

Zvonko Kovačić, ing.el.
HEP – ODS d.o.o., Elektrodalmacija Split
zvonko.kovacic@hep.hr

Tvrtko Jelavić, dipl.ing.el.
HEP – ODS d.o.o., Elektrodalmacija Split
tvrtko.jelavic@hep.hr

Doc.dr.sc. Tonko Garma, dipl.ing.el.
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split
garma@fesb.hr

Toni Rogošić, mag.ing.el.
HEP – ODS d.o.o., Elektrodalmacija Split
toni.rogosic@hep.hr

ELIMINACIJA ATMOSFERSKIH PRENAPONA U NISKONAPONSKOJ MREŽI S UZEMLJENIM NEUTRALNIM VODIČEM

SAŽETAK

U ovom referatu opisani su problemi odvođenja prenapona u niskonaponskim distribucijskim mrežama na terenima s visokim specifičnim otporom tla. Detaljno je opisan jedan primjer iz prakse koji se odnosi na odašiljač Vrgorac Gomila smješten na brdu Ilića Glavica. Odašiljač je s distribucijskom mrežom povezan zračnim niskonaponskim samonosivim kabelskim snopom (SKS) iz TS 10/0,4 kV Podprolog 1. Budući da se radi o terenu s visokim specifičnim otporom tla, a time i nezadovoljavajućim uzemljivačem odašiljača, svi prenaponi koji su se javljali na području odašiljača preko neutralnog vodiča SKS-a prenosili su se u TS i pripadajuću niskonaponsku mrežu. U ovom slučaju se koristio inovativan pristup tako da se na sredini predmetnog SKS-a izvršilo podzemno kabliranje duljine 100 metara. Kao neutralni vodič podzemnog dijela voda korišten je isključivo uzemljivač od bakrenog vodiča 2x50 mm² u svrhu odvođenja prenapona u zemlju.

Ključne riječi: Atmosferski prenapon, odvodnik prenapona, uzemljenja, neutralni vodič, terenska mjerenja

SUPPRESSION OF THE ATMOSPHERIC OVER-VOLTAGES IN GROUNDING NEUTRAL CONDUCTOR LOW VOLTAGE GRIDS

SUMMARY

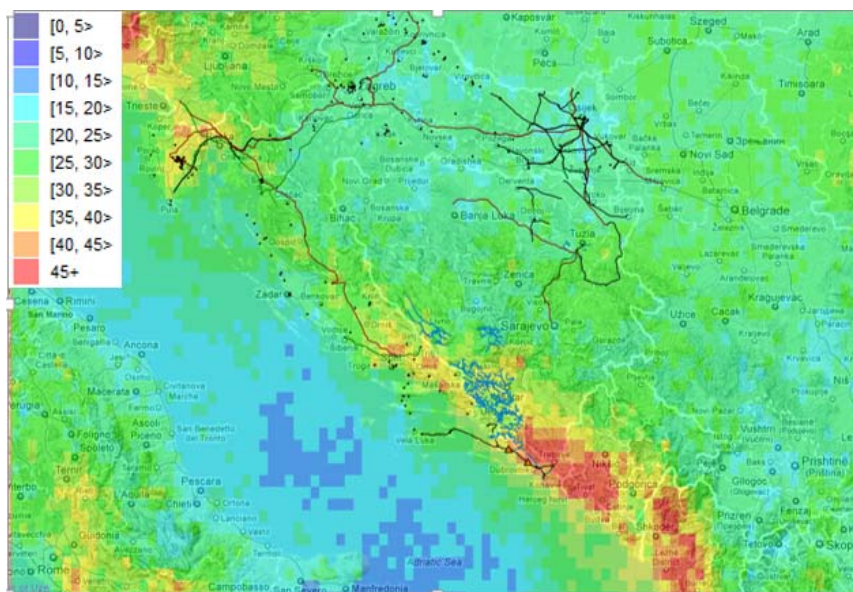
This paper reports the issues related to over-voltages in low-voltage (LV) distribution networks characterized by high specific soil resistance. Detailed description of real case observed on Transmitter Glavica –Vrgorac, located at Ilića Glavica hill is reported. Transmitter is supplied from distribution grid via cable from TS 10/0,4 kV Podprolog 1. Since specific soil resistance and corresponding transmitter grounding resistance are quite high, over-voltages were flowing towards substation grounding system via cable neutral conductor, instead through transmitter grounding system. In this case, authors applied innovative approach. Approximately in the middle of existing over-head LV cable, 100 m long part of over-head cable was replaced by buried cable. Instead of neutral conductor from the cable itself, 2 non-insulated Cu wires (2x50 mm²) were applied.

