

IZBIRA USTREZNEGA VODNIKA ZA OZEMLJEVANJE OPLETOV KABLOV NA KONSTRUKCIJI DALJNOVODNEGA STEBRA

Robert MARUŠA, Jože VORŠIČ, Jože PIHLER, Ivo KOBAL, Leon MARUŠA

POVZETEK

V članku je opisana izbira ozemljitvenega vodnika namenjenega za ozemljevanje odvodnikov prenapetosti in opletov visokonapetostnih kablov nameščenih na konstrukciji daljnovodnega stebra kjer je izveden prehod daljnovod – kablovod. Za ozemljevanje odvodnika in opleta kabla morajo biti ozemljitveni vodniki zasnovani tako, da zagotovijo tudi učinkovit odvod tokov višjih frekvenc in jakosti do 10 kA. Z raziskavo in meritvami smo izbrali ustrezen vodnik, ki zagotavlja priporočene parametre, hkrati pa ni zanimiv za odtujevanje.

ABSTRACT

This paper describes which factors to consider when faced with choosing conductor for grounding of surge arresters and high-voltage cables on powerline construction, where is transition between powerline construction and powerline cable takes place. For proper grounding of surge arrester and shielded cable, the grounding cables have to be designed to ensure efficient high frequency current flow to the ground that can reach up to 10 kA. During our research and measurements we have chosen such a conductor that at the same time ensures recommended parameters and is not of any particular value to vandalism.

1. UVOD

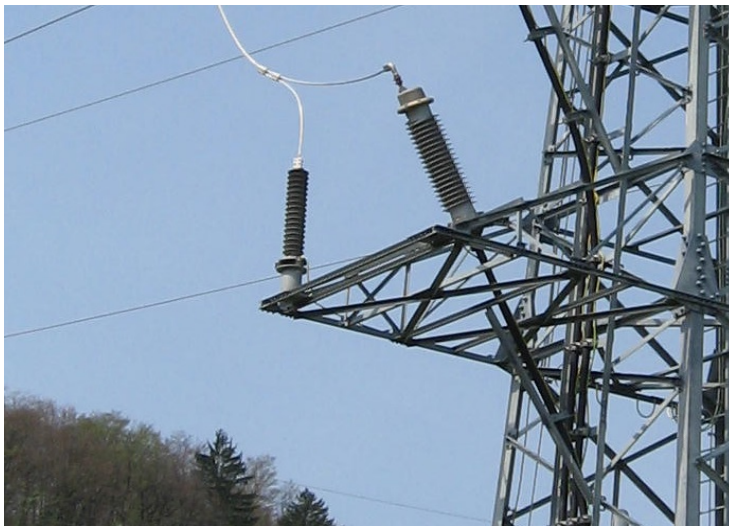
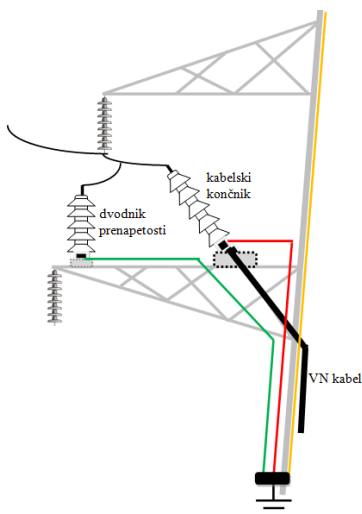
Na stebrih daljnovodov visoke napetosti, ki se nahajajo v bližini oklopljenih plinsko izoliranih postrojev (GIS), je običajno izveden prehod daljnovod - kablovod. Na tem mestu je stikalni postroj preko kabla priključen na daljnovod visoke napetosti. Zaradi različne valovne upornosti daljnovoda in kablovoda se na takšnih prehodih ob stikalnih manipulacijah, hitrih spremembah obratovalnega stanja ali ostalih prehodnih stanjih pojavijo visoke prenapetosti, ki lahko povzročijo poškodbe kabla. Za preprečitev teh pojavov in posledično zmanjšanje poškodb je potrebno kabel varovati z visokonapetostnim odvodnikom prenapetosti, oplet kabla pa ustrezno in učinkovito povezati z ozemljilom [1]. V namen povezave in opleta kabla smo v dosednji praksi uporabljali bakren vodnik v finožično pleteni izvedbi ustreznega preseka. Takšen vodnik ima zagotovo najboljše zahtevane lastnosti, vendar je zaradi vandalizma žal neprimeren za uporabo na prosto dostopnih mestih daljnovodnih konstrukcij. Zaradi tega smo bili primorani izvesti raziskavo in izbrati vodnik iz drugega (nezanimivega) materiala, ki pa bo zadovoljeval zahtevam, ki jih narekuje ustrezna izvedba ozemljitvenega sistema.

