

**PRORAČUN MINIMALNOG POPREČNOG PRESEKA PARALELNOG PROVODNIKA
UZEMLJENJA ZA PODZEMNE ENERGETSKE KABLOVE U TROUGAONOJ FORMACIJI SA
METALNIM EKRAMIMA UZEMLJENIM NA JEDNOM KRAJU**

**CALCULATING MINIMUM CROSS-SECTIONAL AREA OF THE PARALLEL-EARTHING-
CONDUCTOR FOR UNDERGROUND POWER CABLES IN TREFOIL FORMATION WITH
METALLIC SCREENS BONDED AND EARTHED AT ONE END**

Marko ŠUĆUROVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Čačak, Srbija
Dardan KLIMENTA, Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Kosovska Mitrovica, Srbija
Dragan TASIĆ, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Dobro je poznato da su za tri jednožilna podzemna kabla u trougaonoj formaciji, čije su dužine manje od 500 m i čije su površine poprečnih preseka provodnika veće od 630 mm², metalni ekrani međusobno galvanski spojeni i uzemljeni na paralelni provodnik uzemljenja samo na jednom kraju, dok je drugi kraj povezan sa istim paralelnim provodnikom uzemljenja preko ograničavača napona na metalnim ekranima. Minimalna površina poprečnog preseka paralelnog provodnika uzemljenja može se odrediti primenom stvarnog poprečnog preseka provodnika i materijala provodnika u skladu sa nekim od relevantnih standarda, ili izračunati na osnovu parametara performansi kratkog spoja. Prva metoda je konzervativna i često daje uvećan poprečni presek paralelnog provodnika uzemljenja, dok druga daje identične ili manje poprečne preseke paralelnog provodnika uzemljenja. U ovom radu su date metode prikazane i međusobno upoređene. Proračuni minimalne površine poprečnog preseka paralelnog provodnika uzemljenja izvršeni su za dva različita podzemna voda sa energetske kablovima tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1×800 mm² 19/33 kV i Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1×1000 mm² 19/33 kV (prema BS 6622), pod pretpostavkom da su kablovi položeni direktno u zemljište bez isušivanja. Pretpostavlja se da je paralelni kabl uzemljenja jednožilni, sa bakarnim provodnikom i PVC izolacijom tipa V-75. Takođe se pretpostavlja da je paralelni kabl uzemljenja položen paralelno sa faznim energetske kablovima. Struje kratkog spoja za razmatrane kablove preuzete su iz tehničke dokumentacije proizvođača, uzimajući u obzir da vreme otklanjanja kvara iznosi 1 sekundu.

Ključne reči: metoda uzemljenja metalnih ekrana, paralelni provodnik uzemljenja, podzemni energetski kabl, površina poprečnog preseka, trougaona formacija

ABSTRACT

It is well-known that for three single-core underground cables in trefoil formation, whose lengths are less than 500 m and whose conductors' cross-sectional areas are greater than 630 mm², the metallic screens are solidly bonded together and earthed to a parallel-earthing-conductor at one end only, while the other end is connected to the same earthing-conductor through voltage limiters of metallic screens. A minimum cross-sectional area of the parallel-earthing-conductor can be determined using the actual conductor size and the conductor material in accordance with some of the relevant standards, or calculated based on the short-circuit performance parameters. The first method is conservative and often over-sizes the parallel-earthing-conductor, while the second one results in smaller cross-sectional areas of the parallel-earthing-conductor. In this paper, the two methods are presented and compared with each other. Calculations of the minimum cross-sectional area of the parallel-earthing-conductor are performed for two different underground lines with power cables of the types Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1x800 mm² 19/33 kV and Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1x1000 mm² 19/33 kV (according to BS 6622), assuming that the cables are laid directly in the soil without drying out. The parallel-earthing-cable is assumed to be single-core, with copper conductor and PVC insulation of the type V-75. It is also assumed that the parallel-earthing-cable is laid in parallel with the phase power cables. Short-circuit ratings for the considered cables are taken from the manufacturer's technical documentation, taking into account that the associated fault clearing time is 1 second.

Keywords: cross-sectional area, metallic screen bonding design, parallel-earthing-conductor, trefoil formation, underground power cable

Dardan Klimenta, FTN u K. Mitrovici, ul. Kneza Miloša br. 7, 38220 K. Mitrovica, Srbija, dardan.klimenta@pr.ac.rs, +381 65 40 666 40

