

Ispitivanje specifične toplotne otpornosti i vlažnosti kablovske posteljice u laboratorijskim uslovima

Ninoslav Simić¹, Stefan Obradović¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
ninoslav.simic@ieent.org

Kratak sadržaj: U ovom radu su najpre ukratko predstavljeni primeri promene maksimalne dozvoljene struje za jedan kabl u zavisnosti od vrednosti specifične toplotne otpornosti zemljišta ρ_z . Istaknuta je projektantska praksa da se za proračun trajno dozvoljenog strujnog opterećenja kabla usvaja konstantna vrednost ρ_z . Potom su za dva slučaja, uzorka neporemećenog zemljišta sa kablovske trase i uzorka posebno pripremljene kablovske posteljice, primenom metode iglaste sonde u laboratoriji dobijene vrednosti ρ_z . Ukazano je na razlike u izmerenim vrednostima specifične toplotne otpornosti i vlažnosti uzorka prilikom ispitivanja uzorka isušivanjem u termokomori i isušivanjem na temperaturi ambijenta. Za isušivanje u termokomori su, na osnovu iskustava za kabl sa izolacijom od umreženog polietilena, odabrane temperature u opsegu od 60°C do 90°C, dok je u drugom slučaju temperatura oko 20°C u dužem vremenskom periodu. Dobijeni rezultati su analizirani i prikazani tabelarno i grafički. Na kraju rada izračunata je vrednost vlažnosti uzorkovane kablovske posteljice, koja odgovara vrednosti ρ_z od 1 (K m/W) i dat je predlog sastava odgovarajuće posteljice koja omogućava projektovanu vrednost trajnog dozvoljenog strujnog opterećenja kabla.

Ključne reči: energetski kabl, specifična toplotna otpornost zemljišta, isušivanje zemljišta, temperatura, kablovska posteljica.

1. Uvod

Prilikom proračuna trajno dozvoljenog strujnog opterećenja energetskih kablova, koji se polažu pod zemljom, neophodno je poznavati vrednosti sledećih veličina:

- specifična toplotna otpornost zemljišta: ρ_z (K m/W)
- temperatura zemljišta: θ_z (°C)
- vlažnost zemljišta: w_z (%)

Ovi podaci se posmatraju u sloju zemljišta na dubini polaganja

energetskih kablova i direktno utiču na njihovu pouzdanost u eksploataciji. Treba razumeti da kablovi tokom polaganja na kablovskoj trasi prolaze kroz zemljište različitog sastava, dok je dubina polaganja kabla promenljiva u gradskim zonama (npr. za kablove 110 kV od 1,5 m do čak 5 m, kao na primeru trase TS Beograd 23 – TS Beograd 45, ne delu deonice 2, u dužini od 160 m), što je uslovljeno postojanjem drugih instalacija. Najbitniji parametar od prethodno pomenutih, jeste specifična toplotna otpornost zemljišta, koji zavisi i od vlažnosti zemljišta. Pri tome je gubitak vlage u zemljištu uslovljen dugoročnim procesima isušivanja u samoj blizini kabla koji je opterećen, ili npr. grupa kablova koji se vode u blizini posmatranog kablovskog voda, toplovoda ili drugim procesima prilikom izgradnje objekata koji dovode do isušivanja zemljišta. Iz ovoga je jasno da tokom jedne godine, u zimskom i letnjem periodu realno postoje različite vrednosti specifične toplotne otpornosti, vlažnosti i temperature zemljišta. Takođe, specifična toplotna otpornosti zavisi i od:

- vrste, odnosno porekla zemljišta (glina, pesak, mešavine, frakcija granuliranih agregata; posebno kod peska i mešavina važan je mineraloško-petrografski sastav)
- granulometrijskog, odnosno pedološkog sastava
- vlažnosti tj. sadržaja vode (odnosno od topografskih i meteoroloških uslova)
- zapreminske mase u isušenom stanju
- stepena zbijenosti
- oblika i veličine zrna
- sadržaja kvarca, ugljenika, oksida metala i drugih dodataka
- razvijene zapreminske toplote u zemljištu.