2. PRAKTIČNA IZVEDBA OZEMLJEVANJA

Zaradi zmanjšanja medsebojnih vplivov morajo biti ozemljitveni vodniki izvedeni na način, da so ločeno izvedene ozemljitve strelovodne vrvi preko kovinske konstrukcije stebra [2], ločeno izvedena ozemljitev odvodnika prenapetosti in ločeno izvedena ozemljitev opleta visokonapetostnega kabla saj vsak ozemljitveni vodnik opravlja svojo funkcijo in sicer :

- ozemljitev strelovodne vrvi služi za odvod udarnega tokovnega vala atmosferskih razelektritev, kot tudi za odvod toka zemeljskega stika pri morebitnem povratnem preskoku iz faznega vodnika proti ozemljeni konstrukciji stebra,
- ozemljitev odvodnika prenapetosti služi za odvod toka, ki zaradi prenapetostnega vala steče skozi upornost odvodnika prenapetosti. Na omrežju nivoja 110 kV so tovrstni tokovi omejeni na amplitudo 10 kA in imajo zaradi hitrega pojava značaj višje frekvence. Praviloma gre za tokovni udar atmosferskih razelektritev v fazni vodnik daljnovoda, redkeje pa tudi za odvod stikalnih prenapetosti,
- ozemljitev opleta visokonapetostnega kabla služi za fiksiranje nevtralne točke opleta kabla. Zaradi kapacitivnosti med žilo in opletom kabla teče v oplet kabla kapacitivni tok. Poleg tega pa služi ozemljitveni vodnik tudi za izenačitev potenciala v primeru induciranih napetosti, ki so povzročene zaradi toka v vodniku lastne žile kabla ali toka v sosednjih žilah kablovoda.

Zaradi različnih funkcij ozemljevanja morajo biti ozemljitveni vodniki instalirani vzdolž konstrukcije stebra medsebojno izolirani proti temeljnemu delu kovinske konstrukcije daljnovoda, kot kaže slika 1.



Slika 1: Prikaz razporeditve VN elementov na prehodu daljnovod –kablovod.

Na sliki 1 je prikazana konfiguracija samo za eno fazo, v praksi pa je prehod izvršen na isti konstrukciji za vse tri faze, pogosto tudi za dva ali več daljnovodnih sistemov. Zaradi zmanjšanja zračnih tokov v opletih kablovoda [3] pa tudi ločeno po posameznih fazah omrežja. Pri odtujitvi oz. prisilni demontaži v teku obratovanja nastane na takih mestih izredno velika nevarnost udara električnega toka, saj se zaradi kapacitivnosti kabla (valjni

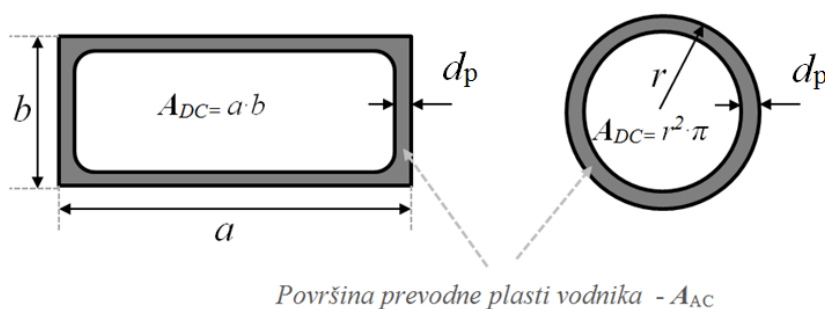
kondenzator) med zemljo in opletom pojavi praktično polna fazna napetost [4]. Opisano nam narekuje, da moramo takšne primere preprečiti in izbrati vodnik, ki ga ne bo zanimivo odtujiti in bo še vedno zadovoljil zahteve, ki jih s tehničnega stališča moramo zagotoviti za učinkovito povezavo z ozemljilom [5 in 6].