1. UVOD

Vrednost trajno dozvoljene struje srednjenaponskog kablovskog voda zavisi od ambijentalnih uslova, odnosno od temperature, toplotne otpornosti tla i dubine polaganja kablova. Takođe, ova struja zavisi i od konstrukcionih parametara kabla. Usled Džulovih gubitaka dolazi do generisanja toplote u provodniku i metalnom ekranu kabla, dok se kod srednjenaponskih kablova sa izolacijom od umreženog polietilena gubici u dielektriku mogu zanemariti [1]. Gubici u metalnom ekranu nastaju kao posledica postojanja cirkulacionih i/ili vrtložnih struja. Kod jednožilnih kablova cirkulacione struje postoje ukoliko su metalni ekrani galvanski povezani i direktno uzemljeni na oba kraja kablovskog voda. Ukoliko trajno dozvoljena struja kabla ima kritičnu vrednost, tj. ako je njena vrednost približna struji opterećenja, moguće je povećati strujnu opteretljivost kabla smanjenjem gubitaka u metalnom ekranu, odnosno eliminisanjem cirkulacionih struja. U tu svrhu primenjuju se različiti načini za povezivanje i uzemljenje metalnih ekrana, kao što su: transpozicija metalnih ekrana jednožilnih kablova (eng. *cross-bonding system*) ili galvansko povezivanje i direktno uzemljenje metalnih ekrana kablova samo na jednom kraju (eng. *single-point bonding system*). Ovde treba naglasiti da se primenom jednog ili drugog načina za smanjenje cirkulacionih struja ne eliminiše postojanje vrtložnih struja koje takođe utiču na trajno dozvoljenu struju kabla [2].

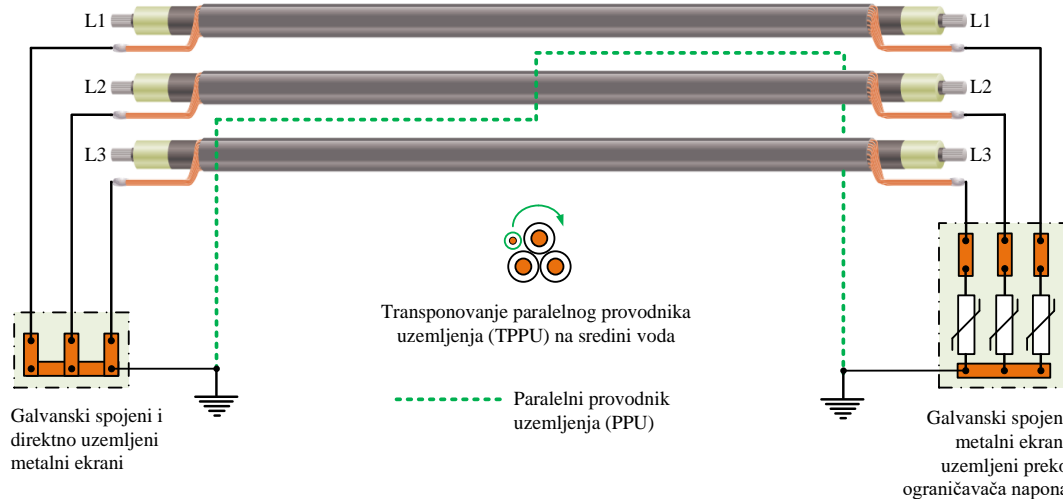
Kod kablovskog voda čiji su metalni ekrani uzemljeni samo na jednom kraju onemogućeno je korišćenje metalnih ekrana kablova kao zaštitnih provodnika kroz koje će proticati struja kvara u slučaju kratkog spoja. Zbog toga se kod primene ovakvog sistema uzemljenja kablovskih ekrana koristi paralelni provodnik uzemljenja (PPU). PPU se polaže paralelno sa energetskim kablovima i vrši galvansko povezivanje lokalnih uzemljivača koji se nalaze na početku i kraju kablovskog voda ili kablovskih sekcija [3]. Površina poprečnog preseka PPU kao zaštitnog provodnika mora da bude takva da njegova izolacija može termički da izdrži struju kvara koja će proticati kroz PPU tokom trajanja kvara. U jednom od relevantnih standarda definisani su minimalni poprečni preseci zaštitnih provodnika, čije vrednosti zavise od materijala i stvarnog poprečnog preseka faznog provodnika. Ove vrednosti su date tabelarno u standardu AS/NZS 3000:2018 [4] i na osnovu njih se usvajaju odgovarajući minimalni poprečni preseci PPU. Drugi način za određivanje minimalne površine poprečnog preseka PPU je korišćenje izraza za toplotni impuls (tzv. Džulovog integrala), koji uzima u obzir vrednost struje kratkog spoja koja će proticati kroz PPU, kao i vreme trajanja kvara [4,5]. Primenom izraza za toplotni impuls uzimaju se u obzir termičke i električne karakteristike materijala provodnika i izolacije od kojih je izrađen PPU. S obzirom da prema standardu BS 6622 za jednožilne kablove sa velikim poprečnim presecima provodnika ($>630 \text{ mm}^2$) pojedini proizvođači preporučuju uzemljenje metalnih ekrana samo sa jedne strane [6], primena PPU se u tom slučaju smatra obaveznom.

