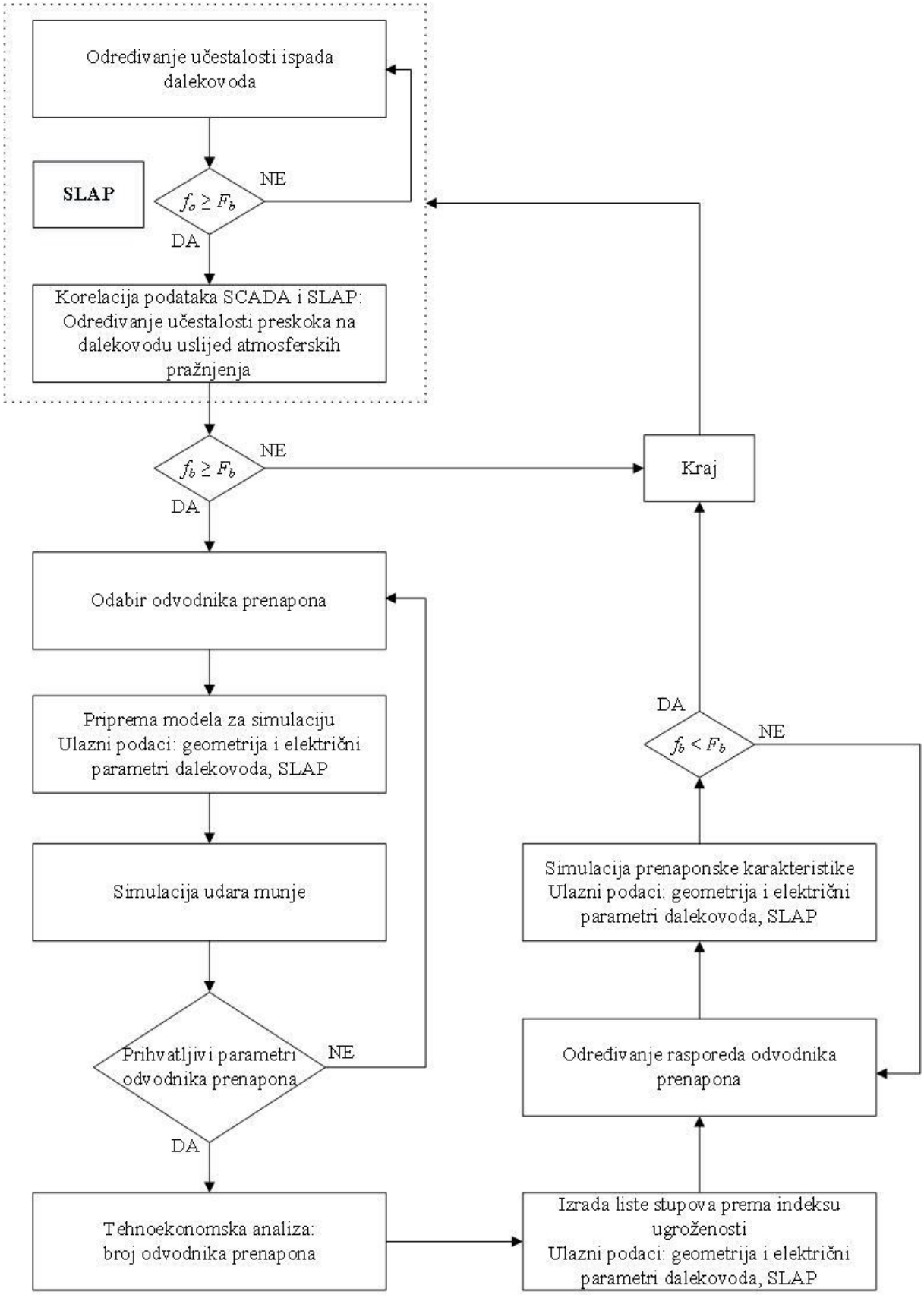
7. Metoda za odabir i određivanje rasporeda odvodnika prenapona

7.1. Odabir i određivanje rasporeda odvodnika prenapona

Prikaz postupaka u okviru metode za odabir i određivanje razmještaja odvodnika prenapona na nadzemnim vodovima primjenom podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja i s ciljem smanjenja broja ispada visokonaponskih nadzemnih vodova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima prikazan je na slici 7.1.

Prvi korak metode podrazumijeva identifikaciju nadzemnog voda za koji broj ispada uslijed atmosferskih prenapona nije prihvatljiv sa stajališta sigurnosti opskrbe električnom energijom. Prema važećem Zakonu o tržištu električne energije [97] sigurna opskrba električnom energijom smatra se ključnim elementom javne sigurnosti, a podrazumijeva i tehničku sigurnost proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje električne energije.

Izloženost nazemnog voda utjecajima atmosferskih pražnjenja određena je učestalošću njegovih ispada iz pogona uslijed pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu uzrokovanog atmosferskim prenaponom f_b koji predstavlja prosječan godišnji broj ispada sveden na 100 km duljine nadzemnog voda. U novije vrijeme korištenje podataka sustava za lokaciju atmosferskih pražnjenja u korelaciji s podacima sustava vođenja elektroenergetskog sustava o ispadima vodova iz pogona omogućava utvrđivanje učestalosti broja ispada uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima. Postupci korelacije kojima se utvrđuje učestalost pojave povratnog preskoka na nadzemnim vodovima opisani su u trećem poglavlju ovog rada. Opisani postupci provode se automatizirano korištenjem programske podrška sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja SLAP, što omogućava izradu statističkih pregleda podataka o ukupnom broju ispada i broju ispada uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima na godišnjoj razini te statistički pregled za dulje vremensko razdoblje po pojedinom nadzemnom vodu [42]. Prihvatljiva razina učestalosti pojave povratnog preskoka F_b ovisi o tome koliki je značaj pojedinog nadzemnog voda za sigurnost opskrbe promatranog elektroenergetskog sustava.



Slika 7.1: Metoda odabira i određivanja rasporeda odvodnika prenapona na nadzemnom vodu

Sljedeći postupak u okviru metode za smanjenje broja ispada nadzemnog voda uslijed atmosferskih pražnjenja podrazumijeva odabir parametara odvodnika prenapona kako je opisano u četvrtom poglavlju ovog rada. Za stup nadzemnog voda opremljenog s jednim ili više odvodnika prenapona, odabranih prema nazivnom naponu opreme i očekivanom energetskom opterećenju, provode se simulacije udara munja. U slučaju da rezultati simulacija pokažu da za odabrane karakteristike odvodnika prenapona i uz struje atmosferskog pražnjenja koje se mogu pojaviti s određenom vjerojatnošću dolazi do energetskog preopterećenja odvodnika prenapona, odabiru se odvodnici prenapona više energetske sposobnosti.

Primjeri simulacija koje se provode u svrhu utvrđivanja vjerojatnosti pojave povratnog preskoka na izolacijskom lancu uslijed atmosferskog pražnjenja u stup nadzemnog voda s obzirom na parametre struje pražnjenja i impedanciju uzemljivača stupa opisani su u nastavku ovog poglavlja. Simulacijama se utvrđuje i prihvatljivost parametara odabranih odvodnika prenapona s obzirom na očekivanu razinu atmosferskih prenapona i energetsko opterećenje odvodnika uslijed provođenja struje atmosferskih pražnjenja.

Ukupan broj odvodnika prenapona kojima će se opremiti nadzemni vod u svrhu poboljšanja prenaponske karakteristike potrebno je odrediti tehno-ekonomskom analizom pri čemu ukupni iznos investicije instalacije odvodnika prenapona sveden na godišnju razinu ne bi trebao biti viši od iznosa prosječnih godišnjih troškova uzrokovanih ispadima nadzemnog voda iz pogona uslijed atmosferskih pražnjenja. Osnovni principi tehno-ekonomske analize opisani su u nastavku ovog poglavlja.

Raspored odvodnika prenapona po stupovima nadzemnog voda određuje se na temelju liste stupova prema relativnom indeksu ugroženosti s obzirom na vjerojatnost udara munje u pojedini stup te očekivanog iznosa prenapona na izolatorskom lancu stupa. Izračun relativnog indeksa ugroženosti opisan je u ovom poglavlju. Broj faza pojedinog stupa koji će se opremiti odvodnikom prenapona ovisi o vjerojatnosti pojave povratnog preskoka na stupu u jednoj, dvije ili sve tri faze koju je moguće utvrditi iz simulacija udara munje u stup.

Učinkovitost utvrđenog rasporeda odvodnika prenapona na nadzemnom vodu potrebno je provjeriti provođenjem simulacija prenaponske karakteristike nadzemnog voda korištenjem odgovarajućih računalnih programa čiji rezultat je učestalost pojave povratnog preskoka na izolacijskom lancu uslijed udara munje f_b. Prihvatljivost utvrđenog rasporeda

utvrđuje se u odnosu na zadanu razinu prihvatljive učestalosti pojave povratnog preskoka na F_b.

Nakon što je nadzemni vod opremljen odvodnicima prenapona, nastavlja se s kontinuiranim praćenjem razine učestalosti ispada iz pogona uslijed pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu uzrokovanog atmosferskim prenaponom f_b temeljem čega je moguće utvrditi učinkovitost primjenjenje prenaponske zaštite.

7.2. Tehno-ekonomska analiza ugradnje odvodnika prenapona

Primjena odvodnika prenapona u svrhu poboljšanja prenaponske karakteristike ovisi o stanju nadzemnog voda, okolini i ekonomskim ograničenjima za svaki slučaj posebno. Tehno-ekonomska analiza provodi se kako bi se utvrdio broj odvodnika prenapona koji je sa stajališta ekonomskog kriterija opravdano ugraditi na nadzemni vod.

Takva analiza podrazumijeva ekonomsku procjenu, tj. određivanje odnosa između dobiti, odnosno koristi, i troškova pojedinog projekta kako bi se utvrdila ekonomska opravdanost projekta, što je važna informacija u procesu donošenja odluke o pokretanju investicije.

Za ekonomski opravdani projekt vrijedi da je očekivana dobit veća ili jednaka troškovima investicije. Kako bi ulazni podaci bili međusobno usporedivi, potrebno ih je svesti na godišnju razinu.

U dobit od investicija u objekte prijenosne mrežu uključena je procjena povećanja sigurnosti napajanja kroz smanjenje očekivanih troškova neisporučene električne energije, dobit od smanjenja gubitaka u mreži, te dobit od minimiziranja troškova preraspodjele proizvodnje elektrana u sustavu. U slučaju ugradnje odvodnika prenapona na postojeći nadzemni vod s ciljem smanjenja broja ispada uslijed atmosferskih prenapona, očekivana dobit predstavlja smanjenje troškova otklanjanja kvarova na opremi i postrojenjima te smanjenje očekivanih troškova neisporučene električne energije zbog prekida u napajanju izazvanih utjecajima atmosferskih pražnjenja. Podatak o prosječnom godišnjem trošku održavanja radi otklanjanja kvarova uzrokovanih atmosferskim prenaponom moguće je odrediti iz stvarnih podataka u određenom vremenskom razdoblju. Podatak o prosječnom očekivanom trošku neisporučene električne energije zbog prekida u napajanju izazvanih utjecajima atmosferskih pražnjenja $T_{ne/g}$ moguće je izračunati iz podataka o neisporučenoj

električnoj energiji (*engl. Expected Energy Not Supplied* – EENS) za vrijeme trajanja prekida napajanja uslijed kvara uzrokovanog atmosferskim pražnjenjima. Prekid napajanja jedno je od definiranih izvanpogonskih stanja elemenata prijenosne mreže, čija je pojava predmet praćenja statistike pogonskih događaja [98]. Neisporučena električna energija W_n procjenjuje se prema očekivanom dnevnom dijagramu trajanja opterećenja opskrbnog područja u kojem je došlo do zastoja opskrbe električnom energijom zbog nastanka kvara na dalekovodu [98], a iskazuje se u megavat satima [MWh]. Uredba Europske unije o unutarnjem tržištu električne energije [99] definira vrijednost neisporučene energije (*engl. Value of Lost Load* – VoLL) kao procjenu u EUR/MWh najviše cijene električne energije koju su kupci voljni platiti kako bi izbjegli prekid opskrbe. U tijeku je priprema obvezujuće metodologije za izračun vrijednosti neisporučene energije na razini Europske unije prema kojoj će nadležna regulatorna agencija ili neko drugo od države članice ovlašteno tijelo imati obvezu utvrditi jedinstvenu procjenu vrijednosti neisporučene energije na svojem teritoriju prema točno definiranim pravilima.

Slijedi da je očekivanu godišnju dobit $D_g$od projekta ugradnje odvodnika prenapona moguće odrediti iz izraza:

$$D_g = \frac{\sum_1^n T_{odr/g_i}}{n} + \frac{\sum_1^m W_{n/g_j} \cdot VoLL_j}{m} \tag{7.1}$$

gdje je T_{odr/g_i} ukupni trošak održavanja u godini i, n broj godina za koje su raspoloživi podaci o troškovima održavanja radi otklanjanja kvarova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima, W_{n/g_j} ukupna neisporučena energija zbog prekida napajanja zbog kvarova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima u godini j, $VOLL_j$ vrijednost neisporučene energije u godini j, a m broj godina u kojima su raspoloživi podaci o neisporučenoj električnoj energiji zbog prekida napajanja zbog kvarova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima.

Troškovi za svaku pojedinačnu investiciju obuhvaćaju sve troškove koji se mogu izravno povezati s dovođenjem sredstava u radno stanje za namjeravanu upotrebu, a procijenjuju se na temelju jediničnih cijena visokonaponske opreme i postrojenja, uključujući i troškove ugradnje opreme te ostalih pripremnih i montažnih radova.

Trošak ugradnje odvodnika prenapona određuje kao umnožak broja odvodnika prenapona N_{op} i zbroja jedinične nabavne cijene odvodnika prenapona c_{op} i jedinične cijene montaže odvodnika prenapona c_m. Ukupni trošak investicije podrazumijeva i jednokratni

trošak pripreme projekta T_{pr} koji uključuje troškove izrade projektne dokumentacije, provođenja potrebnih analiza i proračuna te pripreme postupka nabave, a ne ovisi o broju odvodnika prenapona. Trošak investicije svodi se na godišnju razinu množenjem s godišnjom stope amortizacije opreme a_g. Godišnja stopa amortizacije opreme, iskazana u %, određuje se s obzirom na procijenjeni korisni vijek opreme, a koristi se za obračun amortizacije u svrhu alokacije troška imovine i određivanje knjigovodstvene vrijednosti imovine. Metal-oksidni odvodnici prenapona spadaju u skupinu opreme za koju godišnja stopa amortizacije iznosi 3,03%, što znači da će se njihova knjigovodstvena vrijednost svesti na nulu za 33 godine, odnosno da procijenjeni korisni vijek trajanja odvodnika prenapona iznosi 33 godine.

Slijedi da se godišnji trošak investicije ugradnje odvodnika prenapona $C_{inv/g}$ može odrediti iz izraza:

$$C_{inv/g} = [N_{op} \cdot (c_{op} + c_m) + T_{pr}] \cdot \frac{a_g}{100} \tag{7.2}$$

gdje je N_{op} broj odvodnika prenapona, c_{op} jedinična nabavna cijena odvodnika prenapona, c_m jedinična cijena montaže odvodnika prenapona, T_{pr} trošak pripreme projekta i a_g godišnja stopa amortizacije opreme.

S obzirom na to da za metal-oksidne odvodnike prenapona proizvođači deklariraju da ih nije potrebno održavati tijekom vijeka uporabe, zanemareni su očekivani godišnji troškovi održavanja, koji se uobičajeno pribrajaju ukupnim godišnjim troškovima investicije pri provođenju tehno-ekonomske analize.

Odvodnike prenapona moguće je opremiti uređajima za nadzor, koji omogućavaju brojanje prorada i praćenje ukupne struje i radne komponente struje odvođenja u pogonu. Na temelju kriterija radne komponente struje odvođenja moguće je izvršiti procjenu stanja odvodnika prema preporukama o vrijednostima radne komponente struje ili iskustveno usporedbom rezultata s rezultatima prethodnih mjerenja za isti odvodnik ili usporedbom s rezultatima mjerenja provedenim na odvodnicima istog tipa. Ako se prilikom ugradnje odvodnici prenapona opremaju uređajima za nadzor, trošak njihove nabave i ugradnje potrebno je uračunati u ukupne troškove investicije.

O karakteristikama odvodnika prenapona ovisi učinkovitost prenaponske zaštite nadzemnog voda. Provođenjem odgovarajućih ispitivanja nakon proteka određenog

višegodišnjeg perioda u kojem su odvodnici prenapona u pogonu, moguće je utvrditi stvarno stanje odvodnika prenapona s obzirom na njegovu prenaponsku karakteristiku, odrediti slabljenje karakteristika odvodnika prenapona s vremenom tijekom vijeka uporabe te procijeniti trajanje korisnog vijeka uporabe. U slučaju da provedena ispitivanja pokažu da postoji potreba za redovitim periodičkim ispitivanjima odvodnika prenapona u pogonu, očekivane godišnje troškove provođenja ispitivanja, potrebno je uzeti u obzir pri određivanju troškova investicije.

Iz izraza (7.1) i (7.2) moguće je odrediti maksimalni broj odvodnika prenapona na nadzemnom vodu N_{op} u okviru prihvatljivog troška investicije:

$$N_{op} = \frac{\left(\frac{\sum_1^n T_{odr/g_i}}{n} + \frac{\sum_1^m W_{n/g_j} \cdot VoLL_j}{m}\right) \cdot \frac{100}{a_g} - T_{pr}}{c_{op} + c_m} \tag{7.3}$$

Prilikom donošenja odluke o svakoj pojedinoj investiciji u opremu u prijenosnoj mreži potrebno je uzeti u obzir niz kriterija kao što su minimalni troškovi izvedbe projekta, minimalni utjecaj na okoliš i percepciju društva, zadovoljavajuća i po mogućnosti što viša sigurnost opskrbe, što veća društvena dobrobit te pozitivan učinak na smanjenje gubitaka prijenosa, minimiziranje emisija štetnih plinova i integracija obnovljivih izvora energije.