3. DIMENZIONIRANJE VODNIKOV ZA OZEMLJITVE

Vodnike, ki se uporabljajo za izvedbo ozemljitvenega sistema elektroenergetskih naprav je potrebno ustrezno dimenzionirati. Pred načrtovanjem je potrebno poznati funkcijo in namen ozemljitvenega vodnika. Pri izvedbi ozemljitev elektroenergetskih naprav v grobem ločimo dimenzioniranje v namen odvoda velikih tokov v ozemljilo in dimenzioniranje v namen odvoda tokov višjih frekvenc (do 100 MHz), ki nastanejo zaradi hitrih sprememb toka ob atmosferskih razelektritev ali zaradi prehodnih pojavov [7]. Na osnovi tega izbiramo za izvedbo prevodnih delov ozemljitvenega sistema med različnimi materiali in oblikami ter topologijo namestitve. Pri izvedbi ozemljitev elektroenergetskih naprav lahko pri vodnikih bližinski pojav zanemarimo, potrebno pa je upoštevati kožni pojav izriva toka zaradi vpliva frekvence. Impedanca vodnika je tako odvisna od frekvence toka skozi vodnik tudi v realnem delu zato lahko zapišemo splošen izraz za impedanco (1).

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX_L(\omega) \quad (1)$$

Izraz (1) velja za profilne vodnike, kar bomo tudi v nadaljevanju predstavili. Zaradi kožnega pojava moramo upoštevati zmanjšanje aktivnega prereza vodnika, kakor tudi povečanje upornosti. Kožni pojav zaradi izriva toka proti površini vodnika, močno poveča gostoto toka na površinskem delu, kot kaže slika 2. Globina kožnega pojava je tista globina pri kateri gostota toka oslabi na 37 % (e^{-1}) gostote toka na površini vodnika.



Slika 2: Površina prevodne plasti zaradi izriva toka.

Kožni pojav si lahko razložimo s pomočjo uporabe Amperovega zakona v kombinaciji s Faradayevim zakonom indukcije skladno z izrazi (2 in 3) [7].

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

$$U_i = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

Rezultirajoči električni tok, ki teče skozi vodnik ustvari v materialu vodnika svoje magnetno polje, ki v materialu povzroči inducirano napetost. Ta napetost požene vrtilne tokove, ki zopet povzročijo lasno magnetno polje, ki ima nasprotno smer prvotnemu magnetnemu polju. Ko električni tok narašča, narašča tudi magnetno polje, električno polje pa ima v sredini vodnika vedno nasprotno smer, na robu vodnika pa isto smer. Lastno magnetno polje izmeničnega toka torej izrine tok proti površini vodnika. Ta pojav je odvisen predvsem od magnetnih lastnosti materiala in frekvence. Gostota električnega toka J neskončno debelega vodnika pojenja eksponentno z globino x od površine skladno z izrazom (4) [7].

$$J_{(x)} = J_0 \cdot e^{-x/d_p} \quad (4)$$

Debelino prevodne plasti pri danih parametrih lahko izrazimo z izrazom (5)

$$d_p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \text{ [mm]} \quad (5)$$

V preglednici 1 je prikazana debelina prevodne plasti materialov pri različnih frekvencah.

Preglednica 1: Debelina prevodne plasti pri različnih frekvencah.

Material	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	μ_r	d_p 50 Hz (mm)	d_p 150 Hz (mm)	d_p 1 kHz (mm)	d_p 100 kHz (mm)	d_p 1 MHz (mm)	d_p 20 MHz (mm)
Cu	0,01724	1	9,35	5,4	2,1	0,21	0,066	0,015
Al	0,02857	1	12,12	7	2,7	0,27	0,085	0,019
Fe	0,12987	90	2,7	1,56	0,6	0,06	0,019	0,004
In 304	0,7245	800	0,28	1,23	0,477	0,0477	0,015	0,0033

Zaradi kožnega pojava aktivno prevaja električni tok pri višjih frekvencah le debelina d_p . Zaradi tega je izredno pomembna oblika in material ozemljitvenih vodnikov. Izraz (6) za izračun aktivne površine prevajanja izmeničnega toka lahko zapišemo:

$$A_{AC} = O_{pr} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}} \quad (6)$$

Izraz za izračun upornosti realnega dela impedance povečan zaradi zmanjšane aktivnega preseka ozemljitvenega vodnika predstavimo z izrazom (7).

$$R_{AC} = \frac{\rho \cdot l}{O_{pr} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}}} \quad (7)$$