U nastavku rada predstavljeni su podzemni kablovski vodovi sa uzemljenjem metalnih ekrana kablova samo na jednom kraju primenom PPU. Zatim, prikazani su načini za određivanje minimalnog nazivnog poprečnog preseka PPU, i to: na osnovu tabličnih vrednosti prema standardu AS/NZS 3000:2018 [4] i primenom izraza koji uzima u obzir intenzitet i vreme trajanja struje kratkog spoja koja protiče kroz PPU. Dati su primeri proračuna poprečnog preseka PPU za kablovske vodove izrađene od kablova tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC $1 \times 800 \text{ mm}^2$ 19/33 kV i Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC $1 \times 1000 \text{ mm}^2$ 19/33 kV.

2. PRIMENA PARALELNOG PROVODNIKA UZEMLJENJA KOD SREDNJENAPONSKIH KABLOVSKIH VODOVA

Galvanskim spajanjem i direktnim uzemljenjem metalnih ekrana jednožilnih kablova samo na jednom kraju voda u potpunosti se eliminiše postojanje cirkulacione struje i gubitaka u metalnim ekranima kablova. Uzemljenje metalnih ekrana samo na jednom kraju obično se izvodi kod kablovskih vodova dužine do 500 m [1]. Razlog za ograničavanje dužine kablovskog voda jeste indukovanje napona u metalnim ekranima. Na jednom od krajeva kablovskog voda, gde su ekrani direktno uzemljeni, indukovani napon jednak je nuli i postepeno raste prema drugom kraju voda. Na drugom kraju voda, koji nije uzemljen, indukovani napon ima maksimalnu vrednost, a ona direktno zavisi od dužine kabla i jačine struje u faznom provodniku [3]. Na neuzemljenom kraju metalni ekrani su međusobno izolovani i povezani sa lokalnim uzemljivačem preko ograničavača napona (odvodnika prenapona) kao što je to prikazano na Slici 1. Ograničavači napona imaju ulogu zaštite izolacionih slojeva kablova između metalnog ekrana i zemlje od tranzijentnih prenapona koji mogu nastati usled atmosferskih pražnjenja i komutacionih operacija [7]. S obzirom da metalni ekrani kablova imaju zaštitnu ulogu, odnosno da prilikom

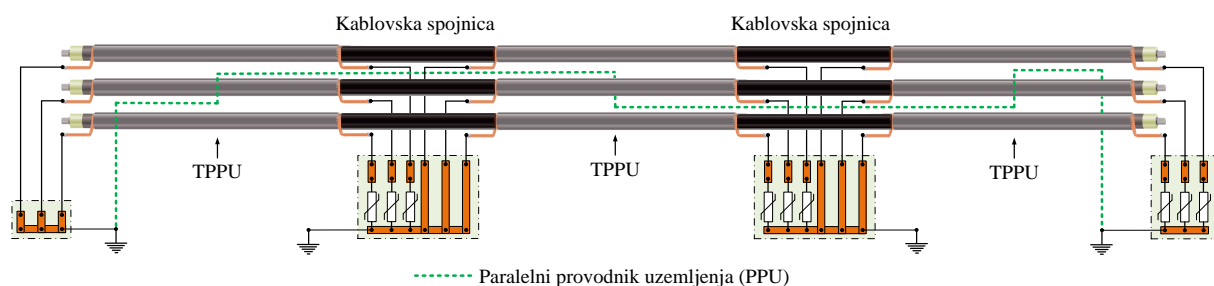
kratkih spojeva kroz njih protiču nulte komponente struje, izolovanjem ekrana na jednom kraju onemogućava se postojanje petlje kvara. Zbog toga se, kod ovakvog sistema uzemljenja ekrana koristi PPU. PPU se direktno povezuje na uzemljiivače koji se nalaze na oba kraja kablovskog voda čime se ponovo omogućava uspostavljanje petlje kvara za vreme kratkog spoja. U slučaju da su početak i kraj kablovskog voda instalirani u okviru postrojenja sa istim uzemljiivačem, nije neophodno korišćenje PPU [3].



