



Branko Paić, dipl.ing.
Zdravko Pamić, dipl.ing.
"ELKA" d.d. - Zagreb

1-01

DISTRIBUTIVNI KABEL KAO UZEMLJIVAČ U VISOKONAPONSKOM POSTROJENJU

SAŽETAK

U referatu se obrađuje konstrukcija kabela primjerena za snižavanje nivoa iznešenog potencijala iz visokonaponskog postrojenja sa osnova poboljšanja sustava uzemljenja. Daju se teoretska razmatranja na ukupnost problematike iznošenja potencijala, zaštite od opasnih napona te dizajn i karakteristike "uzemljivačkog" kabela.

DISTRIBUTION CABLE AS GROUNDING CABLE IN HIGH-VOLTAGE PLANT

SAMMARY

The paper deals with the cable construction, suitable for lowering of the transferred potential level out of the high-voltage plant, from the aspect of grounding system improvement. It features the theoretical reflections on the overall problems of the potential transfer, protection against the touch voltage, same as the design and the features of the "grounding" cable.

KLJUČNE RIJEČI

Iznošenje potencijala
Uzemljivački sustav
Napon dodira
Faktor dobrote

KEY WORDS

Transferred Earth Potentials
System of Grounding
Touch (handle) Voltage
Factor of Goodness

1. UVOD

Problematika izošenja potencijala iz transformacijskih stanica, bez obzira u kakvim geološkom okviru se instalacije nalazile, još uvijek je značajno prisutna, te se rješava na različite načine kao što su :

- kabele paralelno vođeni dodatni metalni uzemljivači
- uzemljenje metalnih plašteva kabela
- odvajanje metalnih plašteva kabela od sustava uzemljivača
- primjena metalnog ekrana /plašt kabela kao uzemljivača i dr.

Sve navedeno ima za jedini cilj: sniziti nivo potencijala nastalog i prenesenog djelovanjem struje kratkog spoja ili tranzijentnih prenapona nastalih djelovanjem udara groma na VN vodove prijenosnog elektroenergetskog sustava, te spriječiti ljudstvo od opasnih napona, dodira i opremu na NN strani od kvarova. To znači da se mora osigurati što je moguće niži otpor sustava uzemljenja. Za dimenzioniranje uzemljivača potrebno je poznavati struju jednopolnog kratkog spoja koja teče preko uzemljivača a sastoji se od struje transformatora, ako je transformator uzemljen, struje zračnih vodova i struje kabelskih vodova. U pravilu struja jednopolnog kratkog spoja je projektantu poznata iz studije energetskog stanja, dok su ostale veličine kao, što je otpor rasprostiranja uzemljivača i ukupno otpor sustava uzemljenja ovisne o obliku i presjeku uzemljivača, te konstrukciji i reducionom faktoru energetskog kabela.

Izvedba energetskog kabela kao "uzemljivačkog" kabela malog reducionog faktora sa vanjskim metalnim slojem od bakra ili čelika direktno ukopanog u zemlju i vodljivim sintetskim plaštom između metalnog sloja i izolacije kabela može značajno poboljšati karakteristiku ukupnog otpora uzemljenja. Praktično iskustvo na već izgrađenim kabelskim sustavima u području s visokim specifičnim otporom tla potvrđuje prihvatljivost navedene kabelske konstrukcije u smanjenju nivoa potencijala iznešenog iz transformatorskog VN postrojenja.

2. KARAKTERISTIKA STANJA

Zaštita pri radu s kabelima uglavnom se svodi na kratko spajanje ekrana ili metalnih armatura kabela na krajevima i spajanje na uzemljivački sustav. U slučaju dozemnih kvarova raste potencijal na uzemljivaču odnosno na mjestu nastanka kvara, i prenosi se preko armature i ekrana kabela i drugih metalnih dijelova galvanski vezanih za uzemljivač na susjedna postrojenja. Nivo iznešenog potencijala određen je "koeficijentom iznošenja potencijala" k_i koji za slučaj kabela sa sintetskom izolacijom se izračunava na osnovu izraza:

$$k_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_p}$$

gdje je: Φ_i - potencijal izvorne TS

Φ_p - potencijal TS SN/NN na kraju kabela koji izlazi iz izvorne TS

Kod kabela sa izoliranim metalnim plaštom koeficijent iznošenja potencijala izračunava se prema izrazu:

$$k_{up} = \left\{ 1 + \frac{Z_1 \cdot l_1}{Z_2} \right\}^{-1}$$

gdje je Z_1 - otpor uzemljenja izvorne TS (Ω)