Impedanca vodnika za ozemljevanje pa je odvisna tudi od reaktančnega dela, ki je posledica lastne induktivnosti vodnika L . Za ozemljitvene vodnike se lahko uporabljajo nemagnetni materiali kot je baker, aluminij, nemagnetno nerjavno jeklo ali pa magnetni materiali kot je pocinkan železni trak, profili iz magnetnega nerjavnega jekla, kot tudi železne kovinske podporne konstrukcije naprav ali daljnovodnih stebrov. Strelovodna vrv je kombinacija materiala Al-Fe. Vodniki tvorijo s svojo dolžino, obliko in magnetnimi lastnostmi materiala induktivnost, ki je po [8] zapisana z izrazi (8 in 9). Za okrogle vodnike lahko zapišemo izraz za lastno induktivnost.

$$L = 0,2 \cdot l \cdot \left(2,303 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot l}{r} \right) - 1 + \frac{\mu_r}{4} \right) [\mu\text{H}] \quad (8)$$

Za pravokotne vodnike lahko zapišemo izraz za lastno induktivnost. Pri tem se zaradi člena v logaritmu zopet izkaže prednost profilnih vodnikov.

$$L = 0,2 \cdot l \cdot \left(2,303 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot l}{a+b} \right) + 0,5 + 0,2235 \left(\frac{a+b}{l} \right) + \frac{\mu_r}{4} \right) [\mu\text{H}] \quad (9)$$

Pri tem pomeni:

- μ_0 permeabilnost praznega prostora ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am),
- μ_r relativna permeabilnost materiala profilnega vodnika,
- a širina pravokotnega vodnika (m),
- A_{AC} aktivna površina prevajanja izmeničnega toka (mm^2),
- b debelina pravokotnega vodnika (m),
- d_p debelina prevodne plasti materiala (mm),
- f frekvenca (Hz),
- l dolžina vodnika (m),
- L lastna induktivnost vodnika (μH),
- O_{pr} obseg profila vodnika (mm),
- r polmer okroglega vodnika (m),
- R_{AC} ohmska upornost realnega dela impedance (Ω),
- ρ specifična upornost materiala ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$).

4. TOKOVNO DIMENZIONIRANJE VODNIKOV ZA OZEMLJILA

Pri tokovno termičnem dimenzioniranju vodnikov ozemljitvenega sistema je potrebno poznati topologijo omrežja, jakost toka zemeljskega stika in časovne nastavitve relejne zaščite. Glede na topologijo omrežja in ozemljitev nevtralne točke zvezdišča so lahko vodniki za ozemljitveni sistem dimenzionirani na velike tokove reda nekaj 10 kA, vendar je ta tok omejen na kratek čas med 0,1 do 2 s. Za tokove zemeljskega stika $3I_0$, ki so prekinjeni v času

manj kot 5 s je potrebno prerez ozemljitvenega vodnika in ozemljila določiti po (10). Izraz je povzet po slovenskem standardu SIST EN 50341-1: 2012 [6], ki ureja gradnjo nadzemnih vodov napetosti nad 45 kV. Enak izraz definira tudi standard IEEE Std. 837: 2002 [5], ki ureja dimenzioniranje ozemljitvenih vodnikov v energetskih postrojih.

$$A = \frac{I}{K} \cdot \sqrt{\frac{t_F}{\ln \frac{\theta_F + \beta_t}{\theta_i + \beta_t}}} \quad [\text{mm}^2] \quad (10)$$

kjer pomeni:

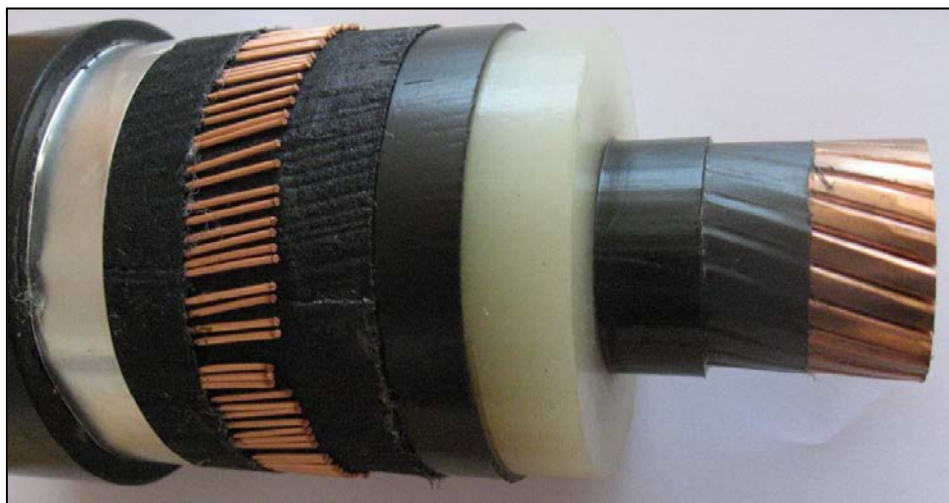
- A aktivni presek ozemljitvenega vodnika (mm^2),
- I efektivni tok zemeljskega stika (A),
- t_F čas trajanja okvare (s),
- K konstanta uporabljenega materiala po preglednici 2 ($\text{A} \cdot \text{s}^{0,5} / \text{mm}^2$),
- β_t inverzna vrednost uporovnega temperaturnega koeficienta po preglednici 2 ($^{\circ}\text{C}$),
- θ_i začetna temperatura ozemljitvenega vodnika ($^{\circ}\text{C}$),
- θ_F končna temperatura ozemljitvenega vodnika ($^{\circ}\text{C}$).

Preglednica 2: Konstante za materiale ozemljitvenih vodnikov po SIST EN 50341-1:2012 [6].

Material za ozemljitveni vodnik	β_t ($^{\circ}\text{C}$)	K ($\text{A} \cdot \text{s}^{0,5} / \text{mm}^2$),
<i>Baker</i>	234,5	226
<i>Aluminij</i>	228,0	148
<i>Jeklo</i>	202,0	78

5. OZEMLJEVANJE OPLETOV ENERGETSKIH KABLOV

Opleti energetskih kablovodov so namenjeni povsem drugačnemu namenu kot opleti kablov za sekundarne tokokroge. Opleti energetskih kablov so namenjeni izključno za zaslanjanje električnega polja in za zagotavljanje homogenih razmer električnega polja v izolaciji med vodnikom in opletom kabla. Visokonapetostni kabli so izvedeni pretežno v enožilni izvedbi. Tak kabel ima oplet izveden monolitno po celotni površini okoli izolacijske plasti. Oplet ali plašč je lahko izveden s svinčenim plaščem ali pa je sestavljen iz navzkrižno povitih trakov iz bakrenega ali aluminijastega materiala. Dodatno ima kabel poleg kovinskega zaslona nameščen še oplet iz prevodnih žic katerega skupen presek znaša najmanj šestino preseka glavnega vodnika, kar v praksi pomeni več kot 95 mm^2 , kot kaže slika 3.



Slika 3: Struktura visokonapetostnega kabla.

Takšna konstrukcija kabla fizikalno predstavlja kondenzator pri katerem predstavlja vodnik eno ploščo in oplet drugo ploščo kondenzatorja. Zaradi tega si pri obratovanju na opletu pojavi poln potencial fazne napetosti in mora biti oplet obvezno ozemljen. V oplet kabla čez ozemljeno točko teče ves čas obratovanja kapacitivni tok, ki pa ni tolikšnega velikostnega reda, da bi povzročal na ohmski upornosti opleta kabla prekomerno pregrevanje. Nevarnost za udar električnega toka preti le na mestu povezave z ozemljitvenim sistemom. Povezava mora biti izvedena zanesljivo saj se na tem mestu drugače pojavi izredno visoka napetost.

Drug pojav, ki se lahko zgodi v kovinskem opletu kablovoda visoke napetosti pa je inducirana napetost, ki nastane v opletu kabla, kot kaže izraz (11).

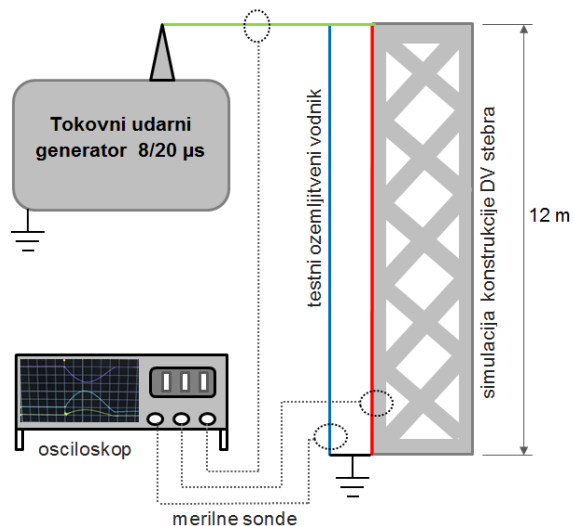
$$U_i(t) = \frac{-d\Phi(t)}{dt} = -\Phi_{\max} \cdot \frac{d\cos(\omega t)}{dt} = \omega \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad [\text{V}] \quad (11)$$