Potrebno je naglasiti kako je nove tehnologije u objektima prijenosne mreže poželjno primijeniti radi poboljšanja tehničkih karakteristika mreže samo ako je to ekonomski opravdano. U slučaju nepremostivih poteškoća vezanih za okoliš i prostorna ograničenja ili sigurnost opskrbe kupaca u pojedinim dijelovima elektoenergetskog sustava, iznimno je moguće primijeniti i rješenja koja predstavljaju veći investicijski trošak nego što je opravdano temeljem rezultata tehno-ekonomske analize, odnosno potrebno je pri donošenju odluke o investiciji u obzir uzeti i neekonomske pokazatelje koji ukazuju na očekivane koristi od projekta. Za projekte primjene odvodnika prenapona u svrhu smanjenja broja ispada nadzemnog voda iz pogona, to bi značilo da je za nadzemne vodove, koji su od posebnog značaja za sigurnost opskrbe konzuma ili evakuaciju proizvodnje, potrebno uzeti u obzir broj odvodnika prenapona čijom bi se primjenom postigla zadovoljavajuća razina sigurnosti opskrbe električnom energijom.

Investicijama od sustavnog značaja smatraju se ulaganja koja je potrebno ostvariti radi postizanja zadovoljavajuće sigurnosti pogona mreže i opskrbe kupaca prema kriteriju (n- 1) ili

drugim tehničkim kriterijima. Kriterij (n-1) predstavlja kriterij tehničke sigurnosti koji se koristi pri vođenju pogona i planiranju razvoja i izgradnje mreže. Odnosi se na utjecaj neraspoloživosti jedne jedinice mreže ili proizvodne jedinice na narušavanje graničnih vrijednosti pogonskih veličina u prijenosnoj mreži (napon, frekvencija, strujna opteretivost). Mrežnim pravilima prijenosnog sustava [100] propisano je da kriterij (n-1) mora biti zadovoljen u svakom trenutku u normalnom pogonu. Utjecaj neraspoloživosti pojedinog elementa mreže na sigurnost opskrbe električnom energijom moguće je odrediti proračunom tokova snaga uz zadane uvjete proizvodnje i opterećenja u promatranom dijelu elektroenergetskog sustava.

Za svaku pojedinu investiciju, odnosno projekt ugradnje odvodnika prenapona, potrebno je provesti odgovarajuću tehno-ekonomsku analizu koja će u obzir uzeti sva ograničenja i utjecajne faktore te odredit broj odvodnika prenapona s obzirom na kriterij ekonomske opravdanosti ili zadovoljavajuće razine prenaponske zaštite promatranog dijela elektroenergetskog sustava.

7.3. Određivanje rasporeda odvodnika prenapona na nadzemnom vodu

Optimalan raspored odvodnika prenapona na stupovima nadzemnog voda određuje se u okviru zadanog ograničenja broja odvodnika određenog tehno-ekonomskom analizom.

Iskustveno je dokazano da je u većini slučajeva prenaponska karakteristika nadzemnog voda određena s jednom ili više kraćih kritičnih dionica, koje su izložene značajnim atmosferskim pražnjenjima te na kojima učestalo dolazi do pojave preskoka na izolatorskom lancu uslijed atmosferskih prenapona.

Dva su najvažnija kriterija koja utječu na prenaponska svojstva nadzemnog voda i koja je potrebno uzeti u obzir pri razmatranju poboljšanja prenaponske zaštite, izloženost nadzemnog voda atmosferskim pražnjenjima te posljedice izloženosti atmosferskim prenaponima na pogon nadzemnog voda [101].

Pri određivanju kritičnih dionica ili stupova koji su ugroženiji u odnosu na ostale dionice ili stupove istog nadzemnog voda, koriste se podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja te karakteristični parametri nadzemnog voda.

Kako bi bilo moguće rangirati stupove pojedinog nadzemnog voda na temelju vjerojatnosti pojave povratnog preskoka u [101] je predložena primjena indeksa ugroženosti

I_{sev} (*engl. severity index*). Indeks ugroženosti predstavlja linearnu funkciju relativne učestalosti protoka struje atmosferskog pražnjenja kroz stup i relativne amplitude prenapona koji se razvija uslijed prolaska struje pražnjenja kroz stup:

$$I_{sev} = I_{freq} \cdot I_{amp}, \tag{7.4}$$

gdje je I_{freq} indeks učestalosti (*engl. frequency index*), a I_{amp} prenaponski indeks (*engl. overvoltage index*).

Važno je istaknuti relativnu prirodu navedenih indeksa, koji ne predstavljaju apsolutnu vrijednost učestalosti atmosferskog pražnjenja niti apsolutnu vrijednost amplitude prenapona na izolatorskom lancu. Indeks učestalosti i prenaponski indeks ne određuju razinu potrebne prenaponske zaštite već samo izražavaju razinu ugroženosti pojedinog stupa u odnosu na sve ostale stupove na istom nadzemnom vodu kako bi bilo moguće odrediti na kojim stupovima je potrebno primijeniti prenaponsku zaštitu. Ovakvim pristupom se minimiziraju moguće pogreške zbog korištenih pretpostavki i pojednostavljenja u izračunu indeksa.

Prema [101] relativna učestalost izloženosti stupa stresu zbog prolaska struje atmosferskog pražnjenja $I'_{freq}(S_i)$ određuje se temeljem broja prolaska struje atmosferskog pražnjenja kroz pojedini stup $N_{f/S}$, odnosno temeljem ukupnog broja pražnjenja na oba susjedna raspona, zbog pretpostavke da struja atmosferskog pražnjenja pri udaru u raspon doprinosi prolasku struje kroz oba stupa na krajevima raspona:

$$I'_{freq}(S_i) = \frac{N_{r_{(i-1)}} + N_{r_i}}{2 \cdot \sum_{k=1}^{n} \frac{N_{r_k}}{n}} \tag{7.5}$$

gdje je N_r relativni indeks učestalosti pražnjenja za pojedini raspon i određuje se temeljem ukupnog broj pražnjenja registriranih u uskom pojasu duž tog raspona na trasi nadzemnog voda.

U ovom istraživanju je broj pražnjenja na rasponu nadzemnog voda određen pomoću izraza:

$$N_r = N_L \cdot L_r, \tag{7.6}$$

gdje je N_L broj atmosferskih pražnjenja po kilometru duljine raspona nadzemnog voda određen pomoću izraza (2.7), a L_r je duljina raspona nadzemnog voda [km].

Korištenjem sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja moguće je odrediti gustoću udara munja za svaki pojedini stup nadzemnog voda kao broj udara munja registriran u alarmnoj zoni stupa po jedinici površine (slika 3.15). Pri izračunu broja pražnjenja za pojedini raspon gustoća udara munja računa se kao prosjek gustoća udara munja za dva susjedna stupa između kojih se nalazi promatrani raspon. Iz navedenog slijedi da je godišnja učestalost pražnjenja u pojedini raspon N_{r_i}:

$$N_{r_i} = \frac{N_{gS_i} + N_{gS_{(i+1)}}}{2} \cdot \left(w + 4 \cdot h_{z_i}^{1,09}\right) \cdot L_{r_i} \tag{7.7}$$

gdje je $N_{g_{Si}}$ gustoća atmosferskog pražnjenja za pojedini stup nadzemnog voda S_i određena pomoću sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja, w razmak između zaštitnih vodiča, h_{z_i} prosječna visina zaštitnog vodiča iznad tla za pojedini raspon i, L_{r_i} duljina raspona i.

Uvrštenjem izraza (7.7) u (7.5) slijedi izraz kojim se relativna izloženost udarima munja za pojedini stupa određuje temeljem podataka o gustoći udara munja:

$$I'_{freq}(S_i) = \frac{\left(N_{gS_{(i-1)}} + N_{gS_i}\right) \cdot \left(w + 4 \cdot h_{z_{(i-1)}}^{1,09}\right) \cdot L_{r_{i-1}} + \left(N_{gS_i} + N_{gS_{(i+1)}}\right) \cdot \left(w + 4 \cdot h_{z_i}^{1,09}\right) \cdot L_{r_i}}{2 \cdot \sum_{k=1}^{n} \frac{\left(N_{gS_k} + N_{gS_{(k+1)}}\right) \cdot \left(w + 4 \cdot h_{z_k}^{1,09}\right) \cdot L_{r_k}}{n}} \tag{7.8}$$

Indeks učestalosti I_{freq} određuje se za svaki stup S_i pomoću izraza:

$$I_{freq}(S_i) = I'_{freq}(S_i) \cdot K_{nv}(S_i), \tag{7.9}$$

gdje je K_{nv} koeficijent nadmorske visine:

$$K_{nv} = 1{,}5^{\left(\frac{nv(S_i)}{nv_s} - 1\right)} \tag{7.10}$$

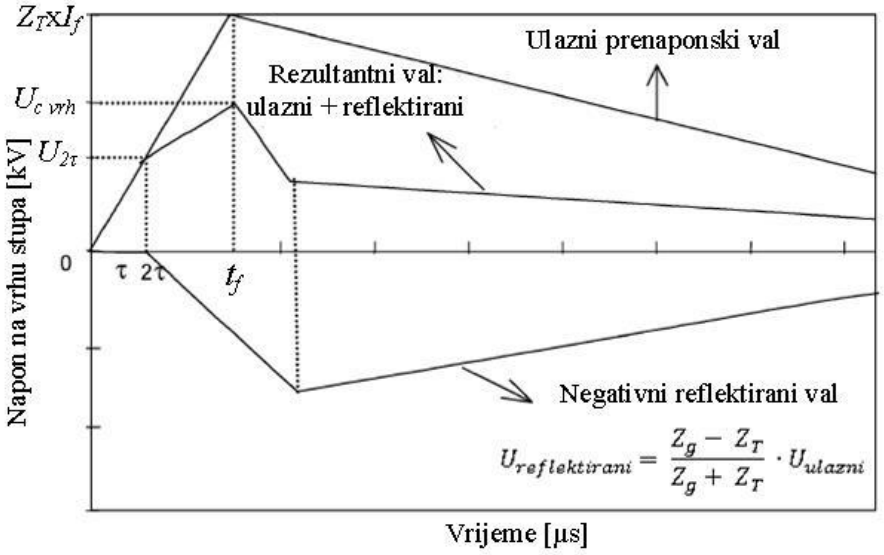
pri čemu je $nv(S_i)$ nadmorska visina na kojoj je stup lociran, a nv_s prosječna nadmorska visina trase nadzemnog voda.

Prenaponski indeks I_{amp} računa se pomoću napona koji se razvija na izolatorskom lancu zbog prolaska struje atmosferskog pražnjenja kroz stup, a na njega može utjecati više

parametara kao što su valna impedancija stupa, impedancija uzemljivača stupa, utjecaj elektromagnetske sprege i vrijednost faznog napona u trenutku udara munje. Za struje atmosferskih pražnjenja amplituda prenapona na izolatorskom lancu U_{iz} približno je linearna funkcija prenapona na vrhu stupa U_{vrh}:

$$U_{iz} = (1 - K_c) \cdot U_{vrh}, \tag{7.11}$$

gdje je U_{vrh} prenapon na vrhu stupa, a K_c koeficijent elektromagnetske sprege (*engl. coupling factor*) između stupa, zaštitnog i faznih vodiča [26], koji iznosi od 0.1 – 0.3 ovisno o geometrijskim odnosima, odnosno rasporedu vodiča i izvedbi stupa. Ako su svi promatrani stupovi približno jednake izvedbe, faktor K_c je jednak za sve stupove te se relativna amplituda prenapona na izolatorskom lancu U_{iz} može približno odrediti kao relativna amplituda prenapona na vrhu stupa U_{vrh}.



Slika 7.2: Prenapon na vrhu stupa

Ako se valni oblik struje aproksimira kao valni oblik rampe s brzim porastom čela kao što je prikazano na slici 7.2, vršna vrijednost prenapona na vrhu stupa $U_{c\,vrh}$ može se odrediti iz izraza:

$$U_{c\,vrh} = \left(\frac{Z_T \cdot I_f}{t_f}\right) \cdot \left[2\tau + \left(1 + \frac{Z_g \cdot Z_T}{Z_g + Z_T}\right) \cdot (t_f \cdot 2\tau)\right] \tag{7.12}$$

gdje je I_f vršna vrijednost ulaznog strujnog vala na stupu, Z_T valna impedancija stupa, Z_g valna impedancija uzemljivača stupa, t_f vrijeme trajanja čela, a τ vrijeme prolaska vala kroz stup, pri čemu je $\tau < t_f$.

Za stupove uobičajene visine vrijeme prolaska vala kroz stup je znatno kraće od vremena porasta čela i vrijedi:

$$t_f - 2\tau \cong t_f \tag{7.13}$$

te se izraz (7.12) može pojednostavniti kako slijedi:

$$U_{c\,vrh} = Z_T \cdot I_f \cdot \left[\frac{2}{c \cdot t_f} \cdot H + \frac{2}{1 + \left(\frac{Z_T}{Z_g}\right)} \right] \tag{7.14}$$

gdje je c brzina širenja strujnog vala, odnosno brzina svjetlosti, a H visina stupa.

Izraz (7.14) predstavlja procjenu vršne vrijednosti prenapona na vrhu stupa i može se zaključiti da, za zadanu udarnu struju i izvedbu stupa, ovisi o impedanciji uzemljivača i visini stupa. Relativni prenaponski indeks za svaki stup računa se kao vršna vrijednost prenapona na vrhu stupa $U_{c\,vrh}$ u odnosu na referentnu vrijednost amplitude prenapona $U_{c\,vrh\,ref}$ i predstavlja relativnu amplitudu prenapona na izolatorskom lancu:

$$I_{amp} = \frac{U_{c\,vrh(S_i)}}{U_{c\,vrh\,ref}} \cong \frac{U_{c\,iz(S_i)}}{U_{c\,iz\,ref}} \tag{7.15}$$

gdje je $U_{c\,iz(S_i)}$ vršna vrijednost prenapona na izolatorskom lancu, a $U_{c\,iz\,ref}$ referentna vrijednost amplitude prenapona na izolatorskom lancu.

Referentna vrijednost amplitude prenapona može se odrediti iz izraza (7.14) uz određene pretpostavke:

- τ se računa za prosječnu visinu stupa i brzinu širenja strujnog vala ($2{,}4 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}$),
- Z_T predstavlja valnu impedanciju stupa prosječnih dimenzija,
- Z_g je pretpostavljena granična vrijednost valne impedancije uzemljivača stupa ispod koje se očekuje zadovoljavajuća razina preponske karakteristike nadzemnog voda,
- t_f vrijeme trajanja čela se određuje temeljem najboljih raspoloživih podataka,

- I_f vršna vrijednost ulaznog strujnog vala na stupu se gubi u izrazu (7.15) pa se ne koristi u izračunu.

Primjer 7.3.1 Određivanje indeksa ugroženosti za dionicu nadzemnog voda

U primjeru je prikazan postupak određivanja relativnog indeksa ugroženosti za proizvoljno odabranih 7 stupova na dionici nadzemnog voda koja je u stvarnom pogonu izložena značajnom utjecaju atmosferskih pražnjenja.

U tablici 7.1 prikazani su podaci za promatranu dionicu nadzemnog voda potrebni za izračun indeksa učestalosti i prenaponskog indeksa, u tablici 7.2 podaci potrebni za izračun i rezultati izračuna indeksa učestalosti, a u tablici 7.3. podaci potrebni za izračun i rezultati izračuna prenaponskog indeksa.

Tablica 7.1: Parametri promatrane dionice nadzemnog voda

Nazivni napon	110 kV
Duljina promatrane dionice	1779 m
Broj stupova	7
Prosječna duljina raspona	297
Prosječna visina stupa	25,4 m
Valna impedancija stupa	110 Ω
Prosječna vrijednost otpora uzemljivača stupa	28,7 Ω

U tablici 7.4 prikazani su rezultati izračuna indeksa ugroženosti te poredak promatranih stupova po indeksu ugroženosti.

U tablici 7.5 prikazani su ispadi promatranog nadzemnog voda iz pogona uzrokovani atmosferskim pražnjenjem u jedan od raspona na promatranoj dionici u vremenskom periodu od deset godina. Atmosfersko pražnjenje kao uzrok ispada potvrđeno je postupkom korelacije podataka sustava vođenja elektroenergetskog sustava i sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja opisanim u trećem poglavlju. Lokacija pražnjenja određena je pomoću sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja.

U tablici 7.6 dani su podaci o broju prolaska struje atmosferskog pražnjenja kroz svaki pojedini promatrani stup $N_{f/S}$ određen kao ukupan broj pražnjenja na oba susjedna raspona koji su uzrokovali ispade, zbog pretpostavke da struja atmosferskog pražnjenja pri udaru u raspon doprinosi prolasku struje kroz oba stupa na krajevima raspona.