Key words: Atmospheric over-voltage, surge arrester, grounding systems, neutral conductor, field measurements

1. UVOD

U ovom poglavlju opisat ćemo osnovne pojmove korištene u tekstu. Munja se najčešće definira kao golom oku vidljivo pražnjenje atmosferskog elektriciteta. Do spomenutog pražnjenja dolazi ukoliko dio atmosfere postane električki nabijen ili ako se pojavi razlika potencijala većeg iznosa od probojnog napona zraka. Vrlo čest izvor udara munje su specifični oblaci, tzv. kumulonimbusi. Razlikujemo munje u samom oblaku, između oblaka, između oblaka i zraka te između oblaka i tla. Iako su pojmovi munja i grom povezani, nije riječ o istoj pojavi, budući da se termin grom odnosi na akustički efekt koji nastaje prolaskom munje kroz zrak.

Pod brojem grmljavinskih dana podrazumijevamo srednji godišnji broj dana s grmljavinom i/ili grmljenjem. Istraživanje broja grmljavinskih dana u Hrvatskoj kroz višegodišnji period provodio je DHMZ te u posljednje vrijeme i FER o čemu se više može pročitati u [1], [2]. Broj grmljavinskih dana za period 2009. do 2011. preuzet je iz [2] i prikazan na slici 1.



Slika 1. Broj grmljavinskih dana u R. Hrvatskoj za period 2009.-2011[2].

Uzemljenje ćemo definirati kao vodljivi spoj neke točke u mreži ili postrojenju sa zemljom. Spoj sa zemljom ostvaruje se elementom kojeg zovemo uzemljivač. Prolazak struje kroz uzemljivač u zemlju dovodi do pojave napona na površini zemlje, odnosno, između pojedinih točaka na površini zemlje može doći do razlike potencijala. Ova pojava je izrazito nepoželjna u kontekstu sigurnosti ljudi ili životinja koje svojim tijelima, npr. tijekom koraćanja, mogu premostiti dvije takve točke između kojih postoji razlika potencijala. Zamišljene linije koje povezuju sve točke istog potencijala nazvat ćemo ekvipotencijalnim linijama. Oblik i međusobna udaljenost ekvipotencijalnih linija ovisi o geometriji uzemljivača, iznosu struje kroz uzemljivač i specifičnom otporu tla. Prema teoriji [3], silnice električnog polja okomite su na plohe istog potencijala. Za kružnu ili polukuglastu geometriju uzemljivača, ekvipotencijalne linije su kružnice. Međutim, ako uzemljivački sustav uključuje radijalno uzemljenje ili kabele s uzemljivačkim učinkom (plašt), ekvipotencijalne linije mogu biti nepravilne. Ovisno o osnovnoj namjeni uzemljivača razlikovat ćemo pogonsko, zaštitno, gromobransko i združeno uzemljenje. Budući da se ovaj rad bavi problematikom gromobranskog uzemljenja, ograničit ćemo se samo na ovaj tip uzemljenja. Prema DIN VDE terminologiji, gromobransko uzemljenje tj. uzemljenje za zaštitu od munje jest uzemljenje koje odvodi struju munje u zemlju. Zbog specifičnosti valnog oblika i iznosa struje munje, zahtjevi za uzemljenje za zaštitu od munje razlikuju se od zahtjeva za pogonsko i zaštitno uzemljenje. [4]

Iako je zemlja u usporedbi s metalima više redova veličine lošiji vodič, ima smisla uvesti pojam specifičnog otpora tla, analogno ekvivalentnoj veličini za metalne vodiče. Specifični otpor neke vrste tla definira se kao otpor između dviju stranica kocke brida 1m napravljene od te vrste tla. Ova veličina može varirati od nekoliko desetaka do nekoliko tisuća Ωm , što ponajviše ovisi o vrsti, strukturi i slojevitosti tla. Prilikom prelaska iz uzemljivača u samu zemlju, struja nailazi na sve veći presjek tla, a time i na sve manji otpor. Zbog toga je pad napona u neposrednoj blizini uzemljivača osobito bitan u smislu sigurnosti, što je posebno izraženo za tla većeg specifičnog otpora.

Zbog spomenutih razloga, u praksi se prije projektiranja uzemljivača često provodi mjerenje specifičnog otpora tla. Nakon što se uzemljivač izvede prema projektu, pristupa se mjerenju otpora rasprostiranja uzemljivača koji mora biti manji od propisima definiranih granica [4].

