



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

31-03

DISTRIBUTIVNI KABEL U SUSTAVIMA POSEBNE NAMJENE

DISTRIBUTION CABLE IN SPECIAL ASSIGNMENT SYSTEMS

SAŽETAK

U referatu se određuju nove konstrukcije distributivnih kabela za nazivne napone od 0,6/1 kV do 20/35 kV namjenjene za sustave posebne namjene u uvjetima atmosferskih pražnjenja.

SUMMARY

The paper deals with new constructions of the distribution cables for the nominal voltages from 0,6/1 kV up to 20/35 kV, intended for the systems of special assignment in the conditions of atmospheric discharge.

KLJUČNE RIJEČI

Namjenski sustavi
Atmosferska pražnjenja
"Potencijalni ljevak"
Faktor dobrote

KEY WORDS

Systems of special assignment
Atmospheric discharge
"Potential funnel"
Factor of goodness

1. UVOD

Namjenski sustavi zahtijevaju stabilnost opskrbe električnom energijom tijekom 24 sata na dan, 365 dana godišnje. Obzirom na nemogućnost izgradnje izvora potrebne energije u neposrednoj blizini namjenskih sustava, postavlja se zahtjev da odabrani distribucijski kabeli u potpunosti održe postavljenu stalnost opskrbe.

2. NAMJENSKI SUSTAVI

Namjenski sustavi mogu po funkcionalnosti biti:

- sustavi za potrebe ministarstva obrane
- sustavi za potrebe radio-televizije
- ostali namjenski sustavi

Obzirom na svoj smještaj, gotovo svi namjenski sustavi smješteni su na brdskim vrhovima a u geološkom pogledu smješteni su u pravilu na krškom području, riječe u pošumljenom. Ovi sustavi mogu biti veći ili manji potrošači električne energije te govorimo o njihovom radu na niskom ili visokom naponu. Sa izliza sigurnosti i funkcionalnosti, svi ovi namjenski sustavi u stalnom su i neprekidnom radu, što znači da moraju imati i stalnu i neprekidnu opskrbu električnom energijom.

Iz do sada navedenog može se zaključiti da nepraktičnost stalnog izvora električne energije u neposrednoj blizini namjenskih objekata pred projektante postavlja ozbiljan zahtjev: kakav kabel upotrijebiti za napajanje ovih sustava?

3. KARAKTERISTIKE UGROŽENIH PODRUČJA

Već je navedeno da su namjenski sustavi smješteni pretežno na kraškim brdskim vrhovima, sa visokim specifičnim električnim otporom tla, reda $10.000 \Omega \cdot m$. U kombinaciji i sa direktnim udarima gromova u kabel ili u neposrednu blizinu kableske trase, mogu nastajati termomehanička oštećenja plašta i ekrana kabela. Naponski probij izolacije malo je vjerojatan, zbog veoma visoke probojne čvrstoće izolacije, ali u određenim slučajevima često moguće. Zbog toga se i najveća pažnja posvećuje mogućnosti lokalnog razaranja ekrana, oštećenja eventualnih poluvodljivih slojeva i izolacije u ponovljenim udarima groma na kabel.

Praktična iskustva na već izgrađenim kableskim vezama, u područjima sa visokim specifičnim električnim otporom tla, ukazuje na to da se tehnika zaštite ovakvih veza u mnogočemu razlikuje od uobičajnih zaštitnih mjera koje se praktički sprovode na podzemnim kabelima. U početku izgradnje ovakvih kableskih veza problematika prenapona na kabelima tumačila se kao povremena pojava, a ne kao rezultat nekih određenih zakonitosti. Sa sve većim brojem kableskih veza, bilo energetske zasebno ili u kombinaciji sa telekomunikacijskim vezama, dolazimo do zaključka da griješke uslijed prenapona nisu slučajnog karaktera već da nastaju po nekom određenom pravilu.

Svako atmosfersko pražnjenje određeno je količinom električnog naboja Q [As], jačinom struje groma I [A] i vremenom t_g [s] u kojem maksimalna amplituda struje groma padne na polovinu svoje vrijednosti. Za vrijeme odvijanja procesa nastanka različitih prenapona na kableskim vezama, ovi parametri toka imaju svoju odlučnu ulogu. Navedene veličine su vrlo promjenljive. Duža vremenska praćenja daju neke određene statističke vrijednosti navedene u Tablici I.