Tablica 7.2: Izračun indeksa učestalosti

Stup	N_g	H	L_{span}	h_z	I'_{freq}	$A\ (m)$	K_{alt}	I_{freq}
0	19,42	28,2						
			263	18,7				
1	19,57	21,2			0,74	343,66	1,06	0,79
			247	16,45				
2	19,85	23,7			1,14	364,6	1,10	1,25
			436	20,95				
3	21,58	30,2			1,45	315,4	1,02	1,49
			293	23,2				
4	22,15	28,2			0,96	329,77	1,04	1,00
			170	19,7				
5	22,48	23,2			0,87	281,8	0,98	0,85
			343	17,2				
6	22,14	23,2			0,97	235,05	0,92	0,89
			290	15,45				
7	22,30	19,7			0,94	212,6	0,89	0,84
			313	17,95				
8	21,98	28,2						

Tablica 7.3: Izračun indeksa prenapona

Stup	$R_{g(50Hz)}(\Omega)$	$Z_T\ (\Omega)$	$h\ (m)$	I_{amp}
1	45,02	112,89	28,2	1,36
2	38,52	109,02	21,2	1,16
3	13,66	110,67	23,7	0,62
4	38,14	113,67	30,2	1,25
5	28,19	112,89	28,2	1,02
6	16,23	102,72	23,2	0,66
7	21,34	110,37	23,2	0,81

Tablica 7.4: Izračun indeksa ugroženosti

Stup	I_{freq}	Poredak po I_{freq}	I_{amp}	Poredak po I_{amp}	I_{sev}	Poredak po I_{sev}
1	0,79	7	1,36	1	1,07	3
2	1,25	2	1,16	3	1,45	1
3	1,48	1	0,62	7	0,91	4
4	1,00	3	1,25	2	1,25	2
5	0,85	5	1,02	4	0,87	5
6	0,89	4	0,66	6	0,59	7
7	0,84	6	0,81	5	0,68	6

Tablica 7.5: Ispadi uzrokovani atmosferskim pražnjenjem u promatranu dionicu nadzemnog voda

Datum	Vrijeme kvara (SCADA)	Vrijeme pražnjenja (SLAP)	Lokacija pražnjenja/ Raspon
4.8.2009.	12:05:42.902	12:05:42.899	1 – 2
8.11.2010.	03:04	03:04:19.997	2 – 3
10.08.2013.	14:11	14:11:25.126	2 – 3
15.06.2014.	05:39	05:39:05.923	2 – 3
31.07.2014.	07:07:18.544	07:07:18.525	3 – 4
22.08.2014.	04:58:53.938	04:58:53.910	1 – 2
15.07.2016.	13:31:20.601	13:31:20.591	3 – 4

Tablica 7.6: Broj prolaska struje atmosferskog pražnjenja kroz stupove

Stup	$N_{f/S}$	Poredak po $N_{f/S}$
1	2	3-4
2	5	1-2
3	5	1-2
4	2	3-4
5	0	5-7
6	0	5-7
7	0	5-7

Važno je napomenuti da se broj prolaska struje atmosferskog pražnjenja kroz stup u tablici 7.6 odnosi samo na struje pražnjenja koje su uzrokovale ispad nadzemnog voda iz

pogona. Usporedbom podataka iz tablice 7.4 i 7.6 moguće je zaključiti da su prema rezultatima izračuna relativnog indeksa ugroženosti na promatranoj dionici više izloženi utjecajima atmosferskih prenapona u odnosu na ostale promatrane stupove isti stupovi za koje je u stvarnom pogonu korelacijom s podacima sustava za lociranje atmosferskim pražnjenjima utvrđena češća pojava preskoka na izolatorskim lancima uzrokovana atmosferskim prenaponima.

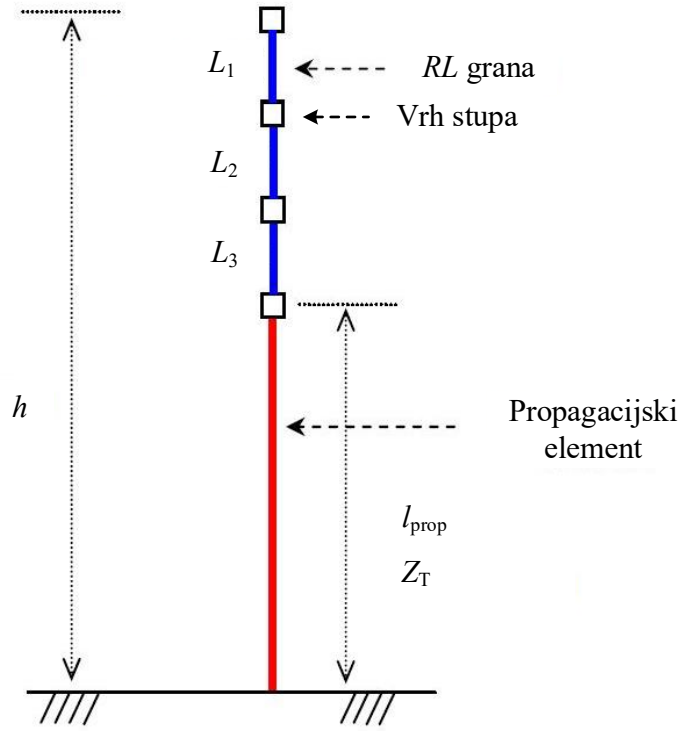
Primjer 7. 3.2 Određivanje prenaponske karakteristike nadzemnog voda

Proračun prenaponske (preskočne) karakteristike nadzemnih vodova provodi se posebno razvijenim programskim alatima, kao što je Sigma slp [102]. U programu Sigma slp korištenjem statističke metode Monte Carlo i trodimenzionalnog elektrogeometrijskog modela simuliraju se atmosferska pražnjenja u nadzemni vod. Ulazni podaci za proračun prenaponske karakteristike su podaci o geometriji voda (visina stupova, visina vodiča, horizontalne udaljenosti vodiča, promjeri vodiča, provjesi vodiča), broj stupova u modeliranoj dionici nadzemnog voda, izmjerene vrijednosti otpora uzemljivača stupova, karakteristike odvodnika prenapona, kritični preskočni napon izolatora te karakteristike atmosferskih pražnjenja. Na temelju ulaznih podataka program postavlja model za simulaciju elektromagnetskih prijelaznih pojava. Model stupa predstavlja kombinaciju propagacijskog elementa i RL grana za modeliranje prijelaznih pojava na vrhu stupa (slika 7.3). U elektrogeometrijskom modelu moguće je modelirati i obližnje objekte koji bi mogli privući dio atmosferskih pražnjenja.

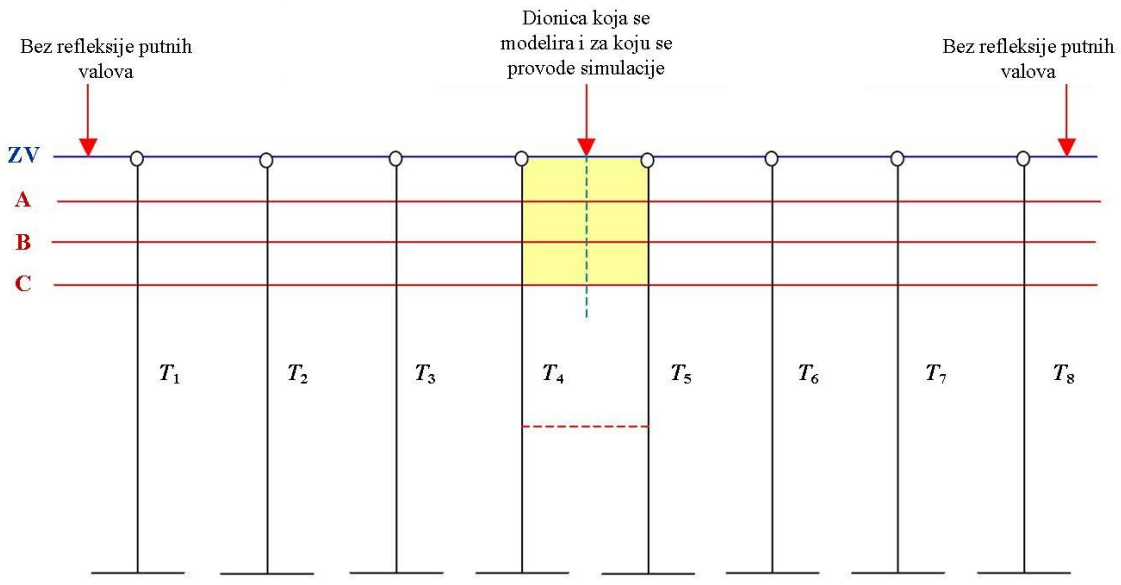
Nadzemni vod za koji se provodi simulacija modelira se kao niz jednakih podsustava, odnosno dionica s određenim brojem stupova, koji su u programu međusobno povezanih preko Theveninovih ekvivalenata. Elektrogeometrijski model se izrađuje i simulacije se provode za modeliranu dionicu voda, čime se postiže velika brzina proračuna, budući da se prijelazne pojave na vodičima (faznim i zaštitnim) i stupovima promatraju odvojeno. Na kraju svake dionice modelirana je valna impedancija kako bi se eliminirao utjecaj refleksije putnih valova (slika 7.4). Moguće je modelirati i proračun provesti za više različitih podsustava ako su za pojedine dionice nadzemnog voda različiti ulazni podaci za proračun.

Za svaki proračun generator slučajnih brojeva izvršava zadani broj simulacija.

Pomoću Monte Carlo simulacija i elektrogeometrijskog modela program određuje koji broj munja od ukupnog broja provedenih simulacija koji pogađa okolno tlo, svaki od obližnjih objekata (ako su modelirani), svaki od stupova, zaštitni vodič te svaki od faznog vodiča.



Slika 7.3: Model stupa za simulaciju elektromagnetskih prijelaznih pojava [103]



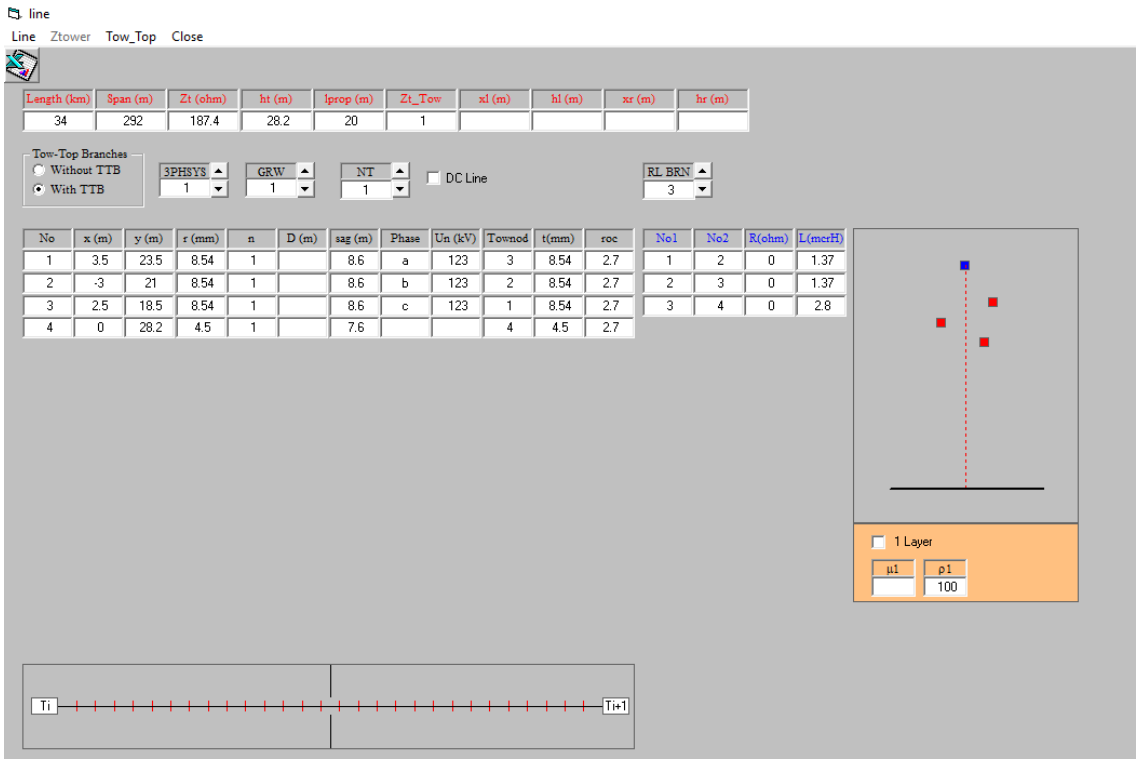
Slika 7.4: Model dalekovoda [103]

Rezultat statističke analize elektromagnetskih prijelaznih pojava je ukupan broj preskoka na nadzemnom vodu koji predstavlja zbroj broja preskoka uslijed greške štićenja i broja povratnih preskoka na izolatorskim lancima. Detaljna razrada rezultata analize daje broj

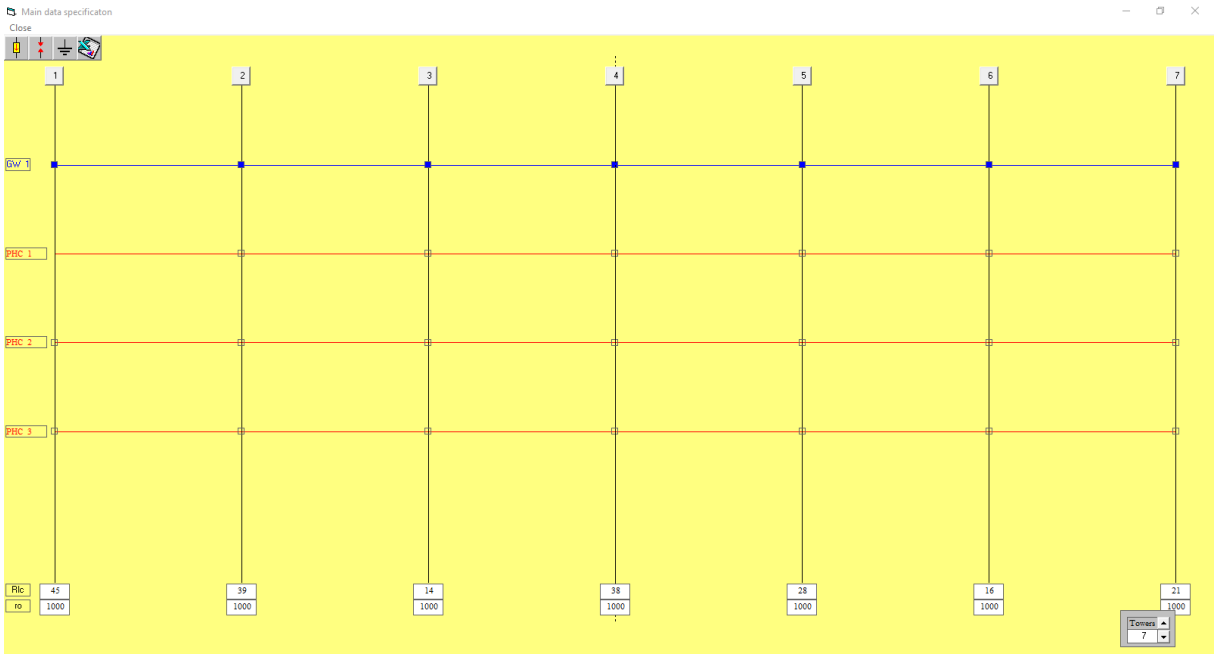
greški štićenja, broj preskoka uslijed greške štićenja i broj povratnih preskoka na izolatorskim lancima po svakoj od faza. Svi rezultati su iskazani kao učestalost pojave na 100 km duljine nadzemnog voda.

U programu je također moguće provesti tzv. višestruke proračune u kojima se variraju različite kombinacije vrijednosti otpora uzemljivača stupova, kritičnog preskočnog napona izolatorskog lanca i rasporeda odvodnika prenapona na stupu. Za svaku od kombinacija program izračunava ukupan broj preskoka na nadzemnom vodu, broj preskoka uslijed greške štićenja i broj povratnih preskoka na izolatorskim lancima.

U primjeru je proveden izračun prenaponske karakteristike 110 kV nadzemnog voda za konfiguraciju bez odvodnika prenapona i za konfiguraciju u kojoj odvodnici prenapona ugrađeni u donjoj fazi četiri stupa za koje je u prethodnom primjeru izračunato da su ugroženiji u odonosu na ostale stupove na toj dionici nadzemnog voda. Ulazni podaci za modeliranu dionicu nadzemnog voda prikazani su na slici 7.5, a model dionice na slici 7.6. Geometrija nadzemnog voda je zadana projektnom dokumentacijom, a otpori uzemljivača stupova su izmjereni kako je opisano u primjeru 5.6.2. Gustoća udara munja određena je iz podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja.



Slika 7.5: Ulazni podaci za simulaciju prenaponske karakteristike (Sigma slp)



Slika 7.6: Model dionice nadzemnog voda (Sigma slp)

Za svaki od slučaja provedeno je po 15000 simulacija udara munja korištenjem elektrogeometrijskog modela i 3000 simulacija elektromagnetskih prijelaznih pojava uslijed udara munje. Rezultati prenaponske karakteristike za nadzemni vod koji nije opremljen odvodnicima prenapona prikazani su na slici 7.7, a za nadzemni vod opremljen odvodnicima prenapona na slici 7.8.