Prvi način za određivanje vrednosti ρ_z , je usvajanje vrednosti specifične toplotne otpornosti, uglavnom 1 ili 1,2 (K·m/W). Na ovaj način se često dobije veće dozvoljeno strujno opterećenje nego što je realno moguće, pa u praksi dolazi do pregrevanja izolacije kabla. Drugi način je ispitivanje tla na predviđenoj kablovskoj trasi, te usvajanje ekstremne vrednosti ρ_z za koju je dozvoljeno strujno opterećenje najmanje. U ovom slučaju bi se zbog jedne deonice kabla sa većim ρ_z ograničila struja kroz kabl, pa isti ne bi bio dovoljno iskorišćen. Treba imati u vidu da kompanije za prenos električne energije imaju usvojene tipizirane vrednosti poprečnih preseka kablova na visokom naponu. U ranijim godinama, problem sa isušivanjem zemljišta i povećanjem vrednosti ρ_z nije bio od značaja, jer su se primenjivali kablovi sa velikim poprečnim presekom (npr. za 110 kV, Al 1000 mm²). Danas se zbog povećanja opterećenja u gradskim centrima razmatra usvajanje većih poprečnih preseka kablova, te trenutno ostaje problematika ograničenja dozvoljenog strujnog opterećenja kabla (trajno dozvoljena temperatura izolacije kabla tipa XLPE je 90°C). U tabeli 1 su date karakteristične vrednosti strujnih opterećenja.

TABELA I DOZVOLJENA STRUJNA OPTEREĆENJA 110kV KABLOVSKOG VODA TIPA XHE 49-A U ZIMSKOM I LETNJEM PERIODU ZA PROMENLJIVO (DISTRIBUTIVNO) OPTEREĆENJE, PRORAČUN PREMA IEC 60853-2 ZA 1 (K m/W) i 1,2 (K m/W) (IZVOR TP 3 JP EPS IZ 2012)

Tip kabela	Presek kabela (mm ²)	ρ_z (K m/W)	Naznačena struja i snaga		Dozvoljena opterećenja 110 kV kablovskog voda zimi i leti			
			I_{nd} (A)	S_{nd} (MVA)	I_{dozZ} (A)	S_{dozZ} (MVA)	I_{dozL} (A)	S_{dozL} (MVA)
XHE 49-A	630	1,0	726	138	777	148	726	138
		1,2	675	128	723	138	675	128
	800	1,0	797	152	853	162	797	152
		1,2	741	141	793	151	741	142
	1000	1,0	878	167	939	179	878	167
		1,2	816	155	873	166	816	155

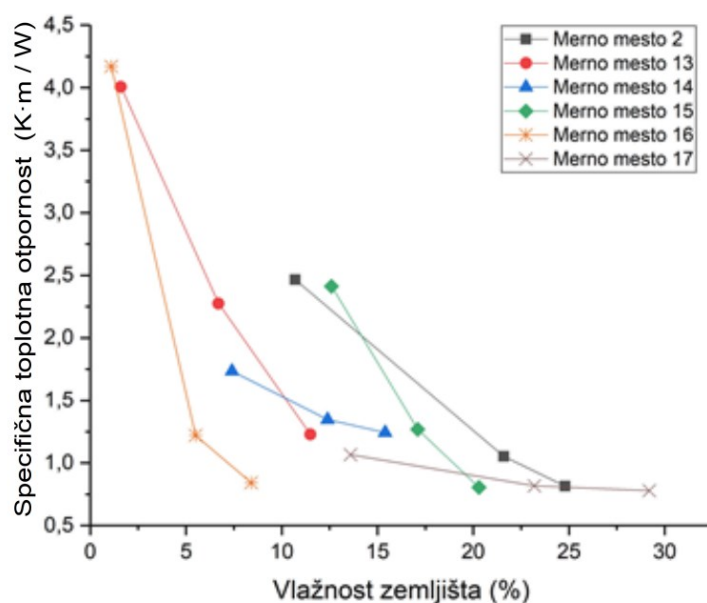
ρ_t (K m/W) - spec. toplotna otpornost tla; broj_{kabl} =1; zimi; $\theta_t = +10\text{ C}^\circ$; leti; $\theta_t = \theta_{ref} = +20\text{ C}^\circ$;
 Promenljivo (distributivno) opterećenje: $m = 0,8$. Nema isušivanja tla oko kabela.
 I_{nd} (S_{nd}) – naznačena dozvoljena struja (snaga) kablovskog voda;
 I_{dozZ} (S_{dozZ}) - dozvoljena struja (snaga) kablovskog voda u zimskom periodu;
 I_{dozL} (S_{dozL}) - dozvoljena struja (snaga) kablovskog voda u letnjem periodu;