Opsežnija teoretska razmatranja ovog problema mogu se naći u literaturi 1,3 i 4 iz popisa ovog referata, gdje su detaljno obrađeni raspodjela potencijala u ovisnosti o specifičnoj električnoj vodljivosti tla te mjestu udara groma u zemlju u odnosu na položaj kabela:

- udar groma u tlo iznad ili u blizini kableske trase
- udar groma u početku (završetak) kableskog voda
- utjecaj prenapona iz vodova povezanih s kabelom galvanski ili preko transformatora.

Opći je zaključak da je najefikasnija zaštita ovih kabela polaganje dodatnog neizoliranog vodiča paralelno kableu. Protjecanje dijela struje groma kroz ovaj dodatni vodič uzrokuje na njemu pad napona i pojavu razlike potencijala dodatni vodič - ekran kabela. Međutim, praksa je pokazala da na mjestu probijanja dodatni vodič - ekran kabela nastaju znatna mehanička i termička oštećenja koja mogu nakon nekog vremena dovesti do probijanja izolacije kabela. Da se to spriječi, potrebno je dodatni vodič galvanski spojiti s ekranom kabela u razmacima manjim od udaljenosti na kojoj se javlja probojni napon dodatni vodič-ekran kabela. Na taj način se izjednačuje njihov

potencijal, a ujedno omogućavamo smanjenje struje koja protiče kroz ekran kabla te time smanjujemo i razliku potencijala ekran-vodič kabla.

Tablica I.: Značajke atmosferskih pražnjenja

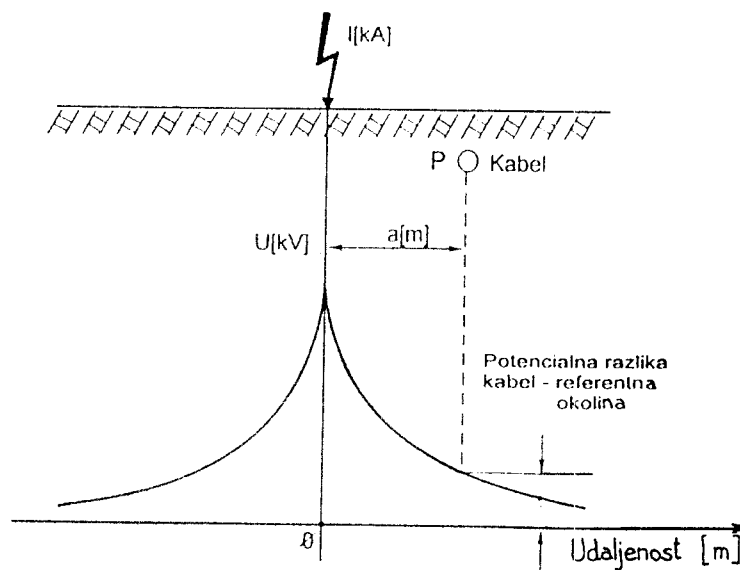
Učestalost	Amplituda toka	Naboj Q u brdovitim predjelima	Čelo toka dI/dt
%	kA	As	kA/ μ sck
20	10	4	30 - 140 *
70	10 - 50	4 - 70	30 - 140 *
8	50 - 100	70 - 200	30 - 140 *
2	100 - 250	200 - 600	30 - 140 *

* Radi se o mjerenju struja groma na antenskom stupu pored Garmisch-Partenkirchena u ljetu 1993. godine, kao najveća do sada izmjerena vrijednost čela udarnog toka struje groma. Zbog toga se preporuča za teoretske proračune upotrebljavati vrijednosti od 30 kA/ μ sck (do sada preporučena vrijednost) do 140 kA/ μ sck.

Iz navedenih razmatranja nameće se nova konstrukcija kabla otpornih na atmosferske prenapone, tj. da se umjesto izolacijskog plašta kabla postavlja plašt od odgovarajućeg slabovodljivog materijala, iznad kojeg se postavlja električki ekran od metalnog vodiča otpornog na koroziju.

