

Određivanje termički pouzdanog položaja za instalaciju DFOTS sistema u paraleli sa podzemnim energetske kablovima

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

Sadržaj — U ovom radu je predložen postupak za određivanje termički pouzdanog položaja za instalaciju (polaganje) optičkog kabla za distribuirano merenje temperature (DFOTS sistema) u paraleli sa postojećim 110 kV-nim podzemnim vodovima čiji su kablovi raspoređeni u formaciju trougla. Prema datom postupku, DFOTS sistem je termički pouzdan pozicioniran ako se na osnovu merenja temperature izvršenih pomoću njega na datoj poziciji i obaveznog praćenja promene opterećenja 110 kV-nih kablova mogu kvalitetno proceniti isušena zona oko 110 kV-nih kablova i temperature provodnika, izolacija i ekrana tih kablova. Osim toga, rešena je dilema da li je DFOTS sistem bolje instalirati u centru trougaone formacije između tri 110 kV-na kabla ili negde u kablovskoj posteljici na nekom odstojanju od 110 kV-nih kablova. Takođe, razmatranja iz ovog rada mogu se koristiti pri projektovanju sistema za praćenje temperature u realnom vremenu kod novih visokonaponskih podzemnih kablovskih vodova.

Ključne reči — DFOTS sistem, energetski kabl, instalacija kabla, metoda konačnih elemenata (MKE), termička pouzdanost, toplotno kritično mesto.

I. UVOD

VISOKONAPONSKI (VN) podzemni kablovski vodovi koji su instalirani poslednjih godina najčešće su opremljeni DFOTS sistemima za monitoring temperature pomoću kojih se meri temperatura spoljašnje površine jednog od tri kabla u diskretnim vremenskim intervalima na celoj njegovoj dužini [1]. Rezultati monitoringa temperature značajno mogu povećati tačnost proračuna raspoloživih prenosnih kapaciteta svakog od kablova nadziranog kablovskog voda. Međutim, među postojećim VN kablovskim vodovima veliki je broj onih koji nemaju sisteme za monitoring temperature i opterećenja. U takvim okolnostima, stvarna opterećenja kablova moguće je proceniti samo na osnovu formula iz standarda IEC 287. Da bi se povećala tačnost jednog takvog proračuna opterećenja potrebno je imati izmerene

vrednosti temperature kablovske posteljice ili okolnog zemljišta na dubini polaganja posmatranog VN kablovskog voda [1].

Na području grada Beograda, DFOTS sistem za monitoring temperature instaliran je samo na priključnim 110 kV-nim podzemnim kablovskim vodovima postrojenja TS 110/10 kV/kV Obilić (ili TS Beograd 36) u ukupnoj dužini od 500 m [2,3]. Na preostalim dužim delovima 110 kV-nih vodova od TS 110/10 kV/kV Obilić prema TS 220/110 kV/kV Beograd 17 i od TS 110/10 kV/kV Obilić prema TS 110/10 kV/kV Pionir (ili TS Beograd 28) nisu instalirani sistemi za monitoring temperature, ali se planira njihova instalacija. Danas se na ovim 110 kV-nim vodovima monitoring i snimanje vršnih opterećenja vrši pomoću sistema SCADA.

U centru trougaone formacije između tri 110 kV-na kabla instaliran je optički kabl tipa TO SM 04 2×6×II×0.4×3.5×CMAN [2,3]. Prema [4], optički kabl TO SM 04 ima spoljašnji zaštitni PVC-plašt spoljašnjeg prečnika od 11.3 mm, nema mehaničku zaštitu pa se po pravilu mora polagati u zaštitne cevi, otporan je na elektromagnetne uticaje i atmosferska pražnjenja, a opseg njegovih dozvoljenih temperatura pre i posle instalacije je od -20 do +50 °C. VN podzemni kablovski vod sastoji se od 110 kV-nih kablova tipa XHE 48-A 1×1000 mm², čiji su konstrukcioni podaci, standardni način polaganja, formule za proračun opterećenja i toplotnih otpora, termofizičke i električne karakteristike materijala elemenata konstrukcije kabla i okoline dati u [5-8]. Takođe, u [7,8] su dati rezultati detaljne termičke analize jednog toplotno kritičnog mesta na trasi kablovskog voda između TS Obilić i TS Beograd 17.

Pojam termičke pouzdanosti DFOTS merenja temperature plašteva VN kablova, odnosno polažaja optičkog kabla TO SM 04 u odnosu na trougaonu formaciju 110 kV-nih kablova tipa XHE 48-A pominje se po prvi put u referenci [2]. Prema [2], dati optički kabl naknadno je instaliran u centru trougaone formacije postojećeg VN podzemnog kablovskog voda bez uvažavanja preporuka proizvođača, odnosno bez njegovog uvlačenja u zaštitnu cev i bez osvrta na opseg dozvoljenih radnih temperatura. Takođe, u [2] se bez numeričke verifikacije, tačka centra trougaone formacije iskustveno izdvaja kao termički najpouzdanija za merenje temperature plašteva datih kablova.

Međutim, sa aspekata optike i termodinamike takav način instalacije optičkog kabla i iskustveno tvrđenje da je izabrani položaj centra trougaone formacije termički najpouzdaniji su neprihvatljivi. Najpre, tokom instalacije

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)

optičkog kabla moglo je doći do trajnih nagnječenja (mehaničkih deformacija) njegove spoljašnje PVC zaštite; zatim su tokom eksploatacije VN kablova, temperature njihovih spoljašnjih polietilenskih (PE) plašteva, u delovima obima okrenutim ka centru trougaone formacije, mogle biti veće od dozvoljenih +50 °C. Ove promene temperature mogle su dodatno izdeformisati spoljašnju PVC zaštitu optičkog kabla [9]. Prema [9], i mehanička nagnječenja optičkih vlakana i promena njihove temperature u oblasti gornje ili donje granice opsega dovode do povećanja optičkih gubitaka u optičkim kablovima. Takođe, rezultati merenja temperature plašta nekog VN kabla pomoću spoljašnjeg optičkog kabla ne mogu se u pogledu pouzdanosti porediti sa rezultatima merenja temperature dobijenih kod VN kablova sa ugrađenim optičkim vlaknima [10].

U ovom radu je pomoću simulacije bazirane na MKE razrešena dilema da li optički kabl za monitoring temperature treba instalirati u centru trougaone formacije, uz dva VN kabla izvan centra trougaone formacije ili negde u kablovskoj posteljici na nekom odstojanju od VN kablova. Ovde data razmatranja mogu se koristiti pri projektovanju sistema za monitoring temperature kako kod postojećih tako i kod novih VN podzemnih kablovskih vodova. Uz to, pokazano je da su osnovni principi termodinamike i činjenica da se toplotni otpor okolnog zemljišta definiše između spoljašnje površine nekog kabla i referentne zemlje [5] dovoljni kriterijumi za izbor termički pouzdanog položaja za spoljašnju instalaciju DFOTS sistema.

II. ESTIMACIJA OPTEREĆENJA VN KABLOVA ZA PROIZVOLJAN POLOŽAJ DFOTS SISTEMA

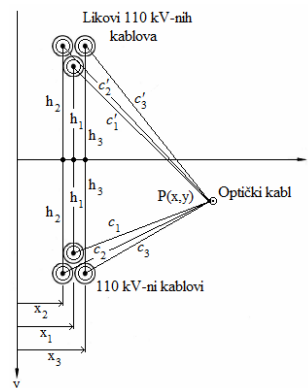
Ako su u nekom trenutku poznate vrednosti struja u provodnicima 110 kV-nih kablova i ako se u datom trenutku na nekom toplotno kritičnom mestu trase 110 kV-nog voda zna vrednost temperature zemljišta u bilo kojoj tački P(x,y), onda se prema [5] temperatura referentne zemlje θ_E može izračunati pomoću

$$\theta_E = \theta_x - \sum_{i=1}^{n=3} (W'_{ci} + W'_{si} + W'_{di}) \cdot \frac{\rho_E}{2\pi} \ln \frac{c_i}{c'_i} \quad (1)$$

gde su W'_{ci} , W'_{si} i W'_{di} za $i=1,2,3$ podužne snage 9 izvora toplote lociranih u provodnicima, električnim zaštitama i izolacijama triju 110 kV-nih kablova u W/m, respektivno; n ukupan broj jednožilnih kablova koji čine 110 kV-ni kablovski vod; ρ_E specifični toplotni otpor referentnog zemljišta u °C·m/W [8]; θ_x temperatura zemljišta u tački P(x,y) dobijena merenjem pomoću DFOTS sistema u °C; c_i i c'_i za $i=1,2,3$ rastojanja prema slici 1 u m.

Prema tome, za izračunavanje temperature referentnog zemljišta na nekom toplotno kritičnom mestu potrebno je poznavanje vrednosti toplotnih snaga/energija koje se odaju sa površina spoljašnjih zaštitnih plašteva triju 110 kV-nih kablova. Ove snage se prema [8] jednostavno određuju na osnovu kataloških podataka i snimljenih dijagrama opterećenja za razmatrane 110 kV-ne kablove. Na Sl. 1 ilustrovan je toplotni uticaj 110 kV-nog kablovskog voda u proizvoljnoj tački P(x,y). Na slici 1 sa

h_i za $i=1,2,3$ označene su dubine polaganja 110 kV-nih kablova, a sa x_i za $i=1,2,3$ označena su odstojanja uzdužnih osa simetrije 110 kV-nih kablova od y-ose referentnog koordinatnog sistema.



Sl. 1. Toplotni uticaj 110 kV-nog kablovskog voda u proizvoljnoj tački P(x,y).

Kada su poznate temperature θ_x i θ_E , onda se sa dijagrama temperature promene specifičnog toplotnog otpora okolnog zemljišta očitavaju vrednosti ρ_x i ρ_E koje odgovaraju vrednostima temperatura θ_x i θ_E , respektivno. Prema tome, ρ_x bi bio specifični toplotni otpor zemljišta između spoljašnjih površina 110 kV-nih kablova i izoterme kojoj pripada tačka P(x,y) (tačka na spoljašnjoj površini optičkog kabla koja je najbliža spoljašnjoj površini nekog od tri 110 kV-na kabla), a ρ_E bi bio specifični toplotni otpor zemljišta između te izoterme i referentnog zemljišta.

Sada se na osnovu ovako određenih vrednosti za θ_x , θ_E , ρ_x i ρ_E , poznate geometrije 110 kV-nih kablova, poznatih termo-fizičkih i električnih karakteristika materijala elemenata konstrukcije 110 kV-nih kablova i izračunatih vrednosti za toplotne otpore koji figuriraju u odgovarajućem izrazu iz standarda IEC 287, može izračunati dozvoljeno strujno opterećenje grupe jednožilnih kablova istog tipa sa promenljivim strujnim opterećenjem i isušivanjem okolnog zemljišta I_{cp} [5]. Ako se zna dozvoljeno strujno opterećenje I_{cp} za toplotno najkritičnije mesto na trasi datog 110 kV-nog kablovskog voda, onda je lako izračunati sa koliko ampera se može dodatno opteretiti svaki od 110 kV-nih kablova.

III. ODREĐIVANJE TERMIČKI POUZDANOG POLOŽAJA ZA DFOTS SISTEM

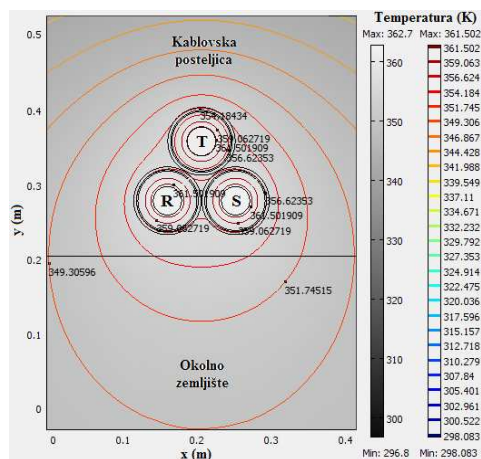
Spoljašnji položaj DFOTS sistema u odnosu na postojeći 110 kV-ni podzemni kablovski vod biće termički pouzdan: (i) ako se obezbedi da se optički kabl fiksira za spoljašnji zaštitni plašt, tj. spoljašnju površinu jednog 110 kV-nog kabla (ili dva 110 kV-na kabla) celom njegovom (ili njihovom) dužinom radi bolje termičke senzitivnosti i boljeg odziva DFOTS sistema; naime, spoljašnje dimenzije optičkog kabla obično su manje od površine slobodnog prostora u centru trougaone formacije između 110 kV-nih kablova; (ii) ako optički kabl ima mehaničku zaštitu (armaturu) i spoljašnji zaštitni plašt – ovo primarno štiti optička vlakna od mehaničkih oštećenja pri instalaciji

a sekundarno od povećanja optičkih gubitaka sa promenom temperature u blizini donje ili gornje granice dozvoljenog opsega temperatura; i (iii) ako se optički kabl instalira na poziciji gde se istovremeno mogu ispoštovati standardni postupak izračunavanja toplotnog otpora okolnog zemljišta i standardna pretpostavka da se uticaj promene prilika uz površinu zemlje (vetra, sunčevog zračenja, i sl.) može zanemariti na dubini polaganja 110 kV-nih kablova.

Ako se prethodno ima u vidu, onda se termički pouzdan položaj DFOTS sistema u odnosu na 110 kV-ni kablovski vod jednostavno određuje na osnovu rezultata stacionarne i tranzijentne termičke MKE analize standardnog rešavanog domena (domena koji geometrijski odgovara standardnom načinu polaganja 110 kV-nih kablova [5-8]) za vremenski promenljivo i uravnoteženo opterećenje faznih provodnika 110 kV-nih kablova. Zapreminske snage izvora toplote u 110 kV-nim kablovima koje su korišćene u simulacijama njihovog stacionarnog i tranzijentnog zagrevanja date su u tabeli 1. Snage od 12493.2 W/m^3 i 3123.3 W/m^3 odgovaraju stalnom strujnom opterećenju od 592.5 A i polovini tog opterećenja od 296.25 A za dati 110 kV-ni kabl pri uslovima iz [5,6], respektivno. Dielektrični gubici su konstantni dok gubici u električnim zaštitama prema [8] prate promenu gubitaka u provodnicima 110 kV-nih kablova.

TABELA 1. SNAGE IZVORA TOPLOTE U 110 kV-NIM KABLOVIMA.

Lokacija izvora toplote	Vrsta termičke analize			
	Stacionarna	Tranzijentna		
		0-8 h	8-24 h	24-48 h
Provodnici u W/m^3 za t u s	12493.2	$0.325 \cdot t + 3123.3$	$-0.163 \cdot t + 17178.13$	3123.3
Izolacije u W/m^3 za t u s	41.9	41.9	41.9	41.9
Električne zaštite u W/m^3 za t u s	2910.4	$0.076 \cdot t + 727.6$	$-0.038 \cdot t + 4001.8$	727.6

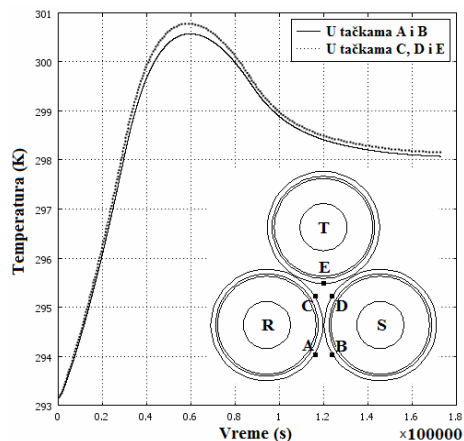


Sl. 2. Stacionarna raspodela temperaturnog polja u delu rešavanog domena oko 110 kV-nih kablova.

Stacionarna raspodela temperaturnog polja za zapreminske snage izvora toplote iz tabele 1 i deo rešavanog domena koji obuhvata 110 kV-ne kablove, deo kablovske posteljice i deo okolnog zemljišta prikazana je na Sl. 2. Prema rezultatu datom na Sl. 2 temperature provodnika faza R, S i T su 89.56, 89.56 i 88.58 °C,

respektivno. Sa iste slike se vidi i da izoterma od 356.624 K (ili 83.464 °C) prolazi kroz PE plašteve kablova faza R i S, dok kod kabla faze T prolazi ispod električne zaštite. Ovo znači da na potencijalnim mestima za instalaciju DFOTS sistema između spoljašnjih površina kablova faza R i T, kao i kablova faza S i T, postoji izvesna temperaturna razlika. Takođe, sa Sl. 2 se vidi da je odvođenje toplote bolje sa delova spoljašnjih površina VN kablova koji gledaju ka površini zemlje. Na osnovu toga proizilazi da bi DFOTS sistem trebalo fiksirati za spoljašnje površine kablova faza R i S. Preostalo je još da se na osnovu rezultata tranzijentne termičke analize pokaže da li je to bolje učiniti između kablova faza R i S u centru trougaone formacije ili u delu koji ne gleda na kabl faze T.

Na Sl. 3 dati su tranzijenti zagrevanja spoljašnjih površina kablova faza R i S u tačkama u kojima bi optički kabl bio fiksiran za njih. To su tačke A, B, C i D, dok je tačka E izdvojena kao tačka na spoljašnjoj površini kabla faze T koja bi bila najbliža optičkom kablju za slučaj njegove instalacije uz kablove faza R i S u centru trougaone formacije. Tranzijentna analiza zagrevanja 110 kV-nih kablova izvedena je za promene zapreminskih snaga izvora toplote iz tabele 1. Tranzijentna termička analiza je pokazala da su tranzijenti u tačkama A i B međusobno identični; zatim, da su tranzijenti u tačkama C i D međusobno identični; i da se tranzijent u tački E zanemarljivo razlikuje od tranzijenata dobijenih za tačke C i D. Takođe, sa Sl. 3 se vidi da je temperatura tranzijenata u tačkama A i B niža od temperature tranzijenata u tačkama C, D i E za 0-0.3 °C (razlika od 0 °C je posledica pretpostavke da se ceo rešavani domen u početnom trenutku nalazio na temperaturi od 20 °C). Razlika između ovih tranzijenata je posledica toga što se u blizini tačaka C i D nalazi još jedan izvor toplote, tj. kabl faze T koji predstavlja prepreku odvođenju toplote od tačaka C i D ka površini zemlje.



Sl. 3. Tranzijenti zagrevanja spoljašnjih površina 110 kV-nih kablova u tačkama A, B, C, D i E.

Kada bi opterećenje faznih provodnika bilo trajno uravnoteženo, onda bi temperature spoljašnjih površina kablova faza R i S bile najveće u tačkama C i D i to bi bio termički najpouzdaniji položaj za instalaciju DFOTS sistema. Međutim, tačke C i D se ne nalaze na putu odvođenja toplote od kablova ka referentnom zemljištu i površini zemlje što se ne slaže sa standardnim postupkom izračunavanja toplotnog otpora okolnog zemljišta. Prema

tome, DFOTS sistem bi uz tačke C i D očitavao nešto veće temperature nego u slučaju njegove instalacije uz tačke A i B, što bi išlo u korist sigurnosti proračuna dozvoljenog strujnog opterećenja. Standardi i osnovni principi termodinamike bili bi ispoštovani samo kada bi DFOTS sistem bio instaliran uz tačke A i B, ali inženjerskoj praksi je važnija sigurnost proračuna pa prema tome DFOTS sistem u slučaju vođenja 110 kV-nih kablova u trougaonoj formaciji treba instalirati uz tačke C i D.

