

Zagrevanje podzemnih telekomunikacionih kablova usled struja indukovanih kratkim spojem – teorijska razmatranja

Dardan Klimenta, član IEEE-a, Branislav Pajković, Jordan Radosavljević i Dejan Anđelković

Sadržaj — U ovom radu je predložen numerički model za termičku analizu podzemnih telekomunikacionih kablova usled dejstva kratkog spoja nastalog na susednom 220 kV-nom nadzemnom vodu. Struja kratkog spoja koja protiče kroz uzemljene metalne delove nadzemnih objekata i sistem uzemljenja indukuje u podzemnim telekomunikacionim kablovima napone i struje. Ove struje mogu zagrejati telekomunikacione kablove, odnosno njihove provodnike i izolaciju samo do temperatura koje ih ne mogu termički oštetiti. U termičkoj analizi uzete su konstantne vrednosti za početne uslove, granične uslove, izvor toplote, termo-fizičke i električne osobine materijala. Konačno, ovde dobijeni rezultati su potvrdili činjenicu zbog koje se termički uticaji zanemaruju pri klasičnom proračunu kratkim spojem indukovanih napona i struja.

Ključne reči — indukovana struja, kratki spoj (KS), metoda konačnih elemenata (MKE), nadzemni vod, telekomunikacioni (TK) kabl, termička analiza.

I. UVOD

OSIM usled KS-ova sa zemljom na obližnjim podzemnim i nadzemnim vodovima srednjeg i visokog napona [1], u podzemnim TK (ili signalnim) kablovima do indukovanja napona i struja može doći još usled komutacionih operacija u primarnim kolima (na visokom naponu) ili udara groma [2]. Standardna analiza uticaja elektroenergetskih (EE) vodova na TK kablove svodi se samo na proračun napona koji se mogu indukovati u TK kablovima usled njihove induktivne ili električne sprege sa nekim od EE vodova ili elemenata EE postrojenja za vreme zemljospoja [1,3]. Ovi proračuni se obično vrše radi zaštite zaposlenih i elektronske opreme u TK postrojenjima, kao i samih TK kablova od velikih amplituda indukovanih napona ili od smetnji [1].

Međutim, u svim tim proračunima i naučnim publikacijama, generalno se zanemaruje zagrevanje TK kablova usled indukovanih struja u njima. Prema [2] u slučaju direktnog udara groma, u TK kablju se može

pojavit i strujni talas amplitude do 10 kA i trajanja temena (temene vrednosti) od 1.2 μ s što s aspekta Joule-ovih gubitaka, odnosno zagrevanja sigurno nije zanemarljivo. Publikacija na temu uticaja komutacionih operacija u visokonaponskim postrojenjima na obližnje TK kablove uopšte nema, ali treba istaći rezultat koji je prezentovan u [4] gde se u najnepovoljnijem slučaju usled komutacije u 161 kV-nom sistemu pojavio prenaponski talas amplitude od 256.33 kV i trajanja temena od 18.3 ms. Izuzev za slučaj direktnog udara groma u TK kabl velike amplitude i dovoljnog trajanja, zbog izuzetno kratkog trajanja ovih talasa, kao i amplitude indukovanih struja i njihovog mogućeg trajanja u TK kablovima, može se sa sigurnošću reći da je malo verovatno da bi u datim vremenima indukovane struje zagrejale neki od TK kablova do temperature koja bi bila veća od njegove maksimalno dozvoljene radne temperature. Prema tome, termički model koji je predložen u ovom radu ima isključivo teorijski značaj i primenjen je na slučaj kvara za koji se u susednim TK kablovima ne indukuju najviše moguće vrednosti struja.

U ovom radu je predložen termički model za analizu zagrevanja podzemnih TK kablova usled dejstva KS-a nastalog na nekom susednom nadzemnom vodu. Za potrebe termičke analize TK kabl je ekvivalentiran prema [2] na način koji je sličan postupku termičkog ekvivalentiranja sredjenaponskih višežilnih kablova datom u [5]. Indukovana struja u TK kablju predstavlja jedini izvor toplote lociran u provodniku ekvivalentnog koaksijalnog TK kabla, odnosno u celom rešavanom domenu. Dati linearni MKE model primenljiv je i u analizi problema zagrevanja TK kablova usled struja indukovanih udarom groma i komutacionim operacijama.

