

# Analiza termo-električnih karakteristika rudarskih kablova

Snežana Aleksandrović, Vesna Damnjanović

Rudarsko-geološki fakultet

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

[snezana.aleksandrovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:snezana.aleksandrovic@rgf.bg.ac.rs), [vesna.damnjanovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:vesna.damnjanovic@rgf.bg.ac.rs)

*Sadržaj*—Rudarski kablovi izloženi su veoma teškim uslovima rada. Najčešća vrsta kvara je zemljospoj. Kroz uzemljeni zaštitni omotač kabla protiče struja kvara, koja izaziva značajno povećanje temperature dok zaštita ne isključi napajanje. U ovom radu razmotrena su termička naprezanja zaštitnog omotača u slučaju ove vrste kvara.

*Ključne reči* - rudarski kablovi, zemljospoj, zaštitni omotač, zagrevanje

## I. UVOD

Savremeni kablovi su prilično složene konstrukcije, diktirane uslovima primene, ali i raznim električnim pojavama čije se delovanje višestruko nepovoljno odražava na njihovu sigurnost i životni vek. U tom smislu izolacija je sigurno najvažniji deo kabla i njen značaj je utoliko veći ukoliko je veći nominalni napon kabla. Međutim, bez obzira na njen kvalitet, usled postojanja razarajućeg dejstva električnog polja neophodna je primena ekrana kako bi se električno polje ograničilo na izolaciju i formirala ravnomerna konfiguracija polja na njenoj unutrašnjoj površini [1].

Ekran se postavlja preko provodnika i preko izolacije kabla, a izrađuje se od pogodnog poluprovodnog materijala. Ekran preko izolacije sastoji se od nemetalnog i metalnog dela. Metalni deo postavljen je preko nemetalnog i naziva se metalnom zaštitom. Pored popravljivanja konfiguracije polja u kablu, ona predstavlja zaštitu od dodira i služi kao provodnik za kapacitivne struje i struje odvođenja i grešaka.

Metalni zaštitni omotač se najčešće izvodi od žica kružnog poprečnog preseka. Preko njih je, u suprotnom smeru namotavanja, omotana tanka bakarna traka, koja služi za bolju međusobnu električnu vezu žica i za izjednačavanje njihovog strujnog opterećenja. Zaštitni omotač se izvodi i kao omot od jedne ili dve bakarne trake omotane sa preklapanjem.

Metalni zaštitni omotač kabla mora biti dobro uzemljen. U slučaju kvara na izolaciji između provodnika i metalnog zaštitnog omotača javlja se efekat koji je praktično isti kao i u slučaju kratkog spoja između dva provodnika kabla. Kroz zaštitni omotač teče vrlo velika struja kvara, pa je neophodno njegov presek tako dimenzionisati da se on ne zagreje iznad dozvoljene temperature dok zaštita ne proradi i ne izvrši isključenje.

## II. TERMIČKA NAPREZANJA PRI POJAVI KRATKOG SPOJA

Kratak spoj u mreži je pojava sa karakteristikama prelaznog režima, pri kojoj se javljaju vrlo velike struje usled kojih dolazi do značajnih termičkih i dinamičkih naprezanja u delovima električnih kablova, kroz koje one protiču. Zagrevanje provodnika zavisi od veličine i trajanja struje kratkog spoja. Dozvoljena temperatura provodnika u slučaju kratkog spoja može biti znatno viša nego u normalnom režimu, jer je zagrevanje vrlo kratko i nastupa samo u retkim slučajevima kvara. Trajanje struje kratkog spoja određeno je vremenom podešavanja zaštite, pri čemu treba uzeti u obzir i sopstveno vreme reagovanja zaštite i prekidača.