2. PROBLEMI KOD ODAŠILJAČA GOMILA I NAPOJNE TS 10/0,4 kV PODPROLOG 1, METODOLOGIJA MJERENJA I OBRADE

Odašiljač Gomila napaja se iz TS 10/0,4 kV Podprolog 1 zračnim kabliskim vodom SKS (3x35+70) mm², dužine 1145 metara. Kako se radi o TN-C-S sustavu napajanja, neutralni vodič uzemljen je unutar TS 10/0,4 kV Podprolog 1 preko združenog uzemljivača, na prvom stupu kod TS, na sredini voda i kod odašiljača Gomila. Uzemljivači su izvedeni od pocinčane željezne (FeZn) trake 25x4 mm. Uzemljivač odašiljača izveden je sa tri potencijalna prstena i šest radijalnih krakova, na sredini voda i prvom stupu kod TS trakastim uzemljivačem, a kod TS sa dva prstena i četiri radijalna kraka.



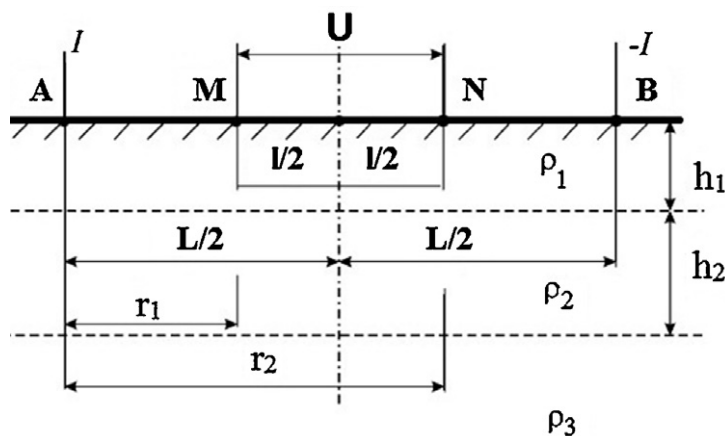
Slika 2. Zemljopisni prikaz napajanja odašiljača Gomila

Kao i obično, ovdje se radi o paralelno spojenim uzemljivačima. Atmosferska pražnjenja koja su se događala, u prosjeku desetak puta godišnje, na odašiljaču Gomila preko neutralnog vodiča prenosila su se na TS 10/0,4 kV Podprolog 1, a odatle po objektima potrošača. Gore spomenuta pražnjenja uzrokovala su višestruke materijalne štete, kako na elementima mreže u samoj trafostanici (osigurači i brojlara), tako i na različitim uređajima potrošačke elektronike kod krajnjih kupaca (TV uređaji i sl.). Valja napomenuti da nikada nije došlo do izgaranja odvodnika prenapona, iako su isti ugrađeni na početku, sredini i kraju niskonaponskog voda.

3. METODOLOGIJA MJERENJA I OBRADA REZULTATA SPECIFIČNOG OTPORA TLA I OTPORA UZEMLJENJA

Poglavlje 3 donosi kratki opis primijenjenih tehnika mjerenja i obrade rezultata. Zbog već spomenute pretpostavke o značajnim razlikama u iznosu specifičnog otpora tla, a koju su u ograničenom opsegu potvrđivala i ranije provedena parcijalna mjerenja, pristupilo se sustavnom vertikalnom geoelektričnom sondiranju tla. Ovaj pristup temelji se na pretpostavki da se tlo može podijeliti na slojeve poznate debljine i specifičnog otpora, s tim da se slojevi međusobno razlikuju, ali je tlo unutar pojedinog sloja homogeno. Sondiranje je provedeno s ciljem utvrđivanja specifičnog otpora tla u horizontalno homogenom modelu, i to na lokaciji samog odašiljača, na lokaciji stupa gdje se nadzemni kabel prebacuje u podzemni, kao i na lokaciji TS 10/0,4 kV Podprolog 1. Mjerenje je vršeno prema tzv.

Schlumbergerovoj metodi [5]. U nastavku poglavlja ukratko je opisana metodologija mjerenja, a detalji se mogu naći u literaturi [6]. Mjerenje se provodi pomoću 4 sonde/elektrode, i to na način da se struja relativno male frekvencije injektira kroz vanjske elektrode (A i B), a na unutarnjim elektrodama (M i N) mjeri se pad napona (vidi sliku 3).



Slika 3. Geoelektrično sondiranje tla prema Schlumbergerovoj metodi

Teorijska krivulja otpornosti tla za višeslojni model dana je sa:

$$\rho_T = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \rho_1 \int_0^\infty k(\lambda, \bar{x}) [J_0(\lambda r_1) - J_0(\lambda r_2)] d\lambda \quad (1)$$

gdje je:

ρ_T – teorijska krivulja specifičnog otpora višeslojnog modela tla, u Ωm

r_1 – specifični otpor prvog sloja tla, u Ωm

r_1, r_2, λ – parametri Besselove funkcije (vidi sl. 3)

J_0 – Besselova funkcija nultog reda

\bar{x} – parameter pomoćne funkcije

Detaljniji komentari i pojašnjenja za jednadžbu (1) mogu se naći u [5] i [6].