Line Flashover Data

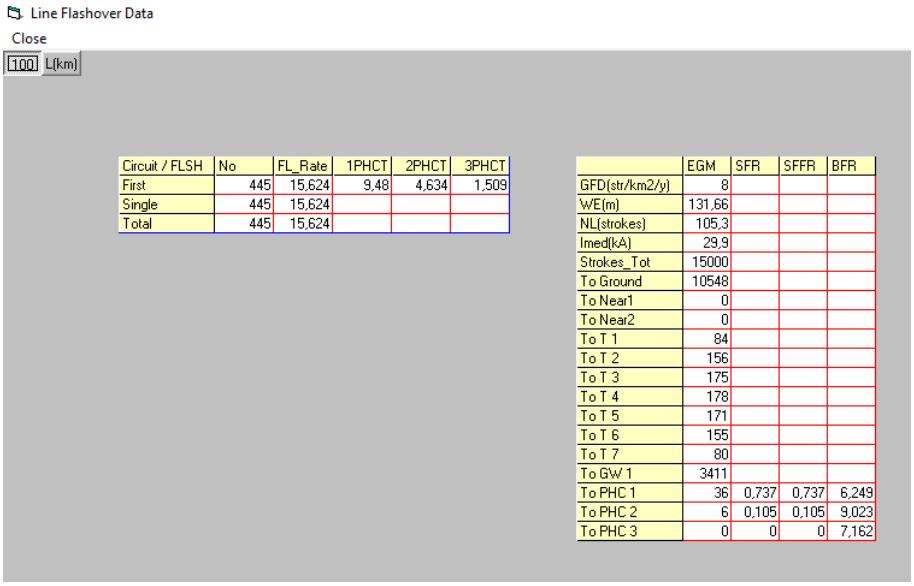
Close

100 L(km)

Circuit / FLSH	No	FL_Rate	1PHCT	2PHCT	3PHCT
First	785	27,791	16,922	8,284	2,584
Single	785	27,791			
Total	785	27,791			

	EGM	SFR	SFFR	BFR
GFD(str/km2/y)	8			
WE(m)	132,76			
NL(strokes)	106,2			
Imed(kA)	29,8			
Strokes_Tot	15000			
To Ground	10511			
To Near1	0			
To Near2	0			
To T 1	95			
To T 2	166			
To T 3	167			
To T 4	157			
To T 5	148			
To T 6	165			
To T 7	80			
To GW 1	3478			
To PHC 1	23	0,601	0,566	11,399
To PHC 2	10	0,247	0,212	14,09
To PHC 3	0	0	0	14,975

Slika 7.7: Rezultati simulacije prenaponske karakteristike za nadzemni vod bez odvodnika prenapona (Sigma slp)



Circuit / FLSH	No	FL_Rate	1PHCT	2PHCT	3PHCT
First	445	15,624	9,48	4,634	1,509
Single	445	15,624			
Total	445	15,624			

	EGM	SFR	SFFR	BFR
GFD(str/km2/y)	8			
WE(m)	131,66			
NL(strokes)	105,3			
Imed(kA)	29,9			
Strokes_Tot	15000			
To Ground	10548			
To Near1	0			
To Near2	0			
To T 1	84			
To T 2	156			
To T 3	175			
To T 4	178			
To T 5	171			
To T 6	155			
To T 7	80			
To GW 1	3411			
To PHC 1	36	0,737	0,737	6,249
To PHC 2	6	0,105	0,105	9,023
To PHC 3	0	0	0	7,162

Slika 7.8: Rezultati simulacije prenaponske karakteristike za nadzemni vod opremljen odvodnicima prenapona (Sigma slp)

Usporedbom rezultata provedenih simulacija moguće je zaključiti da je isti broj provedenih simulacija udara munja rezultirao približno jednakim brojem pražnjenja u elemente nadzemnog voda, pri čemu je naveći broj pražnjenja u zaštitni vodič. Također, u oba slučaja je približno jednak broj pražnjenja u zemlju, u stupove te u zaštitni i fazne vodiče, što je očekivano obzirom na elektrogeometrijski model. Kao što je očekivano, broj povratnih preskoka uslijed atmosferskih pražnjenja u elemente nadzemnog voda značajno je manji za slučaj kada su stupovi opremljeni odvodnicima prenapona (445) u odnosu na slučaj bez odvodnika prenapona (785). Potrebno je naglasiti da su svi rezultati simulacija iskazani svedeno na duljinu nadzemnog voda od 100 km. Proračun je moguće ponavljati za sve veći broj odvodnika u fazama i na ostalim stupovima dok se ne postignu rezultati koji su zadovoljavajući s obzirom na zahtjevanu prenaponsku karakteristiku nadzemnog voda.

Primjer 7.3.3 Simulacije atmosferskih pražnjenja korištenjem programa za izračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP

Iako u nekim slučajevima može doći do preskoka između zaštitnog i faznog vodiča na rasponu ili do greške štićenja, odnosno izravnog udara munje u fazni vodič, u slučajevima atmosferskih pražnjenja malih amplituda struja, najveći broj preskoka nastaje na stupovima, odnosno izolatorskim lancima. Stoga se za nadzemne vodove koji su opremljeni zaštitinim vodičem, kada se analizira utjecaj atmosferskih pražnjenja na vjerojatnost pojave povratnog preskoka uobičajeno provode simulacije udara munje u stup nadzemnog voda.

Vjerojatnost nastanka kratkog spoja uslijed pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu ovisi o više parametara. U prvom redu to su tjemena vrijednost i strmina čela valnog oblika struje, otpor uzemljivača stupa, preskočni razmak izolatorskih lanaca na pogođenom stupu, amplituda i fazni kut pogonskog napona te atmosferski uvjeti (kiša, snijeg, tlak, temperatura i vlažnost).

U nastavku su prikazani rezultati simulacija atmosferskih pražnjenja u stup nadzemnog voda korištenjem programa za izračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP. Priprema modela za provođenje simulacije opisana je u petom poglavlju ovog rada.

U tablicama 7.7 i 7.8 prikazani su rezultati simulacija udara munje u stup nadzemnog voda za različite otpore uzemljivača stupa te različite vrijednosti amplituda struja atmosferskog pražnjenja koje će biti premašene u 50%, 20%, 10%, 5% i 2% slučajeva.

U tablici 7.7 simulacije su provedene za vršne vrijednosti struja atmosferskih pražnjenja koje će biti premašene sa zadanom vjerojatnošću određene korištenjem izraza (2.4), a u tablici 7.8 za vršne vrijednosti struja munje koje će biti premašene s istom zadanom vjerojatnošću određene iz raspodjele amplituda struja munja registriranih sustavom za lociranje atmosferskih pražnjenja. Maksimalna strmina čela S_{m} računa se pomoću izraza (2.5) i koeficijenata α i β iz tablice 2.2. za prvi udar munje. Za vrijednosti otpora uzemljivača stupa odabrane su različite vrijednosti izmjerene za stupove iz primjera 5.6.2.

U tablicama zelena boja prikazuje kombinacije vrijednosti amplitude struje munje i otpora uzemljivača stupa u kojima neće nastupiti povratni preskok niti u jednoj fazi i za bilo koji fazni kut pogonskog napona, siva boja označava ovisnost nastanka povratnog preskoka o faznom kutu napona, a crvena boja označava da će nastupiti povratni preskok, barem u jednoj fazi na promatranom stupu nadzemnog voda, neovisno o faznom kutu napona u trenutku udara.

Tablica 7.7: Rezultati simulacija udara munja za izračunate amplitude struje munje

		P (31 kA) = 50% S_m = 25,78 kA/µs	P (52,8 kA) = 20% S_m = 34,56 kA/µs	P (72 kA) = 10% S_m = 40,98 kA/µs	P (96 kA) = 5% S_m = 48,00 kA/µs	P (138 kA) = 2% S_m = 58,61 kA/µs
R_g (Ω)	13,66					
	16,23					
	21,34					
	28,19					
	38,14					
	38,52					
	45,02					

Tablica 7.8: Rezultati simulacija udara munja za stvarne amplitude struje munje (SLAP-a)

		P (8 kA) = 50% S_m = 12,24 kA/µs	P (16 kA) = 20% S_m = 17,92 kA/µs	P (22 kA) = 10% S_m = 21,35 kA/µs	P (33 kA) = 5% S_m = 26,68 kA/µs	P (54 kA) = 2% S_m = 34,98 kA/µs
R_g (Ω)	13,66					
	16,23					
	21,34					
	28,19					
	38,14					
	38,52					
	45,02					

U analiziranom slučaju vjerojatnost pojave određene vrijednosti amplitude struje prema podacima sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja je značajno manja nego ako se računa korištenjem izraza (2.4) te je stoga manja vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskim lancima za određene vrijednosti otpora uzemljivača stupa. Moguće je primjetiti da za određene kombinacije otpora uzemljivača stupa i amplitude struje atmosferskog pražnjenja neće doći do pojave povratnog preskoka na izolatorskim lancima na stupu. Vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskim lancima na stupu je veća za stupove s višim otporima uzemljivača te raste s povećanjem amplitude struje atmosferskog pražnjenja.

Simulacije udara munje u stup nadzemnog voda provedene su za slučajeve bez ugrađenih odvodnika prenapona, za odvodnik prenapona ugrađen u donju fazu (C), za odvodnike prenapona ugrađene u srednju i donju fazu (B, C) te za odvodnike prenpona ugrađene u sve tri faze (A, B, C) za različite kombinacije vrijednosti amplitude struje munje i otpora uzemljivača stupa te za različite fazne kuteve napona u trenutku udara munje. U promatranom slučaju odabran je odvodnik prenapona s karakteristikama navedenim u tablici 4.5.

U tablicama 7.9 i 7.10 prikazani su rezultati simulacija za stup s izmjerenim otporom uzemljivača 45,02 Ω te amplitude struje munje 33 kA i 54 kA.

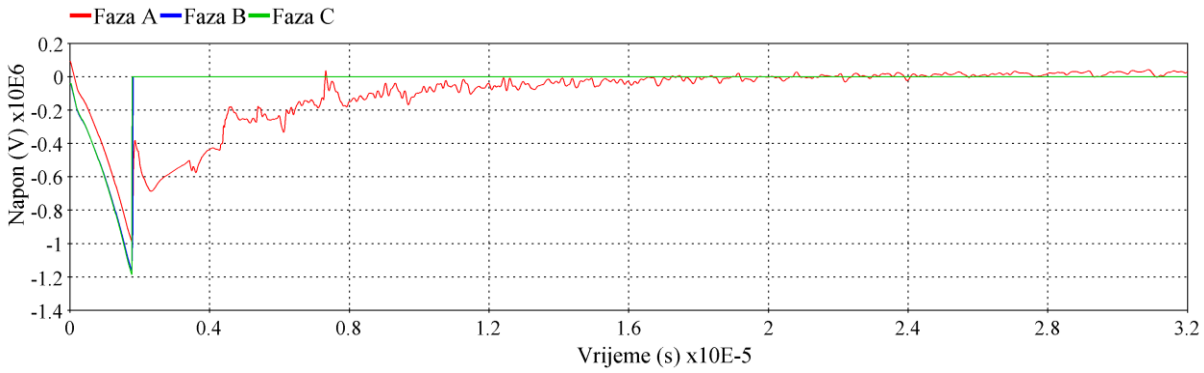
Tablica 7.9: Rezultati simulacija za R = 45,02 Ω, I_f = 33 kA

R = 45,02 Ω, I_f = 33 kA	Odvodnik prenapona u fazi:		
	-	C	B, C
Kut napona u fazi A (°)	Preskok na izolatorskom lancu u fazi/fazama		
0	B ,C	B	-
30	B ,C	B	-
60	B ,C	B	-
90	B ,C	-	-
120	B ,C	-	-
150	B ,C	-	-
180	B ,C	B	-
210	B ,C	B	-
240	B ,C	B	-
270	B ,C	B	-
300	B ,C	B	-
330	B ,C	B	-

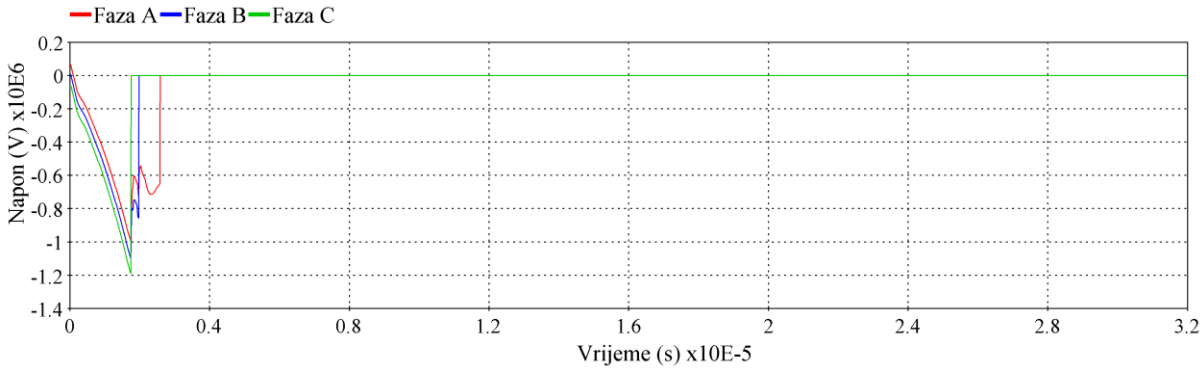
Tablica 7.10: Rezultati simulacija za R = 45,02 Ω, I_f = 54 kA

R = 45,02 Ω, I_f = 54 kA	Odvodnik prenapona u fazi:			
	-	C	B, C	A, B ,C
Kut napona u fazi A (°)	Preskok na izolatorskom lancu u fazi/fazama			
0	B ,C	A, B	A	-
30	B ,C	A, B	A	-
60	A, B ,C	A, B	A	-
90	A, B ,C	A, B	A	-
120	A, B ,C	A, B	A	-
150	A, B ,C	A, B	A	-
180	A, B ,C	A, B	A	-
210	A, B ,C	A, B	A	-
240	A, B ,C	A, B	A	-
270	A, B ,C	A, B	A	-
300	B ,C	A, B	A	-
330	B ,C	A, B	A	-

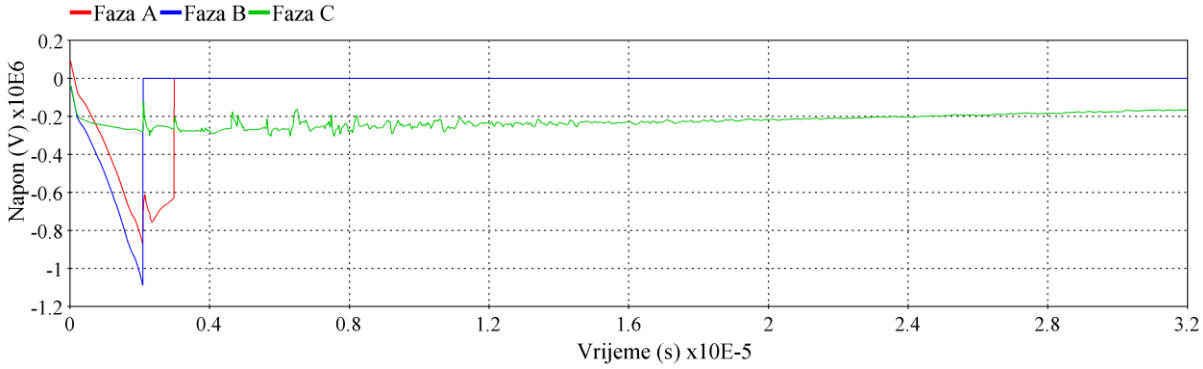
Na slikama 7.9 – 7.13 prikazani su izračunati prenaponi na izolatorskim lancima u slučaju udara munje amplitude struje I_f = 54 kA u stup s izmjerenim otporom uzemljivača stupa R = 45,02 Ω za slučaj bez odvodnika prenapona, za odvodnik prenapona ugrađen u donjoj fazi (C), za odvodnike prenapona ugrađene u srednjoj (B) i donjoj (C) fazi te za odvodnike prenapona ugrađene u sve tri faze, gornjoj (A), srednjoj (B) i donjoj (C).



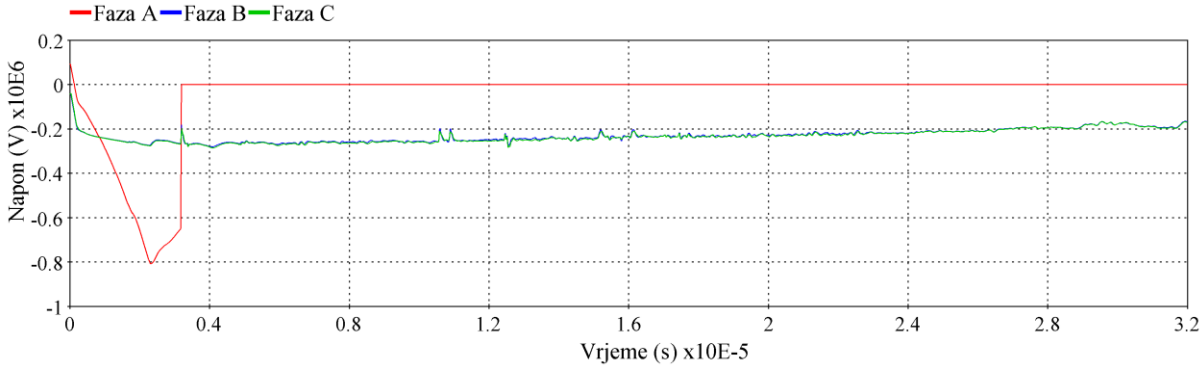
Slika 7.9: Prenaponi na izolatorskim lancima na stupu bez odvodnika prenapona (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω), preskok u srednjoj (C) i donjoj (B) fazi



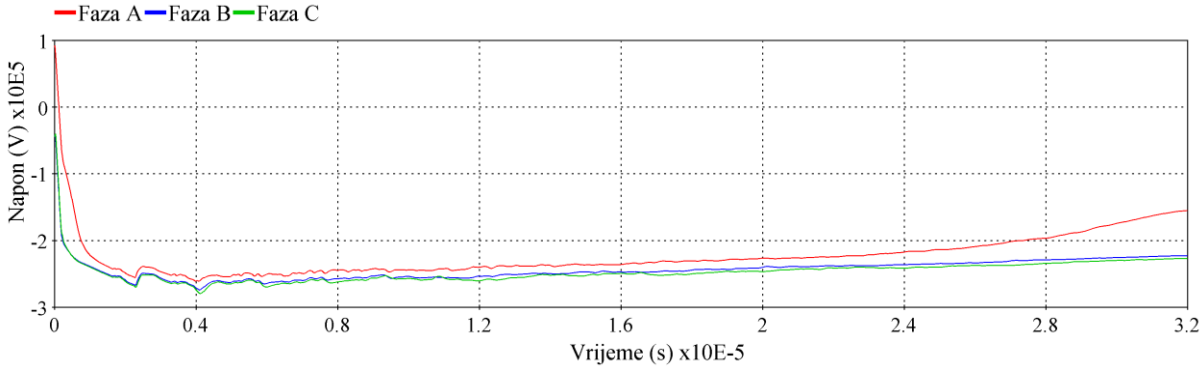
Slika 7.10: Prenaponi na izolatorskim lancima na stupu bez odvodnika prenapona (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω), preskok u u sve tri faze