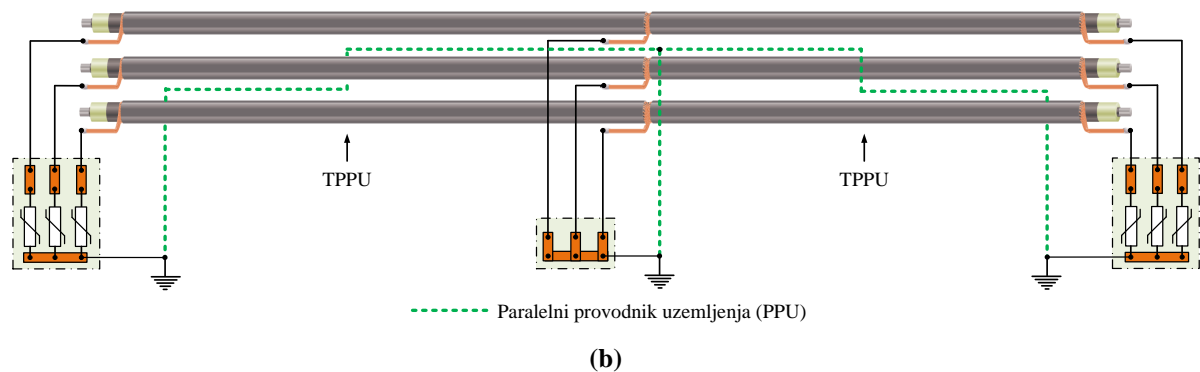
Slika 1 - Šema srednjenaponskog kablovskog voda sa metalnim ekranima koji su galvaniski spojeni i direktno uzemljeni na jednom kraju

PPU se duž trase polaže paralelno sa jednožilnim kablovima. Iz tog razloga kroz PPU može postojati cirkulaciona struja koje se javlja usled proticanja trofaznih struja kroz fazne provodnike jednožilnih kablova. Ova cirkulaciona struja protiče kroz PPU, zatim kroz zemlju od jednog do drugog lokalnog uzemljiivača. U cilju smanjenja ove struje vrši se transponovanje PPU na sredini trase voda (Slika 1). Osim jednostrukog, duž jedne trase može se izvršiti i višestruko transponovanje PPU [3].

Kao što je prethodno navedeno, ograničavanje dužine trase kablovskog voda sa uzemljenjem ekrana na jednom kraju vrši se zbog maksimalne vrednosti indukovano napona. Ukoliko se ovakav sistem uzemljenja ekrana primenjuje kod dužih vodova, tada se čitava trasa voda deli na više sekcija [7]. Na Slici 2(a) prikazan je primer kablovskog voda podeljenog na tri sekcije. Na jednom kraju svake od sekcija metalni ekrani su galvaniski spojeni i direktno uzemljeni, a na drugom povezani sa uzemljiivačem preko ograničavača napona. U ovom slučaju indukovani naponi su jednaki nuli na početku svake sekcije i rastu prema drugom kraju sekcije. Kod ovako primenjenog sistema uzemljenja metalnih ekrana dužine pojedinih sekcija ne moraju da bude jednake, kao što je to slučaj kod *cross-bonding* sistema. Bitno je da se ne premaši maksimalno dozvoljena vrednost indukovano napona na krajevima pojedinih sekcija. Na Slici 2(b) prikazan je kablovski sistem sa uzemljenim metalnim ekranima na sredini voda, dok su na oba kraja oni uzemljeni preko ograničavača napona. U ovom slučaju indukovani napon ekrana je jednak nuli na sredini voda i postepeno raste krećući se prema krajevima kablovskog voda.



(a)



Slika 2 - Primena transponovanog paralelnog provodnika uzemljenja (TPPU) kod (a) kablovskog voda podeljenog u više sekcija i (b) kablovskog voda sa galvanski spojenim i direktno uzemljenim metalnim ekranima samo na sredini voda.

Uzemljenje metalnih ekrana na jednom kraju primenjuje se i u slučaju korišćenja delimičnog *cross-bonding* sistema. Naime, primena *cross-bonding* sistema se ponekad ne može izvesti sa brojem sekcija koji je deljiv sa tri. Tada se krajnja sekcija kablovskog voda ne može transponovati i kod nje se primenjuje direktno uzemljenje metalnih ekrana samo na jednom kraju sekcije primenom PPU [8].

3. ODREĐIVANJE MINIMALNOG POPREČNOG PRESEKA PARALELNOG PROVODNIKA UZEMLJENJA

Minimalni poprečni presek PPU određen na osnovu tabličnih vrednosti

Minimalna površina poprečnog preseka PPU može se odrediti na dva načina. Prvi način je korišćenje nekog od relevantnih standarda u kome je data tabela sa definisanim vrednostima minimalnih poprečnih preseka zaštitnog provodnika. Standard AS/NZS 3000:2018 [4] u poglavlju 5.3 – *Delovi uzemljivačkog sistema* daje tabelu u kojoj su definisane ove vrednosti. Minimalna površina poprečnog preseka zaštitnog provodnika određuje se prema materijalu i stvarnoj površini poprečnog preseka faznog provodnika energetskih kablova. Ove vrednosti prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1 – Minimalne površine poprečnog preseka za zaštitne provodnike od bakra [4, 9]

Naznačena površina poprečnog preseka faznog provodnika (mm ²)	Naznačena površina poprečnog preseka zaštitnog provodnika (mm ²)	
	Za fazne provodnike od bakra	Za fazne provodnike od aluminijuma
1	1 ¹⁾	/
1,5	1,5 ¹⁾	/
2,5	2,5	/
4	2,5	/
6	2,5	/
10	4	/
16	6	4
25	6	6
35	10	6
50	16	10
70	25	10
95	25	16
120	35	25
150	50	25
185	70	35
240	95	50
300	120	70
400	≥120 ²⁾	≥95 ²⁾
500	≥120 ²⁾	≥95 ²⁾