S druge strane, mjerena vrijednost specifičnog otpora tla prema Schlumbergerovoj metodi dobiva se iz relacije (2):

$$\bar{\rho} = \frac{\pi R}{l} \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 - \left(\frac{l}{2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

gdje je:

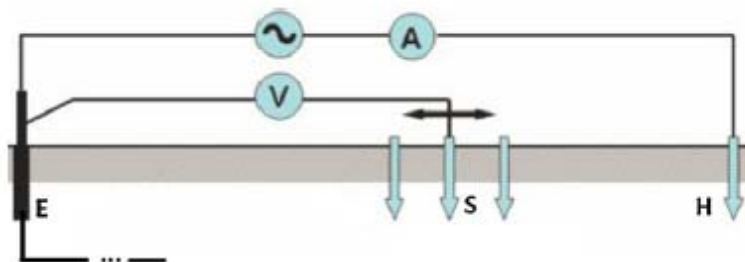
$\bar{\rho}$ – specifični otpor tla dobiven mjerenjima u Schlumbergerovoj geometriji sonde, u Ωm

R – otpor tla dobiven mjerenjima u Schlumbergerovoj geometriji sonde, u Ω

L – udaljenost strujnih sonde u Schlumbergerovoj geometriji, u m (vidi sl. 3)

l – udaljenost naponskih sonde u Schlumbergerovoj geometriji, u m (vidi sl. 3)

Interpretacija rezultata i formiranje vertikalnih slojeva tla temelji se na varijanti Newtonovog algoritma za minimalni broj slojeva, odnosno Tikhonovom algoritmu. Primjenom gore opisanog, dobivaju se rezultati za specifični otpor tla kako je navedeno u tablici I. Otpor uzemljenja mjereno je uobičajenom 3p-metodom, prikazanom na slici 4 [7].



Slika 4. Shematski prikaz 3p-metode mjerenja otpora uzemljenja

I u ovom slučaju samo ćemo ukratko navesti najvažnije postavke 3p-metode mjerenja otpora uzemljenja. Ispitna struja iznosa pravokutnog valnog oblika amplitude 11.1 mA i frekvencije 127 Hz injektira se kroz pomoćnu strujnu sondu H, zemlju i ispitivani uzemljivač. Pad napona mjeri se između ispitivanog uzemljivača i pomoćne naponske sonde S. Otpor se dobiva iz omjera napona i struje pri čemu se uzima da je frekvencija dovoljno mala da smijemo govoriti o otporu, umjesto o impedanciji. Da bi se osiguralo da pomoćna naponska sonda S nije u potencijalnom lijevku uzemljivača E, ista se pomiče 2-3 metra naprijed-natrag u odnosu na E i mjerenja se ponavljaju. U slučaju približno istog rezultata, lijevak je izbjegnut.

Tablica I. Rezultati geoelektričnog sondiranja tla (specifični otpor tla)

| Mjesto mjerenja | Redni broj sloja | Debljina sloja h/m | Specifični otpor sloja $\rho_1/\omega\text{m}$ |
|---|------------------|--------------------|--|
| Odašiljač | 1 | 0,4 | 1018 |
| | 2 | 21,3 | 13746 |
| | 3 | ostatak | 30127 |
| Mjesto prijelaza nadzemnog u podzemni kabel | 1 | 1 | 787 |
| | 2 | 0,9 | 10932 |
| | 3 | ostatak | 953 |
| TS Podprolog 1 10/0.4 kV | 1 | 1,6 | 298 |
| | 2 | 1,4 | 1406 |
| | 3 | ostatak | 417 |

Tablica II. Rezultati mjerenja otpora uzemljenja

| | Kod TS 10/0.4 kV Podprolog 1 | Na sredini voda; na prijelazu zračnog u kabelski vod | Na odašiljaču Gomila |
|---|------------------------------|--|----------------------|
| Otpor rasprostiranja (združeni)/ ω | 0,87 | 1,54 | 2,09 |
| Otpor uzemljenja (pojedinačni)/ ω | 0,91 | 5,29 | 9,62 |

Iz rezultata mjerenja specifičnog otpora tla na odašiljaču, sredini niskonaponskog voda (mjestu prelaska nadzemnog voda u podzemni) i kod TS vidljivo je da se radi o značajnim razlikama. Budući da je specifični otpor tla u okolini TS nekoliko puta manji od specifičnog otpora tla na mjestu ugradnje odašiljača, neutralni vodič niskonaponskog voda ponašao se kao gromobranski vodič preko kojega su se atmosferska pražnjenja sa odašiljača Gomila prenosila na TS 10/0,4 kV Podprolog 1, a odatle po objektima potrošača. Klasično, paralelno spojeni uzemljivači, ponašali su se kao naponski djelitelji tako se skoro sav atmosferski naboj praznio na mjestu najmanjeg otpora uzemljenja (kod TS 10/0,4 kV Podprolog 1).