Z_2 - otpor uzemljenja TS na kraju kabela (Ω)

l_1 - duljina položenog kabela (km)

Kod kabela sa vodljivim plaštom koeficijent iznošenja potencijala se izračunava prema izrazu:

$$k_w = \left\{ \operatorname{ch} \gamma \cdot l_1 + \frac{Z}{Z_2} \cdot \operatorname{sh} \gamma \cdot l_1 \right\}^{-1}$$

gdje je: γ - valna konstanta širenja $= \sqrt{Z \cdot Y}$ (1/km)

Z_p - uzdužna impedancija metalnog plašta (Ω/km)

Y_p - poprečna admitancija metalnog plašta (S/km)

$$Z_p = R_o + j(X + X_{Fe}) \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

$$Y_p = \frac{\Pi}{\rho} \left[\ln \frac{l_1}{\sqrt{h \cdot d}} \right]^{-1} \cdot 10^{-3} \text{ (S/km)}$$

$$Z_e = \sqrt{\frac{Z_p}{Y_p}} \text{ - karakteristična impedancija ekrana (}\Omega/\text{km)}$$

h - dubina ukopa kabela (m)

d - vanjski promjer metalnog plašta kabela (m)

ρ - specifični otpor tla (Ωm)

Vidljivo je da kabele sa izoliranim metalnim plaštom nisu direktni uzemljivači radi $Y=0$ i $Z=\infty$, nego su uzemljeni preko uzemljivača povezanih TS. S tog razloga može, u slučaju jednopolnog kratkog spoja, nastali potencijal na uzemljivaču umjesto da opada duž kabela ostati konstantnim, a razlika potencijala između vodiča kabela i ekrana čak i rasti u slučaju visokog specifičnog otpora tla, da to izazove bilo proboj izolacijskog plašta kabela ili izolacije kabela. Dobivena razlika potencijala može višestruko premašiti dozvoljene napone dodira.

Tako se napon dodira može izračunati:

$$U_d = I_{uz} \cdot Z_{uz} \cdot \epsilon \cdot \frac{1}{1 + 1,5\rho / R_e} \text{ (V)}$$

gdje je: U_d - napon dodira (V)

I_{uz} - struja KS kroz otpor uzemljenja (kA)

ϵ - omjer najvišeg napona u središtu petlje i referentnog potencijala zemlje (~ 15)

Z_{uz} - otpor uzemljenja cijelog sustava (Ω)

R_e - otpor čovječjeg tijela ($\sim 1000 \Omega$),

Vidljiv je značajan utjecaj ukupnog otpora uzemljenja na visinu napona dodira. Praktički, uz ostale poznate elemente (I_{uz} , ϵ , ρ i R_e), napon dodira je ovisan samo o karakteristici ugrađenog kabela u uzemljivački sustav postrojenja.

Konstrukcija kabela može se karakterizirati omjerom probojne čvrstoće izolacije U_k (kV) i uzdužne impedancije metalnog plašta kabela Z_p (Ω/km), tzv. faktorom dobrote G , tj.

$$G = \frac{U_k}{Z_p} \text{ (kA}\cdot\text{km)}$$

gdje je: $Z_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_2^2 + X^2}} \quad (\Omega/\text{km}), \text{ a}$

R_1, R_2 - omski otpori metalnih plašteva ekrana (Ω/km)

X - induktivni otpor kabela (Ω/km)

Iz navedenih jednadžbi mogu se izračunati odgovarajuće prelazne impedancije a iz njih i faktor dobrote za svaki pojedinačni kabel.