Stoga je najbolje rešenje primena odgovarajuće kablovske posteljice na lokacijama koje su definisane ispitivanjem sa primetnim isušivanjem zemljišta, pa i sve češće polaganje kabela duž cele kablovske trase u odgovarajuću kablovsku postelnicu, čime se značajno poboljšava odvođenje toplote sa površine kabela. Sastav ove kablovske posteljice je zapravo mešavina pripremljena od određenih procenata frakcije granuliranih agregata (fga 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm sa i bez dodatka cementa), a odnos fga zavisi od željene vrednosti ρ_z . U tom smislu najjednostavnije je izmeriti vrednost specifične toplotne otpornosti već pripremljene mešavine u koju se planira položiti kabl.

Merenje specifične toplotne otpornosti u laboratorijskim uslovima se može obaviti primenom metode grejne ploče ili metodom iglaste sonde u prelaznom stanju zagrevanja [1]. Pri tome je neophodno izmeriti i vrednost vlage ispitivanog uzorka. U ovom radu će se analizirati rezultati dobijeni metodom iglaste sonde, a isti mogu biti primenjeni i za analizu neporemećenih uzoraka zemljišta uzetih sa kablovske trase. Vlažnost uzorka zemljišta se izražava u procentima kao sadržaj vode u odnosu na zapreminu uzorka.

2. Rezultati ispitivanja specifične toplotne otpornosti i vlažnosti zemljišta

Na predviđenoj trasi kablovskog voda 110kV, dužine oko 5 km, je opremom za uzimanje neporemećenog uzorka zemljišta (cilindrima za Proktorov ogled) prikupljeno više uzoraka. Vrsta zemljišta je većinom pesak kombinovan sa šutom, te ilovača na pojedinim deonicama, a dubina uzorkovanja je oko 150 cm. Iskustveno, po pravilu se uzimaju oko 4 uzorka po 1 km trase kabla, pa je u okviru ovog ispitivanja prikupljeno 17 uzoraka. Potom je ispitana vrednost specifične toplotne otpornosti i vlažnosti, a zatim su uzorci isušivani u termokomori u dva koraka, pri 60°C i 90°C u trajanju od 90 minuta. Temperature zagrevanja su odabrane shodno očekivanoj temperaturi kabla (na osnovu projektne dokumentacije kabl je većeg preseka i ne očekuje se temperatura preko 60°C, a samo u izuzetnim slučajevima kabl je predviđen za privremena velika opterećenja u havarijskim isključenjima, pa je uzeta vrednost od 90°C za XLPE izolaciju). Vreme od 90 minuta po jednom ciklusu sušenja je odabrano iskustveno. Cilj ovog ispitivanja je doneti zaključak o tome da li se kabl može položiti u postojeće zemljište na predviđenoj trasi. Rezultati ispitivanja na pojedinim uzorcima, koji su bili isušivani kako na 60°C, tako i na 90°C su predstavljeni na slici 1. Dodatno, uzorci broj 1, 4, 8 10 i 12 su bili isušivani u termokomori samo pri temperaturi 60°C, dok su uzorci broj 5, 6, 7, 11 bili isušivani u termokomori samo u pri temperaturi 90°C i ove dobijene vrednosti su upoređivane prema sa rezultatima ispitivanja uzoraka sa slike 1.



