

UTICAJ KONSTRUKCIJE I USLOVA POLAGANJA NA STRUJNO OPTEREĆENJE KABLOVSKOG VODA

A. ĐORĐEVIĆ, Global Substation Solutions, Srbija
J. STANOJEVIĆ, Global Substation Solutions, Srbija

UVOD

Termički dozvoljena struja kabla u stacionarnom režimu određena je trajno dozvoljenom temperaturom provodnika, odnosno izolacije. Pri određivanju ove struje moraju se pored konstruktivnih karakteristika kabla uvažiti i uslovi u sredini koja ga okružuje[1]. Za odgovarajuću konstrukciju, napon i presek kabla standardizovane su vrednosti nazivnih strujnih opterećenja, koje se odnose na slučaj distributivnog opterećenja kabla i odgovarajućih uslova eksploatacije. Ukoliko se konstrukcija kabla i uslovi eksploatacije razlikuju od standardizovanih, strujno opterećenje kabla može da varira u značajnim granicama. U radu je analiziran uticaj konstrukcije kabla, kao i uslova polaganja na mogućnost njegovog strujnog opterećenja. Za proračun strujnog opterećenja korišćen je matematički model koji obuhvata proračun temperature provodnika, odnosno njegove električne otpornosti, termičkih otpora i električnih gubitaka elemenata kabla. Demonstrirana je primena predstavljenog modela na primeru praktičnog kablovskog sistema.

MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN TERMIČKI DOZVOLJENE STRUJE KABLA

Strujno opterećenje kabla treba da bude ograničeno tako da toplota proizvedena u kablju bude odvedena u okolinu, a da se pri tome ne prekorači dozvoljena maksimalna temperatura provodnika. Dozvoljeno strujno opterećenje kabla u stacionarnom stanju određeno je relacijom [2]:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4)]}{R [T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (1)$$

Gde je:

$\Delta\theta$ - nadtemperatura provodnika, tj. razlika između dozvoljene temperature provodnika θ_p i temperature ambijenta θ_a ($\Delta\theta = \theta_p - \theta_a$) [K],

W_d - dielektrični gubici po jedinici dužine kabla [W/m],

T_1, T_2, T_3 - toplotni otpori izolacije, sloja između metalnog ekrana i armature kabla i spoljašnje zaštite (plašta) kabla, respektivno [Km/W],

T_4 - spoljašnji toplotni otpor tj. toplotni otpor okolnog medijuma [Km/W],

R - električna otpornost provodnika po jedinici dužine [Ω /m],

n - broj žila kabla,

λ_1 - odnos gubitaka u električnoj zaštiti i plaštu kabla prema gubicima u provodniku.

λ_2 - odnos gubitaka u armaturi kabla prema gubicima u provodniku.

Kabl se sa gledišta procesa koji se odigravaju u njegovoj izolaciji- dielektriku ponaša kao kondenzator. Dielektrični gubici u kابلu iznose:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (2)$$

Gde je: $\omega = 2\pi f$ - ugaona učestanost [Hz], C - kapacitet kabla po jedinici dužine kabla [μ F/m], U - napon kabla [kV], $\tan \delta$ - faktor gubitaka dielektrika.

Kapacitet kabla se određuje pomoću relacije:

$$C = \frac{\epsilon}{18 \cdot \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} \cdot 10^{-9} \quad (3)$$

Gde je: ϵ - relativna permeabilnost izolacije, D_i - spoljašnji prečnik izolacije [mm], d_c - prečnik provodnika, uključujući i ekran provodnika [mm].

Vrednosti toplotnih otpora elemenata kabla T_1, T_2, T_3 i toplotni otpor okoline T_4 zavise od konstrukcije kabla i načina polaganja. Gubici koji se javljaju u električnoj zaštiti kabla zavise od načina na koji je izvedena električna zaštita, načina uzemljenja električne zaštite i načina polaganja kablova. Analitički izrazi za određivanje termičkih otpora elemenata kabla, kao i gubitaka u električnoj zaštiti i armaturi kabla dati su u [2].