Ta nastane zaradi izmeničnega magnetnega pretoka, ki ga povzroči tok v lastnem vodniku, deloma pa tudi tok v sosednjih vodnikih istega sistema ali tok sosednjih vzporedno položenih sistemov kablovodov. Največji doprinos k višini inducirane napetosti povzroči nazivni tok lastnega vodnika, ki je lahko jakosti tudi do 2 kA. Inducirana napetost, ki se inducira v standardnem kablu 110 kV znaša cca. 150 V na dolžini 1 km pri toku 1 kA skozi lastni vodnik [4]. V primeru obojestransko ozemljenega opleta kabla bi napetost 150 V na relativno zelo mali impedanci opleta kablovoda pognala velik tok, ki bi povzročal izgube in termično preobremenil kablovod.

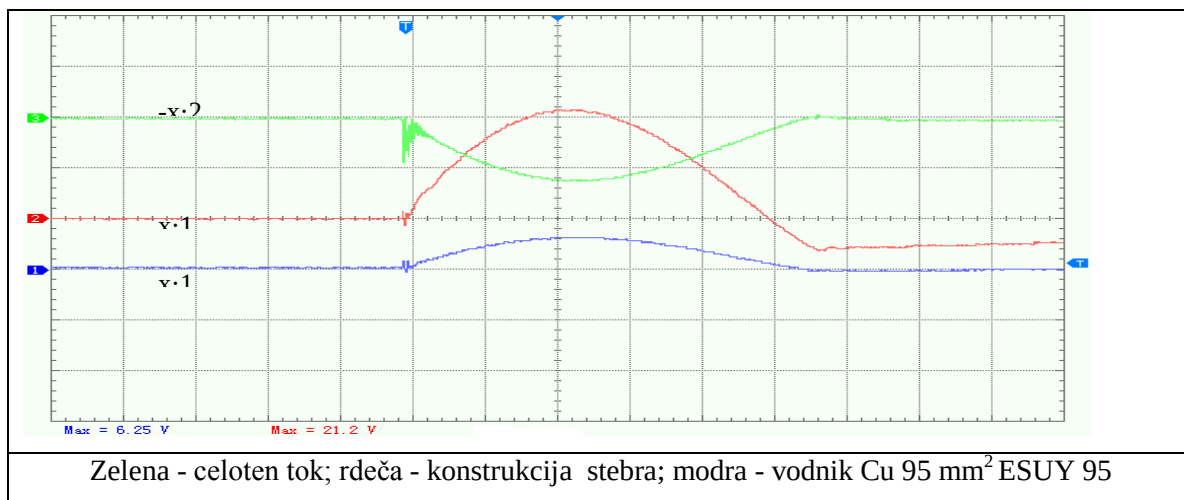
Zaradi tega je nujno potrebno, da je oplet energetskega kabla ozemljen togo le na eni strani, na drugi strani pa je oplet priključen na odvodnik prenapetosti (5 kV, 10 kA). Preko odvodnika bi se v primeru okvare ali prenapetosti oplet kabla kratkotrajno dodatno ozemljal [9].

6. MERITVE IN IZBIRA USTREZNEGA OZEMLJITVENEGA VODNIKA

Za potrebe meritev in ugotovitev karakteristik prevoda toka proti podnožju daljnovodnega stebra smo v Laboratoriju za visoke napetosti Elektro-inštituta Milan Vidmar pripravili posebno merilno progo. Za simulacijo konstrukcije daljnovodnega stebra smo uporabili konstrukcijo, ki je sicer namenja meritvam vplivov korone. Konstrukcija za simulacijo je varjena in izdelana iz nerjavečega jekla. Vz dolž simulirane konstrukcije daljnovodnega stebra, postavljene v vertikalnem položaju smo izmenoma nameščali različne ozemljitvene vodnike, ki smo jih na vrhu galvansko povezali s konstrukcijo, vzdolž konstrukcije pa je bil ozemljitveni vodnik izoliran. Vodnike in konstrukcijo smo ozemljili na obeh straneh v isti točki. V obeh ozemljitvenih vejah in na vходу toka v konstrukcijo smo merili tok, obliko toka in višino amplitude. Meritev smo izvajali s pomočjo tuljav Rogowski in digitalnega osciloskopa ter ustreznih prilagoditvenih členov za umerjanje. Preskusi in meritve so bili opravljeni z udarnim tokom oblike 8/20 μ s [10].