Slika 1. Vrednosti specifične toplotne otpornosti neporemećenih uzoraka zemljišta na budućoj kablovskoj trasi

Dakle, za svaki uzorak sa slike 1 određene su tri tačke: na temperaturi ambijenta u trenutku uzorkovanja, te nakon oglada zagrevanja na 60°C u trajanju 90 min, i zagrevanja na 90°C u trajanju 90 min. Na osnovu slike 1 vidi se da postoje velike vrednosti ρ_z za krivu broj 13 pri prvom koraku zagrevanja do 60°C, dok je značajan gradijent za temperaturu uočen kod krive broj 16, ali i za merna mesta 2 i 15 pri zagrevanju od 90°C, s tim da u preostala dva primera vrednost nije prešla 2,5 (K m/W).

Prednosti ovakvog načina određivanja specifične toplotne otpornosti tla su sledeće:

- Ispitivanje je jednostavno i može se obaviti skoro na svim terenima, osim tamo gde je tlo izuzetno kamenito. Sa obzirom da su kablovi većinom položeni u gradskim područjima ispitivanje je primenljivo i ne zahteva mnogo vremena.
- Ponovljivost ispitivanja postoji, rezultati pokazuju sličnost za iste lokacije uzorkovanja.
- Moguće je uzorkovati kako neporemećeno zemljište, tako i kablovsku posteljicu u otvorenom rovu ili nakon zatrpavanja.
- Za izvođenje kompletnog oglada dovoljno je 1-2 dana.

Nedostaci ovakvog načina određivanja specifične toplotne otpornosti tla su sledeći:

- Nakon svakog vremenski definisanog perioda u termokomori uzorak je potrebno ostaviti da se ohladi na temperaturu ambijenta, pa tek potom dalje ispitivati i zagrevati .
- Primenom iglaste sonde, kao i primenom uređaja za merenje vlažnosti potrebno je ostvariti dobar kontakt između uzorka i sonde, u suprotnom su rezultati sa vidljivim odstupanjem vrednosti.
- Mali broj tačaka krive nije odgovarajući za dobru procenu uzorka u pogledu vrednosti ρ_z .
- Prilikom isušivanja uzorka u termokomori dolazi do stvrdnjavanja i rasipanja istog, te umetanje iglastih sondi u uzorak nije uvek moguće, čime se dalje ispitivanje prekida. Zbog toga je potrebno imati rezervne uzorke uzete sa iste lokacije da bi se ispitivanje nastavilo (npr. uzorci broj 1, 7, 12 su nakon zagrevanja bili neupotrebljivi za dalje ispitivanje zbog rastresitosti).

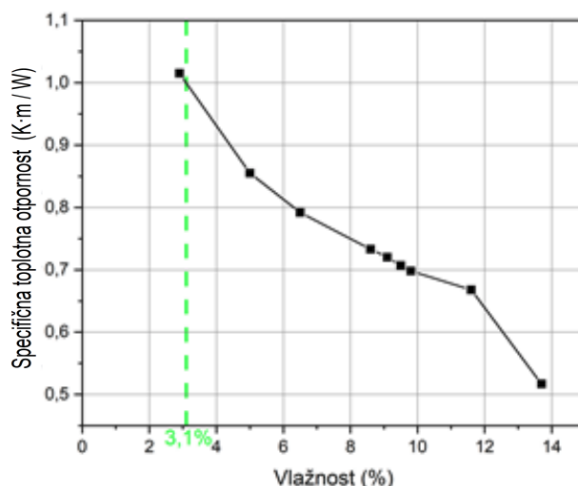
3. Rezultati ispitivanja specifične toplotne otpornosti i vlažnosti pripremljenog uzorka specijalne mešavine za kablovsku posteljicu

Na osnovu slike 1 jasno je da su vrednosti specifične toplotne otpornosti daleko od željenih vrednosti od oko 1 (K m/W). U realnosti, ova vrednost je veoma promenljiva ukoliko je vrednost vlažnosti zemljišta ispod 20%. Za veće vrednosti vlage zemljišta od 20% opisani način ispitivanja daje veoma dobre rezultate. Iz ovoga sledi, da je za manje vrednosti vlažnosti zemljišta primena specijalnih mešavina za kablovsku posteljicu neminovna.