4. OPIS I VALIDACIJA RJEŠENJA

Nakon definiranja problema pristupili smo rješenju istog, i to na način da je dio neutralnog vodiča pretvoren u gromobranski uzemljivač. Ovo poglavlje prikazuje kratki opis specifičnosti udara munje i uz to povezane pojmove, kao i predloženo inovativno rješenje problema. Na kraju poglavlja prikazani su rezultati provjere izvedenog rješenja pomoću terenskih mjerenja.

Uzemljivači pri odvođenju jakih struja munje poprimaju visoke potencijale i oko njih se stvara električno polje, što je posebice izraženo u loše vodljivom tlu. To električno polje može poprimiti iznose veće od probojnog napona zemljišta i u okolišu uzemljivača nastupa proboj [4]. Zemlja u okolišu uzemljivača zbog toga postaje vodljiva. Pojavu možemo shvatiti kao povećanje efektivnog presjeka našeg uzemljivača, što bi konačno značilo smanjenje otpora uzemljenja R_z . Međutim, induktivitet uzemljivača, što fizikalno označava magnetski tok oko uzemljivača, onemogućava jednako otjecanje struje s metalnog vodiča po cijeloj njegovoj dužini. Zato se struja raspršuje u zemlju samo po dužini nekoliko prvih metara. Tu drugu pojavu, koja na dopušta da se aktivira cijela dužina uzemljivača, možemo shvatiti kao povećanje otpora uzemljenja [4]. O tome koja će od tih dviju suprotnih tendencija prevladati ovisi rezultirajući otpor rasprostiranja struje munje, koji nazivamo udarni ili impulsni otpor rasprostiranja uzemljenja R_i .

Razlika između impulsnog otpora uzemljenja R_i i otpora uzemljenja R_z ne ovisi samo o jačini struje munje nego i o obliku iste. Što je strmina struje veća, odnosno što je vrijeme trajanja čela vala T_c kraće, struja će prodrijeti dulje po uzemljivaču. Trajanje čela vala kreće se u rasponu od 1,8 μ s do 4,5 μ s.

Upravo radi specifičnosti valnog oblika munje, ima smisla uvesti veličinu koju ćemo zvati aktivna ili efektivna duljina uzemljivača. Ova veličina pruža informaciju o upotrebljivoj duljini uzemljivača u kontekstu udara munje. Drugim riječima, uzemljivač koji se izvede dulji od svoje aktivne duljine imat će otpor uzemljenja manji od impulsnog otpora uzemljenja. S druge strane, uzemljivač koji je kraći od svoje efektivne duljine će se koristiti cijelom duljinom prilikom odvođenja munje, stoga će impulsni otpor uzemljenja biti jednak otporu uzemljenja. Za izračun aktivnog dijela uzemljivača koristimo se formulom:

$$l_A = 1,1 \sqrt{\frac{T_c}{G_1 L_1}} \quad (3)$$

gdje je:

l_A - aktivna duljina uzemljivača, m

G_1 - jedinični odvod, S/m

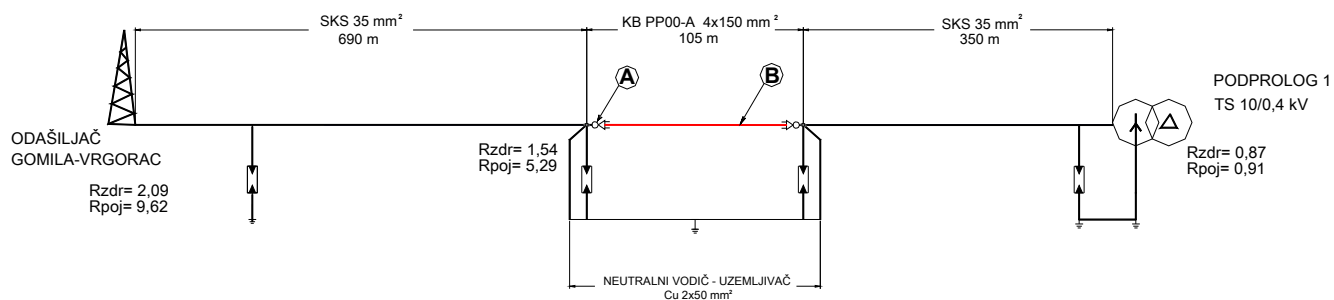
L_1 - jedinični induktivitet, mH/m, za horizontalno položen trakasti uzemljivač, odnosno horizontalni cilindrični vodič, uzimamo 1,5 mH/m