Navodimo primjer izračuna faktora dobrote za kabel PPh 91-A 4x150/25/(90+100) mm² 0,6/1 kV za struje groma 100 kA i 300 kA, vrijeme pada amplitude struje groma na polovinu vrijednosti $t_g = 100 \mu\text{s}$, specifični električni otpor tla $\rho_z = 10.000 \Omega\text{m}$ i probojne čvrstoće zemljišta; $E_z = 3 \text{ kV/cm}$:

- omski otpor I ekrana, $R_1 = 0,0985 \Omega/\text{km}$
- omski otpor II ekrana, $R_2 = 0,727 \Omega/\text{km}$
- probojna čvrstoća izolacije kabela, $U_k = 18 \text{ kV}$
- induktivni otpor, $X_L = 0,080 \Omega/\text{km}$
- potencijal na mjestu udara grama 100 kA

$$U_{p100} = 100 \frac{10.000 \times 10^{-3}}{2 \times \pi \times 1} = 159,2 \text{ kV/km}$$

Udaljenost oko mjesta udara grama unutar kojeg dolazi do proboja nezaštićenog kabela tipa PPOO-A 4x150 mm² 0,6/1 kV:

$$a = \frac{U_p}{U_k} \sqrt{\frac{I \times \rho_z}{2 \times \pi \times E_z}} = 203 \text{ m}$$

Potencijal na mjestu ulaza grama 100 kA u ekran kabela PPh 91-A iznosi:

$$U_{ek100} = 0,08675 \sqrt{10^4 \times 10^{-4}} \times 50 = 4,34 \text{ kV} < 18 \text{ kV}$$

Potencijal na mjestu ulaza grama 300 kA u ekran kabela PPh 91-A iznosi:

$$U_{ek300} + 3 \times U_{ek100} = 13 \text{ kV} < 18 \text{ kV}$$

U oba slučaja ne može doći do proboja izolacije kabela.

Faktor dobrote za kabel PPh 91-A, kod 100 kA struje groma iznosi:

$$G = \frac{U_k}{Z_p} = \frac{18 \cdot 10^3}{0,098} \cong 184 \text{ kA}\cdot\text{km}$$

što znači da po ovakom kableu može proteći struja jačine 184 kA na 1000 m kabela ili 370 kA na 500 m. Vidljiva je izuzetno visoka zaštićenost ovih kabela na atmosferska pražnjenja.

Isto vrijedi i za posebne ojačane izvedbe SN kabela također predstavljenih u ovom referatu.

Faktor dobrote ne definira se kod nearmiranih i neekraniziranih kabela.

Iz datih proračuna proizlazi da je posebno konstruiran energetski kabel u mogućnosti zadovoljiti u uvjetima udara izuzetno visokih vrijednosti struje groma i do 400 kA u uvjetima specifičnog električnog otpora tla i do 10.000 Ωm .

Otog razloga su ovi kabeli izuzetno pogodni za napajanje objekata i izvedbu distributivne mreže u sustavima posebne namjene u izuzetno teškim geološkim područjima.

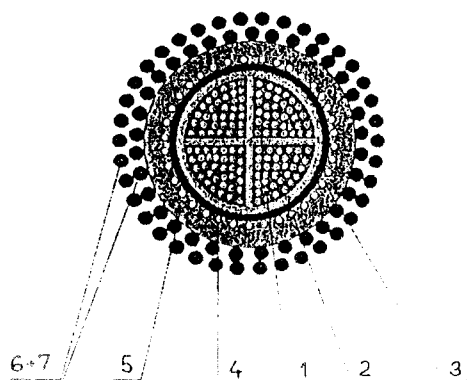
3. KONSTRUKCIJE KABELA

Prvi kabeli namijenjeni za izrazita grmljavinska područja i zemljišta visokog specifičnog električnog otpora tla izrađeni su sa polietilenskom izolacijom, pod oznakom A2YHSHS.

Usvajanjem umreženog polietilena, kao izolacionog materijala, izrađena je poboljšana varijanta kabela pod oznakom AXHSHS, gdje je umjesto poluvodljivog sloja od grafita i poluvodljive trake, preko izolacije postavljen ekstrudirani poluvodljivi sloj isto od slabovodljivog umreženog polietilena kao i preko vodiča. Naknadno je usvojena konstrukcija kabela pod oznakom XHEh 91-A.