Slika 7.11: Prenaponi na izolatorskim lancima na stupu s odvodnikom prenapona u donjoj fazi (C) (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω), preskok u gornjoj (A) i srednjoj (B) fazi



Slika 7.12: Prenaponi na izolatorskim lancima na stupu s odvodnicima prenapona u srednjoj (B) i donjoj fazi (C) (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω), preskok u gornjoj (A) fazi



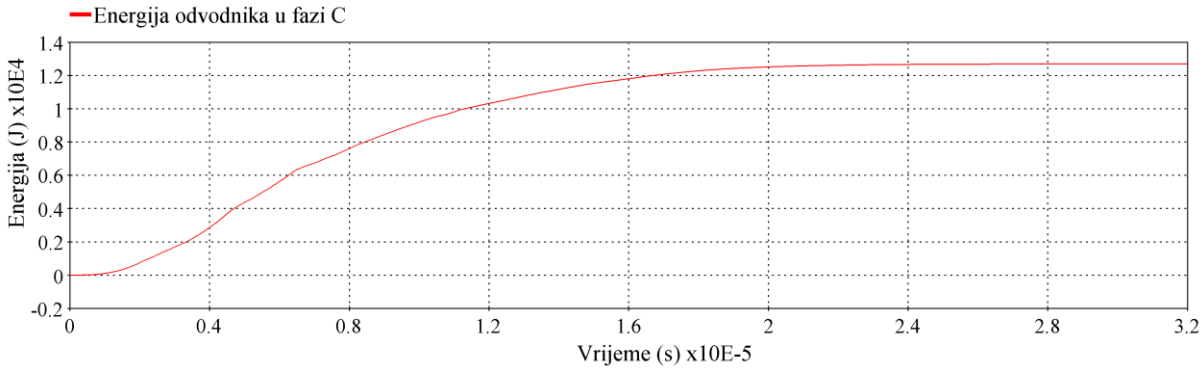
Slika 7.13: Prenaponi na izolatorskim lancima na stupu s odvodnicima prenapona u sve tri faze: gornjoj (A), srednjoj (B) i donjoj (C) (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω)

Promatrajući sve kombinacije vrijednosti amplitude struje atmosferskog pražnjenja i otpora uzemljivača stupa i različite fazne kuteve napona u trenutku pražnjenja, za slučaj bez ugrađenih odvodnika prenapona statistički je najveća vjerojatnost pojave preskoka u donjoj fazi (C). Napon na izolatorskom lancu je jednak razlici potencijala stupa na mjestu zavješenja i potencijala faznog vodiča. Za struje atmosferskih pražnjenja amplituda prenapona na izolatorskom lancu ovisi o faktoru elektromagnetske sprege kojim se u obzir uzima utjecaj napona induciranog na faznom vodiču uslijed električne i magnetske sprege koji djeluje na smanjenje napona na izolaciji (izraz 7.11). Faktor elektromagnetske sprege ovisi o međusobnoj udaljenosti faznog i zaštitnog vodiča, odnosno manji je što je veća međusobna udaljenost faznog i zaštitnog vodiča. Stoga je amplituda prenapona, a time i vjerojatnost pojave povratnog preskoka, najveća na izolatorskom lancu u donjoj fazi koja je najudaljenija od zaštitnog vodiča.

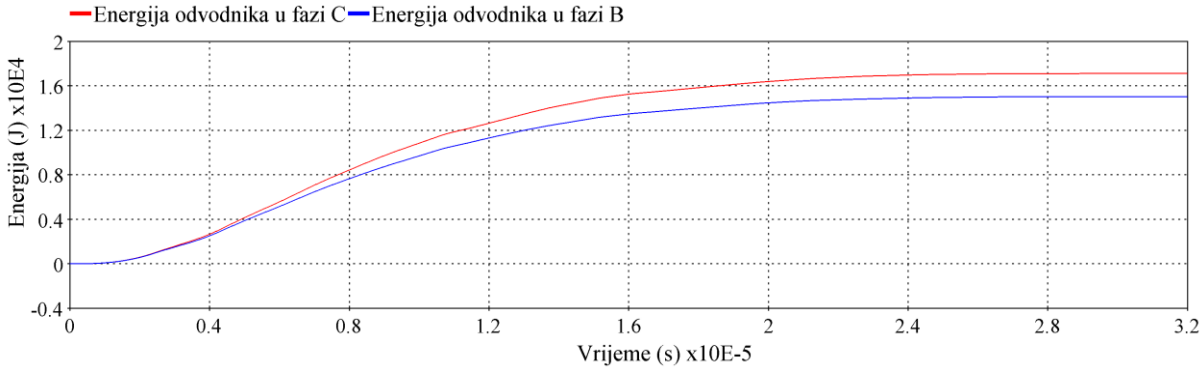
Kao što je očekivano, ugradnjom odvodnika prenapona na stup, smanjuje se vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskim lancima. Ovisno o kombinaciji vrijednosti otpora uzemljivača stupa i amplitude struje munje, varira broj faza stupa u koje je potrebno ugraditi odvodnik prenapona kako bi se postigla zadovoljavajuća razina prenaponske zaštite. Može se zaključiti da je moguće minimizirati vjerojatnost pojave povratnog preskoka na stupu ugradnjom odvodnika prenapona u jednu ili više faza ovisno o vrijednostima otpora uzemljivača stupa. Dok se za stupove s nižim vrijednostima otpora uzemljivača stupa vjerojatnost pojave povratnog preskoka značajno smanjuje ili u potpunosti eliminira ugradnjom odvodnika prenapona u donju fazu, za stupove s višim vrijednostima otpora uzemljivača potrebno je ugraditi odvodnik prenapona u dvije faze, srednju i donju, ili u sve tri faze, ovisno o potrebnoj razini prenaponske zaštite promatranog nadzemnog voda.

Na slikama 7.14 -7.16 prikazana je izračunata energija na odvodnicima prenapona tijekom provođenja atmosferskog prenapona za stup s odvodnikom prenapona ugrađenim u donju fazu, za stup s odvodnicima prenapona u dvije faze, donjoj i srednjoj i za stup s odvodnicima prenpona u sve tri faze. Moguće je primjetiti da je najnepovoljniji slučaj s aspekta energetskog optrećenja odvodnika prenapona, energija na odvodniku prenapona u donjoj fazi u slučaju atmosferskog pražnjenja u stup s odvodnicima prenapona ugrađenim u sve tri faze. Međutim, i u tom slučaju energija na odvodniku prenapona ne prelazi vrijednost od 25 kJ, što za odvodnik prenapona nazivnog napona U_r = 108 kV rezultira energetskim opterećenjem značajno manjim od termičke energetske sposobnosti W_{th} = 5 kJ/ kV (U_r)

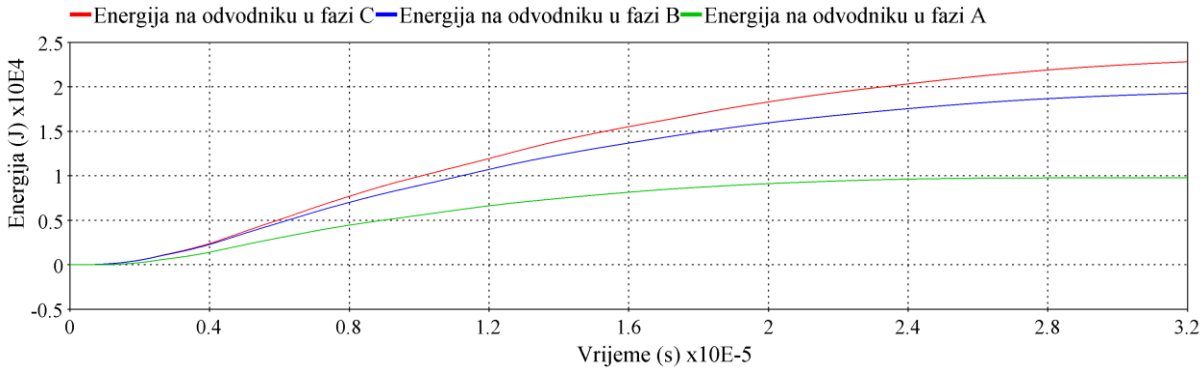
deklarirane od strane proizvođača odvodnika te se može zaključiti da je u ovom slučaju odabran odvodnik prenapona s odgovarajućim karakteristikama.



Slika 7.14: Energija na odvodniku prenapona za stup s odvodnikom prenapona u donjoj fazi (C) (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω)



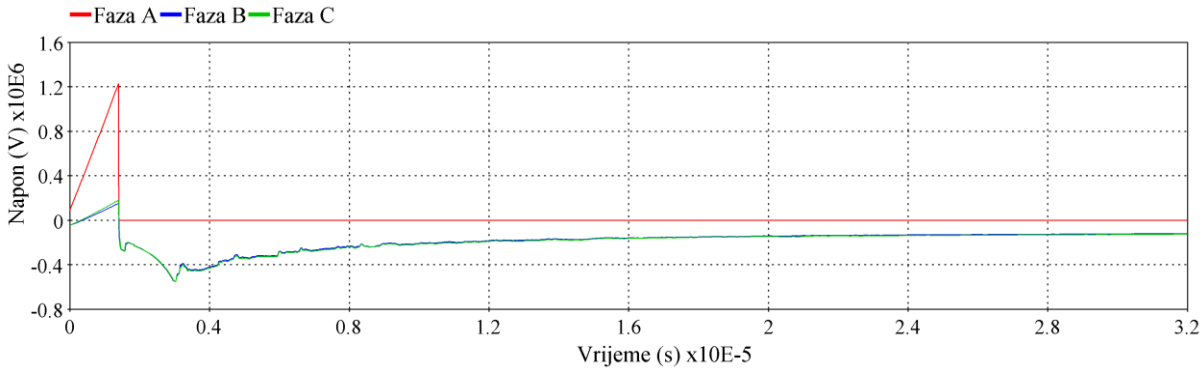
Slika 7.15: Energija na odvodniku prenapona za stup s odvodnicima prenapona u srednjoj (B) i donjoj fazi (C) (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω)



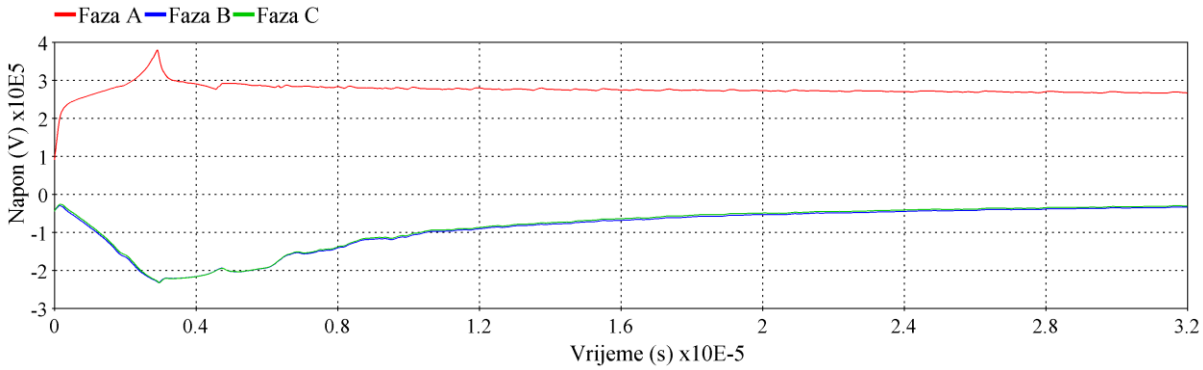
Slika 7.16: Energija na odvodniku prenapona za stup s odvodnicima prenapona u sve tri faze: gornjoj (A), srednjoj (B) i donjoj (C) (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω)

U slučaju greške štićenja, za struje atmosferskog pražnjenja amplitude manje od kritične struje koja se računa za svaki stup pomoću elektrogeometrijskog modela i izraza 2.12., doći će do udara munje izravno u gornju fazu stupa i do povratnog preskoka na izolatorskom lancu u gornjoj fazi (slika 7.17). Rezultati simulacija su pokazali da se pojava

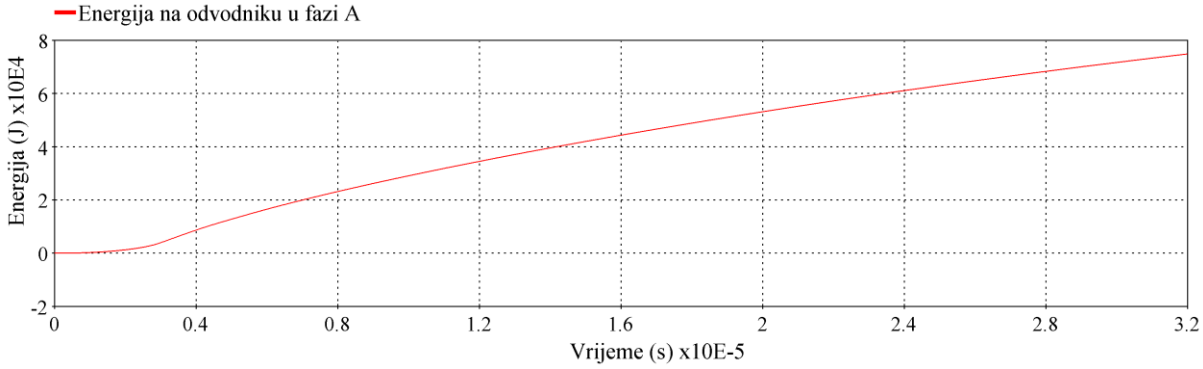
povratnog preskoka u fazi izravno pogođenoj udarom munje može spriječiti samo ugradnjom odvodnika prenapona u toj fazi (slika 7.18). U tom slučaju je s aspekta energetskog opterećenja odvodnika prenapona najnepovoljniji slučaj kada je amplituda struje pražnjenja jednaka kritičnoj struji ($I_f = I_K$), ali je izračunato energetsko opterećenje u tom slučaju još uvijek manje od termičke energetske sposobnosti deklarirane od strane proizvođača odvodnika (slika 7.19).



Slika 7.17: Prenaponi na izolatorskim lancima na stupu bez odvodnika prenapona (I_f = 19,66 kA, R = 45,02 Ω): izravni udar munje u fazu A, preskok u fazi A

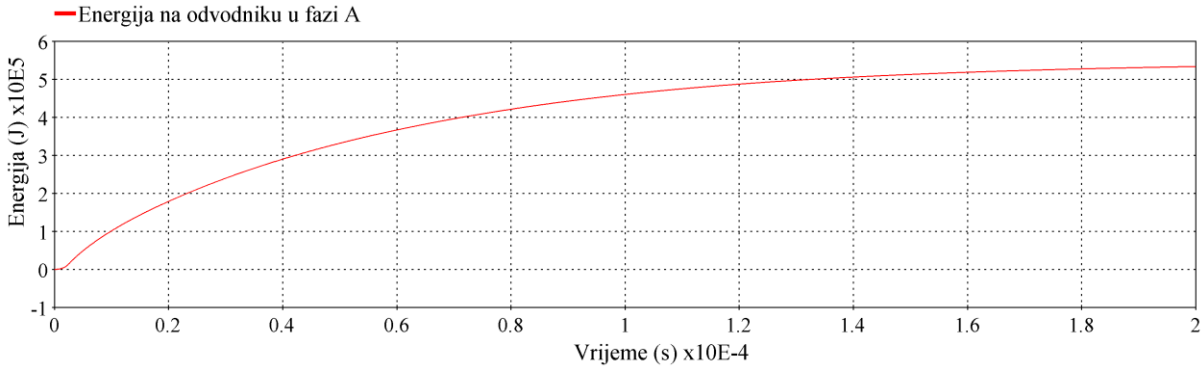


Slika 7.18: Prenaponi na izolatorskim lancima na stupu s odvodnicima prenapona u sve tri faze: gornjoj (A), srednjoj (B) i donjoj (C) (I_f = 19,66 kA, R = 45,02 Ω)

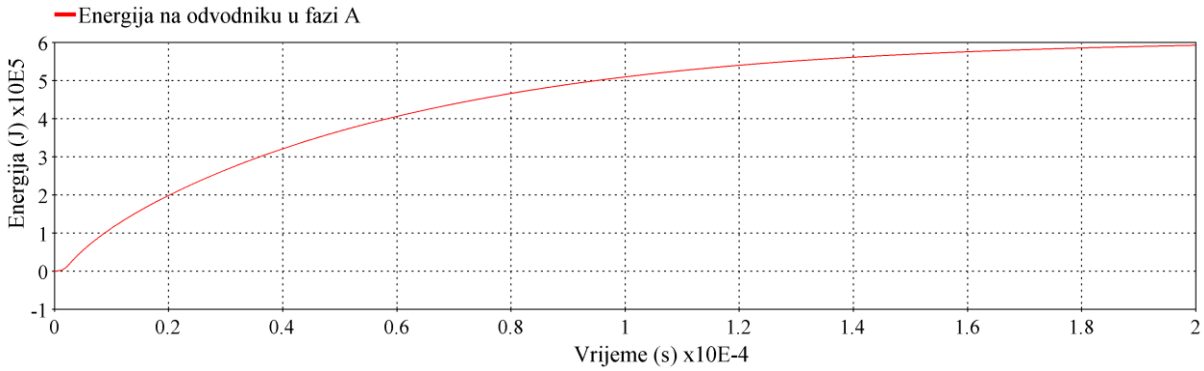


Slika 7.19: Energija na odvodniku prenapona u fazi A za stup s odvodnicima prenapona u sve tri faze: gornjoj (A), srednjoj (B) i donjoj (C) (I_f = 19,66 kA, R = 45,02 Ω)

Za višestruka atmosferska pražnjenja je uobičajeno da je amplituda struje veća za prvi nego za uzastopni udar, ali nije u svakom slučaju tako. U slučaju višestrukog atmosferskog pražnjenja s amplitudom struje prvog udara koja je manja od kritične struje, postoji mogućnost, iako vrlo male vjerojatnosti, izravnog udara u fazni vodič te stvaranje vodljivog kanala kroz koji može doći do pražnjenja s amplitudama većim od kritične struje u isti fazni vodič. U tom slučaju odvodnik prenapona u fazi u kojoj je došlo do izravnog udara štiti od pojave povratnog preskoka, ali će za pražnjenja s većim amplitudama struja doći do energetskog preopterećenja odvodnika prenapona. Simulacije provedene za promatrani stup (R = 45,02 Ω) opremljen s odvodnicima prenapona u sve tri faze su pokazale da će za pražnjenja s amplitudama struje munje većim od 50 kA doći do energetskog preopterećenja odvodnika prenapona (slike 7.20 i 7.21). Prema raspoloživim informacijama, u praksi do sada nisu zabilježeni slučajevi kvarova uslijed energetskog preopterećenja odvodnika prenapona ugrađenih na stupove nadzemnih visokonaponskih vodova.