Električna otpornost provodnika pri temperaturi provodnika θ_p se određuje pomoću relacije:

$$R = R' (1 + y_s + y_p) = R_0 \cdot (1 + \alpha_{20} (\theta_p - 20)) \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (4)$$

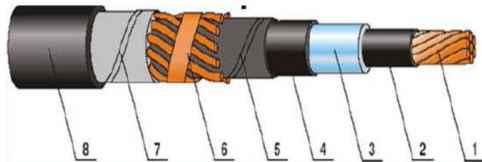
gde je: R' - otpornost provodnika pri jednosmernoj struji i temperaturi provodnika θ_p , y_s - faktor skin efekta, y_p -

faktor efekta blizine, R_0 - otpornost provodnika pri jednosmernoj struji i temperaturi provodnika od 20°C, α_{20} - temperaturni koeficijent na temperaturi provodnika od 20°C.

Iz relacije (1) se vidi da strujno opterećenje kabla zavisi od stalnih i promenljivih veličina. Stalne veličine su one koje se odnose na konstrukciju kabla i ne menjaju se pri trajnom strujnom opterećenju. Pored stalnih veličina postoje i promenljive veličine koje su zavisne od sredine u kojoj je kabl položen. Korišćenjem opisanog modela za proračun termički dozvoljene struje kabla analizirana je mogućnost strujnog opterećenja kablova različitih konstrukcionih karakteristika, pri različitim uslovima eksploatacije.

UTICAJ KONSTRUKCIJE NA STRUJNO OPTEREĆENJE KABLOVSKOG VODA

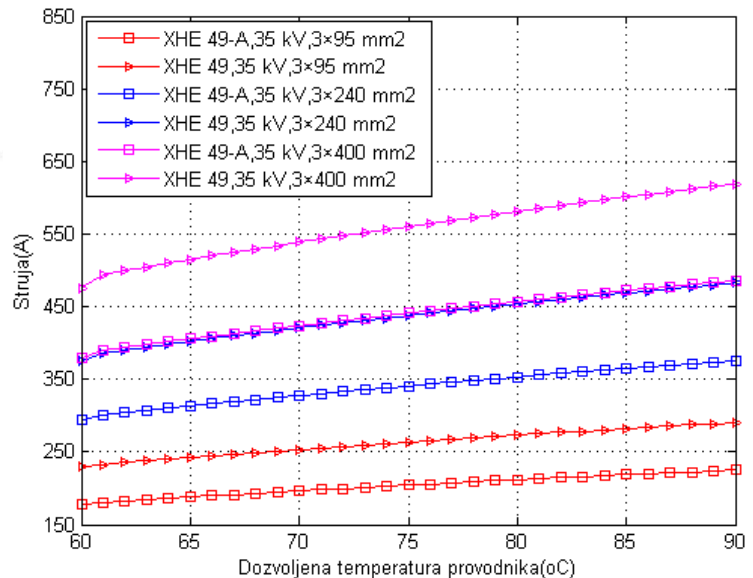
Konstrukcija energetskog kabla prvenstveno zavisi od naponskog nivoa, odnosno naznačenog napona i uslova polaganja (u zemlji, pod vodom, u agresivnoj sredini, u prostorijama - na regalima, u cevima, ispod maltera i sl.). Na Sl.1. prikazani su osnovni elementi konstrukcije jednožilnog sredjenaponskog kabla.



Sl.1. Konstrukcija jednožilnog kabla

1- provodnik, 2- unutrašnji poluprovodni sloj, 3- izolacija, 4- spoljašnji poluprovodni sloj, 5- separator, 6- električna zaštita, 7- separator, 8- spoljašnji plašt.

Sl.2. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova XHE 49-(A), 35 kV, različitog preseka, položenih u zemlji temperature 20°C, toplotnog otpora 1.5 Km/W, na dubini od 0.9m



Kao materijal za provodnike kablova upotrebljavaju se bakar i aluminijum. Primena aluminijuma kao električnog provodnika je opravdana zbog manje težine i niže cene za istu provodnost. Specifična masa aluminijuma je oko 3.5 puta manja od specifične mase bakra. Provodnost aluminijuma pri jednosmernoj struji i temperaturi provodnika od 20°C je oko 1.6 puta manja od provodnosti bakra, dok je trenutna cena bakarnog provodnika oko tri puta veća od cene aluminijumskog provodnika. Sa druge strane, bakar je elastičniji, otporniji na spoljašnje uticaje, ima znatno višu tačku topljenja nego aluminijum, veću čvrstoću na kidanje i mehanički se može više opteretiti.