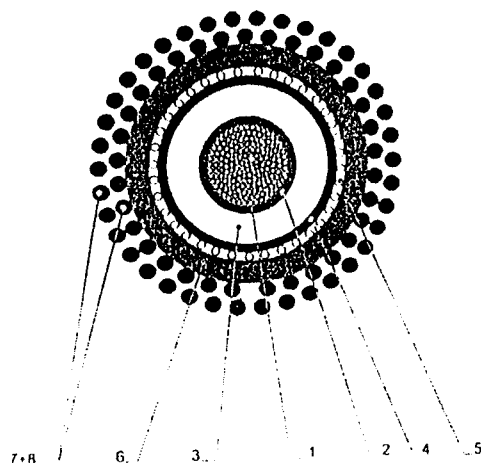
Ovom konstrukcijom kabela dobiven je faktor dobrote kabela 100 kA·km. Propisani podnosivi udarni napon za kabele naponskog nivoa 20 kV iznosi 125 kV za val 1,2/50 μs . Već ovako velike značajke ovih kabela ukazuju da se radi o kabelima koji zadovoljavaju dosadašnja saznanja o strujama groma. Najveće do sada izmjerene struje groma (400 kA) navode naša razmišljanja prema dodatnoj zaštiti kabela. Kako se ugroženost kabela od atmosferskih prenapona smanjuje sa smanjenjem otpora ekrana (iz konstrukcijskih razloga to smanjenje ima svoja ograničenja), time se naprosto nameće ideja da se dosadašnji presjek zaštitnog ekrana (cca 60 mm²) poveća za dobivanje faktora dobrote ≥ 1000 kA·km. Na plašt, od poluvodljivog materijala, postavljaju se dva sloja bakrenih pokositrenih žica, od kojih je prvi sloj omotan u jednom a drugi u suprotnom smjeru, uz 100 % prekrivanje svih ugrađenih žica.

Na slikama 1 i 2 prikazane su nove konstrukcije 1 kV i 20 kV energetskih kabela otpornih pred djelovanjem struje groma u ekstremno zahtjevnim uvjetima.



- 1 - Cu ili Al vodič
- 2 - PVC izolacija
- 3 - separator
- 4 - I električna zaštita
- 5 - plašt od poluvodljivog PVC
- 6 - II el.zaštita, 1.sloj
- 7 - II el. zaštita, 2.sloj

Slika 1.: Presjek kabela PPh 91



- 1 - Cu ili Al vodič
- 2 - slabovodljivi PEX
- 3 - PEX izolacija
- 4 - slabovodljivi PEX
- 5 - I električna zaštita
- 6 - plašt od slabovodljivog PE
- 7 - II el.zaštita, 1. sloj
- 8 - II el. zaštita, 2.sloj

Slika 2.: Presjek kabla XHEh 91

U Tablici I. dati su osnovni konstrukcijski podaci za tipizirane nove konstrukcije 1 kV kabla. Svi važniji električni podaci za iste konstrukcije kabla nalaze se u Tablici II.

Tablica I.: Konstrukcijski podaci kabla PPh 91-A 1 kV

Konstrukcija kabela $n \times \text{mm}^2$	Debljina izolacije mm	Debljina plašta mm	Promjer kabela mm	Težina kabela kg/km	Pakiranje	
					Bubanj	Duljina m
4x35/16/(65+75)	1,2	2,0	39	2800	SD-16	500
4x70/16/(75+80)	1,4	2,2	47	3420	SD-18	500
4x150/25/(90+100)	1,8	2,6	60	5410	SD-22	500

Tablica II.: Električni podaci kabela PPh 91-A 1 kV

Konstrukcija kabela		$n \times \text{mm}^2$	4x35/16/(65+75)	4x70/16/(75+80)	4x150/25/(90+100)
Najveća vrijednost otpora vodiča kod	20°C	Ω/km	0,868	0,443	0,206
	70°C	Ω/km	1,0430	0,5323	0,2475
Najveća vrijednost otpora ekrana	I	Ω/km	1,15	1,15	0,727
	II	Ω/km	0,136	0,120	0,0985
Najveća temperatura vodiča	radna	°C	70	70	70
	u kratkom spoju	°C	160	160	160
Strujno opterećenje u zemlji		A	159	232	359
Struja kratkog spoja u	vodiču	kA	2,66	5,32	11,4
	I ekran	kA	3,2	3,2	4,9

U Tablici III. dati su osnovni konstrukcijski podaci za tipizirane nove konstrukcije 20 kV kabela. Svi važniji električni podaci za iste konstrukcije kabela nalaze se u Tablici IV.