Zbog toga je u praksi usvojena ideja da se za poznati tip zemljišta unapred pripremi specijalna mešavina za kablovsku posteljicu, čija se vrednost specifičnog toplotnog otpora ispituje u toku projektovanja. Pri tome uzorci mogu biti veće zapremine, homogeniji, nego u slučaju uzorkovanja iz neporemećenog zemljišta, gde je uzorak definisan prečnikom i visinom cilindra za uzorkovanje. Da bi se eliminisali nedostaci prethodno opisanog načina ispitivanja, ispitne sonde se postavljaju u uzorak i ne pomeraju se do kraja ogleada. Uzorak se ispituje prirodnim isušivanjem na temperaturi ambijenta u dužem vremenskom periodu (od 15 do 21 dan). Vrednosti specifičnog toplotnog otpora i vlažnosti se prate dva do tri puta dnevno, te se sa ovako većim brojem tačaka dobijaju odgovarajuće krive. Potom se sa dobijenih grafikona određuju vrednosti specifične toplotne otpornosti i vlažnosti zemljišta od interesa. Rezultati ovog načina ispitivanja su dati u tabeli II i na slici 2. Izmerene vrednosti temperature ambijenta za vreme ispitivanja su se kretale od 19,4°C do 22,2°C.

TABELA II REZULTATI ISPITIVANJA UZORKA SPECIJALNE MEŠAVINE KABLOVSKE POSTELJICE

r.br	Specifična toplotna otpornost ρ_z (K m/W)	Vlažnost (%)
1.	0,517	13,7
2.	0,688	11,6
3.	0,698	9,8
4.	0,707	9,5
5.	0,720	9,1
6.	0,733	8,6
7.	0,792	6,5
8.	0,855	5,0
9.	1,015	2,9



Slika 2. Izmerene vrednosti specifične toplotne otpornosti uzorka posteljice (specijalne mešavine).

Granica vlage pri kojoj posteljica dostiže vrednost specifične toplotne otpornosti od 1 (K m/W) je 3,1%. Ove vrednosti projektanti koriste za određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja kablova [2]-[5]. Nakon polaganja kablova u kablovski rov potrebno je još jednom nasumično uzorkovati posteljicu, u cilju potvrde da se radi o istoj mešavini koja je ispitivana u laboratoriji. Sa obzirom da su već dobijene krive zavisnosti specifične toplotne otpornosti od vlažnosti zemljišta, ovo ispitivanje se obavlja u toku dana.

4. Zaključak

Smatra se da isušivanje tla počinje kada specifična toplotna otpornost tla oko kabla, zbog porasta temperature i gubitka vlažnosti dostigne vrednost 2,5 (K m/W), odnosno kritična temperatura zemljišta dostigne vrednost 30°C, prema [6]. Izmerene vrednosti specifične toplotne otpornosti zemljišta, na uzorcima uzetim sa predviđene kablovske trase, veće su od vrednosti 1-1,2 (K m/W), što se u većini slučajeva uzima kao konstantna vrednost u projektnoj dokumentaciji. Takođe premašena je i vrednost od 2,5 (K m/W) tokom ciklusa zagrevanja. Problem isušivanja zemljišta oko kabla može da se reši na dva načina:

1. Primeniti kablovsku posteljicu od posebno pripremljene mešavine peska i šljunka, koja i u isušenom stanju ima dobre karakteristike odvođenja toplote.
2. Smanjiti trajno dozvoljeno strujno opterećenje kabla ili povećati presek kabla do vrednosti koje ne izazivaju isušivanje tla.