Na grafiku na Sl.2. data je zavisnost dozvoljenog strujnog opterećenja kablova tipa XHE 49(-A), 35 kV od dozvoljene temperature provodnika (izolacije), za različite preseke kablova. Kabl se izrađuje od bakarnog (XHE 49) ili aluminijumskog (XHE 49-A) kompaktnog užeta kao provodnika, sa poluprovodnim slojevima (ekranima) preko provodnika i izolacije, poluprovodnom trakom ispod i preko električne zaštite (od bakarnih žica i bakarne trake) i aluminijumskom folijom ispod spoljašnjeg plašta od polietilena. Proračun je izvršen za slučaj polaganja tri jednožilna kabla u snopu, u zemlji temperature 20°C i toplotnog otpora 1.5 Km/W, na dubini od 0.9m. Sa grafika se vidi da je dozvoljeno strujno opterećenje bakarnog provodnika istog preseka i temperature za oko 30% veće od dozvoljenog strujnog opterećenja provodnika od aluminijuma.

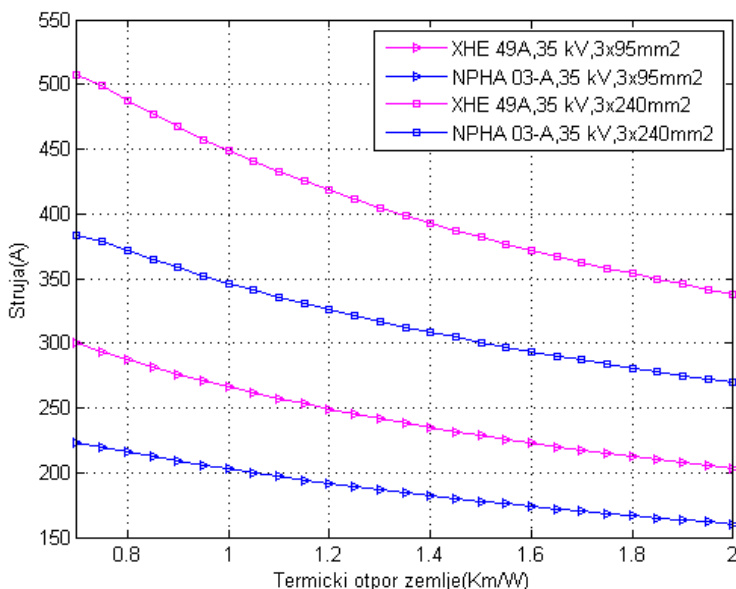
Pri temperaturi provodnika od 90°C, dozvoljeno strujno opterećenje bakarnog kabla preseka 240 mm² iznosi 486.8 A, a kabla od aluminijuma preseka 400 mm² iznosi 482.3A. To praktično znači da bi za gotovo istu strujnu nosivost morali koristiti aluminijumski provodnik koji je za oko 65% većeg preseka od bakarnog provodnika:

$$S_{AL} = 1.65 \cdot S_{CU} \quad (5)$$

Prostiranju toplote sa provodnika suprostavlja se izolacija kabla. Izolacija kabla ima različite toplotne otpornosti, tako polietilen ima termički otpor 3,5 Km/W, polivinilhlorid 6 Km/W, izolacija uljnog kabla 5 Km/W, papir impregnisan u ulju 6 Km/W. Bitna razlika ovih materijala je njihovo ponašanje na povišenim temperaturama.

Dozvoljena radna temperatura izolacije od polivinilhlorida i polietilena je 70°C, kablova sa izolacijom od umreženog polietilena je 90°C, kablova izolovanih impregnisanim papirom, uljem ili gasom 65^o-85^oC.

Tehničkom preporukom br.3 Elektrodistribucije Srbije [3] za kablovske mreže nominalnog napona 35kV preporučuje se primena dva osnovna tipa kabla: XHE 49-A i NPHA 03-A. NPHA 03-A je jednožilni kabl sa aluminijumskim provodnikom i izolacijom od naročito impregnisanog papira, sa poluprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, plaštom od aluminijumske cevi i spoljašnjim polietilenskim plaštom visoke gustine.