Ako se želi precizno planiranje, treba uzeti u obzir vrstu izolacije, tip kabla i veličinu nominalnog napona da bi se definisala dozvoljena temperatura u slučaju pojave kratkog spoja. Može se garantovati da će zagrevanje provodnika pri pojavi kratkog spoja ostati u dozvoljenim granicama ako se izvrši pravilan izbor preseka provodnika. Najmanji presek može se odrediti iz odgovarajućih tabela i dijagrama, koji uzimaju u obzir prethodno navedene relevantne veličine, pri određenim uslovima. Međutim, problem se može javiti ako se uslovi u konkretnoj praktičnoj primeni razlikuju od onih navedenih u tabelama iz kataloga u priručniku proizvođača, ili ako iz bilo kojih razloga neki kabl neplanirano treba uključiti u eksploataciju, pa treba proveriti da li, pored drugih uslova, on ispunjava i zahteve u pogledu podnošenja eventualnih kratkih spojeva [2].

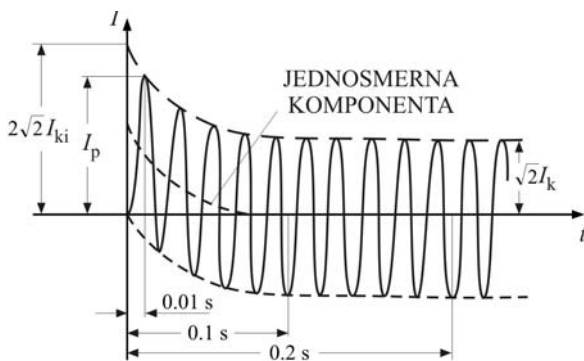
Kada nastane kratak spoj između pojedinih žila kabla, dolazi samo do termičkog naprezanja provodnika. U slučaju zemljospoja, kada dođe do spoja između jedne ili više faza sa metalnom zaštitom kabla, termičkom napreznju izložen je i metalni zaštitni omotač. Pošto je površina omotača po pravilu prilično dobro izolovana od zemlje, osim na mestima gde je uzemljena, treba računati sa tim da kroz metalni omotač kabla protiče celokupna struja kratkog spoja. Ovo se mora imati u vidu prilikom provere zaštitnog omotača kabla na termičko podnošenje kratkog spoja. Međutim, treba istaći da se provere na termičko napreznje najčešće vrše za slučajeve kratkog spoja između žila kabla, a da se veličina preseka metalne zaštite ili uopšte ne tretira, ili se za određivanje njene veličine, pored podataka iz tabela, koriste i razni približni empirijski obrasci.

U rudarskoj praksi se često javlja potreba da se neki kabl iz bilo kojih razloga upotrebi umesto planiranog ili se iskoristi za alternativno, odnosno rezervno napajanje nekog važnog postrojenja. Sa druge strane, u rudarstvu je pojava kvarova na kablovima mnogo češća nego u distributivnom prenosu električne energije, a naročito kvarova tipa zemljospoja. Zbog toga je vrlo važno da se u ovakvim primenama, osim za žile, dovoljno tačno izvrši i provera metalnog zaštitnog omotača kabla na termičko podnošenje kratkog spoja.

Režimi kratkog spoja u mrežama za prenos energije dosta su složeni, jer zavise od mnogo faktora, pa je i njihova sveobuhvatna analiza teška i nepregledna. Ipak, stvari se mogu dosta pojednostaviti sledećim razmatranjima. Struja kratkog spoja zavisi od ukupne impedanse elektroenergetskog sistema do mesta kvara. Imajući ovo u vidu, slučajevi kratkog spoja se mogu razdvojiti u dve kategorije: kratke spojeve koji su blizu generatora i kratke spojeve daleko od generatora [3, 4]. Kvarovi iz prve grupe nastaju u električnim centralama i njihovoj neposrednoj blizini.

Kvarovi iz druge grupe javljaju se po pravilu u mrežama koje se ne napajaju neposredno od generatora. Pošto je ovo najčešći slučaj u praksi, to će samo on biti razmatran.

Kada nema kvara, struja ima neku normalnu vrednost  $I_n$ . U trenutku pojave kratkog spoja na nekom mestu u mreži, amplituda struje naglo poraste, zatim postepeno opada i posle kraćeg vremena se ustali. Struja kratkog spoja je složena funkcija vremena i sastoji se od dve komponente, jednosmerne i naizmjenične.