Slika 7.20: Energija na odvodniku prenapona u fazi A za stup s odvodnicima prenapona u sve tri faze: gornjoj (A), srednjoj (B) i donjoj (C) (I_f = 50 kA, R = 45,02 Ω)



Slika 7.21: Energija na odvodniku prenapona u fazi A za stup s odvodnicima prenapona u sve tri faze: gornjoj (A), srednjoj (B) i donjoj (C) (I_f = 54 kA, R = 45,02 Ω)

8. Zaključak

Ispadi visokonaponskih nadzemnih vodova iz pogona vrlo često su uzrokovani atmosferskim pražnjenjima, posebno u područjima s velikom gustoćom udara munja u tlo i visokim specifičnim otporom tla. Atmosferska pražnjenja u nadzemni vod uzrokuju visoke atmosferske prenapone, a moguće posljedice su oštećenje opreme uslijed velikih struja kvara ili velikog broja sklopnih operacija te smanjenje kvalitete opskrbe električnom energijom.

Postoje različite metode koje se mogu primijeniti za poboljšanje prenaponske zaštite. Kako bi se smanjio broj ispada iz pogona uslijed atmosferskih pražnjenja, u novije vrijeme sve se više koriste odvodnici prenapona na nadzemnom vodu. Ugradnju odvodnika prenapona na nadzemni vod omogućio je razvoj tehnologije metal oksidnih odvodnika prenapona s polimernim kućištem, koji ne izazivaju značajnija dodatna mehanička naprezanja konstrukcije stupova te su jednostavni za ugradnju i na već izgrađenim nadzemnim vodovima uz prihvatljivu nabavnu cijenu.

Na vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu na stupu uslijed atmosferskog pražnjenja utječu različiti parametri kao što su gustoća udara munja, parametri struje atmosferskog pražnjenja, geometrija stupa i nadzemnog voda te impedancija uzemljivača stupa.

Za određivanje karakteristika atmosferskih pražnjenja u području u kojem je lociran nadzemni vod, prvenstveno gustoće udara munja te parametara struje atmosferskog pražnjenja, koriste se statistički podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja. Podaci sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja u korelaciji s podacima relejnog sustava o ispadima promatranog nadzemnog voda daju pouzdanu informaciju o broju ispada uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima i lokaciji kvara uzrokovanog pojavom povratnog preskoka uslijed atmosferskog pražnjenja.

U okviru doktorskog rada razvijena je metoda za smanjenje broja ispada visokonaponskih nadzemnih vodova uzrokovanih atmosferskim prenaponima primjenom odvodnika prenapona koja podrazumijeva korištenje statističkih podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja, analizu statistike ispada i kvarova nadzemnog voda uzrokovanih atmosferskim prenaponima, analizu prenaponskih karakteristika nadzemnog voda, izbor i ugradnju odgovarajućih odvodnika prenapona te određivanje kriterija za ugradnju odvodnika prenapona u jednu ili više faza pojedinog stupa nadzemnog voda.

Razvijena metoda za smanjenje broja ispada visokonaponskih nadzemnih vodova ugradnjom odvodnika prenapona podrazumijeva primjenu odvodnika prenapona na onim nadzemnim vodovima za koje je korelacijom podataka o ispadima iz pogona iz sustava relejne zaštite i podataka iz sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja potvrđena učestalost pojave povratnog preskoka uslijed atmosferskih pražnjenja veća od prihvatljive razine obzirom na sigurnost pogona elektroenergetskog sustava i opskrbe električnom energijom.

Vjerojatnost pojave povratnog preskoka ovisno o parametrima struje atmosferskog pražnjenja i impedancije uzemljivača stupa određuje se simulacijama atmosferskih pražnjenja u stup nadzemnog voda korištenjem EMTP programa za analizu elektromagnetskih prijelaznih pojava, jednako kao i vjerojatnost pojave povratnog preskoka na stupu uz primjenu odvodnika prenapona u jednoj ili više faza na stupu nadzemnog voda. Parametri odvodnika prenapona odabiru se prema nazivnom naponu mreže na način da što učinkovitije ograničavaju atmosferske i sklopne prenapone ispod razine podnosivog napona opreme, a da se pri tome energetski ne preopterete uslijed privremenih prenapona. Simulacijama atmosferskih pražnjenja pokazano je da u najvećem broju slučajeva atmosferski prenaponi nisu kritični za energetsko opterećenje odvodnika prenapona.

U radu je razvijen model uzemljivača stupa koji u obzir uzima frekvencijsku ovisnost impedancije uzemljivača stupa što je posljedica frekvencijske ovisnosti specifičnog otpora i permitivnosti tla. Frekvencijski ovisni model uzemljivača stupa modeliran je kao RLC strujni krug uz poznate izraze za parametre R, L i C za zadanu geometriju uzemljivača stupa i za frekvencijski ovisne specifični otpor i permitivnost tla. Mjerenje frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa provodi se strujama visoke frekvencije različitih amplituda i trajanja. Iz izmjerenih veličina napona i struje moguće je odrediti karakterističnu prijelaznu impedanciju uzemljivača stupa u vremenskoj domeni. Vrijednosti amplitude i kuta izmjerene impulsne impedancije uzemljivača stupa odgovaraju vrijednostima izračunatim korištenjem frekvencijski ovisnog RLC modela impedancije uzemljivača pri čemu se vrijednosti amplitude impedancije uzemljivača stupa smanjuju s porastom frekvencije za tla s visokim specifičnim otporom. Model frekvencijski ovisne impedancije uzemljivača stupa u EMTP programu izrađen je korištenjem jednadžbi prostora stanja temeljenim na prijenosnim jednadžbama i metodom racionalne aproksimacije impedancije stupa. S obzirom na to da je atmosfersko pražnjenje pojava širokog spektra frekvencija, uključujući i one vrlo visoke, pokazano je na primjeru 110 kV stupa nadzemnog voda da se pri atmosferskom pražnjenju

impedancija uzemljivača stupa smanjuje, a time i vjerojatnost pojave povratnog preskoka na izolatorskim lancima stupa uz ostale iste zadane utjecajne veličine.

Broj odvodnika prenapona koji će se ugraditi na nadzemni vod u svrhu poboljšanja prenaponske zaštite i smanjenja broja ispada iz pogona, potrebno je odrediti temeljem tehno-ekonomske analize. Kako bi ugradnja odvodnika prenapona na nadzemni vod bila ekonomski opravdana, troškovi investicije te održavanja odvodnika prenapona ne bi trebali premašiti očekivanu korist zbog smanjenja troškova uzrokovanih ispadom i kvarovima promatranog nadzemnog voda. U iznimnim slučajevima kada je promatrani nadzemni vod od važnosti za sigurnost opskrbe pojedinog dijela elektroenergetskog sustava, prihvatljivi su viši investicijski troškovi od očekivane financijske koristi.

Kriterij za ugradnju odvodnika prenapona na pojedine stupove nadzemnog voda određuje se prema indeksu relativne ugroženosti stupa, kojim je određena razina ugroženosti pojedinog stupa u odnosu na sve ostale stupove istog nadzemnog voda koja se izračunava na temelju podataka o gustoći udara munja, geometrijskih podataka nadzemnog voda i podataka o otporu uzemljivača stupa. Kriteriji za ugradnju odvodnika prenapona u jednu ili više faza pojedinog stupa nadzemnog voda određuju se na temelju rezultata simulacija atmosferskih pražnjenja u EMTP programu kojima se određuje vjerojatnost pojave povratnog preskoka za različite kombinacije vrijednosti otpora uzemljivača stupa i amplitude struje atmosferskog pražnjenja.

Proračun prenaponske (preskočne) karakteristike nadzemnih vodova provodi se posebno razvijenim programskim alatima kao što je Sigma slp, kojim se korištenjem statističke metode Monte Carlo i trodimenzionalnog elektrogeometrijskog modela simuliraju atmosferska pražnjenja u nadzemni vod.

U radu je pokazano da je moguće smanjiti broj ispada visokonaponskih nadzemnih vodova uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima primjenom odvodnika prenapona, a također i ostvariti učinkovitiju prenaponsku zaštitu odabirom i određivanjem rasporeda odvodnika prenapona prema kriterijima koji u obzir uzimaju parametre atmosferskih pražnjenja određenih iz podataka sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja te frekvencijsku ovisnost impedancije uzemljivača stupa.

Literatura

[1] Wurzer, G., Hübl, I., Pack, S., "A new methodology for electrical tower grounding in practical use", International Colloquium on Lightning and Power Systems, ICLPS 2016, Bologna, Italy, 2016

[2] Betz, H.D., Schumann, U., Laroche, P., "Lightning: Principles, instruments and applications, review of modern lightning research", Chapter 5: "'LINET – an international VLF/LF lightning detection network in Europe", Springer Science + Bussiness Media B.V., December 2008

[3] Schulz, W., Poelman, D., Pedeboy, S., Vergeiner, C., Pichler, H., Diendorfer, G., Pack, S., "Performance Validation of The European Lightning Location System Euclid", International Colloquium on Lightning and Power Systems, ICLPS 2014, Lyon, France, 2014

[4] Franc, B., Uglešić, I., Filipović-Grić, B., "Application of Lightning Location System Data for Designing the External Lightning Protection System", International Colloquium on Lightning and Power Systems, ICLPS 2014, Lyon, France, 2014

[5] Bonnet, M, "Status of lightning detection Performances and limitations of existing systems", International Colloquium on Lightning and Power Systems, ICLPS 2014, Lyon, France, 2014

[6] Tong, C., Gao, Y., Tong, M., Li, J., Wang, Q., Chen, K., "Application of Lightning Detection in Smart Grid Dynamic Protection", International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012, Vienna, Austria, 2012

[7] Wuerl, A., Betz, H.D., Schmidt, K., Oettinger, W.P., "Surveillance of Lightning Strokes Near Transmission Lines", Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems Colloquium, Cavtat, Croatia 2008

[8] Uglešić, I., Milardić, V., Franc, B., Filipović-Grčić, B., Horvat, J., "Prva iskustva sa sustavom za lociranje munja u Hrvatskoj", 9. simpozij HRO CIGRÉ o sustavu vođenja EES-a, Zadar, 2010.

[9] Kosmač, J., Djurica, V., Babuder, M., "Automatic Fault Localization Based on Lightning Information", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2006

[10] Uglešić, I., Milardić, V., Franc, B., Betz, H.D., Piliškić, S., Nuhanović, R., Tokić, A., "Correlation between Lightning Impacts and Outages of Transmission Lines", CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012

[11] Thanasaksiri, T., “Improving the lightning performance of overhead lines applying additional underbuild shield wire ”, IEEE, 2013

[12] Sadović, S., Joulie, R., Tartier, S., Brocard, E., “Use of line surge arresters for the improvement of the lightning performance of 63 kV and 90 kV shielded and unshielded transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997

[13] Visacro, S., Alipio R., “Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 2, April 2012, str. 927–935

[14] CIGRE WG C4.33, “Impact of Soil-Parameter Frequency Dependence on the Response of Grounding Electrodes and on the Lightning Performance of Electrical Systems”, CIGRE Technical Brochure, 2018

[15] International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B2: Overhead Lines, CIGRE Green Books: “Overhead Lines”, Springer Reference, 2017

[16] Piliškić, S., Uglešić, I., Jurišić, B., “Evaluating the overvoltage performance of an overhead line taking into account the frequency-dependence of its tower’s grounding electrodes with high soil resistivity”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 116, March 2020

[17] Uglešić, I., Milardić, V., Milešević, B., Filipović-Grčić, B., “Tehnika visokog napona”, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, Hrvatska, Ožujak 2016.

[18] IEC 60071-1, “Insulation coordination – Part 1: Definitions, principles and rules”, March 2011

[19] Baba, Y., Tatematsu, A., “CIGRE WG C4.37 Tutorial based on the Technical Brochure Electromagnetic Computation Methods for Lightning Surge Studies with Emphasis on the FDTD Method”, Delft, Netherlands, October, 2019

[20] Berger, K., Anderson, R.B., Kroninger, H., “Parameters of lightning flashes”, Electra, Vol. 41, 1975, str. 223-237.

[21] Rakov, V. A., Uman, M. A., “Lightning Physics and Effects”, Cambridge University Press, 2003

[22] Birkl J., Shulzhenko, E., Heidler, F., Diendorfer, G., “Measuring Lightning Currents on Wind Turbines”, 4th International Symposium on Winter Lightning (ISWL), Joetsu, Niigata-ken, Japan, 2017

[23] IEC 62305-1, “Protection Against Lightning - Part 1: General principles”, 2010

[24] Torres, H., Perez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., Herrera, J., “Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations”, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, str. 4086-4093.

[25] CIGRE WG C4.407, “Lightning parameters for engineering applications”, CIGRE Brochure 549, August 2013

[26] CIGRE WG 33, “Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”, CIGRE Brochure 63, October 1991

[27] IEEE, “Guide for Improving the Lightning Performance of electric Power Overhead Distribution Lines”, IEEE Std. 1410 – 2010

[28] IEEE, “Parameters of Lightning Strokes: A Review”, IEEE Trans. Power Delivery, vol.20, January 2005, str. 346 –358

[29] IEC 61312-1, “Protection against lightning electromagnetic impulse”, March 1995

[30] Anderson, R. B., Eriksson, A. J., “A summary of lightning parameters for engineering applications”, CIGRE 1980 Session, paper 33-06

[31] Uglešić, I., Franc, B., Stipetić, N., “Lightning stroke measurements, data verification and application in power systems”, VI Russian Conference on Lightning Protection (RCLP), Saint Petersburg, Russia, 2018

[32] Balota, A., Strujić, D., Sadović, T., Sadović, S., Uglešić, I., Betz, H.D., “Lightning activity monitoring system on mountain Lovcen, Montenegro”, CIGRE International Colloquium on Lightning and Power Systems, Bologna, Italy, 2016

[33] Mareev, Y.A., Slyunyaev, N.N., Rakov, V.A., “On the statistical distribution of the peak current of lightning discharges”, VI Russian Conference on Lightning Protection (RCLP), Saint Petersburg, Russia, 2018

[34] Anderson, R. B., Eriksson, A. J., “Lightning parameters for engineering application”, Electra, Vol. 69, March 1980, str. 65-102.

[35] Filipović-Grčić, B., Franc, B., Uglešić, I., Betz, H.D., “Lightning overvoltage protection of combined overhead line and underground cable distribution network”, CIGRE International Colloquium on Lightning and Power Systems, Bologna, Italy, 2016

[36] Van House, D.L., Cummins, K.L., Tuel, J.V., “Applications of the U.S. National Lightning Detection Network in line reliability and fault analysis”, Proc. CIGRE Int. Workshop Line Surge Arresters Lightning, 1996

[37] Cummins, K.L., Krider E.P., Malone, M.D., “The U.S. national lightning detection network and applications of cloud-to-cloud lightning by electric power utilities”, IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 40, No. 4., November, 1998

[38] Schmidt, K., Betz, H.D., Oettinger, W.P., Wirz, M., Diendorfer, G., “A New Lightning Detection Network in Southern Germany”, 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Avignon, France, 2004

[39] Betz, H.D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W.P., Defer, E., Dziewit, Z., Konarski, J., “LINET – An international lightning detection network in Europe”, Atmospheric Research 91, 2009, str. 564-573,

[40] Betz, H.D., Kulzer, R., Gerl, A., Eisert, B., Oettinger, W.P., Jakubassa, D., “On the correlation between VLF-atmospherics and meterological data”, International Conference on Lightning Protection, Firence, Italy, 1996

[41] Cummins, K.L., Murphy, M.J., Tuel, J.V., “Lightning detection methods and meteorological applications”, IV International Symposium on Military Meteorology, Malbork, Poland, 2000

[42] “Statistika udara munja u vodove prijenosne mreže RH za 2018. godinu”, FER, Zagreb, veljača 2019.

[43] Marušić, A., Skok, S., “Pravilnik o određivanju podešenja funkcija relejne zaštite u postrojenjima HEP-OPS d.o.o.”, 2012.

[44] Horowitz, S. H., Phadke, A. G., “Power System Relaying”, Third Edition, Research Studies Press Limited, John Wiley & Sons, Ltd., 2008

[45] Franc, B., Uglešić, I., Šturlan, M., Piliškić, S., Mesić, K., “Analiza isklopa prekidača uzrokovanih udarima munja u prijenosnoj mreži u 2014. godini”, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2015.

[46] “Analiza mogućih rješenja prilagođenja instaliranih sustava daljinskog upravljanja u EE objektima na sinkronizaciju vremena putem NTP protokola”, KONČAR KET, svibanj 2011., prilog 5.

[47] IEEE Working Group, “A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines”, IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS – 104, No. 4/1985

[48] ABB Application Guidelines, “Overvoltage protection-Metal oxide surge arresters in medium voltage systems” Wettingen, Switzerland, 6th ed., June 2018

[49] IEC 60099-5, “Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations”, 2013

[50] ABB Buyer's guide, “High voltage surge arresters”, October 2019

[51] Filipović-Grčić, B., Filipović-Grčić, D., Uglešić, I., Milardić, V., "Energetsko opterećenje metal-oksidnih odvodnika prenapona pri privremenim prenaponima", 10. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2011.