SI.3. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova tipa XHE 49-A i NPHA 03-A, 35 kV, preseka 95mm² i 240 mm², položenih u zemlji temperature 20°C, na dubini od 0.9m

U poređenju sa umreženim polietilenom impregnisanim papir ima veću specifičnu toplotnu otpornost (6Km/W) i manje dozvoljene temperature zagrevanja u normalnom (65°C) i nužnom (95÷100°C) pogonu. Kao glavni nedostatak kablova sa izolacijom od impregnisanog papira ističe se mogućnost tečenja kompaunda. Ovaj nedostatak je delimično otklonjen korišćenjem izolacije od naročito impregnisanog papira (polučvrsti kompaund). S ovom izolacijom dozvoljava se temperatura zagrevanja u normalnom pogonu od 70÷85°C i u nužnom pogonu 110°C. Nedostatak izolacije od umreženog polietilena je mala otpornost na mehanička oštećenja.

U cilju poređenja karakteristika pomenuta 2 tipa kabla analizirana je mogućnost njihovog strujnog opterećenja. Proračun je izvršen za slučaj da su tri jednožilna kabla položena u snopu, u zemlji različitih vrednosti toplotnog otpora i temperature 20°C, na dubini od 0.9m. Pri proračunu je za temperaturu provodnika u normalnom pogonu θ_p korišćena vrednost od 75°C za kablove tipa NPHA 03-A, a za kablove tipa XHE 49A vrednost od 90°C.

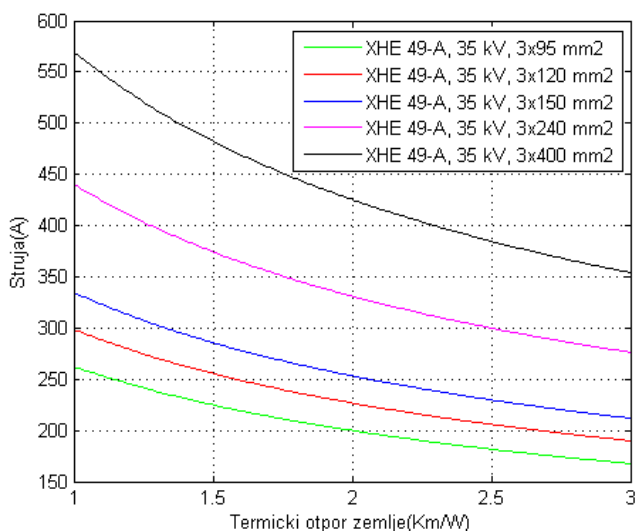
Relativna dielektrična konstanta i faktor gubitaka izolacije od umreženog polietilena su $\epsilon_r = 2.3, \tan \delta = 0.0005$ dok su za papirnu izolaciju $\epsilon_r = 3.5, \tan \delta = 0.0024$.

Rezultati pokazuju da je izolacija od umreženog polietilena pogodnija sa aspekta dozvoljenog strujnog opterećenja kabla(SI.3). Prednost kablova sa izolacijom od umreženog polietilena su bolje toplotne karakteristike, manji toplotni otpor i viša radna temperatura, što omogućava znatno veću strujnu opteretljivost. Sa druge strane, visoka dielektrična konstanta i faktor gubitaka izolacije od impregnisanog papira dovode do većih dielektričnih gubitaka. Stoga poslednjih godina prevladava upotreba kablova sa izolacijom od umreženog polietilena. Međutim, činjenica da su se kablovi sa izolacijom od impregnisanog papira dugo održali u upotrebi govori o njihovoj velikoj pouzdanosti.