4. POTENCIJALNO POLJE U OKOLICI UDARA ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA

Ukoliko dođe do udara groma u zemlju, nastane u okolini udara odgovarajući veliki pad napona - "potencijalni ljevjak". Raspodjela potencijala na površini zemlje zavisi smo o jačini struje i specifičnog električnog otpora okolnog tla.



Slika 1.: Potencijalno polje u okolini mjesta udara groma

Ukoliko se kabel nađe u "potencijalnom ljevku" nastaje između vodiča u kabelu i zemlje znatna potencijalna razlika. Napon između točke P koja se nalazi na udaljenosti "a" od mjesta udara groma i neutralne referentne okoline može se za homogeno zemljište specifičnog električnog otpora ρ_z izračunati iz slijedeće jednadžbe:

$$U_p = I \frac{\rho_z}{2\pi a} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

U Tablici II. su dane vrijednosti U_p za dvije vrijednosti specifičnog električnog otpora zemljišta u odnosu na udaljenosti "a" i za jakost toka struje groma 100 kA.

Ako je udaljenost "a" dovoljno mala, nastane proboj u tlu i praktično kabel preuzme cijelu struju groma. Udarom groma u zemlju nastaju relativno velike potencijalne razlike. Zaključujemo da kabel nije dovoljno zaštićen od proboja zbog ovih potencijalnih razlika samo pomoću plašta od PVC ili PE, jer su ove potencijalne razlike toliko velike da ne možemo spriječiti proboj plašta kabela povećavanjem njegove debljine u razumno ekonomsko-tehničkim granicama. Zaštita se ostvaruje ugradnjom ekrana ispod i iznad plašta, opisano u točki 3 ovog referata.

Tablica II.: Karakteristične vrijednosti U_p

I=100 kA	U_p [kV]	
Udaljenost "a"	$\rho_z = 100$	$\rho_z = 1000$
m	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{m}$
20	80	8000
50	32	3200
100	16	1600
200	8	800
500	3,2	320

5. FAKTOR DOBROTE

Faktor dobrote je karakteristični parametar konstrukcije kabela, kao mjera otpornosti kabela na atmosferska pražnjenja, koji se može prikazati jednačinom:

$$G = \frac{U_k}{Z_p} \quad [\text{kA} \cdot \text{km}] \quad (2)$$

gdje su:

G - faktor dobrote [$\text{kA} \cdot \text{km}$]

U_k - probojna čvrstoća izolacije kabela [kV]

Z_p - prolazna impedancija ekrana kabela, prema:

$$Z_p = \frac{R_1 \times R_2}{\sqrt{R_2^2 + X^2}} \quad [\Omega/\text{km}]$$

gdje su:

R_1 - omski otpor vanjskog ekrana kabela [Ω/km]

R_2 - omski otpor unutarnjeg ekrana [Ω/km]

X - induktivni otpor kabela [Ω/km]

Iz navedenih jednačina 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 $t_g = 100 \mu s$, specifični električni otpor tla $\rho_z = 10.000 \Omega m$ i probojne čvrstoće zemljišta; $E_z = 3 \text{ kV/cm}$:

- omski otpor I ekrana, $R_1 = 0,0985 \Omega/km$
- omski otpor II ekrana, $R_2 = 0,727 \Omega/km$
- probojna čvrstoća izolacije kabela, $U_k = 18 \text{ kV}$
- induktivni otpor, $X_L = 0,080 \Omega/km$
- potencijal na mjestu udara groma 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 groma unutar kojeg dolazi do proboja nezaštićenog kabela tipa PPOO-A 4x150 mm² 0,6/1 kV:

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

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

$$U_{gk100} = 0,08675 \sqrt{10^4 \times 10^{-4}} \times 50 = 4,34 \text{ kV} < 18 \text{ kV}$$

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

$$U_{gk100} + 3 \times U_{gk100} = 13 \text{ kV} < 18 \text{ kV}$$

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 kabeu 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 .