Na drugoj strani, kada bi opterećenje faznih provodnika bilo neuravnoteženo po principu struja faze T znatno veća od struja faza R i S, onda bi DFOTS sistem pozicioniran uz tačke C i D registrovao temperaturu blisku temperaturi tačke E. Ovo bi uz poznavanje opterećenja faza R i S dalo informaciju za koliko se mogu povećati opterećenja faznih provodnika R i S da bi njihove temperature dostigle vrednost temperature provodnika faze T. Prema tome, u slučaju bilo kojeg drugog neuravnoteženog opterećenja faznih provodnika merenje temperature spoljašnjih površina 110 kV-nih kablova opet bi bilo termički najpouzdanije uz tačke C i D.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predložen postupak za određivanje termički pouzdanog položaja za instalaciju DFOTS sistema u paraleli sa postojećim VN podzemnim vodovima čiji su kablovi raspoređeni u formacije trouglova. Takođe, dat je algoritam za estimaciju temperature provodnika VN kablova na osnovu rezultata merenja temperature spoljašnjih površina VN kablova/okoline pomoću DFOTS sistema i merenja vršnih opterećenja provodnika VN kablova pomoću SCADA sistema. Rezultati termičke analize numerički su potvrdili raniju iskustvenu hipotezu da je DFOTS sistem termički najpouzdanije instalirati u centru trougaone formacije. Zatim je pokazano da u centru trougaone formacije DFOTS sistem treba fiksirati uz dva donja kabla a ne uz gornji kabl. Konačno, ukazano je na sve faktore koji se ne smeju zanemarivati pri instalaciji DFOTS sistema u blizini VN podzemnih vodova, kako s aspekta prenosa signala u optičkim vlaknima, tako i s aspekta termodinamike kod VN kablova. Dati pristup za određivanje termički pouzdanog položaja DFOTS sistema u odnosu na neki VN podzemni vod može se primeniti i na slučaj kada su VN kablovi raspoređeni u formaciju horizontalne ravni.

LITERATURA

- [1] G. M. Williams, P. L. Lewin, M. LeBlanc, Accurate Determination of Ambient Temperature at Burial Depth for High Voltage Cable Ratings, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN USA, 19-22 September 2004, pp. 458-461.
- [2] A. Popovac-Damljanović, M. Sredojević, Ž. Janda, S. Nikolajević, Monitoring temperature visokonaponskih kablova, *Elektroprivreda* 4 (2006) 110-118.
- [3] A. Popovac-Damljanović, M. Sredojević, Ž. Janda, Distribuirana termoslika jednog 110 kV kabla sa estimacijom temperature provodnika u eksploataciji,

28. savetovanje JUKO CIGRÉ, Vrnjačka Banja, 30. septembar – 05. oktobar, 2007, str. 25-31.

- [4] Online prezentacija proizvodnog asortimana NFK Novkabel, Novi Sad, Srbija, http://www.novkabel.com/artikal/138_en.pdf
- [5] L. Heinhold, Power cables and their application-Part 1, third revised ed., Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich, 1990, pp. 146-251 and 349-361.
- [6] B. M. Lalević, Priručnik kablovi elektroenergetski, CEKOS-ING, Beograd, 1997, str. 218-370 i 440-464.
- [7] D. Klimenta, S. Nikolajević, M. Sredojević, Controlling the thermal environment in hot spots of buried power cables, *European Transactions on Electrical Power*, 17 (2007) 427-449.
- [8] D. Klimenta, Doktorska disertacija: Prilog analizi procesa razmene toplote kod podzemnih visokonaponskih kablova metodom konačnih elemenata – optimalno upravljanje ambijentnim uslovima na toplotno kritičnim mestima, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2007.
- [9] Y. Maeda, F. Montalti, and others, Optical fibres, cables and systems, ITU-T Manual, International Telecommunication Union, 2009.
- [10] M-H. Luton, G. J. Anders, J-M. Braun, N. Fujimoto, S. Rizzetto, J. A. Dovnes, Real time monitoring of power cables by fibre optic technologies tests, applications and outlook, JICABLE'03 – 6th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, France, June 22-26, 2003.

ABSTRACT

In this paper it is proposed a procedure for determining a thermally reliable location for a fiber-optic-based distributed temperature sensing system (DFOTS system) installation (laying) in parallel along an existing trefoil 110 kV buried cable line. According to the procedure, a location is thermally reliable if the DFOTS measurements carried out in it, together with obligatory ampacity recordings of the 110 kV cables, can provide a high-grade basis for estimation of the drying-out area around the cables, as well as temperature estimation in the conductors, insulations and screens of the cables. Furthermore, it is solved a dilemma about whether it is better to install the DFOTS system in the centre point of the trefoil formation between the three 110 kV cables, or somewhere in the cable bedding at a distance from the 110 kV cables. The considerations presented herein can be used in the design of the real-time monitoring systems for new high-voltage buried cable lines as well.

Keywords: cable installation, DFOTS system, FEM, hotspot, power cable, thermal reliability.

DETERMINING A THERMALLY RELIABLE LOCATION FOR DFOTS SYSTEM INSTALLATION ALONG BURIED POWER CABLES

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