[52] Hinrichsen, V., Reinhard, M., Richter, B., "Energy Handling Capability of High-Voltage Surge Arresters Part 1: A Critical Review of the Standards", CIGRE International Technical Colloquium, Rio de Janeiro, Brazil, 2007

[53] IEC 60099-4, "Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems"

[54] IEC 60071-2, "Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines", March 2018

[55] Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Pavić, I., "Application of line surge arresters for voltage uprating and compacting of overhead transmission lines", Electric Power Systems Research, 140, 2016, str. 830–835.

[56] Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Milardić, V., Tokić, A., "Odabir nazivnog napona odvodnika prenapona za efikasnu zaštitu od prenapona", 12. savjetovanje HRO CIGRÉ Šibenik, 2015.

[57] Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Milardić, V., Xemard, A., Guerrier, A., "Energy Stress of Surge Arresters Due to Temporary Overvoltages", International Conference on Power Systems Transients, Delft, The Netherlands, 2011

[58] Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Xemard, A., "Selection of Station Surge Arresters for Control of Slow-Front Overvoltages on Compact Lines", CIGRE C4 International Colloquium on Lightning and Power Systems, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010

[59] Uglešić, I., Milardić, V., Filipović-Grčić, B., Tokić, A., "Evaluation of Energy Stress on Line Arresters" Colloquium Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems, Cavtat, Croatia, 2008

[60] Xemard, A., Michaud, J., Maciela, F., Lassaigne, T., Sauvegrain, F., Auriol, P., Roumy, J.G., Saad, O., Bui Van, Q., Dutil, A., "Reduction of the double-circuit flashovers on a 400 kV overhead line", Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems Colloquium, Cavtat, Croatia, 2008

[61] Williamson, J., "Lightning protection and surge arrester application on NB Power transmission lines", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, 2008

[62] Christodoulou, C.A., Gonos, I.F., Stathopulos, I.A., "Lightning performance of high voltage transmission lines protected by surge arresters: a simulation for the Hellenic

transmission network", 29th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2008, Uppsala, Sweden, 2008

[63] Kwak, J.S., Woo, J.W., Shim, E.B., Kim, H.J., "Application of arrester to double circuit transmission line to enhance lightning performance and introduction about the obtained lightning waveforms by monitering systems", 19th International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, USA, 2006

[64] Wahab, Y A., Abidin, Z.Z., Sadovic, S., "Line surge arrester application on the quadruple circuit transmission line", IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy, 2003

[65] Puharić, M., Lovrić, M., Radovanović, J., Ćosić, Ž., Sadović, S., "Line surge Arrester application Pilot Project", 27th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2004, Avignon, France, 2004

[66] Mesić, M., Radovanović, J., Škarica, D., Sadović, S., "The experience of operation of the overhead line 110 kV Ston-Komolac equipped with line surge arresters", CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012

[67] Radovanović, J., Škarica, D., "Iskustva s DV 110 kV Ston – Komolac nakon ugradnje linijskih odvodnika prenapona", 9. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2009.

[68] Piliškić, S., Uglešić, I., Jurišić, B., Bojić, S., "Tower grounding resistance influence on the overvoltage performance of the 110 kV overhead line equipped with line surge arresters", International Colloquium on Lightning and Power Systems, Delft, The Netherlands, 2011

[69] Puharić, M., Mesić, M., Piliškić, S., Mijoč, M., "The Overvoltage Protection of the 110 kV Overhead Lines of the Island of Brač by the Line Surge Arresters' Application", ICLPS, Lyon, France, 2014

[70] IEC/TR 60071-4, "Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks", 1st edition, 2004

[71] IEEE Std. 1243-1997, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", 1997

[72] J. Marti, "Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, 1982, str. 147-157

[73] Filipović-Grčić, D., Filipović-Grčić, B., Brezak, D., Uglešić, I., Tokić, A., "Leader Progression Model Application for Calculation of Lightning Critical Flashover

Voltage of Overhead Transmission Line Insulators", 31st International Conference on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.

[74] Hileman, A.R., "Insulation Coordination for Power Systems", Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.

[75] Filipović-Grčić, D., Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., "Lightning critical flashover voltage of high voltage insulators: laboratory measurements and calculations", International Review of Electrical Engineering, vol. 7, no. 2 - part B, 2012, str. 4321-4328

[76] Mahseredjian, J., "EMTP-RV: ZnO Data Function Device", EMTP-EMTP Works, 2019

[77] IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, 1992, str. 302–309

[78] Pinceti, P., Giannettoni, M., "A Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, 1999, str, 393–398

[79] Magro, M. C., Giannettoni, M., Pinceti, P., "Validation of ZnO Surge Arresters Model for Overvoltage Studies", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, 2004, str. 1692–1695

[80] Fernández, F., Díaz, R., "Metal-Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations", International Conference on Power System Transients, Rio de Janeiro, Brazil, 2001

[81] Mirošević,G., Vidaković, F., "Projektiranje, građenje i održavanje dalekovoda", KIGEN d.o.o., Zagreb, 2008.

[82] Majdandžić, F., "Uzemljivači i sustavi uzemljenja", GRAPHIS d.o.o., Zagreb, 2004.

[83] "Lightning Protection Guide", 2nd updated edition, DEHN, Neumarkt, September 2007

[84] Bojić, S., Božić D., Nemec, V., Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., "Eksperimentalno istraživanje impulsnih svojstva i prijelazne impedancije uzemljivača dalekovodnih stupova u uvjetima povišenog specifičnog otpora tla", Zagreb, prosinac 2018.

[85] Vasantrao, B.M., Bhaskarrao, P.J., Mukund, B.A., Baburao, G.R., Narayan, P.S., "Comparative study of Wenner and Schlumberger electrical resistivity method for groundwater investigation: a case study from Dhule district (M.S.), India", Applied Water Science, Volume 7, Issue 8, December 2017, pp. 4321–4340

[86] Piliškić, S., Mesić, M., Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., Franc, B., Ćurin, L., "Iskustva u primjeni odvodnika prenapona na 110 kV dalekovodima u Hrvatskoj prijenosnoj mreži", 13. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Rovinj, 2018.

[87] Musil, L., Švancar, M., Spurný, P., Ovesný, R., "Experiences gained during development of methodology for measuring ground resistance of high voltage transmission lines", International Colloquium on Lightning and Power Systems, ICLPS 2017, Ljubljana, Slovenia, 2017

[88] Chauvin Arnoux, Earth/Ground measurement guide, 2013 - Ed. 02

[89] Barić, T., Haznadar, Z., Berberović, S., "Utjecajne veličine na dinamički odziv vertikalnog cjevastog uzemljivača pri impulsnoj pobudi", Energija, vol. 57 (2008), No. 2, 2008., str. 226-245

[90] Cooray V., "Lightning Protection", The Institution of Engineering and Technology, 2010

[91] Popov, M., Grcev, L., Hoidalen, H.K., Gustavsen, B., Terzija, V., "Investigation of the Overvoltage and Fast Transient Phenomena on Transformer Terminals by Taking Into Account the Grounding Effects", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, Nov.-Dec. 2015, str. 5218-5227

[92] Legrand, X., Xémard, A., Nucci, C.A.,Auriol, P., "A method to interface Electromagnetic Models of Grounding Systems with Transients Programs", CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning", Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012

[93] Grcev, L., Popov, M.: "On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, April 2005, str. 1598-1603

[94] Gustavsen B., Semlyen A., "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3., 1999, str. 1052–1061

[95] Jurišić B., "Metode proračuna prenesenih prenapona visokih frekvencija energetskoga transformatora", doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Sveučilište Blaise Pascal, 2016.

[96] Grcev, L., "Computer analysis of transient voltages in large grounding systems", IEEE Trans. on Power Delivery 11, 1996, str. 815-823.

[97] "Zakon o tržištu električne energije", Narodne novine broj 22/2013, 102/2015, 68/2018, 52/2019

[98] Hebel, Z., Huml-Dimitrijević, M., Mileusnić, E., Kalea, M., Nikolovski, S., "Oblikovanje statistike pogonskih događaja u prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede", Energija 4, 1996, str. 173-186

[99] Uredba (EU) 2019/943 Europskog parlamenta i Vijeća od 5. lipnja 2019. o unutarnjem tržištu električne energije, OJ L 158, 14.6.2019, str. 54–124

[100] "Mrežna pravila prijenosnog sustava", Narodne novine broj 67/2017

[101] Visacro, S., Dias, R. N., De Mesquita, C. R., "Novel approach for determining spots of critical lightning performance along transmission lines", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

[102] Sadović, S., Sadović, T., Balota, A., Grebović, S., "Use of Line Surge Arresters in the Reduction of Double Circuit Line Outages", International Conference &Workshop REMOO "Technological, Modelling and Experimental Achievements in Energy Generation Systems", Budva, Montenegro, 2015

[103] Sadovic Consultant, France, "sigma slp: Software for the computation of the transmission and distribution lines lightning performance", www.sadovic.com, zadnji pristup veljača 2020.

Popis oznaka i kratica

Oznake:

a	empirijski utvrđena konstanta [3,3 ; 10,6] za izračun probojne udaljenosti
a	ekvivalentni promjer elektrode uzemljivača (poglavlje 6.3)
A, B, C i D	matrice koje opisuju frekvencijski odziv impedancije uzemljivača stupa (poglavlje 6.4)
a_g	godišnja stopa amortizacije opreme
a_{n,m_i}	polovi koji mogu biti ili realni ili kompleksno konjugirani parovi (poglavlje 6.4)
A_0, A_1	nelinearni otpori u modelu odvodnika prenapona (poglavlje 5.5)
$A2$	parametar modela impedancije za uzemljivač konfiguracije 4 x L (poglavlje 6.3)
b	empirijski utvrđena konstanta [0,5 ; 0,85] za izračun probojne udaljenosti
$B_x(t)$, $B_y(t)$	komponente magnetske indukcije
C	kapacitet u modelu odvodnika prenapona (poglavlje 5.5)
C	kapacitet u modelu impedancije uzemljivača stupa (poglavlje 6.3)
c	brzina širenja strujnog vala, odnosno brzina svjetlosti
c_m	jedinična cijena montaže
c_{n,m_i}	reziduumi koji mogu biti ili realni ili kompleksno konjugirani parovi (poglavlje 6.4)
c_{op}	jedinična cijena nabave odvodnika prenapona
D	konstanta u modelu preskoka
d	faktor distribucije struje na mjestu kvara
d	duljina preskočnog razmaka izolatorskog lanca u modelu preskoka
d	duljina odvodnika prenapona (poglavlje 5.5)
d	duljina elektrode uzemljivača (poglavlje 6.3)
DA	točnost lociranja atmosferskih pražnjenja
D_g	očekivana godišnja dobit

$d_{n,m}$	konstanta realne vrijednosti (poglavlje 6.4)
$(di/dt)_{max}$	maksimalna strmina struje
E	energetsko opterećenje odvodnika prenapona
E_r, E_s	napon izvora
E_x	napon na ulazu relejnog uređaja
E_0	kritična vrijednost električnog polja pri kojoj počinje pojava preskoka
E_0	jakost električnog polja potrebna za početak ionizacije tla
f	frekvencija
F_b	zadana prihvatljiva razina učestalost pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu
f_b	učestalost pojave povratnog preskoka na izolatorskom lancu uzrokovanog atmosferskim prenaponom
f_k	frekvencija (poglavlje 6.4)
H	visina stupa nadzemnog voda
h	visina faznog vodiča iznad tla
H_z	prosječna visina stupa
h_1	visina od baze do sredine u modelu stupa nadzemnog voda
h_2	visina od sredine do vrha u modelu stupa nadzemnog voda
h_z	prosječna visina zaštitnog vodiča iznad tla
I	struja atmosferskog pražnjenja, amplituda struje atmosferskog pražnjenja
I	jednostupčana matrica struja (poglavlje 6.4)
I_0, I_1	struje kroz nelinearne otpore u modelu odvodnika prenapona
I_f	struja kvara, amplituda struje atmosferskog pražnjenja
I_{freq}	indeks učestalosti protoka struje atmosferskog pražnjenja kroz stup nadzemnog voda
I_g	struja atmosferskog pražnjenja, granična amplituda struje pražnjenja potrebna za iniciranje ionizacije tla
I_{hc}	kratkotrajna udarna podnosiva struja odvodnika prenapona
i_j	izmjerena točka nelinearne karakteristike odvodnika prenapona

I_K	kritična struja
$I_m\,(f_k)$	struja na stezaljki uzemljivača *m* (poglavlje 6.4)
I_{max}	maksimalna amplituda struje
i_{max}	vršna vrijednost struje atmosferskog pražnjenja
I_n	nazivna struja odvodnika prenapona
I_n	element jednostupčane matrice struja (poglavlje 6.4)
I_{ref}	referentna struja odvodnika prenapona
I_s, I_r	struja izvora
I_{sev}	indeks ugroženosti stupa od pojave povratnog preskoka
I_{sw}	udarna podnosiva struja dugog trajanja
$i(t)$	vremenski promjenjiva struja
$i(u_j)$	izračunata točka nelinearne karakteristike odvodnika prenapona
I_x	struja na ulazu relejnog uređaja
I_{x0}	struja na ulazu releja prije nastanka kvara
K	faktor za izračun induktiviteta u IEEE modelu odvodnika prenapona
k	konstanta u modelu preskoka
k	konstanta uzemljivača
k, α	parametri za aproksimaciju *U-I* karakteristike odvodnika prenapona
K_c	koeficijent elektromagnetske sprege
k	udaljenost do mjesta kvara
k_{L}	konstanta predvodnika u modelu preskoka na izolatorskom lancu
K_{nv}	koeficijent nadmorske visine
K_p	koeficijent prenapona, omjer amplitude prenapona i fazne vrijednosti maksimalnog pogonskog napona
L	induktivitet u modelu impedancije uzemljivača stupa (poglavlje 6.3)
l	duljina nadzemnog voda
l	duljine predvodnika preskoka u modelu preskoka
L_0, L_1	induktiviteti u modelu odvodnika prenapona (poglavlje 5.5)
L_r	duljina raspona nadzemnog voda

L_{stat}	statistička greška lociranja atmosferskih pražnjenja
L_{sust}	sustavna greška određivanja lokacije atmosferskog pražnjenja u zemlju
L_{uk}	ukupna greška lociranja atmosferskih pražnjenja u zemlju
N	broj stezaljki uzemljivača (poglavlje 6.4)
N	broj nadzemnih vodova u točki priključka odvodnika prenapona
n	broj paralelnih grana blokova odvodnika prenapona
N_L	broj atmosferskih pražnjenja po kilometru nadzemnog voda
$N_{f/S}$	broj prolaska struje atmosferskog pražnjenja kroz pojedini stup
N_g	gustoća udara munja
N_{op}	broja odvodnika prenapona
Np	broj polova korišten pri aproksimaciji (poglavlje 6.4)
N_r	relativni indeks učestalosti pražnjenja za pojedini raspon, broj pražnjenja na rasponu nadzemnog voda
nv_s	prosječna nadmorska visina trase nadzemnog voda
$nv(S_i)$	nadmorska visina na kojoj je stup lociran
P	snaga električnih gubitaka odvodnika prenapona
p	provjes vodiča
p, q	parametri za aproksimaciju *U-I* karakteristike odvodnika prenapona
$P(I_f)$	vjerojatnost pojave amplitude struje atmosferskog pražnjenja
Q	preneseni naboj
Q	disipacija topline
Q_{rs}	podnosivi naboj provođenja odvodnika prenapona
R	otpor kvara
R	probojna udaljenost
R	ekvivalentni polumjer baze u modelu stupa nadzemnog voda
R	otpor u modelu impedancije uzemljivača stupa (poglavlje 6.3)
R, R_0	stacionarni otpor uzemljivača stupa, pri malim strujama i frekvenciji 50 Hz
R, R_0, R_1	otpori u modelu odvodnika prenapona (poglavlje 5.5)
R_{0l}	jedinični nulti radni otpor faznog vodiča