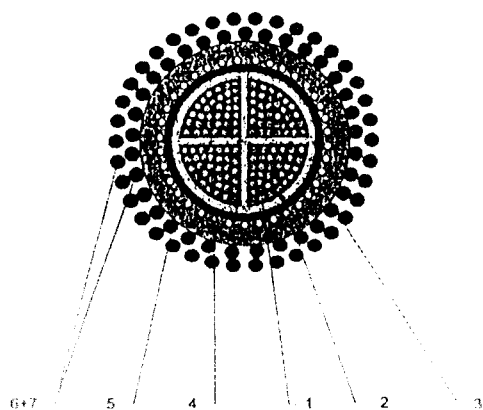
S tog razloga su ovi kabeli izuzetno pogodni za napajanje objekata i izvedbu distributivne mreže u sustavima posebne namjene u izuzetno teškim geološkim područjima.

6. 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.

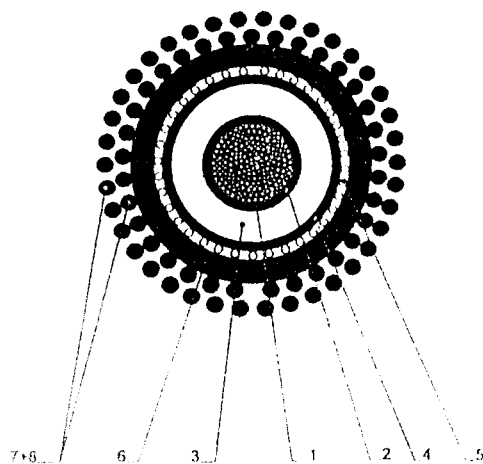
Ovom konstrukcijom kabela dobiven je faktor dobrote kabela 100 kA·km. Propisani podnosivi udarni napon za kabele naponskog nivoa 20 kV iznosi 125 kV za val 1,2/50 μs . Već ovako velike značajke ovih kabela ukazuju da se radi o kabelima koji zadovoljavaju dosadašnja saznanja o strujama groma. Najveće do sada izmjerene struje groma (400 kA) navode naša razmišljanja prema dodatnoj zaštiti kabela. Kako se ugroženost kabeleske izolacije 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 $\geq 1000 \text{ kA} \cdot \text{km}$. 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 2 i 3 prikazane su nove konstrukcije 1 kV i 20 kV energetske kabele otpornih pred djeclovanjem struje groma u ekstremno zahtjevnim uvjetima.



Slika 2.: Presjek kabela PPh 91

- 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 3.: Presjek kabela XHEh 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

U Tablici III. dati su osnovni konstrukcijski podaci za tipizirane nove konstrukcije 1 kV kabela. Svi važniji električni podaci za iste konstrukcije kabela nalaze se u Tablici IV.

Tablica III.: Konstrukcijski podaci kabela 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 IV.: 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 V. dati su osnovni konstrukcijski podaci za tipizirane nove konstrukcije 20 kV kabela. Svi važniji električni podaci za iste konstrukcije kabela nalaze se u Tablici VI.

Tablica V.: 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

7. 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:

- istosnijernim 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.

Tablica VI.: Električni podaci kabela XHEh 91-A 20 kV

Konstrukcija kabela		$n \times \text{mm}^2$	1x70/16/(60+75)	1x150/25(75+80)
Najveća vrijednost otpora vodiča kod	20°C	Ω/km	0,443	0,206
	90°C	Ω/km	0,5680	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 kratkim spoju	°C	250	250
Strujno opterećenje		A	230	345
u zemlji		A	240	360
Struja kratkog spoja u	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.

LITERATURA:

1. "Djelotvoran način šticeanja podzemnih kabelaških trasa od udara groma na nepovoljnim terenima", autori: Josip Mužny, Branko Tokić, Dragan Nikolić, Petko Rosić, Danimir Selišek - VIII Simpozij o energetskim kabelima, Donji Milanovac, 1982.
2. Proizvodne informacije ELKA: "Kabel za polaganje u tla visokog električnog otpora u grmljavinskim područjima".
3. "Telekomunikacijski kablovi i atmosferska pražnjenja", autor: Jože Pungertl.
4. "Konstrukcija elektroenergetskoga kabla otpornoga pred djelovanjem strele v ekstremno zahtjevnih pogojih", autori Jože Pungertl, Zdravko Pamić.
5. ISE-A 003: Energetski kabeli za nazivne napone od 1 kV do 35 kV (ISE-Interni standard ELKA).