II. FORMULACIJA PROBLEMA

Planira se polaganje TK kabla tipa A-2Y(L)2Y 70×2×0.8 STIII Bd [6] u blizini 220 kV-nog nadzemnog voda zbog čega je potrebno ispitati da li dati TK kabl zadovoljava standardom dozvoljene vrednosti podužne elektromotorne sile (EMS) koja se indukuje u TK kablju za vreme KS-a na njemu bliskom nadzemnom vodu. Uz to, potrebno je odrediti vrednosti temperature provodnika TK kabla za vreme dejstva indukovane podužne EMS. Poznati su sledeći podaci:

(i) $\ell=5$ km – dužina paralelnog vođenja TK kabla i nadzemnog voda; $a=100$ m – rastojanje između TK kabla i nadzemnog voda; $\rho_E=50$ Ω ·m – specifični električni otpor zemlje; M'_{Ee} – podužna međusobna induktivnost

Dardan Klimenta, član IEEE-a, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Kneza Miloša br. 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, (e-mail: dklimenta@hotmail.com)

Branislav Pajković, Fakultet za menadžment u saobraćaju i komunikacijama – Berane, Donje Luge bb, 51000 Berane, Crna Gora, (e-mail: bisko.ba@gmail.com)

Jordan Radosavljević, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Kneza Miloša br. 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, (e-mail: radjor73@yahoo.com)

Dejan Anđelković, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Kneza Miloša br. 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, (e-mail: aaa.dejo@gmail.com)

između TK kabla i nadzemnog voda koja prema [1] za $a=100$ m i $\rho_E=50 \Omega \cdot \text{m}$ iznosi $M'_{Ee}=0.4 \times 10^{-6}$ H/m;

(ii) za 220 kV-ni nadzemni vod: standardno izvedeno uzemljenje; $f=50$ Hz – učestanost; 185 mm^2 i 32 mm^2 – nazivni preseki aluminijumskog i čeličnog dela zaštitnog Al-Fe užeta, respektivno; $r_E=0.62$ – redukcioni faktor zaštitnog Al-Fe užeta nazivnog preseka $185/32 \text{ mm}^2$ pri srednjoj vrednosti specifičnog električnog otpora zemlje od $\rho_E=50 \Omega \cdot \text{m}$ [1]; $3 \cdot I_0=8.5$ kA – struja jednopolnog KS-a sa zemljom koja odgovara ukupnoj dužini paralelnog vođenja TK kabla sa 220 kV-nim nadzemnim vodom [1]; I_0 – nulta komponenta struje kvara; $w=0.7$ – faktor očekivanja koji uzima u obzir činjenicu da je malo verovatno istovremeno dejstvo svih štetnih uticaja na TK kabl (kada se ne radi o železničkim signalnim vodovima, standard DIN VDE 0228 nalaže da se puna vrednost struje KS-a umanju pomoću faktora $w=0.7$, odnosno da se za vrednost struje merodavne za izračunavanje podužne EMS indukovane u TK kabl uzme vrednost $I=3 \cdot I_0 \cdot w=5.95$ kA) [1];

(iii) za TK kabl tipa A-2Y(L)2Y 70×2×0.8 STIII Bd: spoljašnji prečnik TK kabla je 26.7 mm; sastoji se od ukupno $n=140$ jednožičnih bakarnih provodnika prečnika 0.8 mm sa izolacijom od polietilena (PE) minimalnog otpora izolacije pri jednosmesnoj struji $R_{i\text{min}}=5 \times 10^{12}$ $\Omega \cdot \text{m}$, relativne dielektrične konstante $\epsilon_r=2.4$ i faktora dielektričnih gubitaka $\tan \delta=0.4 \times 10^{-3}$; unutrašnji PE omotač je nominalne debljine 1.3 mm; ekran je od uzdužno postavljene glatke aluminijumske trake debljine 0.15 mm presvučene sa obe strane kopolimerom koji se čvrsto vezuje za spoljašnji PE omotač; prečnik preko aluminijumskog ekrana je 24.3 mm; prema [1], Al-ekranu debljine 0.15 mm i spoljašnjeg prečnika 24.3 mm približno odgovara vrednost naponskog redukcionog faktora $r_{Ku}=0.96$; nema metalnu mehaničku zaštitu; spoljašnji PE omotač je nominalne debljine 1.2 mm; dozvoljene temperature za ovaj kabl su: pri polaganju od -20 °C do $+50$ °C i tokom eksploatacije -40 °C do $+70$ °C; ispitni naponi učestanosti 50 Hz i trajanja od 1 min za ovaj kabl su: između dve žile 500 V i između žile i ekrana 2000 V;