630	≥ 120 ²⁾	≥ 120 ²⁾
>630	$\geq 25\%$ stvarnog poprečnog preseka faznog provodnika ²⁾	$\geq 25\%$ stvarnog poprečnog preseka faznog provodnika ²⁾
<p>1) Ovi zaštitni provodnici koriste se samo kao sastavni deo višezilnog kabla ili fleksibilnog kabla, osim za pokretne kablove kod liftova, u skladu sa sekcijom 5.3.3.4, tačke (b) i (c) iz [4, 9].</p> <p>2) Može se zahtevati veća površina poprečnog preseka zaštitnog provodnika kako bi se zadovoljila sekcija 5.3.3.1.1 iz [4, 9].</p>		

Kao što se može videti iz priložene tabele, za fazne provodnike, čije su nazivne površine poprečnih preseka veće od 630 mm², minimalna površina poprečnog preseka zaštitnog provodnika za fazne provodnike od bakra treba da bude veća ili jednaka od četvrtine stvarne površine poprečnog preseka jednog faznog provodnika. U standardu AS/NZS 3000:2018 navodi se da nakon određivanja površine poprečnog preseka zaštitnog provodnika treba proveriti da li je vrednost ukupne impedanse petlje kvara zadovoljavajuća, s obzirom na to da nulta komponenta struje kvara protiče kroz zaštitni provodnik. Takođe, treba proveriti da li zaštitni provodnik ima odgovarajuću mehaničku čvrstoću i otpornost u odnosu na ambijentalne uslove.

Minimalni poprečni presek PPU određen prema vrednosti struje kratkog spoja

Drugi način za određivanje površine poprečnog preseka PPU jeste pomoću izraza za toplotni impuls, koji uzima u obzir oslobođenu toplotnu energiju u PPU za vreme trajanja struje kratkog spoja. Obzirom da kvar traje relativno kratko (nekoliko sekundi) smatra se da je zagrevanje PPU adijabatsko, odnosno da se sva energija (u posmatranom provodniku) troši na porast temperature PPU. Toplotni impuls dat je izrazom [5,10]:

$$\int_0^{t_k} i_k^2 \cdot dt = k^2 S^2 \quad (1)$$

gde je i_k – trenutna vrednost struje kratkog spoja koja protiče kroz PPU u A, t_k – vreme trajanja kratkog spoja u s, S – površina poprečnog preseka PPU u mm², k^2 – koeficijent čija vrednost zavisi od toplotnih i električnih karakteristika materijala provodnika i izolacije PPU u A²·s/m². Leva strana jednačine (1) predstavlja toplotni impuls oslobođen u provodniku tokom vremenskog intervala trajanja kvara i izražena je u A²·s.

Vremenski oblik struje kratkog spoja i_k je neperiodičnog oblika zbog postojanja jednosmerne komponente struje kvara. Zbog toga se može reći da je izračunavanje integrala sa leve strane jednakosti (1) složeno za korišćenje u inženjerskoj praksi. Jednostavnija formula za proračun minimalne površine poprečnog preseka zaštitnog provodnika koja uzima u obzir adijabatske uslove i koja važi za maksimalno vreme trajanja kvara od 0,1 do 5 s je [5,10]:

$$S \geq \frac{I_k}{k} \sqrt{t_k} \quad (2)$$

gde I_k predstavlja efektivnu vrednost struje kvara koja protiče kroz PPU. Koeficijent k zavisi od toplotnih i električnih karakteristika materijala provodnika PPU, kao i od početne i krajnje temperature materijala koji se koristi za izolaciju PPU. Ovaj koeficijent se određuje pomoću izraza [5,10]:

$$k = \sqrt{\frac{c}{\alpha_0 \cdot \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha_0 \theta_M}{1 + \theta_0 \alpha_0}} \quad (3)$$

gde je c –specifični zapreminski toplotni kapacitet materijala provodnika u J/(m³·K), α_0 –temperaturni koeficijent specifične električne otpornosti materijala provodnika u K⁻¹, ρ_0 –specifična električna otpornost materijala provodnika na početnoj temperaturi u Ω·m, θ_0 –početna temperatura provodnika u °C i θ_M –krajnja temperatura provodnika u °C. Vrednosti α_0 , ρ_0 i c za materijale od kojih se izrađuju provodnici i ekrani date su u Tabeli 2, dok su vrednosti za početnu i krajnju temperaturu, θ_0 i θ_M različitih izolacionih materijala date u Tabeli 3.