Slika 4: Merilna proga za meritev ozemljitvenih vodnikov.



Slika 5: Oscilogram prevoda toka skozi konstrukcijo in ozemljitveni vodnik.

Preglednica 4: Rezultati meritev razporeditev toka ob udarnem valu 8/20 μ s.

Oznaka ozemljitvenega vodnika	tok skozi ozemljitveni vodnik I (kA)	tok skozi konstrukcijo I (kA)	razmerje tokov
Strelovodni vodnik Al- ϕ 10	1,00	4.87	4,87
Strelovodni vodnik Al- ϕ 10- 90160	1,00	4.63	4,63
Izoliran ozem. vodnik Cu 95 mm ² ESUY	1.40	4.53	3,23
Izoliran ozem. vodnik Cu 95 mm ²	1.58	4.81	3,04
Vrv Al/Fe ϕ 19 mm	1.60	4.31	2,69
Vrv Al/Fe ϕ 16 mm	1.27	4.61	3,63
Jeklenica Fe ϕ 9 mm	0.74	5.22	7,05
Valjanec Zn 25 x 4 mm	1.07	4.94	4,62
Valjanec RH - I304 30 x 4 mm	0.80	5.06	6,33

7. ZAKLJUČEK

Na sliki 5 so podani oscilogrami meritev na simulacijski konstrukciji po sliki 4. Iz dobljenih rezultatov meritev je razvidno, da jeklena konstrukcija v vseh primerih (ne glede na obliko in material ozemljitvenega vodnika) prevzame večji del odvodnega toka. V preglednici 4 je razbrati, da bo razen bakrenega vodnika naslednji najbolj primeren material za ozemljitveni vodnik Al/Fe ϕ 16 mm ali Al/Fe ϕ 19 mm. Na tak način smo izbrali material, ki ne bo zanimiv za odtujevanje, z meritvami pa smo dokazali, da lahko učinkovito prevaja tokove, ki imajo tudi značaj višjih frekvenc, saj je struktura vodnika pletena.

8. LITERATURA

- [1] IEEE Guide for the application of Sheath-Bonding methods for Single Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths, ANSI/IEEE Std 575-1988.
- [2] Preskusno poročilo 13-Mlab-293, *Meritev upornosti spojev jeklene konstrukcije*, ICEM-TC Maribor, 2013.
- [3] Tehnični priročnik, *Visokonapetostni XLPE kabelski sistemi*, Brugg Cables, 2008.
- [4] R. Maruša, Poročilo o meritvah induciranih napetosti v opletih kablovoda 110 kV, ELES 2/2012, Podlog, september 2012.
- [5] IEEE Std 837-2002, Standard for Qualifying Permanent Connection Used in Substation Grounding.
- [6] SIST EN 50341-1:2012, Nadzemni električni vodi za izmenične napetosti nad 45 kV.
- [7] E.B. Joffe, K.S. Lock, *Grounds for grounding*, Wiley 2010.
- [8] MIL-HDBK-419A, Military Handbook, Grounding, Bonding, and Shielding for Electronic Equipments and Facilities, Washington, DC:U.S. Government Printing Office, 1987.

- [9] IEEE Working Group 3.4.11–Surge Protective Devices Committee, *Modeling of Metal Oxide Surge Arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.1, pp. 302-309, January 1992.
- [10] EIMV, Izvedba prenapetostne zaščite 110 kV kablov na DV stebrih in način ozemljevanja prenapetostnih odvodnikov, poročilo o meritvah št. 2227, Ljubljana november 2013.

NASLOV AVTORJEV

mag. Robert Maruša

ELES, d.o.o.

Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija.

red. prof. dr. Jože Voršič,

red. prof. dr. Jože Pihler,

Leon Maruša

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, SI-2000 Maribor, Slovenija,

Ivo Kobal

EIMV

Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija