

Modeliranje izolacije za potrebe termičke analize PVC i XLPE kablova u uslovima kratkog spoja

Dardan Klimenta, Miroljub Jevtić, Jordan Radosavljević i Bojan Perović

Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici

Univerzitet u Prištini

Kosovska Mitrovica, Srbija

dklimenta@hotmail.com

Sadržaj—U ovom radu je predstavljen postupak za modeliranje električnih i termofizičkih karakteristika malih cilindričnih zapremina, tj. tačkastih uzoraka izolacije kablova. Za vreme kvara, kroz ove tačkaste uzorke izolacije kabla osim malih struja odvođenja mogu proticati i velike struje koje ih zagrevaju i razaraju. Uvođenje modela za električne i termofizičke karakteristike izolacije u nelinearnu termičku FEM analizu kvarova pokazano je na primerima kratkih spojeva kod podzemnih energetskih kablova. Nelinearnost termičkog FEM modela bazirana je na temperaturno- i/ili vremenski-zavisnim izvorima toplote, električnim i termofizičkim karakteristikama PVC i XLPE izolacije. Prema VDE standardu, konstrukcije kablova razmatranih u ovom radu odgovaraju kablovima tipa NAYY 4×120 SM 0.6/1 kV i NA2XY 4×120 SM 0.6/1 kV. Predloženi modeli za karakteristike izolacije primenljivi su u termičkoj FEM analizi kvarova kod svih vrsta višezilnih energetskih kablova položenih u zemlju, vazduh ili vodu.

Ključne reči—energetski kabl; karakteristike izolacije; kratki spoj; metoda konačnih elemenata (FEM); polivinil-hlorid (PVC); termička analiza; umreženi polietilen (XLPE);

I. UVOD

Analiza termodinamike kvarova kod višezilnih energetskih PVC i XLPE kablova zahteva izračunavanje vrednosti i određivanje temperaturnih promena struja koje za vreme kvara protiču kroz njihove izolacije između opterećenih provodnika. Poznato je da se sa povećanjem temperature elastomeri lako deformišu ali ne tope kao plastomeri i da se njihova specifična električna otpornost smanjuje ali ne tako brzo kao kod plastomera. Takođe se zna da će kablovi sa izolacijom od plastomera pretrpeti električni slom negde u opsegu temperatura od 200 do 250 °C, dok će se isti kod kablova sa izolacijom od elastomera dogoditi negde u opsegu od 400 do 450 °C [1]. Ovo su opsezi temperatura u kojima će se vrednosti struja kroz izolaciju između opterećenih provodnika kabla za vreme kvara naglo promeniti sa malih vrednosti struja odvođenja na vrednosti reda veličine struje kvara. Prema tome, jasno je da će u datim kritičnim opsezima temperature uzrok za nagli skok vrednosti struja kroz izolaciju biti nagli pad električne otpornosti izolacije, odnosno njen električni slom.

Takođe, porast struje kroz izolaciju između faznih provodnika PVC ili XLPE kabla u opsegu temperature od 200-250 °C ili 400-450 °C prati porast specifične toplotne provodnosti date izolacije, respektivno. Naime, do temperature

od 200 °C (ili 400 °C) specifične toplotne provodnosti tačkastih uzoraka od PVC-a (ili XLPE-a) menjale su se klasično sa temperaturom da bi se po uspostavljanju proboja između provodnika faza R i S, kao i faza R i T, u opsegu temperature od 200-250 °C (ili 400-450 °C), specifične toplotne provodnosti tih tačkastih uzoraka izolacije povećale do vrednosti reda veličine zagrejanog aluminijuma. Ovo se tokom kratkih spojeva sigurno događa između faznih provodnika kablova kada se njihove izolacije nađu na temperaturama iz datih kritičnih opsega, a to se do sada nije uzimalo u obzir pri termičkoj FEM analizi kvarova.

Sa slika kvara na PVC kablju iz [2] vidi se da je izolacija između provodnika faza R i S, kao i faza R i T progorela samo u dve tačke čije su površine uporedive sa poprečnim presekom provodnika kabla. Zapremina izgorele izolacije se u svakoj od te dve tačke može modelirati cilindrom čija je osnova po površini jednaka poprečnom preseku jednog provodnika a visina jednaka debljini izolacije provodnik-provodnik. Modeliranjem električne otpornosti izolacije ovih cilindričnih uzoraka otvara se mogućnost za procenu vrednosti komponenti struje kvara koje su merodavne za zagrevanje provodnika i izolacije kabla. Slično tome, modeliranje specifičnih toplotnih provodnosti tih tačkastih uzoraka omogućuje da se simulacijom termodinamike kvara ilustruje topljenje provodnika faza S i T koje se imalo tokom kvara.