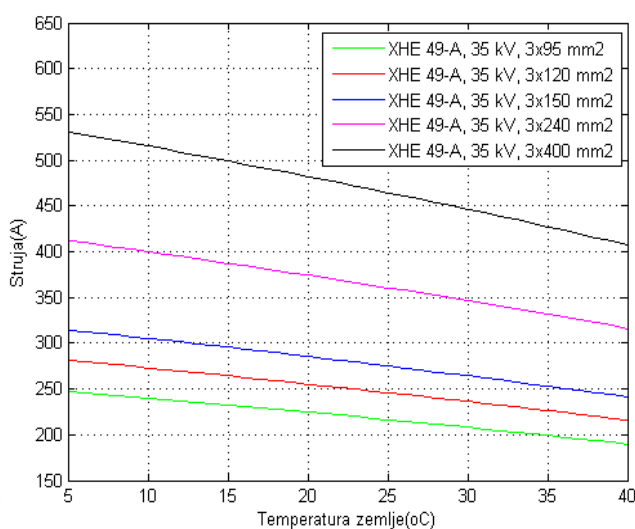
UTICAJ NAČINA POLAGANJA NA STRUJNO OPTEREĆENJE KABLOVSKOG VODA

Polaganje energetskih kablova u zemlji je najčešći način polaganja u urbanim gradskim sredinama. Toplotni otpor zemlje se suprostavlja prostiranju toplote sa površine kabela. Specifična toplotna otpornost tla ρ_t zavisi od vrste tla (šljunak, pesak, zemlja iz otkopa itd.) i sadržaja vlage u tlu u toku godine[1]. Pri proračunima se može pretpostaviti za relativno kratke vremenske periode da je toplotni otpor zemlje konstantan. Takođe, može se smatrati da je površina zemlje izoterma.

Vlažno zemljište ima približno upola manju vrednost specifičnog toplotnog otpora od suvog. U vreme maksimalnog godišnjeg opterećenja distributivnog konzuma (zimski period) pretpostavlja se normalna vlažnost tla ispod slobodnih i asfaltiranih površina u kojima se nalazi kabl, tako da se za praktične proračune i prosečne uslove rada distributivne mreže i polaganja može usvojiti vrednost $\rho_t = 1 \text{ Km/W}$, osim za dominantno peskovito tlo kada se usvaja $\rho_t = 1.5 \text{ Km/W}$. Specifični toplotni otpor zemljišta u isušenom stanju (letnji period) može dostići čak i vrednost od $\rho_t = 3 \text{ Km/W}$. Na Sl.4. prikazana je zavisnost dozvoljenog strujnog opterećenja kablova tipa XHE 49-A, 35 KV od specifičnog toplotnog otpora zemljišta. Jednožilni kablovi su položeni u snopu, u zemlji temperature 20°C , na dubini od 0.9m.



Sl.4. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova XHE 49-A, 35 kV, položenih u zemlji temperature 20°C , na dubini od 0.9m

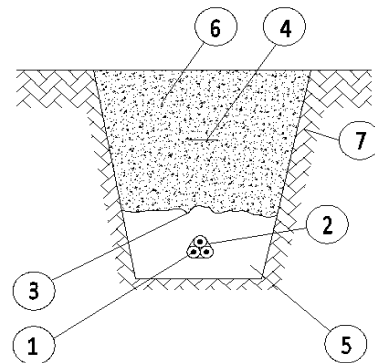
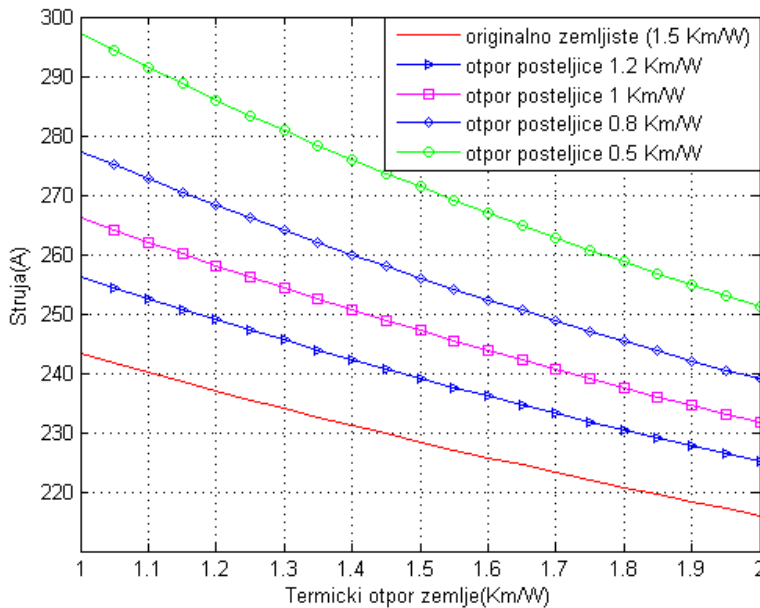


Sl.5. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova XHE 49-A, 35 kV, položenih u zemlji toplotnog otpora 1.5 Km/W , na dubini od 0.9m