T_c - vrijeme trajanja čela vala u μ s, uzimamo da je jednaka 4,5 μ s [4]

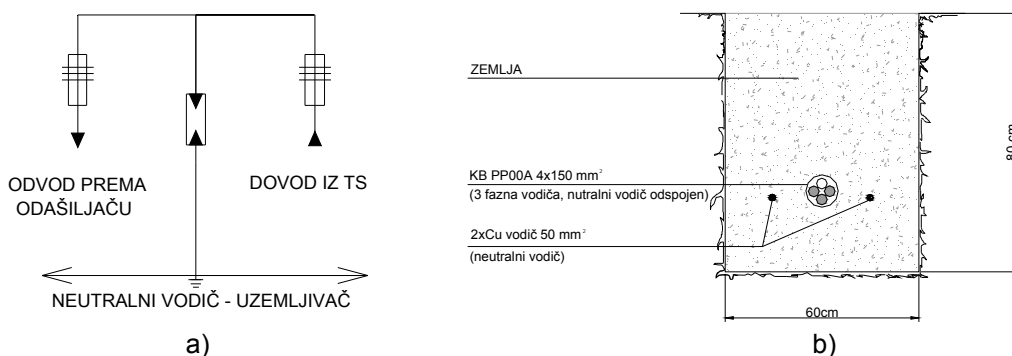
Odvod G_1 u S/m za trakasti uzemljivač, odnosno horizontalni cilindrični vodič, iznosi [4]:

$$G_1 = \frac{3,1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{\ln \frac{l}{r}} \quad (4)$$

Primjenom gornjih relacija, pristupilo se izračunu aktivne duljine uzemljivača kako bi se mogla odrediti optimalna duljina Cu vodiča u zemlji. Iz tablice I vidimo da je na mjestu gdje nadzemni kabel prelazi u podzemni i gdje započinje dodani horizontalni uzemljivač specifični otpor tla za prvi metar dubine jednak 787 Ω m. Radi sigurnosti, te imajući u vidu specifični otpor idućeg sloja (tablica I), uzimamo konzervativni iznos od 1000 Ω m. Uz pretpostavku vremena trajanja čela vala $T_c = 4,5 \mu$ s, dobiva se efektivna duljina uzemljivača 106,507 metara. Temeljem ovako dobivene vrijednosti, uzemljivač je realiziran pomoću dva Cu vodiča presjeka 50 mm² u duljini točno 100 m čime je postignuto da je fizička duljina uzemljivača približno nekoliko metara kraća od aktivne duljine uzemljivača. Time je postignut optimalan odnos između otpora uzemljenja i impulsnog otpora uzemljenja, posebice za tla relativno visokog specifičnog otpora kakvo i jest opisano u ovom članku. Shematski prikaz sekcije NN mreže odašiljač – TS prikazan je na slici 5. Slika 6 prikazuje presjek kablenskog rova s četverožilnim kablom kojemu su tri fazna vodiča aktivna, a neutralni vodič odspojen. Paralelno uz kabel položena su dva Cu vodiča koja preuzimaju ulogu neutralnog vodiča i uzemljivača istodobno.



Slika 5. Shema NN voda (Odašiljač Gomila – TS 10/0,4 kV Podprolog 1)

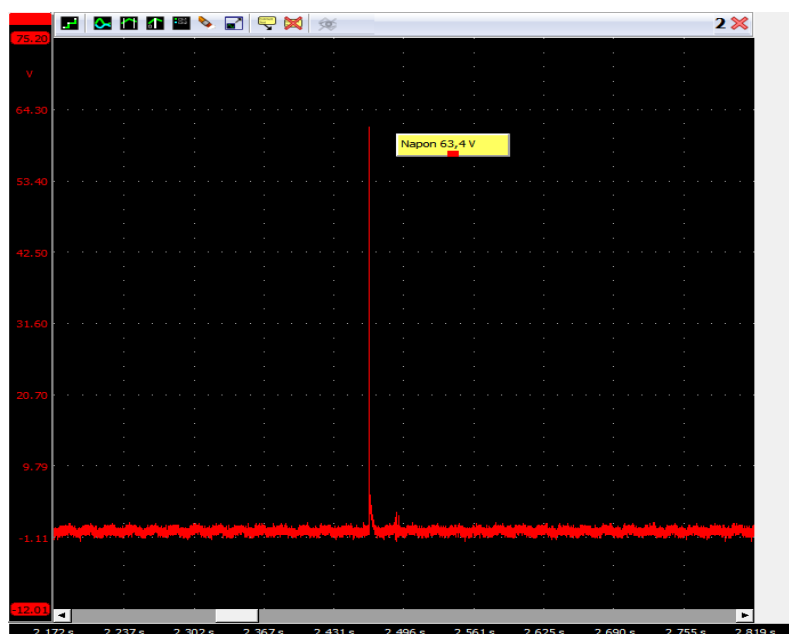


Slika 6. a) Shema povezivanja (Detalj A sa slike br.5) i b) Kabelski rov (Detalj B sa slike br.5)