U ovom radu je FEM model kvara iz [2] prvo proširen modelima temperaturnih promena električne otpornosti i specifične toplotne provodnosti izolacije za vreme kvara, a zatim primenjen na konstrukciju PVC kabla iz [2] i njemu sličnu konstrukciju XLPE kabla tipa NA2XY 4×120 SM 0.6/1 kV. Termička analiza ova dva konstrukciono slična kabla sa različitim izolacijama izabrana je s ciljem da se potvrdi kvalitet predloženih modela za karakteristike izolacije i da se izvrši upoređenje ponašanja datih kablova pri jednom te istom scenariju kvara.

FEM model kvara iz [2] ostavio je mogućnost da se putem modeliranja električne otpornosti i specifične toplotne provodnosti izolacije modeliraju i procesi razmene toplote koji su se odvijali u izolaciji između susednih faznih provodnika. Sa slika kvara iz [2] videlo se da je PVC izolacija izgorela uz sve fazne provodnike, odnosno da je kvar u jednom trenutku prešao iz jednofaznog u trofazni. Prema tome, uvođenje modela za električnu otpornost i specifičnu toplotnu provodnost izolacije u FEM model kvara omogućilo je organizaciju simulacije

prema stvarnom scenariju zagrevanja kabla tokom kvara. Stvarni scenariji kvara bazirani su na ponašanju PVC-a i XLPE-a sa promenom temperature [1], [3]-[5]. Takvi modeli u poređenju sa onim iz [2] obezbeđuju najvernije moguće simulacije zagrevanja razmatranih kablova za vreme kvara.

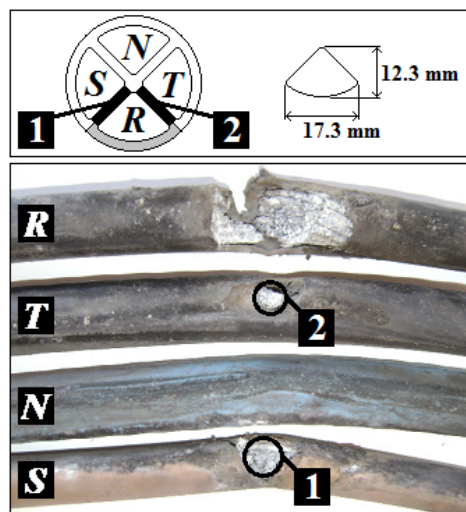
Kao najčešće upotrebljavanim izolacionim materijalima u kablovskoj tehnici, PVC-u i XLPE-u, do danas je posvećen ogroman broj publikacija, tako da ovom prilikom nije dat njihov pregled jer bi isti zahtevao mnogo prostora. Međutim kao najznačajnije za ovde predloženi model, među njima treba izdvojiti [6] gde je na sličan način eksploatisana ideja o modeliranju električne provodnosti izolacije između dva provodnika u kابلu, kao i [1]-[5] odakle su korišćeni FEM model kvara, scenario kvara i rezultati merenja termofizičkih karakteristika PVC-a i XLPE-a izvedenih u cilju određivanja hemijskog, termičkog ili električnog sloma istih.

II. MODELIRANJE KARAKTERISTIKA IZOLACIJE I IZVORA TOPLOTE

Prema standardima, kablovi sa izolacijom od PVC-a i XLPE-a mogu se trajno eksploatisati pri temperaturama od 70 °C i 90 °C, ili kratkotrajno pri 160 °C i 250 °C, respektivno. Prve, trajno dozvoljene temperature izolacije, odnose se na normalan režim rada, dok se druge, dozvoljene temperature izolacije pri kratkom spoju, odnose na havarijski režim rada kablova. PVC i XLPE kablovi ne smeju se izložiti dejstvu struja kratkih spojeva, odnosno temperaturama od 160 °C i 250 °C u periodu dužem od 5 sekundi, respektivno. Konkretno, za kabl tipa NAYY 4×120 SM 0.6/1 kV propisano je da u periodima od 0.1 i 5 sekundi može izdržati termičke struje kratkih spojeva čije su efektivne vrednosti 29 i 4 kA, respektivno [7]. Dokle za kabl tipa NA2XY 4×120 SM 0.6/1 kV, prema propisima, periodima od 0.1 i 5 sekundi odgovaraju struje 36 i 5 kA, respektivno [7]. Prema tome, glavni faktori od kojih zavisi početak električnog sloma PVC-a ili XLPE-a tokom kvara sigurno jesu dominantni izvori toplote u kابلu, odnosno efektivne vrednosti komponenti struje kvara. Dielektrični gubici se u kablovima niskog napona zanemaruju i za vreme kvara jer isti ne mogu značajnije uticati na njihovo zagrevanje.