R_{dl}	jedinični direktni radni otpor faznog vodiča
R_i	nelinearni otpor uzemljivača stupa koji uzima u obzir ionizacijske efekte u tlu
R_u	otpor uzemljivača stupa
r_1	radijus vrha u modelu stupa nadzemnog voda
r_2	radijus na sredini u modelu stupa nadzemnog voda
r_3	radijus baze u modelu stupa nadzemnog voda
S	strmina valnog oblika struje atmosferskog pražnjenja
s	dvostruka dubina na kojoj je položen uzemljivač stupa (poglavlje 6.3)
s	Laplaceova varijabla (poglavlje 6.4)
S_i	oznaka za stup nadzemnog voda
S_m	maksimalna strmina čela valnog oblika struje atmosferskog pražnjenja
S_{max}	maksimalna strmina valnog oblika struje atmosferskog pražnjenja
S_{30}	strmina čela valnog oblika struje atmosferskog pražnjenja
T	temperatura
t	vrijeme
$T_č$	vrijeme trajanja čela
T_d	keraunička razina, broj grmljavinskih dana u godini
T_f	vrijeme trajanja čela prenapona vrlo brzog porasta čela
t_f	vrijeme trajanja čela vala struje atmosferskog pražnjenja
t_h	vrijeme trajanja polovice hrpta vala struje atmosferskog pražnjenja
T_i	vrijeme trajanja čela prenapona brzog porasta čela
T_l	ekvivalentno trajanje struje atmosferskog pražnjenja
$T_{ne/g}$	prosječni godišnji trošak neisporučene električne energije zbog prekida u napajanju izazvanih utjecajima atmosferskih pražnjenja
$T_{odr/g}$	prosječni godišnji trošak održavanja radi otklanjanja kvarova uzrokovanih atmosferskim prenaponom
T_p	vrijeme trajanja čela prenapona polaganog porasta čela
T_{pr}	trošak pripreme projekta
t_v	vrijeme širenja putnog vala
T_0	vrijeme od kojeg je napon na iskrištu postao veći od minimalnog napona

	preskoka
T_2	vrijeme trajanja hrpta prenapona
t_{30}	vrijeme potrebno za postizanje 30% vršne vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja
t_{90}	vrijeme potrebno za postizanje 90% vršne vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja
U_{MAX}	amplituda prenapona
$U_{c\ iz\ ref}$	referentna vrijednost amplitude prenapona na izolatorskom lancu
$U_{c\ iz(S_i)}$	vršna vrijednost prenapona na izolatorskom lancu
$U_{c\ vrh\ ref}$	referentna vrijednost amplitude prenapona na vrhu stupa
$U_{c\ vrh}$	vršna vrijednost prenapona na vrhu stupa
U_c	trajni radni napon odvodnika prenapona
U_{iz}	amplituda prenapona na izolatorskom lancu
U_m	nazivni napon mreže
U_{max}	maksimalna amplituda napona
$U_n\ (f_k)$	napon na stezaljki uzemljivača *n* (poglavlje 6.4)
U_n	jednostupčana matrica napona (poglavlje 6.4)
U_{pl}	amplituda preostalog napona pri nazivnoj struji odvodnika prenapona
U_{pr}	negativni preskočni napon izolatorskog lanca
U_{ps}	preostali napon odvodnika prenapona s obzirom na sklopne prenapone
U_r	nazivni napon odvodnika prenapona
U_{ref}	referentni napon odvodnika prenapona
U_{ref}	proizvoljno izabrani referentni napon pri aproksimaciji *U-I* karakteristike odvodnika prenapona
$\Delta U_{res\%}$	povećanje preostalog napona na odvodniku prenapona
$U_{r_{1/T_2}}$	preostali napon za strujni val 10 kA velike strmine, $T_f = 1$ µs, $2 \leq T_2 \leq 20$ µs
$U_{r_{8/20}}$	preostali napon za strujni val 10 kA, 8/20 µs
U	efektivna vrijednost pogonskog napona (linijski napon)

U_s	amplituda sklopnog prenapona
$u(t)$	prijelazni napon
$u(t)$	napon na iskrištu izolatorskog lanca u modelu preskoka
U_{vrh}	prenapon na vrhu stupa
$u_{10,8/20}$	napon odvodnika izmjeren ispitivanjem strujnim valom amplitude 10 kA, oblika 8/20 μs
v	brzina širenja putnog vala
$V(t)$	napon na iskrištu izolatorskog lanca
$v(t)$	brzina predvodnika u modelu preskoka
$VOLL$	vrijednost neisporučene energije
V_0	konstanta koja predstavlja minimalnu vrijednost napona pri kojem proces pojave preskoka započinje ili se nastavlja
$V_{50\%}$	kritični preskočni napon izolatorskog lanca
W	energija odvodnika prenapona
w	prosječni razmak između zaštitnih vodiča
w	specifično energetsko opterećenje odvodnika prenapona
W_n	neisporučena električna energija
W/R	specifična energija
W_{th}	termička energetska sposobnost odvodnika prenapona
X	vektor stanja (poglavlje 6.4)
x	udaljenost nepremoštenog razmaka između iskrišta izolatorskog lanca u modelu preskoka
X_{0l}	jedinična nulta reaktancija faznog vodiča
X_{dl}	jedinična direktna reaktancija faznog vodiča
$Y_{n,m}(s)$	element frekvencijski ovisne matrice admitancije (poglavlje 6.4)
Z, Z_T	valna impedancija stupa nadzemnog voda
Z_g	valna impedancija uzemljivača stupa nadzemnog voda
Z_{imp}	impulsna (udarna) impedancija uzemljivača stupa
$Z_{m,n}$	element matrice impedancije uzemljivača stupa (poglavlje 6.4)

$Z_{m,n}\ (f_k)$	frekvencijski ovisna impedancija uzemljivača stupa (poglavlje 6.4)
Z_r, Z_s	impedancija izvora
Z_t	impedancija nadzemnog voda
$z(t)$	prijelazna impedancija uzemljivača
Z_v	valna impedancija nadzemnog voda
α, β	koeficijenti za izračun strmine struje atmosferskog pražnjenja
γ	konstanta, odnos struja kroz nelinearne otpore u modelu odvodnika prenapona
δ_r, δ_s	fazni kut napona izvora
ε	zadana točnost aproksimacije modela eksponencijalno segmenta *U-I* karakteristike odvodnika prenapona
$\varepsilon(f)$	frekvencijski ovisna permitivnost zemlje
θ_s	kut štićenja stupa
ρ	specifični otpor tla
$\rho(f)$	frekvencijski ovisan specifični otpor zemlje
ρ_0	specifični otpor tla pri niskoj frekvenciji 50 Hz
τ	vrijeme prolaska vala kroz stup

Kratice:

2D	dvodimenzionalan
3D	trodimenzionalan
CG	pražnjenja u zemlju (*engl. cloud to ground*)
CIGRÉ	Međunarodno vijeće za velike elektroenergetske sustave (*fra. Conseil International des Grands Reseaux Electriques*)
DA	točnost lociranja atmosferskih pražnjenja (*engl. Detection Accuracy*)
DH	oznaka za distribucijski odvodnik prenapona visoke energetske sposobnosti
DL	oznaka za distribucijski odvodnik prenapona niske energetske sposobnosti
DM	oznaka za distribucijski odvodnik prenapona srednje energetske sposobnosti
DV	dalekovod
EENS	neisporučena električna energija (*engl. Expected Energy Not Supplied*)
EGLA	odvodnik prenapona s vanjskim iskrištem (*engl. externally gapped line arrester*)
EMTP	program za simulaciju elektromagnetskih prijelaznih pojava (*engl. Electromagnetic Transients Program*)
EPM	*engl. Eigenvalue Perturbation Method*
FMF	faktor višestrukosti udara munja (engl. *flash multiplicity factor*)
FRP	*engl. Fast Residue Perturbation*
GIS	geografski informacijski sustav (*engl. geographic information system*)
GPS	sustav mjerenja vremena (*engl. Global Positioning System*)
IC	pražnjenja između oblaka (*engl. intra cloud*)
IEC	međunarodno elektrotehničko povjerenstvo (*engl. International Electrotechnical Commission*)
IEEE	Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (*engl. The Institute of Electrical and Electronics Engineers*)
LF	niska frekvencija (*engl. Low Frequency*)
LINET	sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja (*engl. Lightning Detection Network*)
LSA	odvodnik prenapona na nadzemnom vodu (*engl. Line Surge Arrester*)
MCOV	maksimalni trajni radni napon (*engl. Maximum continuous operating voltage*)

MO	metal oksid
NEGLA	odvodnik prenapona bez iskrišta (*engl. gapless line arrester*)
OO	atmosfersko pražnjenje između oblaka
OZ	atmosfersko pražnjenje između oblaka i zemlje
SCADA	sustav za nadzor, mjerenje i upravljanje elektroenergetskim sustavom (*engl. supervisory control and data acquisition*)
SH	oznaka za prijenosni odvodnik prenapona visoke energetske sposobnosti
SL	oznaka za prijenosni odvodnik prenapona niske energetske sposobnosti
SLAP	sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja
SM	oznaka za prijenosni odvodnik prenapona srednje energetske sposobnosti
TOA	metoda vremena pristizanja (*engl. Time of Arrival*)
TOV	privremeni prenapon (*engl. Temporary overvoltage*)
VF	*engl Vector Fitting algoritam*
VFT	vrlo brzi prijelazni prenaponi (*engl. very fast transients*)
VLF	vrlo niska frekvencija (*engl. Very Low Frequency*)
VoLL	vrijednost neisporučene energije (*engl. Value of Lost Load*)

Životopis

Silvia Piliškić je rođena 28.08.1977. u Splitu. Osnovnu školu je završila u Supetru na otoku Braču. U Splitu je od 1991.-1995. godine pohađala 1. gimnaziju. Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu upisala je 1995. godine. Diplomski rad na temu "Nastanak i posljedice udara groma na elektroenergetske objekte" obranila je u lipnju 2000. godine, a magistarski rad na temu „Primjena sustava za lociranje munja LINET u prijenosnoj mreži Hrvatske" u prosincu 2011. godine.

U HEP - Operatoru distribucijskog sustava radila je tijekom 2001. godine na poslovima izdavanja uvjeta za priključak potrošača, nakon čega se zapošljava u Hrvatskom operatoru prijenosnog sustava. Nakon stečenog iskustva na poslovima održavanja i dijagnostike visokonaponske opreme u transformatorskim stanicama, analize rada elektroenergetskog sustava, potpore tržištu električnom energijom, pripreme planova razvoja prijenosne mreže te međunarodne suradnje, danas je savjetnica u Uredu Uprave u Hrvatskom operatoru prijenosnog sustava.

Sudjelovala je u aktivnostima više radnih grupa europskog udruženja operatora prijenosnog sustava ENTSO-E te različitim međunarodnim projektima i inicijativama.

Članica je Studijskog odbora za Tržište električne energije i regulaciju (SO C5) hrvatskog ogranka Međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave, HRO CIGRÉ.

Od 2001. godine objavljuje radove u zbornicima domaćih i međunarodnih stručnih i znanstvenih skupova.

Popis objavljenih radova

- **Znanstveni rad objavljen u časopisu:**

  Piliškić, S., Uglešić, I., Jurišić, B., "Evaluating the overvoltage performance of an overhead line taking into account the frequency-dependence of its tower's grounding electrodes with high soil resistivity", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 116, March 2020

- **Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:**
  - ***iz područja doktorskog istraživanja:***

1. Uglešić, I., Milardić, V., Franc, B., Betz, H.D., Piliškić, S., Nuhanović, R., Tokić, A., "Correlation between Lightning Impacts and Outages of Transmission Lines", CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012
2. Uglešić, I., Milardić, V., Franc, B., Piliškić, S., "Study of Time Correlation Between Lightning Data Recorded by LLS and Relay Protection", International Conference on Lightning Protection, ICLP2012 – Vienna, Austria, 2012
3. Puharić, M., Mesić, M., Piliškić, S., Mijoč, M., "The Overvoltage Protection of the 110 kV Overhead Lines of the Island of Brač by the Line Surge Arresters' Application", CIGRE C4 Colloquium on Lightning and Power Systems, Lyon, France, 2014
4. Mesić, M., Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., Piliškić, S., Mijoč, M., Franc, B., "Overvoltage Protection Performance of the 110 kV Overhead Lines after the Line Surge Arresters Implementation", International Conference on Power Systems Transients, Cavtat, Croatia, 2015
5. Mesić, M., Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., Piliškić, S., Franc, B., "Performance of the Line Surge Arresters of the 110 kV Overhead Lines on the island Brač", International Colloquium on Lightning and Power Systems, Bologna, Italy, 2016
6. Mesić, M., Uglešić, I., Piliškić, S., Franc, B., Ćurin, L., "Application and Performance of the Line Surge Arresters of the 110 kV Overhead Lines of the Croatian Transmission System", International Colloquium on Lightning and Power Systems, Ljubljana, Slovenia, 2017
7. Levačić, G., Mesić, M., Piliškić, S., Ćurin, L., Škarica, D., "Application of Line Surge Arresters on Transmission Lines in Croatian Power System", International Conference on Power Systems Transients, Perpignan, France, 2019

8. Piliškić, S., Uglešić, I., Jurišić, B., Bojić, S., "Tower Grounding Resistance Influence on the Overvoltage Performance of the Overhead Line Equipped with Line Surge Arresters", International Colloquium on Lightning and Power Systems, Delft, Netherlands, 2019

- ***ostali radovi:***

Mesić, M., Plavšić, T., Piliškić, S., "Regional Balancing Energy and Control Reserves Exchange Perspectives in South East Europe", First South East European Regional CIGRÉ Conference, Portorož, Slovenia, 2016

- **Ostali radovi u časopisima ili zbornicima skupova s recenzijom:**
  - ***iz područja doktorskog istraživanja:***

1. Piliškić, S., Franc, B., "Analiza utjecaja atmosferskih pražnjenja na ispade prijenosnih vodova usporedbom podataka sustava za lociranje munja i podataka relejne zaštite", HRO CIGRÉ, 10. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Opatija, 11. – 11. studenoga 2012.
2. Franc, B., Uglešić, I., Šturlan, M., Piliškić, S., Mesić, K., "Analiza isklopa prekidača uzrokovanih udarima munja u prijenosnoj mreži u 2014. godini", 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 8. – 11. studenoga 2015.
3. Franc, B., Uglešić, I., Piliškić, S., "Lightning data utilization in power system control", Journal of Energy (Energija), vol. 64 (2015) Special Issue, p. 62-77
4. Piliškić, S., Mesić, M., Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., Franc, B., Ćurin, L., "Iskustva u primjeni odvodnika prenapona na 110 kV dalekovodima u hrvatskoj prijenosnoj mreži", HRO CIGRÉ, 13. simpozij o sustavu vođenja EES-a ,Rovinj, 5. – 7. studenoga 2018.
5. Piliškić, S., Škarica, D., Levačić, G., Ćurin, L., "Iskustva u primjeni odvodnika prenapona na dalekovodima u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži RH", 14. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 10. − 13. studenoga 2019.

  - ***ostali radovi:***

1. Milardić, V., Uglešić, I., Piliškić, S., "Gromobranska zaštita VN rasklopnih postrojenja", 5. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 4 - 8. studenoga 2001.
2. Schönberger, M., Jaman, N., Piliškić, S., "Iskustva u radu sustava za motrenje energetskih transformatora i prigušnice u TS 400/110 kV Ernestinovo i TS 400/220/110 kV Žerjavinec", 7. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 6. – 10. studenoga 2005.
3. Brkić, S., Piliškić, S., Međimorec, D., Salobir, U., Kramar, D., "Pilot-projekt tržišta energijom uravnoteženja u jugoistočnoj Europi", 8. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 4. – 8. studenoga 2007.

4. Cerovečki, T., Piliškić, S., “Mehanizmi uravnoteženja – trenutno stanje i mogućnosti unapređenja”, HRO CIGRÉ, 8. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Cavtat, 9. – 12. studenoga 2008.
5. Cazin, S., Međimorec, D., Piliškić, S., “Zaštita prirode pri korištenju dalekovoda 2 x 400 kV Ernestinovo - Pécs”, HRO CIGRÉ, 9. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 6. – 10. studenoga 2011.
6. Međimorec, D., Piliškić, S., Brkić, S., “Razvidnost podataka kao dodatni prioritetni zahtjev za informacijske i komunikacijske sustave operatora prijenosnog sustava”, HRO CIGRÉ, 9. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 6. – 10. studenoga 2011.
7. Jakić, I., Piliškić, S., “Trendovi u planiranju novih nuklearnih elektrana s obzirom na socioekonomske uvjete u EU”, HRO CIGRÉ, 10. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Opatija, 11. – 11. studenoga 2012.
8. Piplica, S., Plečko, M., Piliškić, S., “Verifikacijski postupci za pružatelje pomoćnih usluga na području srednje Europe”, HRO CIGRÉ, 11. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Opatija, 10. – 12. studenoga 2014.
9. Piliškić, S., Piplica, S., Ubrekić, I., Međimorec, D:, “Usklađena pravila za dugoročnu dodjelu prekozonskih prijenosnih kapaciteta”, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 8. – 11. studenoga 2015.
10. Piplica, P., Plavšić, T., Međimorec, D., Piliškić, S., Mravak Knezić, K., Ubrekić, I., Kirigjija, S., Sagrestano, P., “Rana implementacija (Uredbe o uspostavljanju) smjernica za dodjelu kapaciteta i upravljanje zagušenjima”, HRO CIGRÉ, 12. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Split, 14. – 16. studenoga 2016.
11. Piliškić, S., Martinčić, D., Međimorec, D., Mijušković, A., “Primjena usklađenih pravila za dodjelu na granicama u jugoistočnoj Europi”, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 5. – 8. studenoga 2017.
12. Vrbičić Tenđera, D., Tenđera, T., Piliškić, S., “Mehanizmi održavanja ravnoteže pri vođenju EES-a”, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 5. – 8. studenoga 2017.
13. Horvat Sedlić, A., Piliškić, S., Tadin, T., “Razvoj jedinstvenog EU tržišta pomoćnih usluga sustava sa stajališta nacionalnog operatora prijenosnog sustava”, HRO CIGRÉ, 13. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Rovinj, 5. – 7. studenoga 2018.
14. Mihaldinec, A., Aralica, I., Međimorec, D., Piliškić, S., “Utjecaj novog zakonodavno regulatornog okvira Europske unije na operatore prijenosnih sustava”, 14. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 10. − 13. studenoga 2019.

Curriculum Vitae

Silvia Piliškić was born on 28th August 1977 in Split. She finished elementary school in Supetar at the island of Brač. From 1991-1995 she attended 1st Grammar School in Split. She enrolled to Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb in 1995. She completed the thesis "Occurrence and Consequences of Lightning Strike to Electricity Objects" in June 2000 and the master thesis "LINET Lightning Location System application in Croatian transmission network" in December 2011.

She started to work in the company HEP-Distribution System Operator in 2001, with issuing conditions for the consumers' connection to the distribution grid, after which she started to work at the Croatian Transmission System Operator. After she has gained experience in high voltage substations' equipment maintenance and diagnostics, analysis of power system operation, electricity market support, transmission network development plans drafting and international cooperation, she is now working as an advisor in the Executive Office of the Croatian Transmission System Operator.

She has been participating in the working groups of the European Network of Transmission System Operators (ENTSO-E) and within different international projects and initiatives.

She is a member of the Study Committee Electricity Markets and Regulation of the Croatian National Committee of the International Council on Large Electric Systems, HRO CIGRÉ.

From 2001 she has been issuing papers at national and international expert and scientific conferences.