Slika 1. Vremenski tok struje kratkog spoja (daleko od generatora)

Na slici 1 prikazan je tipičan vremenski tok struje kratkog spoja iz kategorije kratkih spojeva daleko od generatora [5]. Pri tom su korišćene sledeće oznake:  $I_{ki}$  - početna naizmjenična struja kratkog spoja (efektivna vrednost),  $I_p$  - udarna struja kratkog spoja (amplituda),  $I_k$  - ustaljena struja kratkog spoja (efektivna vrednost).

Jednosmerna komponenta brzo opada i nestaje posle kratkog vremena. Naizmjenična komponenta u opštem slučaju opada postepeno.

Kod kratkih spojeva daleko od generatora može se smatrati da praktično nema opadanja naizmjenične komponente, odnosno da je efektivna vrednost početne naizmjenične struje

kratkog spoja jednaka efektivnoj vrednosti ustaljene struje kratkog spoja, odnosno,  $I_p = I_k$ .

Za izračunavanje termičkog naprezanja provodnika, odnosno zaštite kabla, merodavna je srednja efektivna vrednost struje kratkog spoja  $I_{ks}$  za vreme njegovog trajanja, odnosno do trenutka  $t_i$  kada ga zaštita isključi. Struja koja bi imala ovu vrednost, za vreme trajanja kratkog spoja proizvela bi istu količinu toplote kao i stvarna struja kratkog spoja. Pošto je struja kratkog spoja složena funkcija vremena, uticaji promene jednosmerne i naizmjenične komponente uzimaju se u obzir odgovarajućim faktorima koji se očitavaju iz dijagrama. Kako se ovde tretiraju samo slučajevi kratkih spojeva daleko od generatora kod kojih nema promene naizmjenične komponente, treba računati samo faktor koji uzima u obzir promenu jednosmerne komponente, a umesto faktora za naizmjeničnu uzeti vrednost 1:

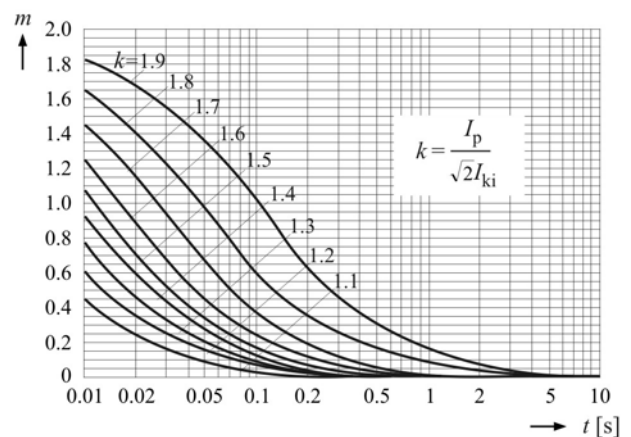
$$I_{ks} = I_p \sqrt{m+1} = I_k \sqrt{m+1} \quad (1)$$

gde je  $m$  faktor koji uzima u obzir promenu jednosmerne komponente. Njegova vrednost se određuje iz dijagrama sa slike 2.

Dijagram za određivanje vrednosti  $m$  daje se obično kao familija krivih za razne vrednosti parametra  $k$ , koji predstavlja odnos:

$$k = \frac{I_p}{\sqrt{2}I_{ki}} \quad (2)$$

Koeficijent  $k$  zavisi od odnosa omske i induktivne komponente ukupne impedanse [6]. U najnepovoljnijem slučaju, kada bi omska komponenta bila jednaka nuli, bilo bi  $k=2$ . U praksi, realne vrednosti koeficijenta  $k$  sa kojima treba računati kreću se između 1,6 i 1,8, te se kao najnepovoljniji slučaj koji se realno može očekivati u praksi usvaja vrednost  $k=1,8$ .



Slika 2. Određivanje faktora uticaja jednosmerne komponente

### III. PRORAČUN PRESEKA ZAŠTITNOG OMOTAČA KABLA S OBZIROM NA ZAGREVANJE U KRATKOM SPOJU

Zaštitni metalni omotač kabla treba da ima toliki presek da se za vreme proticanja struje kratkog spoja ne zagreje iznad dozvoljene temperature. U cilju njegovog određivanja može se smatrati da se razvijena toplota troši samo na zagrevanje zaštitnog omotača i da se ne prenosi na izolaciju. Ova pretpostavka je opravdana, jer je vreme trajanja kratkog spoja vrlo malo.