U Tabeli 2 su date vrednosti početnih temperatura za materijale izolacije i one zapravo predstavljaju maksimalne temperature izolacije pri referentnim uslovima, odnosno pri normalnim pogonskim uslovima. Ove temperature u izrazu (3) predstavljaju početne ako je zaštitni provodnik, tj. PPU, sastavni deo energetskog kabla (sastavni deo

višežilnog kabla). S obzirom da se u ovom radu razmatra slučaj kablovskog voda sa tri jednožilna kabla, PPU nije sastavni deo višežilnog kabla i njegova početna temperatura može imati i niže vrednosti, a najniža moguća temperatura u tom slučaju je temperatura okolnog zemljišta.

Tabela 2 – Vrednosti parametara materijala provodnika i ekrana koji se koriste za proračun faktora k [5]

Materijal	ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	α_0 (K^{-1})	c ($J/(m^3 \cdot K)$)
Provodnik:			
- Bakar	$1,7241 \cdot 10^{-5}$	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$3,45 \cdot 10^{-3}$
- Aluminijum	$2,8264 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,422 \cdot 10^{-3}$
Ekran i armatura:			
- Olovo i legure olova	$21,4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$
- Čelik	$13,8 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$3,756 \cdot 10^{-3}$
- Nerđajući čelik	$70 \cdot 10^{-5}$	Zanemarljivo	$3,756 \cdot 10^{-3}$
- Aluminijum	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,422 \cdot 10^{-3}$

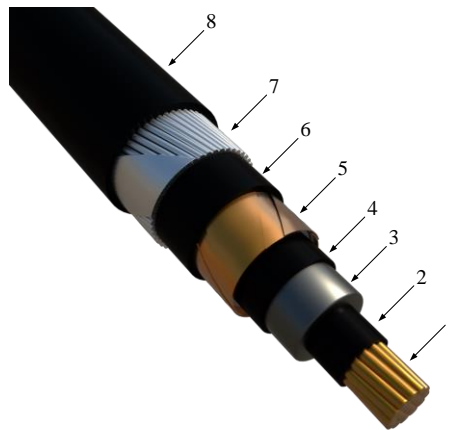
Tabela 3 – Granične temperature izolacionih materijala koji su u fizičkom kontaktu sa provodnicima [5]

Vrsta izolacije	Temperatura provodnika ($^{\circ}C$)	
	Pod normalnim pogonskim uslovima (pri trajno dozvoljenoj struji)	Maksimalna vrednost tokom kratkog spoja
Termoplastika: V-75, HFI-75-TP, TPE-75, V-90, HFI-90-TP, TP-90, V-90HT		
- $S \leq 300 \text{ mm}^2$	75	140
- $S > 300 \text{ mm}^2$	75	160
Polietilen: PE, linearni PE niske gustine		
- $S \leq 300 \text{ mm}^2$	70	140
- $S > 300 \text{ mm}^2$	70	160
Umreženi elastomer:		
- R-EP-90, R-CPE-90, R-HF-90, R-CSP-90	90	250
- R-HF-110, R-E-110	110	250
Umreženi polietilen (XLPE):		
- X-90, X-90UV, X-HF-90	90	250
- X-HF-110	110	250
Kablovi sa mineralnom izolacijom i spoljašnjim zaštitnim plaštom od metala	100	250
Za visoke temp.: R-S-150 i tip 150 fiber	150	350
Impregnirani papir	85	250

4. PRIMER ODREĐIVANJA MINIMALNOG POPREČNOG PRESEKA PARALELNOG PROVODNIKA UZEMLJENJA

Proizvođači u svojim katalozima, prema standardima IEC 60287-1-1 i BS 6622, definišu trajno dozvoljene struje pod određenim eksploatacionim uslovima, načinu polaganja i načinu uzemljenja metalnih ekrana jednožilnih kablova. Za velike poprečne preseke provodnika ($> 630 \text{ mm}^2$) srednjenaponskih jednožilnih kablova, pojedini proizvođači navode da su njihovi metalni ekrani uzemljeni samo na jednom kraju [6] ili jednostavno ne navode podatke i upućuju korisnike da se obrate tehničkoj podršci proizvođača za detalje [11].

Kao primer za demonstraciju određivanja minimalnog poprečnog preseka PPU koristiće se niskonaponski jednožilni kabl sa bakarnim provodnikom od použenih žica i izolacijom od PVC tipa V-75. Razmatraće se dva slučaja: (i) određivanje PPU za kablovski vod sa faznim provodnicima nazivnog preseka 800 mm^2 i (ii) određivanje PPU za kablovski vod sa faznim provodnicima naznačenog preseka 1000 mm^2 . Pretpostavlja se da je kablovski vod izveden od tri jednožilna kabla tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1/C 19/33 kV (Slika 3). Ovaj kabl ima provodnik od použenih bakarnih žica klase 2 prema IEC 60228. Oko provodnika i izolacije od umreženog polietilena postavljeni su ekrani od slaboprovodnog umreženog polietilena. Metalni zaštitni ekran je izrađen od bakarnih traka, a metalna mehanička zaštita (armatura) izrađena je od aluminijumskih použenih žica. Između metalnog ekrana i aluminijumske armature nalazi se sloj posteljice od PVC-a. Plašt kabla je takođe izrađen od PVC-a.