Promene struja koje protiču po faznim provodnicima kablova za vreme kvara zavise isključivo od scenarija kvara, odnosno od temperature promene električne otpornosti izolacije između faznih provodnika na mestu kvara. Prema tome, modeliranje električne otpornosti izolacije na mestu kvara jeste najznačajnije za organizaciju dobre simulacije termodinamike kvara u smislu određivanja vremena trajanja kvara i stepena oštećenja izolacije posle kvara. Stvarni scenario kvara sigurno se razlikuje od scenarija razmatranog u [2]. Tačno je da se sa prodorom vode u PVC kabl iz [2] na mestu njegovog mehaničkog oštećenja prvo pojavila neka mala struja koja se sa smanjenjem električne otpornosti na mestu kvara postepeno povećavala do pune vrednosti struje jednofaznog zemljospoja od 1272.632 A. Kao u [2] i u ovom radu se mora poći od pretpostavke da je u trenutku kvara kroz nultu otpornost na mestu kvara trenutno protekla struja jednofaznog zemljospoja u punom iznosu. Oštećeni deo kabla tipa NAYY 4×120 SM 0.6/1 kV koji će poslužiti kao osnova za postavku

modela prikazan je na sl. 1. Za XLPE kabl koji je po konstrukciji sličan PVC kابلu iz [2], u ovom radu se pretpostavlja jedan te isti scenario kvara i polazi od postavki koje su identične onim iz [2]. Tako se putem klasičnog proračuna za kabl tipa NA2XY 4×120 SM 0.6/1 kV dobija da struja jednofaznog zemljospoja iznosi 1294.588 A.



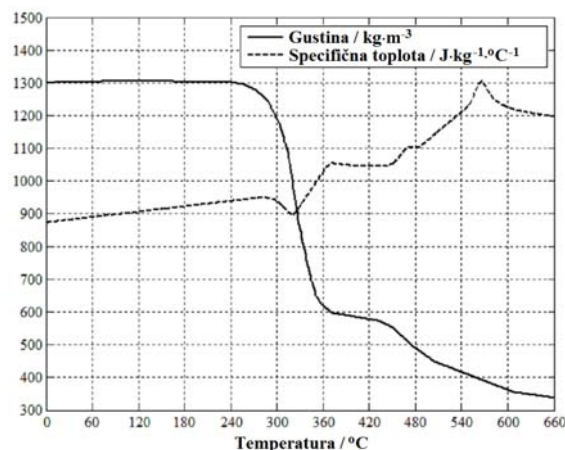
Slika 1. Oštećeni deo kabla tipa NAYY 4×120 SM 0.6/1 kV [2], [9].

A. Slučaj kabla sa PVC izolacijom

Specifična toplotna provodnost PVC izolacije u funkciji od temperature u $W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-1}$ modelirana je na sledeći način:

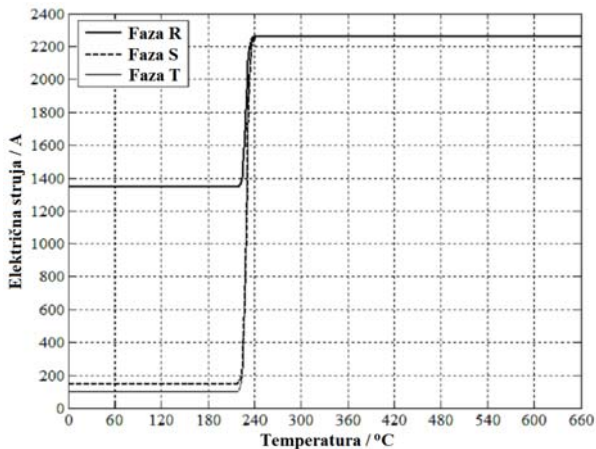
$$k_i(T) = \alpha_i \cdot \rho_i(T) \cdot c_i(T) \quad (1)$$

gde je: α_i toplotna difuzivnost koja se ne menja sa promenom temperature i koja prema [8] iznosi $1.28 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho(T)$ gustina u funkciji od temperature u $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $c(T)$ specifična toplota u funkciji od temperature u $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ i T temperatura u $^\circ \text{C}$. Modeli gustine i specifične toplote PVC izolacije u funkciji od temperature dati su na sl. 2.



Slika 2. Gustina i specifična toplota PVC izolacije u funkciji od temperature [3].

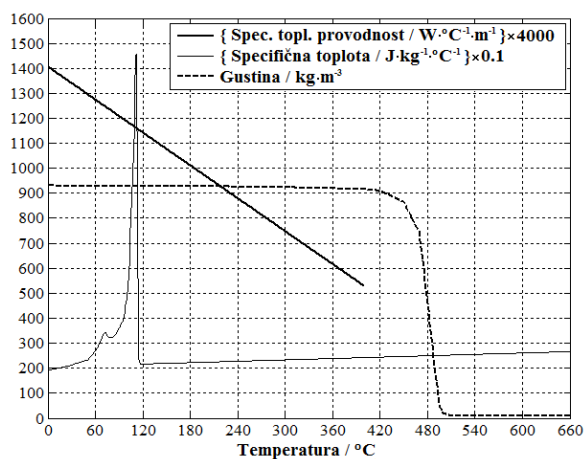
Modeliranje specifične električne otpornosti PVC izolacije izvršeno je saglasno referenci [9]. Zapreminske snage izvora toplote u faznim provodnicima PVC kabla za vreme kvara određene su na osnovu odgovarajućih temperaturno-zavisnih faznih struja datih na sl. 3.



Slika 3. Fazne struje PVC kabla u funkciji od temperature za vreme kvara.

B. Slučaj kabla sa XLPE izolacijom

Temperaturne zavisnosti specifične toplotne provodnosti, specifične toplote i gustine XLPE izolacije generisane su na osnovu rezultata prezentovanih u [5], [10] i date na sl. 4.



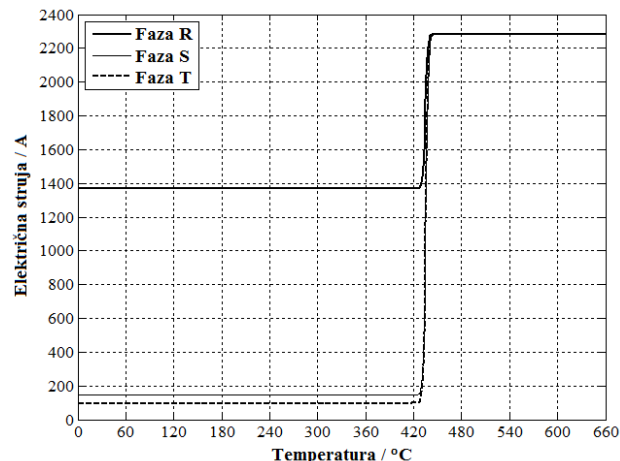
Slika 4. Specifična toplotna provodnost, specifična toplota i gustina XLPE izolacije u funkciji od temperature.

Pretpostavlja se da se specifične toplotne provodnosti oštećenih tačkastih uzoraka XLPE izolacije menjaju sa temperaturom u istim opsezima temperatura u kojim se menjaju njihove specifične električne otpornosti [9]. Prema tome, specifične toplotne provodnosti oštećenih tačkastih uzoraka XLPE izolacije modelirani su na sledeći način: (i) u opsegu temperatura 0-400 °C sa odgovarajućim delom krive specifične toplotne provodnosti date na sl. 4; (ii) u opsegu temperatura 400-450 °C pomoću izraza:

$$k_{XLPE2}(T) = k_{400} \cdot e^{A_3 + B_3/T} \quad (2)$$

gde je: k_{400} specifična toplotna provodnost XLPE izolacije na temperaturi od 400 °C – parametar koji treba očitati sa krive specifične toplotne provodnosti date na sl. 4 u $W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-1}$, T temperatura u °C, a A_3 i B_3 odgovarajuće karakteristične konstante [9]; i (iii) u opsegu temperatura 450-658 °C sa odgovarajućim delom krive specifične toplotne provodnosti aluminijuma [9]. Konstante A_3 i B_3 izraza (2) određene su na osnovu specifičnih toplotnih provodnosti XLPE izolacije i aluminijuma na temperaturama od 400 i 450 °C, respektivno.

Temperaturno-zavisne struje koje su za vreme kvara proticale kroz provodnike faza R, S i T kabla sa XLPE izolacijom generisane su putem klasičnog proračuna i date su na sl. 5.



Slika 5. Fazne struje XLPE kabla u funkciji od temperature za vreme kvara.

III. FEM MODEL TERMODINAMIKE KRATKOG SPOJA

FEM model termodinamike kratkog spoja razmatranog u ovom radu prema [2] se zasniva na sledećoj jednačini:

$$k(T, t) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q(T) = \rho(T) \cdot c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

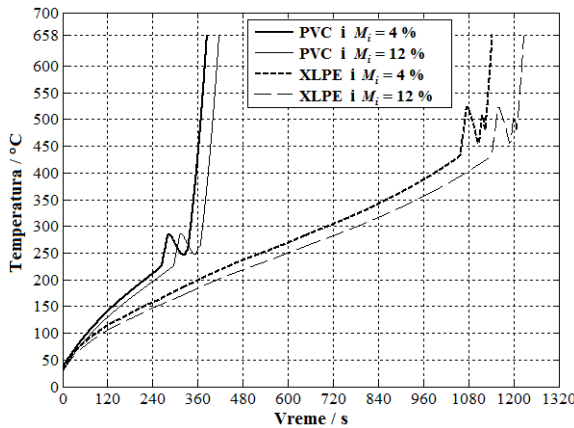
gde je: $k(T, t)$ specifična toplotna provodnost materijala u funkciji od temperature i vremena u $W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-1}$; T temperatura u K; x i y prostorne koordinate u m; $Q(T)$ zapreminska snaga izvora toplote u funkciji od temperature u $W \cdot m^{-3}$; $\rho(T)$ gustina materijala u funkciji od temperature u $kg \cdot m^{-3}$; $c(T)$ specifična toplota materijala u funkciji od temperature u $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ i t vreme u s.

Uzeto je da su hronologija nastanka kvara, termofizičke karakteristike okolnog zemljišta, broj blokova, geometrija blokova, granični uslovi na površini zemlje, parametri numeričke integracije, uvedene pretpostavke za mehaničko oštećenje kabla uz fazu R i postupak modeliranja kretanja vode kroz zemlju isti kao u modelu iz [2]. Poprečni preseči rešavanih domena isti su kao u [9].

IV. REZULTATI PRORAČUNA

Prema [2] kao najverovatnije moguće granične vrednosti za početni sadržaj vlage u zemljištu pre kvara izdvojene su vrednosti od 4 i 12 %. Numerička integracija vršena je sa adaptibilnim vremenskim korakom u intervalu od početnog trenutka u kojem se kroz provodnik faze R imala puna vrednost struje jednopolnog zemljospoja pa do trenutka u kojem je temperatura provodnika faze R dostigla temperaturu topljenja aluminijuma od 658 °C pri punoj vrednosti struje nesimetričnog trolnog kratkog spoja. Uz adaptibilni vremenski korak za postizanje dobre konvergencije korišćena je i pogodnost programa UTAFE da se svaki vremenski korak može izvršiti sa različitim brojem Newton-Raphson-ovih iteracija [11].

Na sl. 6 prikazani su numerički dobijeni tranzijenti zagrevanja provodnika faze R za PVC i XLPE kabl pri vrednostima početnog sadržaja vlage u zemljištu od 4 i 12 %. Pri početnim sadržajima vlage od 4 i 12 % provodnik faze R posmatranog PVC kabla postigao je temperaturu od 658 °C za 384.6 i 415.75 s, dok se isto u slučaju XLPE kabla dogodilo za 1143.55 i 1226.85 s, respektivno. Zapaža se da bi vreme trajanja kvara u slučaju XLPE kabla bilo i do 4 puta duže. Ovo se dobro slaže za zaključcima izvedenim u [1].

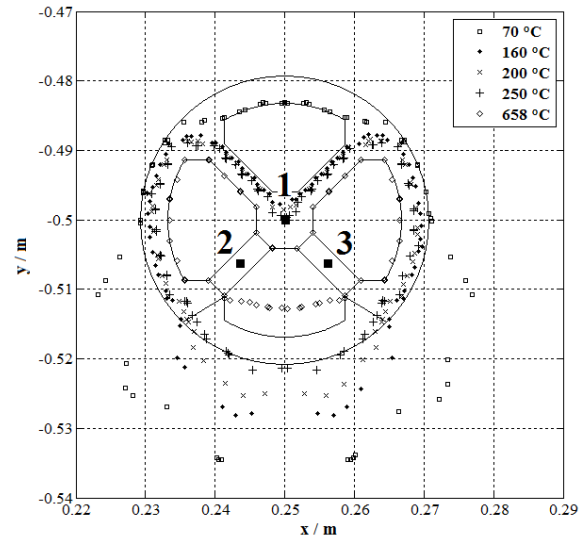


Slika 6. Tranzijenti zagrevanja provodnika faze R za PVC i XLPE kabl pri vrednostima početnog sadržaja vlage u zemljištu od 4 i 12 %.

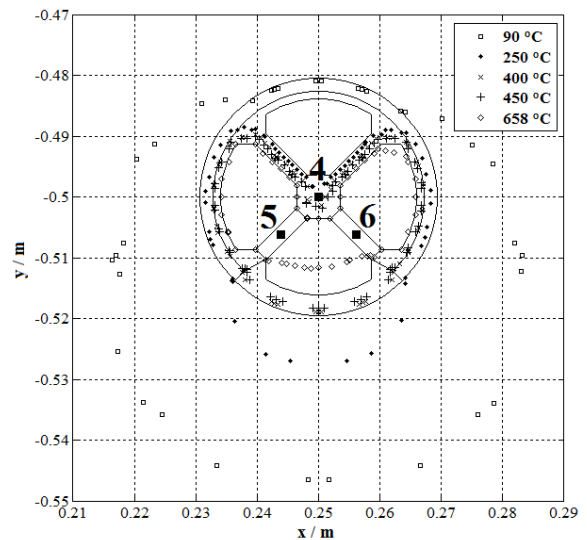
Prema tome, s aspekta stanja izolacije tokom kvara najinteresantnije je pogledati kakve su oblike imale izoterme karakterističnih temperatura za razmatrane kablove u trenucima kada su se njihovi provodnici faze R zagrejali do temperature od 658 °C. Na sl. 7 zajednički su prikazane izoterme karakterističnih temperatura dobijene u trenutku topljenja provodnika faze R pri vrednosti početnog sadržaja vlage u zemljištu od $M_f=12\%$. Izoterme temperatura 70, 160, 200, 250 i 658 °C izračunate za PVC kabl u trenutku topljenja provodnika faze R prikazane su na sl. 7a, dok su izoterme temperatura 90, 250, 400, 450 i 658 °C izračunate za XLPE kabl u trenutku topljenja provodnika faze R prikazane su na sl. 7b. Prostorne raspodele izotermičkih linija za $M_f=4\%$ nisu date zbog njihovih zanemarljivih razlika u odnosu na rešenje prikazano na sl. 7.

Sa sl. 7a se vidi da izoterma od 70 °C obuhvata neutralni provodnik, što se slaže sa rezultatom simulacije prezentovanim

u [2]. Zatim, sa sl. 7a se još vidi da izoterme od 160, 200 i 250 °C prolaze blizu provodnika faza S i T, što se opet slaže sa stanjem izolacije PVC kabla nakon kvara (sl. 1). Takođe, sa sl. 7b se vidi da izoterma od 90 °C obuhvata neutralni provodnik i da izoterme od 250, 400 i 450 °C prolaze blizu provodnika faza S i T, što je ekvivalentno rezultatu dobijenom u slučaju PVC kabla. U poređenju sa rezultatima iz [2], sada se tranzijenti zagrevanja provodnika faza S i T razlikuju između sebe a njihove temperature u trenutku topljenja provodnika faze R bile su bliske (nešto veće) temperaturi od 658 °C.



(a)



(b)

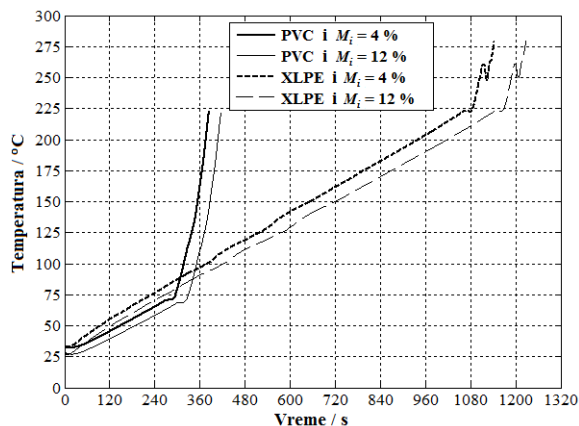
Slika 7. Izoterme karakterističnih temperatura u trenutku topljenja provodnika faze R pri vrednosti početnog sadržaja vlage u zemljištu od 12 %: (a) za PVC kabl i (b) za XLPE kabl.

Prema tome, proizilazi da je skoro istovremeno došlo do topljenja provodnika sve tri faze, što se dobro slaže sa stanjem faznih provodnika sa sl. 1 i rezultatima sa sl. 7 gde su fazni provodnici, u slučaju oba kabla, obuhvaćeni izotermom od 658

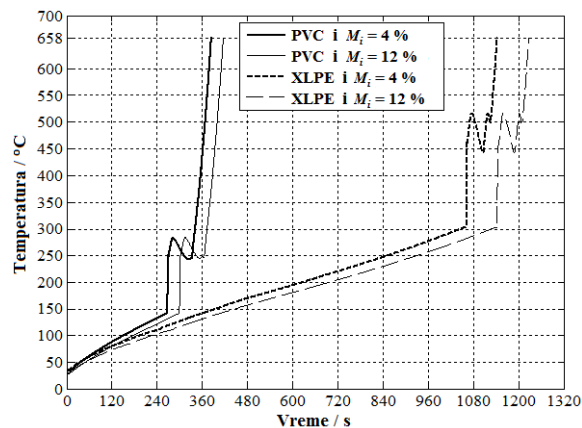
°C. Takođe, temperatura neutralnog provodnika pri različitim vrednostima početnog sadržaja vlage u zemlji nije imala veću vrednost od 78 ili 175 °C za PVC ili XLPE kabl, respektivno; što opet, nije bilo dovoljno da izazove topljenje neutralnog provodnika.

Da bi se imao bolji uvid u rezultate simulacija kvara izvršenih za kablove sa PVC i XLPE izolacijom na sl. 7 izdvojene su termički najkritične tačke 1-6. Tačke 1, 2 i 3 pripadaju izolaciji PVC kabla sa sl. 7a, dok tačke 4, 5 i 6 pripadaju izolaciji XLPE kabla sa sl. 7b. To su tačke PVC i XLPE izolacije u kojima je zagrevanje najintenzivnije tokom kvara. Na osnovu tranzijenata zagrevanja u tačkama 1-6 lako se može uočiti kako i u kojem trenutku je došlo do termičkog proboja izolacije kablova. Tranzijenti zagrevanja izolacije kablova u tačkama 1-6 dati su na sl. 8, 9 i 10. Na sl. 8 dati su tranzijenti zagrevanja izolacije u centrima kružnica kojima su predstavljene spoljašnje površine razmatranih kablova (u tačkama 1 i 4). Na sl. 9 i 10 dati su tranzijenti zagrevanja centara tačkastih uzoraka izolacije lociranih između provodnika faza R i S (u tačkama 2 i 5) i provodnika faza R i T (u tačkama 3 i 6), respektivno.

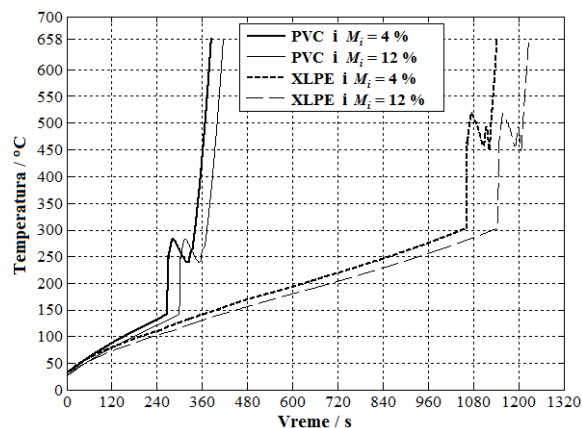
Tranzijenti sa sl. 8 pokazuju da za $M_i=4\%$ temperatura PVC i XLPE izolacije u tačkama 1 i 4 nije bila veća od 223.2 i 278.9 °C, odnosno nije bila veća od kritičnih 250 i 450 °C, respektivno; što se takođe može smatrati dobrim rezultatom. Izolacija PVC kabla u tački 1 pri početnom sadržaju vlage u zemlji od 4 i 12 % bila je izložena dejstvu temperature veće od 200 °C u vremenima jednakim 8.4 i 8.0 sekundi, respektivno. Za tako kratko vreme izolacija neutralnog provodnika PVC kabla sigurno nije mogla da progori, što se opet poklapa sa stanjem izolacije oštećenog kabla sa sl. 1. Na drugoj strani, izolacija XLPE kabla u tački 4 nije bila izložena dejstvu temperature veće od 400 °C. Tranzijenti zagrevanja centara tačkastih uzoraka izolacije lociranih između provodnika faza R i S i provodnika faza R i T sa sl. 9 i 10 razlikuju se međusobno i za PVC i za XLPE kabl, a njihove temperature u trenutku topljenja provodnika faze R bile su do 2.2 °C veće od temperature 658 °C. Tranzijenti zagrevanja ovih tačkastih uzoraka izolacije nedvosmisleno potvrđuju modele od kojih se pošlo, a u slučaju PVC kabla ovi tranzijenti se poklapaju sa stanjem izolacije kabla koje se imalo posle kratkog spoja na njima odgovarajućim mestima.



Slika 8. Tranzijenti zagrevanja izolacije kablova u tačkama 1 i 4.



Slika 9. Tranzijenti zagrevanja izolacije kablova u tačkama 2 i 5.



Slika 10. Tranzijenti zagrevanja izolacije kablova u tačkama 3 i 6.

Uz sl. 7, sl. 9 i 10 mogu poslužiti i za izvođenje zaključka o stanju izolacija provodnika faza S i T koje su progorele samo na mestima dodira sa izolacijom provodnika faze R, tj. u tačkastim uzorcima izolacije modeliranim blokovima 8 i 9 [9]. Očito je da su ovi tačkasti uzorci izolacije locirani između faznih provodnika PVC ili XLPE kabla bili izloženi dejstvu temperature veće od 250 ili 450 °C mnogo duže od dozvoljenih 5 sekundi (nešto manje od 2 minuta za oba kabla), respektivno.

V. ZAKLJUČAK

Primenom predloženih modela za električni otpor i termofizičke karakteristike izolacije u nelinearnoj FEM analizi zagrevanja kabla tipa NAYY 4×120 SM 0.6/1 kV tokom kvara dobijeni su rezultati koji se bolje poklapaju sa realnim stanjem izolacije istog posle kvara. Takođe, izvršena je uporedna primena datih modela u termičkoj analizi kabla tipa NA2XY 4×120 SM 0.6/1 kV kako bi se videlo kako se dva konstrukciono slična kabla sa različitim izolacijama ponašaju u uslovima identičnog scenarija kvara. Modeliranjem temperature promene električnog otpora izolacije u nekoj njenoj maloj zapremini omogućeno je da se kvalitetnije proceni raspodela struje kvara po faznim provodnicima i da se preko njenih komponenti izračunataju zapreminske snage izvora toplote. Zatim su sa dobrom procenom promene snaga izvora toplote i modeliranjem termofizičkih karakteristika izolacije na

mestu kvara jednostavno obezbeđene najbolje moguće simulacije zagrevanja kablova tokom kvara.