Otpornost zaštitnog omotača zavisna je od temperature. Njegov temperaturni koeficijent  $\alpha$  takođe zavisi od temperature i najčešće se navodi za 20°C kao  $\alpha_{20}$ .

Pošto razlika temperatura  $T - \theta_n$  (gde je  $\theta_n$  najmanja temperatura, odnosno temperatura na početku pojave kratkog spoja) neće biti veća od 150 K, može se smatrati da je promena otpornosti zaštitnog omotača kabla linearna i režirana izrazom [7]:

$$\frac{R_k}{R_n} = \frac{1 + \alpha_{20}(\theta_k - 20)}{1 + \alpha_{20}(\theta_n - 20)} = \frac{T_0 + \theta_k}{T_0 + \theta_n} \quad (3)$$

gde je  $\theta_k$  krajnja temperatura omotača kabla, odnosno temperatura kada zaštita isključi kratak spoj, a  $T_0$  je konstanta materijala (za bakar njena vrednost iznosi 235 K, a za aluminijum 245 K).

Pod ranije navedenim uslovima, u toku zagrevanja zaštitnog omotača kabla važi sledeći energetski bilans

$$R_\theta \cdot I_{km}^2 \cdot t_i = cVd\theta \quad (4)$$

gde su:

$R_\theta$ -otpornost omotača na temperaturi  $\theta$ ,

$I_{km}$ -srednja struja kratkog spoja,

$t_i$  - vreme za koje zaštita isključi kratak spoj,

$c$  – specifična toplota materijala omotača,

$V$  -zapremina zaštitnog omotača.

Zapremina  $V$  određuje se na osnovu izraza:

$$V = S(L_k + \Delta L_k) \quad (5)$$

Sa  $S$  je u poslednjem izrazu označena površina poprečnog preseka zaštitnog omotača,  $L_k$  je dužina kabla, a  $\Delta L_k$  je povećanje dužine žica ili traka usled upređanja ili obavijanja. Otpornost omotača jednaka je:

$$R_\theta = \rho_{20} \frac{T_0 + \theta}{T_0 + 20} \cdot \frac{L_k + \Delta L_k}{S} \quad (6)$$

Zamenom jednačina (5) i (6) u jednačinu (4) i integraljenjem, dobija se:

$$\rho_{20} I_{km}^2 \int_0^{t_i} dt = cS^2 (T_0 + 20) \int_{\theta_n}^{\theta_k} \frac{1}{T_0 + \theta} d\theta. \quad (7)$$

Potreban presek zaštitnog omotača kabla je:

$$S = I_{km} 10^3 \sqrt{\frac{\rho_{20} t_i}{c(T_0 + 20) \ln \frac{T_0 + \theta_k}{T_0 + \theta_n}}} \quad [\text{mm}^2], \quad (8)$$

gde su pojedine veličine izražene u sledećim jedinicama:  $I_{km}$  [A],  $\rho$  [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ],  $c$  [ $\text{J}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm})$ ],  $T_0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t_i$  [s].

Prethodni izraz se može pojednostavljeno napisati kao:

$$S = K_1 K_2 I_{km} \sqrt{t_d} \quad [\text{mm}^2], \quad (9)$$

gde je  $K_1$  konstanta materijala, koja se dobija kao:

$$K_1 = 10^3 \sqrt{\frac{\rho_{20}}{c(T_0 + 20)}} \quad [\text{mm}^2/\text{As}^{1/2}], \quad (10)$$

a  $K_2$  je konstanta koja zavisi od porasta temperature.