TABELA 1. TERMOFIZIČKE I ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE MATERIJALA ZASTUPLJENIH U REŠAVANOM DOMENU

Materijal	Toplotna provodnost k	Spec. toplota c	Gustina γ	Spec. električni otpor ρ_{el}
	$\text{W} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{km}^{-1}$
Bakar	370.37	385	8900	17.241
Aluminijum	208.33	920	2700	28.264
Polietilen	0.333	2300	950	-
Kab. posteljica	1	837	1800	-
Okol. zemljište	0.8	830	1900	-

(iv) dimenzije poprečnog preseka domena rešavanog pri tranzijentnoj analizi zagrevanja TK kabla preuzete su iz [3]; u njemu su okolno zemljište i ispunjena rova od istog materijala a na površini zemlje se razmena toplote odvija samo putem konvekcije. Pretpostavlja se da su se TK kabl i okolina u početnom trenutku proračuna nalazili na

temperaturi od 20 °C. Termo-fizičke i električne karakteristike materijala zastupljenih u rešavanom domenu date su u tabeli 1, dok su vrednosti koeficijenta razmene toplote putem konvekcije i temperature vazduha uz površinu zemlje $h=8.5 \text{ W} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ i $T_a=20$ °C.

III. MODELIRANJE PROBLEMA

Ako se na 220 kV-nom nadzemnom vodu dogodi jednopolni KS sa zemljom, onda se u provodnicima njemu susednog podzemnog telekomunikacionog kabla indukuje EMS E_i sledećeg intenziteta

$$E_i = \omega \cdot M'_{Ee} \cdot \ell \cdot I \cdot r_E \cdot r_{Ku} \quad (1)$$

gde je $\omega=2\pi f$ kružna učestanost trofaznog sistema struja za $f=50$ Hz [1]. Ostale promenljive iz izraza (1) definisane su u okviru tačke 2.

EMS E_i koja se indukuje između nekog provodnika TK kabla i zemlje može se izmeriti vezivanjem visokotopornog voltmetra na jednom kraju tog provodnika kada je njegov drugi kraj uzemljen [1]. Ako su oba kraja datog provodnika izolovana od zemlje i ako se pretpostavi da su međusobno jednake dve kapacitivnosti zemlja-provodnik od kojih svaka odgovara po polovini dužine paralelnog vođenja, onda će se na svakom od krajeva tog provodnika pojaviti EMS jednaka polovini vrednosti E_i , tj. $E_i/2$ [1]. TK vodovi bi uvek trebalo da se dimenzionišu tako da na jednom svom kraju mogu da prihvate EMS u punom svom iznosu dok im je drugi kraj uzemljen [1].

Ako se prethodno primeni na slučaj TK kabla tipa A-2Y(L)2Y 70×2×0.8 STIII Bd, to znači da bi svaki od njegovih 140 provodnika, kada bi im po jedan kraj bio uzemljen, trebalo da na drugom kraju prema zemlji izdrži EMS jednaku E_i . Slično tome se izvodi i naponsko ispitivanje TK kabla, prema kojem svaki provodnik datog kabla u odnosu na uzemljeni ekran treba da izdrži ispitni naizmenični napon od 2000 V [1,6]. U električnom smislu ovo je ekvivalentno testu koji bi se sastojao iz: (i) vezivanja prvih krajeva svih 140 provodnika TK kabla u čvor 2 koji je uzemljen, (ii) vezivanja drugih krajeva svih 140 provodnika TK kabla u čvor 1 koji je izolovan od zemlje, i (iii) indukovanja EMS u datom kolu koja bi se zatim, prema [1], u punom svom iznosu E_i pojavila u čvoru izolovanom od zemlje (u čvoru 1).