Dozvoljeno strujno opterećenje kablova značajno zavisi od vrednosti specifičnog toplotnog otpora tla. Sa grafika na Sl.4. se vidi da povećanje toplotnog otpora zemljišta smanjuje dozvoljeno strujno opterećenje, pri čemu je to smanjenje nešto izraženije kod kablova većeg preseka. Poređenjem vrednosti u slučaju kada se uvažava isušivanje zemljišta ($\rho_t = 3 \frac{\text{Km}}{\text{W}}$) i u slučaju bez isušivanja zemljišta ($\rho_t = 1 \frac{\text{Km}}{\text{W}}$) može se zaključiti da se u realnim okolnostima smanjenjem sadržaja vlage opterećenje kabela može smanjiti i za više od 50%.

Dozvoljeno strujno opterećenje kablova značajno zavisi i od temperature zemljišta. Leti zemljište prima toplotu, a preko zime je odaje u atmosferu. Za potrebe proračuna i prosečne uslove rada distributivne mreže i polaganja za referentnu vrednost temperature zemlje usvaja se vrednost $\theta_z = 20^\circ\text{C}$. Na Sl.5. prikazana je zavisnost dozvoljenog strujnog opterećenja kablova tipa XHE 49-A, 35 kV od specifičnog toplotnog otpora zemljišta. Sa grafika se vidi da ako temperatura zemljišta padne npr. sa 20°C na 5°C , što odgovara zimskim uslovima, dozvoljeno strujno opterećenje kabela je za preko 10% više od dozvoljenog opterećenja pri referentnoj vrednosti temperature zemlje.

U slučaju teških uslova odvođenja toplote i opasnosti od isušivanja tla (na primer pri polaganju više kablova u isti rov na izlazu iz TS, pri ukrštanju sa toplovodom itd.), pri polaganju kablova u zemlji koriste se posteljice od specijalnih mešavina, na primer: mešavina šljunka i peska sa dodatkom do 15% mlevenog krečnjaka, mešavina peska i cementa itd. Za posteljicu se može koristiti i sitnozrnasta zemlja (iz otkopa ili dopremljena). Primer polaganja kablova u kablovskoj posteljici u zemlji prikazan je na Sl.6. Osnovna namena kablovske posteljice je da poboljša odvođenje toplote sa kabla na okolno zemljište [4]. U tom cilju analizirana je zavisnost dozvoljenog strujnog opterećenja kabla XHE 49-A, 3x95 mm² od specifičnog toplotnog otpora zemljišta za slučaj polaganja kablova u originalnom zemljištu bez posteljice, kao i za kablovske posteljice različitog toplotnog otpora i debljine 20 cm (Sl.7.).



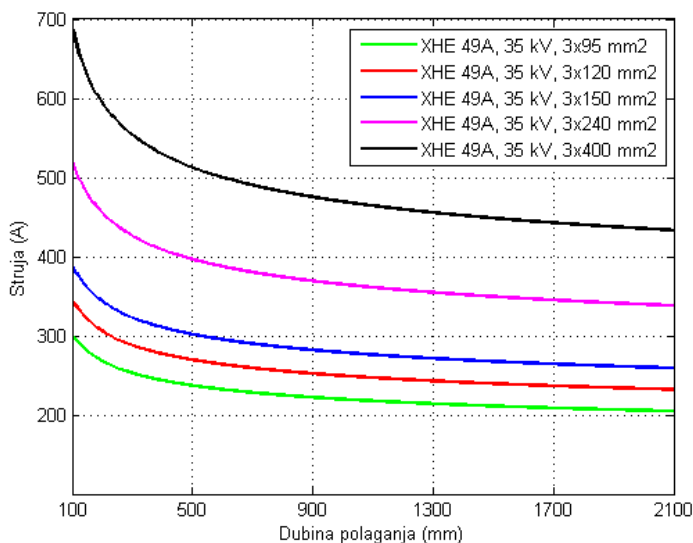
Sl.6. Primer polaganja kablova u rov

1-energetski kabl, 2- traka za formiranje trouglastog snopa, 3-plastični štitnik, 4-PVC traka za upozorenje, 5-kablovska posteljica, 6-prvobitno iskopana zemlja, 6- okolno tlo

Sl.7. Dozvoljeno strujno opterećenje kabla XHE 49-A, 35 kV, 3x95mm², položenog u zemlji temperature 20°C, na dubini od 0.9m