Predloženi modeli za električni otpor i termofizičke karakteristike izolacije primenljivi su u termičkoj FEM analizi kvarova kod svih vrsta višezilnih energetskih kablova koji se polažu u zemlju i vodu, ili se vode kroz vazduh. Ako se javi potreba, dati modeli se mogu primeniti i za modeliranje karakteristika izolacije između provodnika i električne zaštite, provodnika i ekrana ili provodnika i mehaničke zaštite, kako kod jednožilnih, tako i kod višezilnih kablova. Slično tome, dati modeli se mogu primeniti i kod fenomena površinskog gorenja luka za procenu karakteristika kablovske izolacije koja tada stoji na red impedansi luka i slično.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Vladi Republike Srbije za finansiranje ovog rada u okviru projekta TR 33046.

LITERATURA

- [1] S. P. Nowlen, K. McGrattan, H. R. Woods, J. Dreisbach, M. H. Salley, "The cable response to live fire (carolfire) project: advancing the cable fire response knowledge base", American Nuclear Society PSA 2008 Topical Meeting – Challenges to PSA during the nuclear renaissance, Knoxville, Tennessee, September 7-11, 2008.
- [2] 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, Vol. 20, Issue 8, pp. 1237-1254, November 2010.
- [3] R. W. Armstrong, J. Mason, A. Kumar, J. E. Hall, "Thermally induced failure of low-voltage electrical nonmetallic-sheathed cable insulation", Fire Technology, Vol. 35, Issue 3, pp. 263-275, 1999.
- [4] M. Beneš, N. Milanov, G. Matuschek, A. Kettrup, V. Plaček, V. Balek, "Thermal degradation of PVC cable insulation studied by simultaneous TG-FTIR and TG-EGA methods", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 78, pp. 621-630, 2004.
- [5] M. Madani, N. Sharifi-Sanjani, E. Rezaei-Zare, R. Faridi-Majidi, "Preparation of granular cross-linkable medium-density polyethylene", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 104, pp. 1873-1879, 2007.
- [6] O. Keski-Rahkonen, "Effect of electrical conductivity on emergency performance of cables at high temperatures", Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), Prague, Czech Republic, August 17-22, 2003.
- [7] L. Heinhold, "Power cables and their application - Part 1 (3rd revised edn)", Siemens Aktiengesellschaft: Berlin and Munich, 1990.

- [8] A. R. Tillmann, V. L. Borges, G. Guimarães, A. L. F. de Lima e Silva, S. M. M. de Lima e Silva, "Identification of temperature-dependent thermal properties of solid materials", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, Vol. 30, Issue 4, pp. 269-278, 2008.
- [9] D. Klimenta, J. Radosavljević, M. Jevtić, V. Raičević, D. Tasić, A. Todorović, "Insulation modelling for thermal FEM analysis of PVC and XLPE cables under fault conditions", European Transactions on Electrical Power, Vol. 22, Issue 8, pp. 1093-1111, November 2012.
- [10] S. Boggs, J. Densley, J. Kuang, "Mechanism for impulse conversion of water trees to electrical trees in XLPE", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, Issue 2, pp. 310-315, 1998.
- [11] D. Klimenta, S. Nikolajević, M. Sredojević, "Controlling the thermal environment in hot spots of buried power cables", European Transactions on Electrical Power, Vol. 17, Issue 5, pp. 427-449, September/October 2007.

ABSTRACT

An approach to electrical and thermo-physical properties modelling of the cable insulation small cylindrical volumes, that is, spot samples is presented in this paper. Under fault conditions, except the small leakage currents, the high currents can flow through these spots heating up and destroying the cable insulation in them as well. An introduction of the models for electrical and thermo-physical properties of the insulation to the nonlinear thermal FEM analysis of faults is demonstrated on the examples of short-circuits occurred in buried power cables. Nonlinearity of the thermal FEM model is based on the heat sources, electrical and thermo-physical properties of PVC and XLPE insulations as functions of temperature and/or time. According to the VDE standards, the cable structures considered herein correspond to the cables of the type NAYY 4×120 SM 0.6/1 kV and NA2XY 4×120 SM 0.6/1 kV. The proposed models for insulation properties are applicable to the fault thermal FEM analysis of all multi-core power cables laid in the soils, air or water.

INSULATION MODELLING FOR THERMAL ANALYSIS OF PVC AND XLPE CABLES UNDER SHORT CIRCUIT CONDITIONS

Dardan Klimenta, Miroljub Jevtić, Jordan Radosavljević and Bojan Perović