$$K_2 = \ln \frac{T_0 + \theta_k}{T_0 + \theta_n}. \quad (11)$$

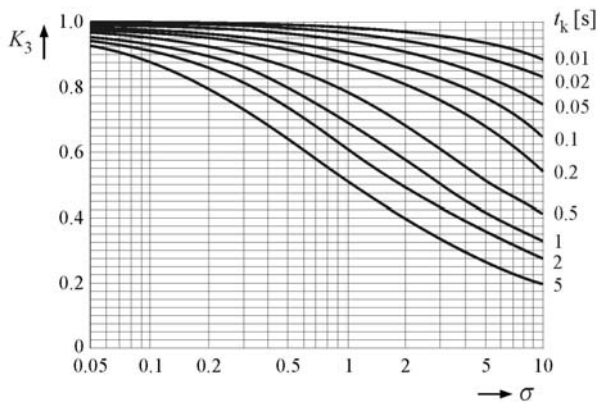
OVAKO izračunati presek ipak je veći od stvarno potrebnog. Ranije usvojena pretpostavka da razvijena toplota u zaštitnom omotaču kabla ide samo na njegovo zagrevanje i da se ne prenosi na izolaciju nije sasvim tačna. To je zbog toga što zaštitni omotač ima veliku površinu u odnosu na presek i dobar kontakt sa susednim materijalima, pa zato brzo odaje toplotu okolini.

Pored toga, na odavanje toplote utiču termička svojstva materijala zaštitnog omotača i okolne izolacije, debljina omotača, kao i vreme trajanja kratkog spoja. Zbog toga treba izvršiti korekciju preseka zaštitnog omotača dobijenog izrazom (9), uvođenjem faktora korekcije  $K_3$ :

$$S = K_1 K_2 K_3 I_{km} \sqrt{t_d} \quad [\text{mm}^2]. \quad (12)$$

Veličina korekcionog faktora  $K_3$  određuje se iz dijagrama na slici 3. Na ovom dijagramu je prikazana familija krivih promene faktora  $K_3$  u zavisnosti od odnosa koeficijenta razmene toplote zaštitnog omotača  $\sigma$  i njegove efektivne debljine, za vreme trajanja kratkog spoja  $t_k$  kao parametra.

Dijagram sa slike 3 dobijen je i potvrđen brojnim ispitivanjima, a odnos  $\sigma$  izračunava se na osnovu podataka proizvođača za konkretni tip kabla.



Slika 3. Korekcionni faktor zaštitnog omotača jednosmerne komponente

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirani su uslovi zagrevanja zaštitnog omotača rudarskih kablova srednjih napona u slučaju nastanka najčešće vrste kvara, zemljospoja. Vidi se da je potrebno izvršiti proračun preseka zaštitnog omotača kabla da bi se moglo garantovati da će zagrevanje u slučaju zemljospoja ostati u dozvoljenim granicama u svim mogućim slučajevima primene.

#### LITERATURA

[1] N. Janssens, and J. Trecat, in "Electric Power Systems", ed. Crappe, M., pp. 5–36, 1st. ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2008.

[2] N. Tleis, "Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice", Oxford, Elsevier Ltd., ISBN-13: 9780750680745, 2008.

[3] D. Nedic, G. Bathurst, and J. Heath, "A Comparison of Short Circuit Calculation Methods and Guidelines for Distribution Networks", CIRED2007 session3, paper No. 0562, 19th International Conference on Electricity Distribution, 21-24 May, Vienna, 2007.

[4] C. K. Jung, J. B. Lee, J. W. Kang, X. H. Wang, Y. H. Song, "Characteristics and Reduction of Sheath Circulating Currents in Underground Power Cable Systems", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 1, Issue 1, 2004.

[5] International Standard IEC 60909-0, Short circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents, 1st ed., 2001

[6] H. N., Triștiu, and L. Toma, in "Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability and Control", ed. Eremia, M. and Shahidehpour, M., pp. 229–290, John Wiley& Sons, 2013.

[7] Carl C. Landinger, in "Electrical power cable engineering", ed. Thue, W. A., pp. 25–42, 2nd ed, CRC Press, New York, USA, 2003.

#### ABSTRACT

Mining cables must be strongly made to withstand the rough use they receive. The most often fault in cables is earth connection. A fault-current flow through earthed cable protective and causes temperature increasing before the protective contactor trip out. This paper deals with thermal strains on the individual protective in the case of earth connection.

#### ANALYSIS OF THERMO-ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINING CABLES

Snežana Aleksandrović, Vesna Damnjanović