Da bi se jedan TK kabl koji se sastoji od 140 međusobno izolovanih provodnika realno predstavio zamenskom električnom šemom (radi određivanja struje merodavne za njegovo zagrevanje), onda bi trebalo radi modeliranja svih postojećih elektromagnetnih uticaja između njegovih provodnika u jednu takvu šemu uneti nekoliko stotina međusobnih induktivnosti i kapacitivnosti. Uz to, poznato je da provodnici TK kablova nisu idealno paralelni, već su prvo po dva/četiri provodnika upredana u vidu parica/četvorki a onda su ponovo te parice/četvorke upredane međusobno itd. Sve ovo čini nemogućim kreiranje geometrijskih modela koji su osnova za određivanje sopstvenih (ili primarnih) parametara provodnika i izolacije nekog TK kabla. Za provodnik primarni parametri su njegov aktivni otpor R ,

njegova induktivnost L i njegova kapacitivnost C , dok je to za izolaciju njena električna provodnost G .

Na drugoj strani, da bi se poprečni presek istog TK kabla verno skicirao na poprečnom preseku rešavanog domena (radi termičke analize njegovog zagrevanja pomoću MKE), opet bi se prvo naišlo na geometrijske poteškoće. Zatim bi usledili problemi sa generisanjem mreže konačnih elemenata po rešavanom domenu, pa sa zadavanjem izvora toplote u svakom od provodnika TK kabla, i tako redom. Sve ovo nalaže da se mora iznaći neki uprošćen, ali dovoljno dobar, geometrijski model koji će u isto vreme poslužiti i za elektromagnetnu i za termičku analizu problema.

Prema tome, ako se još zanemare skin efekat i efekat blizine [2], onda se razmatrani TK kabl može ekvivalentirati koaksijalnim TK kablom za koji važi: (i) površina poprečnog preseka unutrašnjeg provodnika ekvivalentnog koaksijalnog kabla S jednaka je sumi svih n površina pojedinačnih provodnika stvarnog kabla S_1 , tj. $S = n \cdot S_1$; gde je $2 \cdot r_{ic} = 9.47$ mm prečnik ekvivalentnog unutrašnjeg provodnika; (ii) položaj i dimenzije spoljašnjeg provodnika ekvivalentnog koaksijalnog kabla ostaju identični položaju i dimenzijama aluminijskog ekrana stvarnog kabla; (iii) u prostoru između dva provodnika ekvivalentnog koaksijalnog kabla nalazi se ekvivalentna izolacija od PE debljine $\Delta_{ei} = 7.265$ mm; i (iv) spoljašnji zaštitni omotač ekvivalentnog koaksijalnog kabla identičan je zaštitnom PE omotaču stvarnog kabla.

Pretpostavka (i) uvedena pri modeliranju konstrukcije TK kabla znači da indukovani napon usled KS-a na susednom nadzemnom vodu može u datom TK kabl izazvati amplitudu struje koja će međusobno kratko spojiti (sjediniti) sve njegove provodnike koji se u takvom stanju mogu ekvivalentirati sa paralelnom vezom n otpora pojedinačnih provodnika R_1 , tj. sa $R = R_1 / n$. Ovdje treba naglasiti da je eksploatacija ove pretpostavke dopuštena samo kod direktnog udara groma u TK kabl [2]. Međutim, kada bi došlo do topljenja izolacije provodnika TK kabla usled indukovane napona, onda bi princip ekvivalencije aktivnog otpora ostao isti. Prema tome, aktivni otpor unutrašnjeg Cu-provodnika ekvivalentnog TK kabla iznosi $R = 1.225 \Omega$. Ostali sopstveni parametri određeni su na osnovu [1] i [3], a njihove vrednosti su $L = 10.208 \times 10^{-3}$ H, $C = 0.718 \times 10^{-6}$ F i $G = 91.227 \times 10^{-9}$ S.

Kada su poznate vrednosti parametara R , L , C i G , onda se pomoću zamenske šeme simetričnog TK voda iz [3] (u kojoj je jedan kraj kratko spojen dok na drugom deluje EMS od $E_i = 2225.2$ V – vrednost dobijena pomoću izraza (1)) lako izračunava modul struje merodavne za zagrevanje TK kabla. Na taj način se završava posao određivanja kompleksne struje koja protiče kroz unutrašnji provodnik ekvivalentnog TK kabla, i njen modul iznosi $I_{it} = 477.439$ A.