Slika 3 - Struktura sredjenaponskog kabla tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1/C 19/33 kV (BS 6622):
1 – provodnik, 2 – ekran provodnika, 3 – izolacija, 4 – ekran izolacije, 5 – metalni ekran, 6 – posteljica, 7 – armatura i 8 – spoljašnji zaštitni plašt

Ukoliko se primeni prvi način za određivanje minimalnog poprečnog preseka PPU, tj. ako se primeni Tabela 1, treba prethodno ustanoviti vrednost stvarnog poprečnog preseka faznog provodnika jednožilnog energetskog kabla. Kabl tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1/C 19/33 kV ima provodnik klase 2, pa su prema minimalnom broju žica u provodniku, prečniku žica i dimenzijama pojedinih delova kabla datih od strane proizvođača dobijeni stvarni poprečni preseki provodnika, a njihove vrednosti su date u Tabeli 4. Ovim načinom određivanja minimalnog poprečnog preseka PPU ustanovljeno je da je za kablovski vod sa faznim provodnicima preseka 800 mm² potreban PPU nazivnog preseka od 240 mm², dok je za kablovski vod sa faznim provodnicima preseka od 1000 mm² neophodan poprečni presek PPU od 300 mm².

Tabela 4 - Stvarni poprečni preseki provodnika kabla tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1/C 19/33 kV i usvojeni nazivni poprečni preseki PPU prema Tabeli 1

Naznačeni poprečni presek faznog provodnika (mm ²)	Stvarni poprečni presek faznog provodnika klase 2 prema IEC 60228 (mm ²)	Minimalni poprečni presek PPU prema Tabeli 1 (mm ²)	Usvojena vrednost nazivnog poprečnog preseka PPU (mm ²)
800	945,7	0,25·945,7=236,4	240
1000	1134,1	0,25·1134,1=283,5	300

Da bi se za proračun minimalnog poprečnog preseka primenio izraz (3) neophodan je podatak o struji kratkog spoja sa zemljom, kao i vreme trajanja kvara. Vrednost struje kratkog spoja zavisi od parametara ostalih elemenata u distributivnoj mreži (ostalih vodova, transformatora, napojne mreže) i zbog toga ovaj podatak zavisi od konkretnog slučaja. Zbog toga će se u ovom radu uzeti u obzir jednosekundna struja kratkog spoja koju može da izdrži metalni ekran energetskog kabla, a čiju vrednost je dao proizvođač kabla. Prema podacima iz [12] dozvoljene jednosekundne struje kratkog spoja za armaturu kabla iznose $I_{k(800)} = 28,8$ kA za kabl sa provodnikom preseka 800 mm² i $I_{k(1000)} = 30,8$ kA za kabl sa provodnikom preseka 1000 mm².

Za PPU sa bakarnim provodnikom i izolacijom od PVC-a, prema podacima iz Tabela 1 i 2, koeficijent k ima vrednost

$$k_{PVC} = \sqrt{\frac{c}{\alpha_0 \cdot \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha_0 \theta_M}{1 + \alpha_0 \theta_0}} = \sqrt{\frac{3,45 \cdot 10^{-3}}{3,93 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7241 \cdot 10^{-5}} \ln \frac{1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot 140}{1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot 15}} = 139,3 \frac{\text{A} \cdot \text{s}^{0,5}}{\text{mm}^2}.$$

Početna temperatura izolacije PPU određena je prema referentnim uslovima iz kataloga [12], odnosno prema datoj vrednosti temperature okolnog zemljišta koja iznosi 15 °C. Kao što je već rečeno, početna temperatura može biti jednaka temperaturi okolnog zemljišta jer PPU konstrukciono ne pripada energetskom kablju.

Prema izrazu (3) minimalni poprečni presek PPU za kablovski vod sa faznim provodnicima nazivnog poprečnog preseka 800 mm² za jednosekundnu struju kratkog spoja ima vrednost

$$S_{PPU(800)} \geq \frac{I_{k(800)}}{k_{PVC}} \sqrt{t_k} = \frac{28800}{139,3} \sqrt{1} = 206,7 \text{ mm}^2,$$

pa se usvajanjem prvog većeg naznačenog preseka dobija $S_{n,PPU(800)}=240 \text{ mm}^2$.