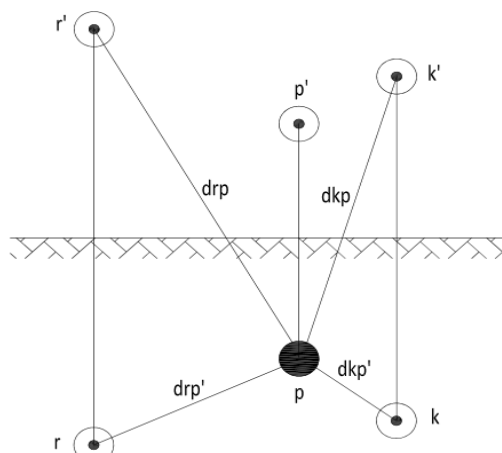
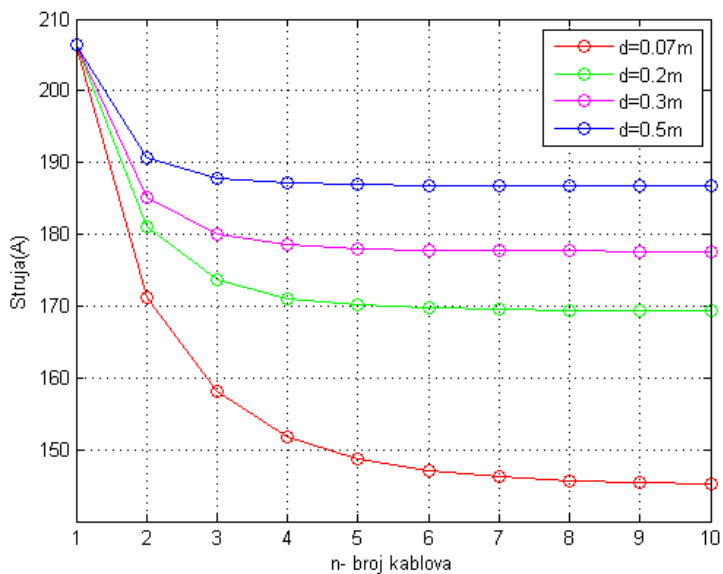
Rezultati su pokazali da provodnik kabla u posteljici ima veću nosivost od kabla položenog u originalno zemljište, što je dobar pokazatelj toplotnih osobina posteljice, pri čemu je to povećanje izraženije što je toplotni otpor posteljice manji. Sa grafika se vidi da se za posteljicu toplotnog otpora $0.5 \frac{Km}{W}$ opterećenje kabla može povećati za više od 20% od opterećenja kabla položenog u originalno zemljište.

Strujno opterećenje kabla zavisi i od dubine polaganja kablova u zemlji. Za polaganje kablova određenog naponskog nivoa prema Tehničkoj preporuci br.3 Elektrodistribucije Srbije[3] propisana je nazivna dubina polaganja, pri čemu se kablovi viših napona polažu na većim dubinama. Međutim, odstupanja od propisanih vrednosti se javljaju često u praksi usled postojanja prepreka, drugih instalacija ili kablova, kao i u slučajevima nepovoljnih uslova polaganja (na primer: kamenito tlo). U tom slučaju je uobičajeno polagati kabl na većoj dubini. Na grafiku na Sl.8 prikazana je zavisnost dozvoljenog strujnog opterećenja kablova tipa XHE 49-A, različitog preseka, od dubine ukopavanja. Rezultati su pokazali da se sa povećanjem dubine polaganja smanjuje dozvoljeno strujno opterećenje, pri čemu je to smanjenje nešto izraženije kod kablova većeg preseka.



Sl.8. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova tipa XHE 49-A, 35 kV, položenih u snopu, u zemlji temperature 20°C i toplotnog otpora 1.5Km/W

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla u konkretnim uslovima polaganja i opterećenja kabla zavisi takođe i od broja i rastojanja kablova u zemlji. Kada se u isti rov polaže veliki broj energetskih kablova prenosna moć kablova može da bude znatno umanjena. Posmatraće se slučaj međusobnog toplotnog uticaja kablova istog tipa i jednakog strujnog opterećenja. Postupak proračuna strujne opteretljivosti grupe kablova istog tipa i jednakog opterećenja se svodi na toplotni proračun kabla koji je najviše zagrejan [5],[6]. To je obično kabl koji se nalazi u sredini skupa kablova.