Konačno, analiziraće se raspodela linearnog temperaturnog polja kao dvodimenzionalni izotropni problem definisan sledećom jednačinom

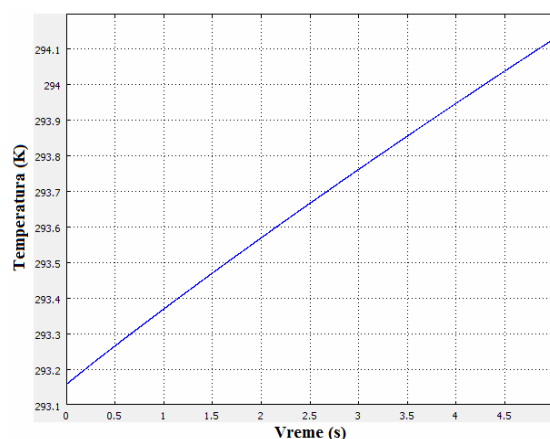
$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q = \gamma c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

gde su x , y prostorne koordinate, T temperatura, t vreme i $Q = 792888.335$ W·m⁻³ zapreminska snaga izvora toplote lociranog u unutrašnjem provodniku ekvivalentnog TK kabla [7].

IV. REZULTATI SIMULACIJE

Da bi se na osnovu ovde prezentovanih rezultata mogli izvesti adekvatni zaključci, onda prvo treba dati par informacija o podešavanju zaštita kod TK i EE vodova koje su od značaja za termičku analizu TK kablova. U ovom slučaju, za EE vod to bi bilo vreme isključenja struje KS-a a za TK kabl to bi bilo vreme kratkotrajne interferencije. Kod EE vodova se zahteva da vreme isključenja struje KS-a bude od 0.1 do 0.5 s od trenutka izbijanja kvara [8], dok se kod TK kablova zahteva da vreme kratkotrajne interferencije bude manje ili jednako 0.5 s [1]. Izuzetno se na srednjenaponskim vodovima zbog selektivnosti dozvoljava trajanje KS-a od 1 do 2 s [8]. Prema tome, zagrevanje TK kablova usled KS-a ne bi trebalo posmatrati u periodima dužim od par sekundi.

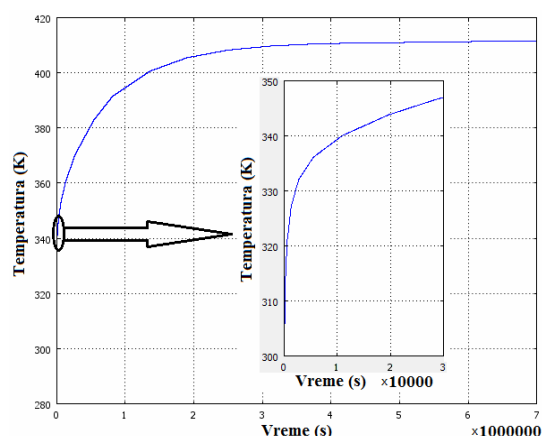
Na Sl. 1 prikazan je tranzijent zagrevanja unutrašnjeg provodnika ekvivalentnog TK kabla u trajanju od 5 s. Sa Sl. 1 se vidi da se za 0.5 odnosno 5 s temperatura unutrašnjeg provodnika povećala za svega 0.1 odnosno 0.965 °C, respektivno. Razlog za to je termička inertnost materijala od kojih je izrađen TK kabl. Imajući u vidu informacije o podešenosti zaštite na EE vodovima, posle ovog zapažanja je jasno da je praktično neverovatno da TK kabal bude termički oštećen posle KS-a na nekom njemu susednom EE vodu.



Sl. 1. Tranzijent zagrevanja unutrašnjeg provodnika ekvivalentnog TK kabla u trajanju od 5 s.

Teorijski gledano, kada bi KS na 220 kV-nom nadzemnom vodu potrajao dovoljno dugo, onda bi se TK kabl sigurno zagrejao preko svoje maksimalno dozvoljene temperature od 70 °C. Da bi se videlo koliko je vremena potrebno da se unutrašnji provodnik ekvivalentnog TK kabla zagreje do 70 °C, potrebno je pogledati Sl. 2 na kojoj je dat tranzijent zagrevanja istog u trajanju od 80 dana. Sa Sl. 2 se vidi da je temperatura unutrašnjeg provodnika TK kabla premašila maksimalno dozvoljenu

temperaturu tek posle 5 časova i 30 minuta dejstva struje indukovane KS-om na susednom nadzemnom vodu.



Sl. 2. Tranzijent zagrevanja unutrašnjeg provodnika ekvivalentnog TK kabla u trajanju od 80 dana.

