

IZBOR OPTIMALNOG PRESEKA 110 kV KABLA U GRADSKOM PODRUČJU I ANALIZA OPRAVDANOSTI PRIMENE CROSS BONDING-A

I. MITIĆ, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, JP Elektromreža Srbije, Srbija
M. BOROVIĆ, JP Elektromreža Srbije, Srbija
I. MILANOV, Elektroistok projektni biro, Srbija

1. UVOD

Na izbor tipa i preseka provodnika kabla utiče više tehničkih i ekonomskih faktora. Zahtevana pouzdanost u napajanju, koja se ogleda u učestalosti kvarova i vremenu koje je potrebno za otklanjanje istih, perspektivni razvoj mreže koji je uslovljen ekonomskim i tehničkim razvojem područja koje se napaja, performanse kablova u trajnom i nestacionarnom režimu, zauzeće prostora i usklađivanje sa drugom postojećom i planiranom infrastrukturom, mogućnost izvođenja radova prilikom izgradnje, unifikacija radi jednostavnijeg održavanja, pogonski i ambijentalni uslovi, samo su neki od tehničkih faktora. Troškovi koji se javljaju prilikom izgradnje kao i u toku eksploatacije poput troškova usled gubitaka i održavanja su ekonomski faktori. Kako je razvoj kablovske mreže naponskog nivoa 110 kV neminovan u većim gradovima na teritoriji Republike Srbije, postavlja se pitanje da li je prihvatljivo odlučiti se za samo jedan tip kabla i poprečni presek provodnika koji bi se koristio u gradskim sredinama za napajanje dve transformatorske stanice 110/x kV, pri čemu bi nominalna snaga svake iznosila 63 MVA. Odluka bi se mogla doneti tek nakon detaljne analize dozvoljenih strujnih opterećenja podzemnih vodova, koji bi bili sačinjeni od kablova tipa XHE 49-A, različitih poprečnih preseka aluminijumskih provodnika, a istog poprečnog preseka bakarne električne zaštite. Problematika dimenzionisanja i konstrukcije električne zaštite, kao i uticaja iste na električne parametre kablovskog voda, zbog obima neće biti predmet ovog rada, ali prilikom analize uzimaju se u obzir trenutne vrednosti struja kvara, kao i perspektivno stanje mreže, te možemo smatrati da je primena bakarne električne zaštite poprečnog preseka 95 mm^2 , koja može podneti struju od 31,5 kA u periodu koji ne traje duže od 150 ms, opravdana.

Cilj ovog rada je prezentovanje matematičkog modela na osnovu koga bi se odredile vrednosti dozvoljenog strujnog opterećenja u ustaljenom režimu, za slučaj kada je izvršena transpozicija kablova ili *cross bonding*, kao i za slučaj kada nije primenjena transpozicija kablova. Analiza dozvoljenih strujnih opterećenja izvršiće se na kablovskom vodu postavljenom direktno u zemlju u trouglastom snopu, pri čemu se neće razmatrati ukrštanje ili paralelno vođenje sa infrastrukturom koja bi mogla nepovoljno da utiče na vrednost iste.

2. GUBICI U KABLOVIMA

Prema mestu nastanka gubici u kablovima mogu se podeliti na gubitke u provodnicima, metalnom omotaču, metalnoj mehaničkoj zaštiti i izolaciji.

Gubici u provodniku se javljaju kao posledica otpora usled procesa uspostavljanja struje. Za trožilini kablovski vod mogu se izraziti relacijom [1, 2, 3]:

$$P_J = 3R_p I_{td}^2 = 3R_{20}[1 + \alpha(\theta_{td} - 20)](1 + y_s + y_p)I_{td}^2, \quad (2.1)$$

gde je R_{20} [Ω/m] jednosmerna otpornost provodnika na temperaturi od 20 °C, θ_{td} [°C] trajno dozvoljena temperatura, y_s koeficijent kojim se uvažava površinski efekat, y_p koeficijent koji uvažava efekat blizine, I_{td} [A] trajno dozvoljena struja. Dopunski koeficijenti zavise od učestanosti mreže, konstrukcije i dimenzija provodnika, kao i materijala koji je upotrebljen za isti i mogu se izračunati na osnovu izraza datih u literaturi [1,2,3]. Relacija (2.1) uvažava da se sa uspostavljanjem struje menja temperatura provodnika, a samim tim i njegova otpornost.

Dielektrični gubici su posledica nehomogenosti izolacije provodnika i zavise od vrste i osobina dielektrika, napona na izolaciji kabla, dielektrične konstante i faktora gubitaka koji se menja sa promenom temperature. Pod dejstvom napona u dielektriku dolazi do provođenja struje koja je proporcionalna naponu, a obrnuto proporcionalna otpornosti izolacije. Gubici po jedinici dužine, za trofazni kablovski vod, se mogu odrediti pomoću relacije [1,2]:

$$P_D = 3\omega C U^2 \tan \delta, \quad (2.2)$$

gde je C [$\mu F/m$] kapacitivnost po jedinici dužine, ω [rad] kružna učestanost, U [V] fazni napon, $\tan \delta$ faktor gubitaka.

Ako napravimo analogiju sa transformatorom, možemo smatrati da provodnik jednožilnog kabla ima ulogu primara dok električna zaštita istog predstavlja sekundar. U zavisnosti od načina na koji će biti izvedeno povezivanje električnih zaštita, kao i da li će one biti uzemljene na jednom ili na oba kraja, moguće je analizirati vrednosti napona koji će se indukovati. U ovom radu se razmatra slučaj kada su električne zaštite uzemljene na oba kraja, što je česta pojava uslovljena bezbednosnim razlozima. Kao posledica toga uspostavlja se cirkulaciona struja, pa samim tim i gubici, koji imaju znatan uticaj na dozvoljeno strujno opterećenje. Pored osnovne mere, koja se ogleda u polaganju kablova u snopu, kao dopunska mera smanjenja ovih struja predlaže se transpozicija ili preplitanje električne zaštite na odgovarajućim deonicama.

Često se kod analize zagrevanja kablova, a pre svega kod određivanja trajno dozvoljene struje, gubici u električnoj zaštiti iskazuju pomoću snage gubitaka u provodniku P_J [W/m] relacijom [1,2,4,5,6,7]:

$$P_e = \lambda_e P_J, \quad (2.3)$$

Na osnovu (2.3), očigledno je da faktor gubitaka λ_e nema dimenziju i da predstavlja odnos snage gubitaka u električnoj zaštiti i snage gubitaka u provodniku. Polazeći od opšte matricne relacije koja daje vezu između napona na krajevima električnih zaštita i struja uspostavljenih u istima kao i struja faznih provodnika [5,7]:

$$\begin{bmatrix} U_{e1} \\ U_{e2} \\ U_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_{e1} \\ I_{e2} \\ I_{e3} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

gde su sa U_{ei} [V] obeleženi naponi između krajeva električnih zaštita svakog od kablova, I_i [A] struje u provodnicima, sa I_{ei} [A] struje u električnim zaštitama, sa Z_{ii} [Ω/m] sopstvene impedanse električne zaštite, a sa Z_{ij} [Ω/m] odgovarajuće međusobne impedanse provodnika i električnih zaštita i odgovarajuće međusobne impedanse električnih zaštita, moguće je analizirati različite slučajeve međusobnog povezivanja električnih zaštita, bez obzira na način polaganja kablova. Pod pretpostavkom da struje u provodnicima čine simetričan trofazni sistem, polazeći od relacije (2.4) dolazi se do sledeće relacije [5,7]:

$$\begin{bmatrix} I_{e1} \\ I_{e2} \\ I_{e3} \end{bmatrix} = -[Z_{ee}]^{-1} [Z_{ep}] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

U slučaju polaganja kablova u snopu, potrebno je imati u vidu da važi sledeće $Z_{44} = Z_{55} = Z_{66} = Z_e$, $Z_{42} = Z_{43} = Z_{45} = Z_{46} = Z_{ff}$, kao i da je $Z_{41} = Z_{ff}$. U slučaju da nije izvršeno preplitanje električnih zaštita, polazeći od (2.5), struja I_{e1} može se izraziti relacijom [5,7]:

$$I_{e1} = -\frac{Z_{41}-Z_{42}}{Z_{44}-Z_{45}} I_1 = -\frac{j\omega M}{R_e+j\omega M} I_1, \quad (2.6)$$

za faktor gubitaka dobija se [1,5]:

$$\lambda_e = \frac{R_e}{R_p} \frac{\omega^2 M^2}{R_e^2 + (\omega M)^2}, \quad (2.7)$$

gde je R_e [Ω/m] otpornost električne zaštite, a M [mH/m] međusobna induktivnost faznog provodnika i električne zaštite, koja zavisi od konstrukcije kabla i odnosa između osnog rastojanja kablova i srednjeg poluprečnika električne zaštite. Otpornost električne zaštite je određena na osnovu izraza:

$$R_e = R_{e20} [1 + \alpha(\theta_e - 20)], \quad (2.8)$$

gde je R_{e20} [Ω/m] jednosmerna otpornost električne zaštite na temperature od 20 °C, θ_e [°C] temperatura na koju dospeva električna zaštita u ustaljenom režimu, dobijena relacijom [2]:

$$\theta_e = \theta_p + (\theta_{tla} - \theta_p) \frac{\ln \frac{d_e}{d_p}}{\ln \frac{d_k}{d_p}}, \quad (2.9)$$

gde je d_e [mm] srednji prečnik električne zaštite, d_p [mm] prečnik provodnika, θ_p [°C] temperatura provodnika, θ_{tla} [°C] temperatura tla na površini kabla, to jest na kružnici čiji je prečnik izražen preko d_k [mm]. Relacija (2.9) se može koristiti kako bi se odredila temperatura bilo koje tačke između dve poznate izotermske površine.

Za slučaj da je izvršeno preplitanje, struja I_{e1} je definisana relacijom [5]:

$$I_{e1} = -\frac{Z_{42}-Z_{43}}{3Z_{42}+4Z_{45}+2Z_{46}} I_2. \quad (2.10)$$

Na osnovu relacije (2.10) dolazi se do zaključka da u slučaju pravilnog izvršenog preplitanja neće doći do uspostavljanja cirkulacionih struja. Međutim, često nije moguće da se kablovski vod polaže u snopu duž cele trase voda, jer se uvek javljaju odstupanja prilikom ukrštanja sa drugom podzemnom infrastrukturom, ili na mestima izvođenja spojnic, kao i pri ulasku u kablovski prostor transformatorskih stanica 110/x kV. Da bi faktor gubitaka u električnoj zaštiti po vrednosti iznosio nula, neophodno je da broj deonica, na kojima se vrši preplitanje, bude celobrojni umnožak broja tri.

Kako analizirani tip kabla ne poseduje armaturu, nema potrebe detaljno analizirati gubitke u ovom elementu. Iz tog razloga za dalju analizu usvajamo da je faktor gubitaka λ_{mo} , koji predstavlja odnos snage gubitaka u armaturi i snage gubitaka u provodniku, po vrednosti jednak nuli.

3. MATEMATIČKI MODEL ZA ODREĐIVANJE DOZVOLJENOG STRUJNOG OPTEREĆENJA

Strujno opterećenje trofaznog kablovskog voda naponskog nivoa 110 kV zavisi od faktora opterećenja distributivne mreže, konstrukcije kabla i materijala od kojih je izrađen, sredine u kojoj je kabl položen, načina polaganja, kao i načina povezivanja električne zaštite. Prilikom određivanja dozvoljenog opterećenja polazi se od pretpostavke da je temperatura provodnika jednaka maksimalno dozvoljenoj temperaturi sloja izolacije koji je u kontaktu sa provodnikom, a koji je samim tim izložen najvećem termičkom naprezanju. U ustaljenom režimu toplota koja nastaje kao posledica gubitaka prostire se kroz elemente kabla od provodnika ka površini, a sa površine istog se odvodi u okolni prostor, pri čemu uzima se da je temperatura tih elemenata konstantna.

Vremenska konstanta zagrevanja zemljišta je mnogo veća od vremenske konstante zagrevanja kabla, stoga promenu opterećenja kabla može pratiti jedan mali deo tla oko kabla. Na intezitet trajno termički dozvoljene struje utiče i isušivanje zemljišta oko kabla, jer se samim tim menja termička otpornost zemljišta. Što je veći intezitet struje, pojava okolnog isušivanja zemljišta je izraženija, što za posledicu ima da se smanjuje vrednost trajno dozvoljene struje.

Pri promenljivom dijagramu opterećenja temperatura kabla se menja prateći opterećenje. Ako se pri proračunu trajne termičke struje uvaži promena dijagrama opterećenja dobiće se veća vrednost struje nego za konstantan dijagram opterećenja, na ovaj način ima se bolje iskorišćenje kabla u toku eksploatacije. Pri maksimalnom opterećenju sloj zemljišta prečnika d_y zagreva se maksimalnom snagom gubitaka, dok se preostali deo zemlje zagreva se srednjom snagom gubitaka. Prečnik sloja zemlje koji prati promenu opterećenja zavisi od oblika dijagrama opterećenja. Prema [1,2] prečnik sloja zemljišta koji prati stvarni dijagram opterećenja računa se prema formuli:

$$d_y = \frac{0,103 + 0,246\sqrt{\mu}}{\rho_{tz}^{0,4} \sqrt{f_t}} \quad (3.1)$$

gde je μ faktor gubitaka ($\mu = Am + (1 - A)m^2$, gde je A konstanta, a m faktor opterećenja, za koji je usvojena vrednost 0,8 [4]), f_t učestanost promene dnevnog opterećenja, ρ_{tz} [Km/W] specifična termička otpornost tla. Vrednost trajno dozvoljene termičke struje se određuje na osnovu formule [1,2,9]:

$$I_{td} = \sqrt{\frac{\Delta\theta - P_d \left(\frac{R_{T1}}{2n} + R_{T2} + R_{T3} + \frac{\rho_{tzi} R_{Tz}}{\rho_{tz}} \right) + \frac{\rho_{tzi} - \rho_{tz}}{\rho_{tz}} \Delta\theta_{xz}}{nR \left(\frac{R_{T1}}{n} + (1 + \lambda_e) R_{T2} + (1 + \lambda_e + \lambda_{mo}) (R_{T3} + \frac{\rho_{tzi} R_{Tzy}}{\rho_{tz}}) \right)}}, \quad (3.2)$$

gde je $\Delta\theta$ [°C] dozvoljeni porast temperature provodnika u odnosu na temperaturu tla, R_{T1} [Km/W] toplotna otpornost između provodnika i električne zaštite, R_{T2} [Km/W] toplotna otpornost između električne zaštite i armature (u ovom primeru ne postoji armatura pa je $R_{T2} = 0$), R_{T3} [Km/W] toplotna otpornost spoljne zaštite kabla i R_{Tz} [Km/W] toplotna otpornost između površine kabla i sredine koja ga okružuje pri konstantnom opterećenju, R_{Tzy} [Km/W] toplotna otpornost između površine kabla i sredine koja ga okružuje pri promenljivom dijagramu opterećenja, $\Delta\theta_{xz}$ pad temperature u neisušenom sloju, koje se pri promenljivom opterećenju računa prema [1,2,9]:

$$\Delta\theta_{xz} = 15 + \frac{100(1-m)}{3}. \quad (3.3)$$

Svaki element kabla i okolina koja ga okružuje imaju određenu vrednost toplotne otpornosti koja definiše njegovu sposobnost prenosa toplote. Ekvivalentna šema toplotnog kola kabla se može pronaći u literaturi [2] za različite izvedbe istog (jednožilni, trožilni, sa armaturom, bez armature i slično). Za potrebe ovog rada analiziraće se otpori koje toplotni fluks mora da savlada na putu od provodnika kabla do spoljašnje površine kabla.

Toplotna otpornost izolacije, tj. otpor koji postoji između provodnika i električne zaštite, a koji zavisi od oblika poprečnog preseka provodnika i vrste materijala koji je primenjen. Kako je poprečni presek provodnika kod jednožilnih kablova kružnog oblika, izolacija je cilindričnog oblika, pa se njena toplotna otpornost može odrediti pomoću relacije [1,2,4]:

$$R_{T1} = \frac{\rho_{tiz}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_p}, \quad (3.4)$$

gde je ρ_{tiz} [Km/W] specifična termička otpornost izolacije, r_p [mm] poluprečnik provodnika, a R [mm] spoljašni poluprečnik izolacionog sloja.

Toplotna otpornost spoljnog zaštitnog plašta kabla je takođe cilindričnog oblika pa se toplotna otpornost može odrediti na osnovu relacije [1,2,4]:

$$R_{T3} = \frac{\rho_{tsmo}}{2\pi} \ln \frac{r_{smo}}{r_{umo}}, \quad (3.5)$$

gde je ρ_{tsmo} [Km/W] specifična termička otpornost izolacije koju imamo iznad metalnog omotača, r_{smo} [mm] spoljašni poluprečnik metalnog omotača a r_{umo} [mm] unutrašnji poluprečnik metalnog omotača.

Toplotna otpornost ambijenta, za slučaj da su kablovi položeni u zemlju se određuje pod pretpostavkama da je površina zemlje izotermička kao i da ne postoji odvođenje toplote u okolinu bilo konvekcijom bilo radijacijom. U slučaju tri ista jednožilna kabla, polegnuta u snopu i uz uvažavanje činjenice da se sloj zemljišta oko kabla prečnik d_y zagreva pod uticajem maksimalne snage, a preostali deo pod uticajem srednje snage gubitaka, toplotna otpornost zemljišta je data izrazom [1,2]:

$$R_{Tzy} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} \left[\ln k + 3(\mu - 1) \ln k_y + 2 \ln \frac{2h}{a} \right], \quad (3.6)$$

gde je ρ_{tz} [Km/W] specifična termička otpornost tla, a h [m] dubina na kojoj se nalazi osa kablovskog snopa u odnosu na tlo, a [m] osno rastojanje između kablova u snopu, odnosno prečnik kabla, k faktor geometrije kabla ($k = \frac{2h}{d_k} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_k}\right)^2 - 1}$), k_y faktor geometrije sloja zemljišta oko kabla prečnika d_y u kojem se oseća uticaj

promenljivog dijagrama opterećenja ($k = \frac{2h}{d_y} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_y}\right)^2 - 1}$).

U slučaju da se celokupni sloj zemšta zagreva istom snagom, toplotna otpornost zemljišta za tri ista jednožilna kabla, polegnuta u snopu data je izrazom [1,2]:

$$R_{Tz} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2h}{d_k} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_k}\right)^2 - 1} \right) + \frac{2h}{d_k} \right]. \quad (3.7)$$

Formula (3.6) i (3.7) odnose se na termičku otpornost zemljišta kada ne dolazi do isušivanja okolnog tla. Dok se za isušeno zemljište toplotna otpornost zemljišta dobija tako što se dobijene vrednosti termičke otpornosti zemljišta pomnože sa $\frac{\rho_{tzi}}{\rho_{tz}}$, gde je ρ_{tzi} [Km/W] specifična termička otpornost isušenog tla.

Potrebno je izvršiti proveru da li je pretpostavka o isušivanju tla opravdana. Prečnik kruga isušene zone se određuje [1,2]:

$$d_x = \frac{4hk_x}{k_x^2 - 1}, \quad (3.8)$$

gde je k_x faktor geometrije isušenog tla.

Za tri kablovska voda postavljena u snopu i promenljivi dijagram opterećenja koeficijent k_x se određuje [1,2]:

$$d_x > d_y \quad k_x = e^{\frac{2\pi\Delta\theta_{xz}}{3\rho_{tz}(\mu P_J + P_d)}} \quad (3.9)$$

$$d_x \leq d_y \quad k_x = e^{\left(\frac{2\pi\Delta\theta_{xz}}{3\rho_{tz}(P_J + P_d)} + \frac{(1-\mu)P_J \ln k_y}{(P_J + P_d)} \right)}. \quad (3.10)$$

Prečnik kruga isušenog sloja zemljišta određuje se iterativno. Najpre je potrebno da se izračuna trajno dozvoljena termička struja prema formuli (3.2), na osnovu ove struje može se odrediti faktor geometrije isušenog tla prema formulama (3.9) i (3.10). Potrebno je izvršiti pretpostavku da je $d_x > d_y$ ili $d_x \leq d_y$. Kada se izvrši proračuna koeficijenta k_x na osnovu formule (3.8) dobija se prečnik kruga isušene zone, ako je pretpostavka dobra proračunata vrednost prečnika kruga isušenog sloja zemljišta je dobra i merodavna za proveru da li postoji isušeni sloj zemljišta oko kabla, u suprotnom pretpostavka je pogrešna i za proračun k_x potrebno je koristiti drugu formulu. Kada se odredi vrednost prečnika kruga isušene zone on se poredi sa ekvivalentnim prečnikom tri jednožilna kabla u snopu ($D_{ekv} = 2,3d_k$, gde je d_k prečnik jednog kabla). Ukoliko je $d_x \leq D_{ekv}$ pretpostavka o isušivanju nije opravdana i oko snopa kablova nema isušenog zemljišta, dok je za slučaj da je $d_x > D_{ekv}$ opravdana je pretpostavka da se oko kablovskog snopa formira sloj isušenog zemljišta. Za primer u radu potrebno je uvažiti isušivanje zemljišta prilikom proračuna trajno dozvoljene termičke struje.

4. PRORAČUN DOZVOLJENIH OPTEREĆENJA I GUBITAKA KABLOVSKOG VODA

Rezultati proračuna naznačenih dozvoljenih strujnih opterećenja, prema relaciji (3.2) za zimski i letnji period za kablove koji su prema [8] usvojeni kao tipski, kao i rezultati proračuna prividnih snaga koje se mogu preneti vodovima su date u tabeli 1, u kojoj se mogu naći i vrednosti parametara za koje su isti dobijeni.

Na osnovu proračuna, može se zaključiti da kablovski vod sačinjen od tri jednožilna kabla tipa XHE 49-A 1x630/95 mm², ne ispunjava zahtev u pogledu napajanja dve transformatorske stanice naznačene snage 2x31,5 [MVA] (što odgovara strujnom opterećenju od oko 660 A), dok kabl tipa XHE 49-A 1x800/95 mm², bez primene transpozicije električnih zaštita ispunjava zahteve u pogledu napajanja isključivo u zimskom periodu (kada se ima maksimalno godišnje opterećenje). Kablovski vod sačinjen od tri jednožilna kabla tipa XHE 49-A 1x800/95 mm², ispunjava zahtev ukoliko je izvršen *cross bonding*. Analizom kablovskog voda sačinjenog od tri jednožilna kabla tipa XHE 49-A 1x1000/95 mm², možemo zaključiti da se isti može primeniti bez obzira da li jeste ili nije izvedeno preplitanje električnih zaštita, a u najkritičnijem slučaju (bez primene *cross bonding*-a, u letnjem periodu), obezbeđuje rezerva od 5,19 %.

TABELA 1 – DOZVOLJENA STRUJNA OPTEREĆENJA KABLOVSKOG VODA 110 kV TIPA XHE 49-A

Presek provodnika [mm ²]	Transpozicija električnih zaštita	Dozvoljeno opterećenje leti [A]	Dozvoljena prividna snaga u letnjem periodu [MVA]	Dozvoljeno opterećenje zimi [A]	Dozvoljena prividna snaga u letnjem periodu [MVA]
630/95	Nije primenjena	573,05	109,18	603,16	114,92
	Primenjena	613,21	116,83	645,54	122,99
800/95	Nije primenjena	632,38	120,48	665,60	126,81
	Primenjena	686,59	130,81	722,82	137,72
1000/95	Nije primenjena	695,72	132,55	732,30	139,52
	Primenjena	766,41	146,02	806,88	153,73

$\rho_{tz} = 1,2 \text{ Km/W}; \rho_{tzi} = 2,5 \text{ Km/W}; \theta_{tlaleti} = 20 \text{ }^\circ\text{C}; \theta_{tlazimi} = 10 \text{ }^\circ\text{C}; m = 0,8; h = 1,5 \text{ m};$

U poslednjim godinama, usled sve većeg korišćenja klima uređaja u stambenim i poslovnim objektima, beleži se porast u potrošnji u letnjem periodu, međutim ona po vrednosti ne prelazi 85% ukupne potrošnje u zimskom periodu. Praksa je da se za konkretan projekat posebno utvrde i uzmu u obzir svi faktori koji mogu uticati na prenosnu moć kablovskog voda. Prilikom određivanja dozvoljenog strujnog opterećenja treba uzeti u obzir i ukrštanja ili paralelna vođenja sa drugim izvorima toplote, koji mogu značajno redukovati struje, a opet treba biti svestan da situacije u pogonu mogu biti povoljnije, jer su redukcije dozvoljenog opterećenja u letnjem periodu, manje nego u zimskom periodu (razlog tome je činjenica da grejna sezona traje u toku zimskih meseci, kada se po pravilu beleže i veća struja opterećenja kablovskih vodova u 110 kV mreži).

Polazeći od pretpostavke da se kablovski vodovi rade u identičnim pogonskim i ambijentnim uslovima, moguće je odrediti vrednosti temperature provodnika. Za snagu od 114 MVA, kojoj približno odgovara strujno opterećenje od 600 A, vrednosti temperatura provodnika u ustaljenom stanju date su u tabeli 2. Analiza sprovedena na ovaj način bi podrazumevala da se napaja industrijski potrošač, čija potrošnja ne zavisi od godišnjeg doba.

TABELA 2 – TEMPERATURA PROVODNIKA

Presek provodnika [mm ²]	Transpozicija električnih zaštita	Temperatura provodnika leti [°C]	Temperatura provodnika zimi [°C]
630/95	Nije primenjena	106,47	91,64
	Primenjena	87,53	73,50
800/95	Nije primenjena	80,50	66,85
	Primenjena	64,66	51,69
1000/95	Nije primenjena	62,73	49,90
	Primenjena	49,26	37,01

$\rho_{tz} = 1,2 \text{ Km/W}; \rho_{tzi} = 2,5 \text{ Km/W}; \theta_{tlaleti} = 20 \text{ }^\circ\text{C}; \theta_{tlazimi} = 10 \text{ }^\circ\text{C}; m = 0,8; h = 1,5 \text{ m}; I = 600 \text{ A};$

Na osnovu vrednosti iz tabele 2 možemo zaključiti da su temperature za sve poprečne preseke veće u letnjem periodu i za slučaj kada nije primenjena transpozicija električnih zaštita. Za istu vrednosti snage, koja bi se prenosila vodovima, u pogledu zagrevanja daleko je povoljnija situacija u slučaju kada je poprečni presek provodnika veći. Dakle dolazi se do zaključka da su, primenom transpozicije električnih zaštita, temperature kojima će biti izloženi provodnici manje, kao i da je apsolutna razlika u temperaturama u slučaju kada je primenjen *cross bonding* veća kod kablova sa manjim poprečnim presecima provodnika.

Promene osnovnih karakteristika kablova najčešće su izazvane zbog povećanih termičkih naprezanja. Ovo za posledicu ima da je proces starenja izolacije na većim temperaturama intenzivniji, pa dolazi do degradacije materijala i pada dielektričnih karakteristika, što može rezultirati i električnim probojom. Sa aspekta životnog veka kablovskog voda, povoljnija je situacija kada se isti izlaže manjim termičkim naprezanjima.

Gubitke na godišnjem nivou usled prenosa energije u provodnicima kablovskih vodova, uzimajući u obzir pretpostavku da je vrednost napona konstantna, možemo izračunati na osnovu relacije:

$$W_p = \frac{R_p}{U^2(\cos \varphi)^2} P_{max}^2 \tau, \quad (4.1)$$

gde je W_p [MWh/god] energija koja se pretvora u toplotu, U [kV] vrednost napona, $\cos \varphi$ faktor snage (usvojena je vrednost $\cos \varphi = 1$), P_{max} [W] maksimalna snaga u trajanju od 15 minuta na godišnjem nivou, τ vreme trajanja maksimalnih gubitaka.

Vrednosti za P_{max} i τ biće usvojene na osnovu merenja, koja su zabeležena tokom 2015. godine, na kablovskom vodu 110 kV koji povezuje transformatorsku stanicu 220/110 kV Beograd 17 sa transformatorskom stanicom 110/10 kV Beograd 36 (radni naziv „Obilić”), a koji je izveden kablovima tipa XHE 48-A 1x1000/95 mm².

U tabeli 3 prikazani su Džulovi gubici i gubici u metalnom omotaču po km kablovskog voda u zavisnosti od poprečnog preseka kabla i primene transpozicije električnih plašteva.

TABELA 3 – GUBICI U KABLU

Presek provodnika [mm ²]	Transpozicija električnih zaštita	Džulovi godišnji gubici svedeni na dužinu od 1 km [MWh/km]	Gubici u električnoj zaštiti za $\theta_{tla} = 20$ [°C], [MWh/km]	Gubici u električnoj zaštiti za $\theta_{tla} = 10$ [°C], [MWh/km]
630/95	Nije primenjena	209,85	34,42	34,52
	Primenjena		0	0
800/95	Nije primenjena	172,01	34,52	34,61
	Primenjena		0	0
1000/95	Nije primenjena	141,05	33,54	33,63
	Primenjena		0	0
$P_{max}=118,8$ MWh; $\tau=2949,3$ h; $\rho_{tz} = 1,2$ Km/W; $\rho_{tzi} = 2,5$ Km/W; $m = 0,8$; $h = 1,5$ m;				

Na osnovu vrednosti iz tabele 3 možemo zaključiti da su, za iste pogonske uslove, gubici u kablovima sa provodnicima većeg poprečnog preseka manji. Razlike u gubicima u letnjem i zimskom periodu, koji se javljaju u električnoj zaštiti, kada nije izveden *cross bonding*, se jako malo razlikuju i neznatno su veći u zimskom periodu. U gornjoj analizi zanemareno je postavljanje kablova u horizontalnoj ravni, pa se mogu očekivati i veći gubici koji zavise od međusobnog rastojanja između kablova i dužine na kojoj ne postoje uslovi za polaganje kablova u snopu.

5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Da bi bilo moguće vrednovanje i poređenje različitih varijanti, u ovom slučaju to su različite vrednosti preseka kablova i primena transpozicije električnih zaštita, neophodno je sve troškove svesti na isti vremenski trenutak, obično je to početak, kraj eksploatacije ili svedeni godišnji troškovi.

Investicioni troškovi kabla i troškovi gubitaka se metodom godišnje vrednosti svode na isti vremenski trenutak, kako bi se mogli porediti. U proračunu je uzeto da su godišnji troškovi eksploatacije kabla iz godine u godinu jednaki i da zavise samo od gubitaka kabla, dok su troškovi održavanja kabla zanemareni. Ovi troškovi zapravo predstavljaju ekvivalentnu novčanu vrednost godišnjih gubitaka energije na kablovskom vodu, u proračunu se uzima da je cena gubitaka 50 euro/MWh.

Prilikom proračuna ekvivalentnih troškova uzima se da je životni vek kabla $n = 40$ godina. Za stopu aktualizacije obično se uzimaju vrednosti u opsegu $p_n = 6-9\%$ [10, 11] (u proračunu je uzeto da je $p_n = 7.5\%$). Ukupni troškovi na godišnjem nivou računaju se na sledeći način:

$$T_0 = K \frac{p_n(1+p_n)^n}{(1+p_n)^n - 1} + E, \quad (5.1)$$

gde su K - ukupni investicioni troškovi u trenutku početka perioda eksploatacije, E – godišnji troškovi eksploatacije kabla. U tabeli 4 prikazani su investicioni, troškovi gubitaka, kao i ukupni troškovi po km kablovskog voda, u zavisnosti od preseka kabla i toga da li je primenjena transpozicija električnih zaštita.

Poređenjem ukupnih svedenih godišnjih troškova, iz tabele 4 se vidi da je ekonomsko najisplativija varijanta upotreba kabla preseka 1000 mm² bez primene transpozicije električnih zaštita. Za ovu vrednost poprečnog preseka kabla veća je i trajno dozvoljena termička struja, nego za kablove manjeg poprečnog preseka, zato je ovo rešenje bolje ne samo sa ekonomskog, već i sa tehničkog aspekta.

U urbanim sredinama, gde se i najčešće koriste 110 kV kablovski vodovi, beleži se stalni trend rasta potrošnje, stoga kablovski vodovi moraju termički da izdrže veću vrednost struje. Primenom kabla preseka 1000 mm² bez *cross bonding*-a ostavlja se mogućnost rekonstrukcije ovog kabla u okviru koje će se izvršiti transpozicija električnih zaštita i povećanja prenosne moći kabla ukoliko to bude potrebno.

TABELA 4 - TROŠKOVI

Presek provodnika [mm ²]	Transpozicija električnih zaštita	Svedeni godišnji investicioni troškovi elektromontažnih radovi i opreme [euro/(km·god)]	Svedeni godišnji investicioni troškovi građevinskih radova [euro/(km·god)]	Godišnji troškovi gubitaka [euro/(km·god)]	Ukupni svedeni godišnji troškovi [euro/(km·god)]
630/95	Nije primenjena	34.465,03	13.233,39	12.218,32	59.916,74
	Primenjena	35.100,23	14.292,06	10.492,33	59.884,62
800/95	Nije primenjena	34.959,96	13.498,05	10.330,72	58.788,73
	Primenjena	35.616,33	14.556,72	8.600,33	58.773,39
1000/95	Nije primenjena	35.708,97	13.762,72	8.733,77	58.205,46
	Primenjena	36.386,52	14.821,39	7.052,33	58.260,24

$\rho_{tz} = 1,2 \text{ Km/W}$; $\rho_{tzi} = 2,5 \text{ Km/W}$; $\theta_{tla} = 10 \text{ [}^\circ\text{C]}$; $m = 0,8$; $h = 1,5 \text{ [m]}$; $p_n = 7,5\%$; $n = 40$

6. ZAKLJUČAK

Izbor optimalnog preseka kabla predstavlja relativno složen zadatak. Na osnovu analize prikazane u ovom radu, kao i usvojenih pretpostavki, može se zaključiti da je u gradskim sredinama gde se beleži trend rasta potrošnje najbolje rešenje i sa tehničkog (trajno dozvoljene struje i pogonske temperature) i sa ekonomskog aspekta (gubici električne energije i godišnji svedeni investicioni troškovi), za napajanje dve transformatorske stanice 110/x kV naznačene snage 2x31,5 MVA, za indikativne parametre koji su po vrednosti isti ili blizu vrednostima koje su uvojene za potrebe analize u ovom radu, korišćenje kabla preseka 1000 mm² bez primene transpozicije električnih zaštita. Promenom indikativnih parametara (kao što su dubina polaganja, termička otpornost tla...) dobijaju se drugačije vrednosti termički dozvoljenih struja, kao i vrednosti gubitaka u kابلu.

Kao predmet dalje analize optimalnog preseka kabla mogu se uvažiti i gubici usled polaganja kablova u horizontalnoj ravni, kao i ukrštanja ili paralelna vođenja sa drugim izvorima toplote, kako bi se dobili još precizniji rezultati.

LITERATURA

1. D. Tasić, 2001. godina, „Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike”, Edicija Osnovni udžbenici, Elektronski fakultet, Niš
2. S. Nikolajević, 2007. godina „Kablovska Tehnika”, JP Službeni list SRJ, Beograd
3. IEC Publication 60827-1-1, 1994. god., „Calculation of the current Rating Part 1: Current rating equaltions (100% load factor) and calculation of losses”
4. Prilog Tehničke preporuke br. 3, 2013. godina, „Metode proračuna dozvoljenog strujnog opterećenja energetskih kablova”, Beograd
5. D. Tasić, 2001. godina, „Gubici snage u električnoj zaštiti jednožilnih kablova usled cirkulacionih struja, 25. savetovanje JUKO CIGRE, R 21-04, Herceg Novi
6. A. Popovac-Damljanović, 2001. godina, „Metode transpozicije metalnih plašteva visokonaponskih kablova”, 25. savetovanje JUKO CIGRE, R 21-03, Herceg Novi
7. B. Stevanović, 2007. godina, „Opravdanost primene „cross-bonding” spojnice kod 110 kV kablovskih vodova”, 28. savetovanje JUKO CIGRE, R B1-04, Vrnjačka Banja
8. Tehnička preporuka br. 3, 2012. godina, „Osnovni tehnički zahtevi za izbor i montažu energetskih kablova i kablovskog pribora u elektrodistributivnim mrežama 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV i 110 kV”, Beograd
9. D. Tasić, N. Rajaković, 1996 godina, Uticaj promenljivog opterećenja i isušivanja zemljišta na intenzitet termički trajno dozvoljene gustine struje kabla, Savetovanje JUKO CIGRE, XIV Simpozijum o kablovima, Jagodina
10. N. Rajaković, 2008. godina, „Analiza elektroenergetskih sistema 2”, Akademska misao, Beograd
11. I. Škokljević, 2000. godina, „Planiranje elektroenergetskih sistema”, Taurus Public, Beograd