Sl.9. Međusobni toplotni uticaj kablova

Sl.10. Dozvoljeno strujno opterećenje kabla XHE 49-A, 35 kV, 3x95mm² u grupi od n zajednički vođenih kablova na rastojanju d

Razlika između temperature provodnika i temperature spoljne površine kabla (tj. nadtemperatura provodnika u odnosu na spoljnu površinu kabla) $\Delta\theta_{pD}$ iznosi [2]:

$$\Delta\theta_{pD} = \Delta\theta_p + \sum_{i=1, i \neq k}^n \Delta\theta_{ip} \quad (6)$$

Gde je:

$\Delta\theta_p$ - nadtemperatura provodnika kabla p izvan temperature okoline, izazvana proticanjem struje kroz provodnik,

$\sum_{i=1, i \neq p}^n \Delta\theta_{ip}$ - nadtemperatura provodnika kabla p izvan temperature okoline, izazvana uticajem grupe od n kablova

(izuzimajući kabl p), pri čemu se uticaj svakog kabla pojedinačno može odrediti na osnovu izraza:

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} \cdot \rho_t \cdot W_k \cdot \ln\left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}}\right) = W_k \cdot T_{zk} \quad (7)$$

Gde je:

ρ_t - toplotni otpor izolacije [Km/W]

W_k - snaga gubitaka u k -tom kablo, po jedinici dužine kabla [W/m]

T_{zk} - dodatni toplotni otpor zemlje izazvan uticajem k -tog kabla [Km/W]

d'_{pk} i d_{pk} - rastojanje između osa posmatranog kabla p i kabla k i rastojanje između centara kabla p i lika kabla k u odnosu na površinu zemlje [mm] (Sl. 9).

Na Sl. 10 prikazana je zavisnost dozvoljenog strujnog opterećenja kabla XHE 49-A, 35 kV, 3x95 mm² od broja zajednički vođenih kablova n , na rastojanju centara kablova d . Proračun je izvršen za slučaj polaganja n kablova u zemlji temperature 20°C i toplotnog otpora 1.5 Km/W, na dubini od 0.9m. Sa grafika se vidi da sa povećanjem broja zajednički vođenih strujnih kola dolazi do smanjenja dozvoljenog strujnog opterećenja kabla usled povećanja ukupnog toplotnog otpora zemlje. Ovo smanjenje je izraženo što je rastojanje između centara kablova manje.

ZAKLJUČAK

Strujno opterećenje kabla treba ograničiti tako da, na svim mestima duž kabla, toplota proizvedena u kablo bude odvedena u okolinu pod postojećim okolnostima. Pri proračunu strujnog opterećenja treba voditi računa o brojnim faktorima koji utiču na vrednosti toplotnog otpora kabla. Unutrašnji toplotni otpor je određen konstrukcijom kabla i osobinama materijala. Pri određivanju spoljašnjeg toplotnog otpora duž trase treba uzeti u obzir sledeće: dubinu polaganja i sastav zemlje, moguće povećanje specifičnog otpora usled isušivanja tla, dodatno zagrevanje od strane kablova koji leže u blizini (polaganje više kablova paralelno), temperaturu okolne zemlje itd. U ovom radu su analizirana strujna opterećenja kablova različitih konstrukcionih karakteristika i uslova eksploatacije. Na konkretnim primerima pokazano je da se variranjem vrednosti pomenutih faktora može značajno uticati na mogućnost strujnog opterećenja u normalnom pogonu. Iz tog razloga je neophodno vršiti proračun strujnog opterećenja za uslove eksploatacije koji vladaju na kablovskoj trasi.

LITERATURA

- [1] Lalević B, Elektroenergetski kablovi, Beograd, 2007.
- [2] Calculation of the Continuous Current Rating of Cables, IEC Publication 287, 1982.
- [3] Tehnička preporuka br.3, Elektrodistribucija Srbije, oktobar 1991.
- [4] Tasić D, Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike, Edicija osnovni udžbenici, Elektronski Fakultet, Niš, 2001.
- [5] Heinhold L., Power Cables and Their Application, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1990.
- [6] S. Y. King, N. A. Halfter, Underground Power Cables, Longman, London, 1982.