Preostaje još da se vidi za koje bi vreme tranzijent zagrevanja datog provodnika dostigao krajnje stacionarno stanje. Prema Sl. 2 krajnje stacionarno stanje dostiglo bi se tek posle 70 dana dejstva struje indukovane KS-om na susednom nadzemnom vodu. U stanju termičke ravnoteže u rešavanom domenu, temperatura unutrašnjeg provodnika ekvivalentnog TK kabla iznosila bi 137.875 °C (ili 411.032 K) što je za 67.875 °C više od maksimalno dozvoljene temperature za dati kabl.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen postupak za modeliranje zagrevanja podzemnih TK kablova usled struja indukovanih u njima. Način modeliranja TK kabla za potrebe termičke analize, odnosno postupak procene vrednosti indukovane struje i zapreminske snage izvora toplote u TK kablju može biti od velikog značaja za analizu zagrevanja nadzemnih TK kablova u slučaju direktnog udara groma. Doprinos ovde dobijenih rezultata sadržan je u sledećem: (i) pokazano je da u TK kablju amplituda struje indukovane usled KS-a nastalog na susednom nadzemnom vodu, gledano u vremenu reagovanja zaštite na nadzemnom vodu, nikada ne može zagrejati dati TK kabl do neke kritične temperature; i (ii) pokazano je da bi temperatura TK kabla premašila dozvoljenih 70 °C tek posle 5 časova i 30 minuta dejstva struje indukovane KS-om a da bi se krajnje stacionarno stanje dostiglo tek posle 70 dana dejstva te struje. Rezultati ovde izvršene analize pokazali su zbog čega se kod TK kablova pri klasičnom proračunu indukovanih struja zanemaruje njihov termički uticaj. Takođe, predloženi model se može primeniti za analizu zagrevanja svih vrsta TK i signalnih kablova u slučaju struja indukovanih u njima zbog udara groma ili komutacionih operacija u susednim EE vodovima ili EE postrojenjima.

LITERATURA

[1] L. Heinhold, Power cables and their application-Part 1, third revised ed., Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich, 1990, pp. 322-361.

[2] A.S. Ahmad, T. Aka-Ngnui, Lightning induced voltage on telephone cables and power systems, International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), Lyon, France, June 4-7, 2007.

[3] Z. Toš, Prijenosni sutavi i mreže u željezničkom prometu I – Odabrana autorizirana predavanja iz kolegija, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2003.

[4] Ping-Heng Ho, Chi-Jui Wu, Transient analysis of the 161-kV Taiwan-PengHu submarine power cable system, IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, July 20-24, 2008, pp. 1-8.

[5] D. Klimenta, Nestacionarna stanja zagrevanja/hlađenja izolacije podzemnih kablovskih vodova, Elektroprivreda 3 (2003) 87-94.

[6] Online prezentacija proizvodnog asortimana Draka Comteq Berlin GmbH & Co. KG, Berlin, Germany, http://www.drakact.com/dtc/files/2004_60e_TELDR_AK_VDE.pdf

[7] D. Klimenta, V. Kuč, V. Raičević, J. Radosavljević, M. Jevtić, D. Tasić, FEM modelling of faults occurred in buried power cables due to the removal of tree roots, European Transactions on Electrical Power DOI 10.1002/etep.399 (published online: 2 Nov 2009).

[8] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić, Distribucija električne energije, Akademska misao, Beograd, 2007, str. 111-114.

ABSTRACT

In this paper it is proposed a numerical model for the thermal analysis of buried telecommunication lines due to the influence of short-circuit occurred on a nearby 220 kV overhead line. Short-circuit current flowing through the conductive earthed structures over the earth and in earthing grids induces voltages and currents in buried telecommunication cables. These currents can cause only non-hazardous heating of the telecommunication circuit, that is, of the cable conductors and insulation. In the thermal analysis the constant values for initial conditions, boundary conditions, heat source, thermo-physical and electrical material properties have been taken into account. In summary, the results obtained herein confirmed the fact because of the thermal effects are found negligible over the classic computation of short-circuit induced voltages and currents.

Keywords: finite element method (FEM), induced current, overhead line, short-circuit, telecommunication cable, thermal analysis.

HEATING OF BURIED TELECOMMUNICATION LINES DUE TO THE INFLUENCE OF SHORT-CIRCUIT INDUCED CURRENTS – THEORETICAL CONSIDERATIONS

Dardan Klimenta, IEEE Member, Branislav Pajković, Jordan Radosavljević, and Dejan Anđelković