U cilju smanjenja vrednosti specifične toplotne otpornosti preporučuje se polaganje kablovskog voda u odgovarajuću kablovsku posteljicu, koja je pripremljena od određenih procenata frakcije granuliranih agregata (fga), sa ili bez dodatka cementa, npr:

fga 0-4 (jedinica)	70%
fga 4-8 (dvojka).....	15%
fga 8-16 (trojka).....	15%

U svrhu spravljanja kablovske posteljice koristi se rečni pesak „dunavac“ ili „moravac“ koji ima veći sadržaj kvarca. Ne preporučuje se korišćenje mlevenog kamena iz kamenoloma, jer isti nema odgovarajući sastav, a pri tom zbog oštih ivica može oštetiti spoljni omotač kabla.

Za potpuni uvid u temperaturu kabla na toplotno kritičnim mestima tokom eksploatacije neophodno je ugraditi monitoring temperature [7], bilo postavljanjem termoparova u zemljištu, ili putem senzora ugrađenog na kablju (DTS - fiber). Korak dalje bi bilo postavljanje sonde za merenje vlage na toplotno kritičnim mestima, te bi se njihovim očitavanjem u svakom momentu mogla odrediti mogućnost preopterećenja kablova u vanrednim režimima

rada. U tom slučaju bi bilo moguće optimalno iskorišćenje kablovskih vodova u realnom vremenu.

Literatura

- [1] *IEEE Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials*, IEEE Std 442™-2017 (Revision of IEEE Std 442-1981)
- [2] *Electric cables – Calculation of the current rating –Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance* IEC 60287-2-1 :2015
- [3] *Standard Power Cable Ampacity Tables* IEEE Standard 835-1994, , IEEE, NY, USA, 1994.
- [4] Hyunjun Oh, „Thermal Resistivity Dry-Out Curves for thirteen Sandy Soils“ University of Wisconsin-Madison, 2014.
- [5] Neher, M.H. Mc Grath, The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems, *AIEE Trans.* (3) (1957) 752e772.
- [6] JP EPS – Direkcija za distribuciju - Tehnička preporuka broj 3: 2012, V izdanje „Osnovni tehnički zahtevi za izbor i montažu energetskih kablova i kablovskih pribora u elektrodistributivnim mrežama 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV, 110 kV“
- [7] Studija 351109 Sistem za merenje i monitoring temperature plašta 110kV kablova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, 2015.

Abstract: This paper at first hand briefly presents examples of the maximum permitted current changes for one cable depending on the specific thermal resistance soil value ρ_z . It is emphasized that the permanently permissible current load of the cable should be calculated using a constant value ρ_z in design - Then, for two cases from field, two samples were examined. The first sample is undisturbed soil from the cable route and the second sample is specially prepared cable bed. The corresponding ρ_z values were obtained using the needle probe method in the laboratory. The difference is pointed out between the measured values of specific thermal resistivity and moisture of the samples. Some samples were being dried in thermal chambers and the others were being dried on ambient temperature. For drying in thermal chambers, based on experience for cross-linked polyethylene cables, the temperatures of 60°C to 90°C were selected for the first case while in the second case the temperature of 20°C over a long period of time was applied. The results obtained were analyzed and shown in appropriate tables and graphs. At the end of this paper the moisture of the soil was calculated for sampled cable bed that corresponds to the value of ρ_z of 1(Km/W). The composition of the cable bed that allows the designed value of the rated power of the cable to be achieved is proposed.

Keywords: power cable, specific thermal resistivity of the soil, soil drying, temperature, cable bed

The Examination of the Specific Thermal Resistivity And Moisture of Cable Bed In Laboratory Conditions

Ninoslav Simić, Stefan Obradović

Rad primljen u uredništvo: 29.11.2022. godine

Rad prihvaćen: 05.12.2022. godine