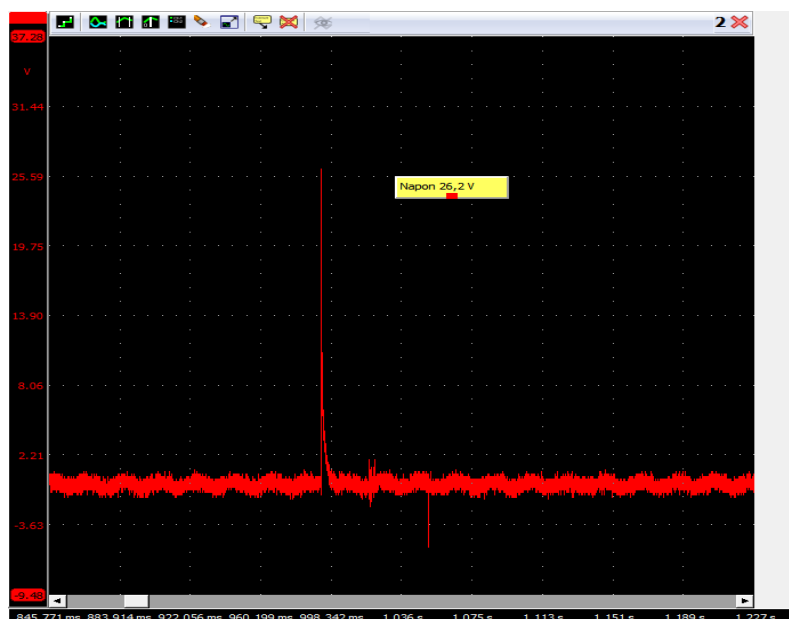
Ovakvim rješenjem neutralni vodič pored ostaloga ponaša se i kao gromobranski uzemljivač, smanjen je otpor petlje te povećan doseg zaštite. Prednosti ovog rješenja u odnosu na klasična rješenja s paralelnim uzemljivačima vidljivi su i iz mjerenja koja smo napravili na terenu.

Kao što je već rečeno, validacija rješenja provedena je mjerenjima na terenu, simulirajući, unutar skaliranja zbog tehničkih ograničenja mjerne opreme, stvarnu situaciju prilikom udara munje.

U blizini početka ovog uzemljivača injektirali smo 15 kV impulsni napon u zemlju korištenjem udarnog generatora te smo izmjerili vrijednosti na početku i na kraju uzemljivača kako je prikazano oscilogramima na slikama 7 i 8.

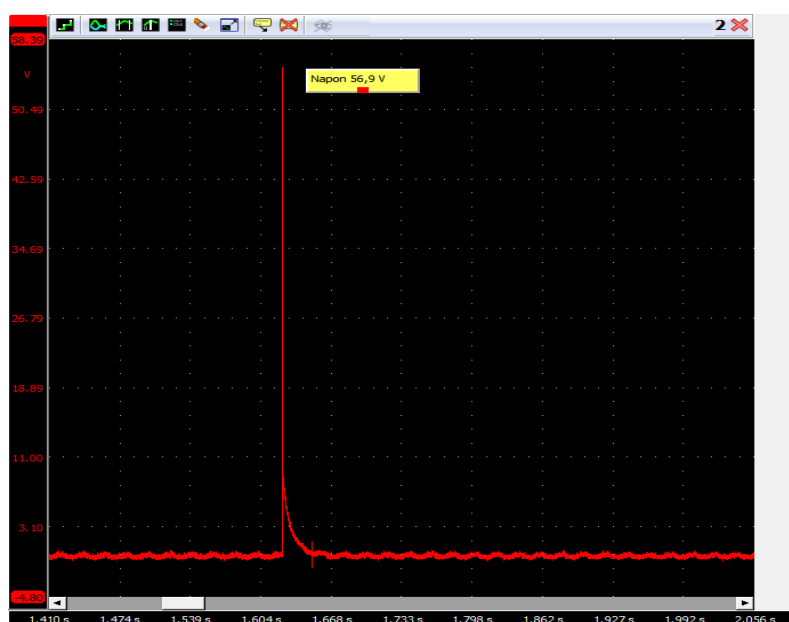


Slika 7. Napon na početku uzemljivača



Slika 8. Napon na kraju uzemljivača - neutralni vodič kabela odspojen

Da bi se validiralo gore opisano rješenje, ugrađeni uzemljivač je obostrano spojen (premošten) s neutralnim vodičem iz kabela (klasični uzemljivač) te smo za iste uvjete na kraju uzemljivača izmjerili naponski oscilogram prikazan na slici 9.