Tablica III.: Konstrukcijski podaci kabela XHEh 91-A 20 kV

Konstrukcija kabela	Debljina izolacije	Debljina plašta	Promjer kabela	Težina kabela	Pakiranje	
					Bubanj	Duljina
$n \times \text{mm}^2$	mm	mm	mm	kg/km		m
1x70/16/(65+75)	5,5	2,0	41	2350	SD-20	1000
1x150/25/(75+80)	5,5	2,2	45	3000	SD-20	1000

Tablica IV. Električni podaci kabela XHh 91-A 20 kV

Konstrukcija kabela		$n \times \text{mm}^2$	1x70/16/(60+75)	1x150/25(7+7)
Najveća vrijednost otpora vodiča na	20°C	Ω/km	0,443	0,206
	90°C	Ω/km	0,5380	0,2643
Najveća vrijednost otpora ekrana	I	Ω/km	1,15	0,727
	II	Ω/km	0,136	0,122
Najveća temperatura vodiča	radna	°C	90	90
	u kratkom spoju	°C	250	250
Srednja brzina kretanja		A	230	345
		A	240	360
Izdržljivost pri udarcu	vodiču	kA	6,6	14,1
	I ekranu	kA	3,2	4,9
Pogonski kapacitet		$\mu\text{F}/\text{km}$	0,20	0,25
Pogonski induktivitet		mH/km	0,43	0,39
		mH/km	0,70	0,64

Moguće su i druge konstrukcije kabela po posebnim zahtjevima projektanata.

4 ISPITIVANJE KABELA NAKON POLAGANJA

Ispitivanje kabela, nakon polaganja, izvodi se na potpuno instaliranom kabelu, sa svim njegovim priborom (spojnice, završne glave, odvodnici prenapona, uzemljenja,...). Ispitivanje se može izvesti na jedan od slijedećih načina:

- istosmjernim naponom od 50 kV (za 20 kV kabele), odnosno 4,5 kV (za 1 kV kabele) u trajanju 15 minuta, ili
- izmjeničnim naponom industrijske frekvencije u trajanju od:
 - 5 minuta, između vodiča i I električne zaštite, linijskim naponom sistema, ili
 - 24 sata, pri radnom naponu sistema

LITERATURA:

1. Distributivni kabel u sustavima posebne namjene; Branko Paić, Zdravko Pamić - I Simpozij o distributivnim mrežama, HK CIGRE, Lovran. 1996.
2. Djelotvoran način šticeanja podzemnih kabelskih trasa od udara groma na nepovoljnim terenima, autori: Josip Mužny, Branko Tokić, Dragan Nikolić, Petko Rosić, Danimir Selišek - VIII Simpozij o energetskeim kabelima, Donji Milanovac, 1982.
3. Uvod u proračun uzemljenja elektroenergetskih objekata, Andrija Miličević, Energija 1977., br.9-10
4. Mjerenje i analiza iznošenja potencijala iz postojenja prijenosnih mreža Hrvatske, Ante Sekso, XVI Savjetovanje CIGRE, Opatija 1983., Ref.br. 21.06.
5. Iznošenje potencijala i zaštita pri radu na srednjenaponskim kabelima,; Zlatko Novoselec, Nikola Čupin, Ivan Galek
6. Iznošenje potencijala iz TS 110/10 kV Osijek, Damir Pečvarac, XVII Savjetovanje CIGRE, Struga 1985.,Ref.br. 21.09.
7. Studija uzemljivačkog sustava TS 110/35, Nerežišća, Zavod za elektroenergetiku, FESB Split, veljača 1987.
8. Telekomunikacijski kablovi i atmosferska pražnjenja; autor: Jože Pungertl
9. Konstrukcija elektroenergetskog kabla otpornoga pred djelovanjem strele v ekstremno zahtjevnih pogojih; autor Jože Pungertl, Zdravko Pamić
10. Proizvodne informacije ELKA: "Kabel za polaganje u tla visokog električnog otpora u grmljavinskim područjima"
11. ISE-A 003: Energetski kabeli za nazivne napone od 1 kV do 35 kV (ISE-Interni standard ELKA).