Za kablovski vod sa faznim provodnicima od 1000 mm², minimalni poprečni presek PPU za jednosekundnu struju kratkog spoja iznosi

$$S_{PPU(1000)} \geq \frac{I_{k(1000)}}{k_{PVC}} \sqrt{t_k} = \frac{30800}{139,3} \sqrt{1} = 221,1 \text{ mm}^2,$$

pa se usvajanjem prve veće nazivne vrednosti za PPU i u ovom slučaju dobija $S_{n,PPU(1000)}=240 \text{ mm}^2$.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan jedan od načina za eliminaciju cirkulacionih struja u metalnim ekranima kablova: uzemljenjem metalnih ekrana kablova na jednom kraju. Prezentovani su različiti načini izvođenja ovog sistema uzemljenja metalnih ekrana sredjenaponskih jednožilnih kablova. Pojašnjeni su razlozi za korišćenje paralelnog provodnika uzemljenja kojim se povezuju uzemljivači na početku i kraju trase ili sekcije kablovskog voda. Prikazani su postupci za određivanje minimalnog poprečnog preseka paralelnog provodnika uzemljenja kao zaštitnog provodnika: korišćenjem tabličnih vrednosti u skladu sa standardom AS/NZS 3000:2018 i primenom formule koja uzima u obzir intenzitet i vreme trajanja struje kratog spoja koja protiče kroz paralelni provodnik uzemljenja. Proračun i usvajanje minimalnog poprečnog preseka paralelnog provodnika uzemljenja izvedeno je za jednožilne kablove tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 1/C 19/33 kV preseka 800 i 1000 mm². Jednosekundne struje kratkog spoja neophodne za proračun preseka paralelnog provodnika uzemljenja preuzete su iz kataloga proizvođača navedenih energetskih kablova. Za kablovski vod sa faznim provodnicima nazivnog poprečnog preseka 800 mm² ustanovljeno je da se primenom oba postupka za određivanje minimalnog poprečnog preseka paralelnog provodnika uzemljenja dobija ista vrednost koja iznosi 240 mm². Za kablovski vod sa faznim provodnicima poprečnog preseka 1000 mm², primenom tabele iz standarda AS/NZS 3000:2018 dobija se nazivni presek paralelnog provodnika uzemljenja od 300 mm², dok se proračunom dobija vrednost koja je za red veličine niža i iznosi 240 mm².

ZAHVALNICA

Ovaj rad je zasnovan na istraživanju sprovedenom u okviru naučnoistraživačkog rada na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2024. godini br. 451-03-66/2024-03/200132, 451-03-1/2024-03/200155 i 451-03-65/2024-03/200102 podržanih od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] L. Heinhold, *Power Cables and Their Application-Part 1*, Berlin: Siemens Aktiengesellschaft, 1990.
- [2] D. Tasić, *Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike*, Elektronski fakultet, Niš, 2001.
- [3] Sheath bonding systems of AC transmission cables - design, testing, and maintenance: Reference 797, Technical brochure, CIGRE, Paris, 2020.
- [4] Electrical installations (known as the Australian/New Zealand Wiring Rules). AS/NZS 3000:2018, 6. izdanje, 2018.
- [5] Protective earth cable sizing. Electrotechnik: Electrical power systems design and analysis software. 05.02.2024. Dostupno na: <https://elek.com/articles/protective-earth-cable-sizing/>
- [6] Dynamic Cables Pvt. Ltd, 05.02.2024. Dostupno na: https://www.dynamiccables.co.in/DCL_product-catalogue.pdf
- [7] Application note 3.1 – Cable sheaths – Overvoltage protection. 05.02.2024. Dostupno na: https://library.e.abb.com/public/42ff93fa18234d5982dad9bfc38482b7/ABB_AppNotes_3.1_Cable%20sheaths%20overvoltage%20protection%20IHC0138880%20EN%20AA.pdf?x-sign=GeI5dghuY/Ig/vL9TLJsm1/UdXVxijfhZeY1f3k+41SzISTBP+ntPkLSoppBhPH
- [8] B. M. Lalević, *Elektroenergetski kablovi*, Beograd, 1993.
- [9] Earth cable size calculator. Electrotechnik: Electrical power systems design and analysis software. 05.02.2024. Dostupno na: <https://elek.com/resources/free-electrical-calculators/earth-cable-size-as3000/>
- [10] M. Mitolo i M. Tartaglia, "An analytical evaluation of the factor k² for protective conductors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 1, str. 211-217, 2012.

- [11] Standard MV power cables – BS6622/BS7835 single core armoured 33 kV XLPE stranded copper conductor. 05.02.2024. Dostupno na: https://www.cablejoints.co.uk/upload/33kV_Single_Core_XLPE_AWA_Stranded_Copper_Conductor_H_V_Cable.pdf
- [12] Standard MV power cables – BS6622/BS7835 single core armoured 33 kV XLPE stranded copper conductor. 05.02.2024. Dostupno na: <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2017/03/33kV-MV-Cables-BS6622-BS7835-Single-Core-XLPE-AWA-Stranded-Copper-Conductors.pdf>.