Slika 9. Napon na kraju uzemljivača – uzemljivač klasično spojen s neutralnim vodičem

Analizom vršne vrijednosti naponskog impulsa na slikama 7-9 uočava se sljedeće:

- 1) Pražnjenjem 15 kV naponskog impulsa preko pomoćnog uzemljivača, na početku „našeg“ uzemljivača mjeri se naponski impuls iznosa 63,4 V.
- 2) U istim uvjetima, na kraju uzemljivača mjeri se impuls iznosa 26,2 V. Sukladno očekivanom, značajan dio potencijala sa početka uzemljivača odveden je u zemlju, odnosno, napon na kraju uzemljivača manji je od napona na početku uzemljivača za približno 2,4 puta.
- 3) Ako se uzemljivač premosti neutralnim vodičem iz kabela kako je ranije opisano, na kraju uzemljivača se mjeri naponski impuls vršne vrijednosti 56,9 V. Ovaj rezultat jasno ukazuje da je učinkovitost uzemljivača u smislu faktora smanjenja potencijala sa 2,4 pala na 1,1. Drugim riječima, postoji evidentna razlika u učinkovitosti uzemljivača sastavljenog

od klasičnih paralelnih uzemljivača i predloženog inovativnog rješenja u kojem je neutralni vodič „izvučen“ iz kabela i položen izravno u zemlju. Iako na prvi pogled zbunjujući, ovakav rezultat posljedica je činjenice da postoji značajna razlika u specifičnom otporu tla duž trase kabela (vidi tablicu I). U slučaju da je neutralni vodič iz kabela obostrano spojen s uzemljivačem, struja munje neće odlaziti u zemlju tamo gdje je najbliži uzemljivač, već gotovo u potpunosti kroz neutralni vodič tamo gdje je specifični otpor tla oko uzemljivača najmanji (TS Podprolog 1).

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazano je rješenje eliminacije atmosferskih prenapona koji su se prenosili s odašiljača Gomila na trafo područje TS 10/0,4 kV Podprolog 1. Inovativnost rješenja karakterizira korištenje neutralnog vodiča kao neutralnog vodiča i gromobranskog uzemljivača. Funkcionalnost rješenja provjerena je i potvrđena mjerenjima na stvarnoj lokaciji korištenjem udarnog generatora koji simulira valni oblik blizak stvarnom udaru munje. Mjerenja su provedena sa i bez odspojenog kabelskog neutralnog vodiča čime je validirana učinkovitost predloženog rješenja u odnosu na klasične paralelne uzemljivače. Nadalje, utvrđeno je da od trenutka puštanja u rad ovakvog uzemljivača (svibanj 2015. godine) nije bilo empirijskih saznanja o izgaranjima na strani TS i krajnjih potrošača, iako je zabilježeno više grmljavinskih nevremena.

Isto rješenje primjenjivo je u svim niskonaponskim mrežama s uzemljenim neutralnim vodičem, gdje se zbog velike razlike u specifičnom otporu tla, atmosferski prenaponi prenose preko neutralnog vodiča.

6. LITERATURA

- [1] M. Perčec – Tadić, „Analiza srednjeg godišnjeg broja grmljavinskih dana u razdoblju 1971. do 2000. na području R. Hrvatske“, DHMZ, 2000.
- [2] FER, "Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja (SLAP)", Zagrebački energetska tjedan, Zagreb, Svibanj, 2013
- [3] T. Bosanac, „Teoretska elektrotehnika 1“, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1969.
- [4] F. Majdandžić, „Uzemljivači i sustavi uzemljenja“, Graphis, Zagreb, 2002.
- [5] S. Milun, G. Petrović, T. Garma, D. Rubinić, „Izvješće o ispitivanju geo-električnih značajki tla na području buduće TS Zadar II 110/10 kV/kV“, FESB, 2012
- [6] S. Milun, G. Petrović, T. Garma, D. Rubinić, „Izvješće o ispitivanju geo-električnih značajki tla na području buduće TS Poličnik 110/10 kV/kV“, FESB, 2012
- [7] S. Šesnić, T. Garma, D. Poljak, S.V. Tkachenko, „Comparison of Antenna model and experimental analysis of fan impulse impedance of horizontal grounding electrode“, Electric Power Systems Research, 2015, 159-163.