

# POREĐENJE PRORAČUNATIH I IZMERENIH VREDNOSTI INDUKOVANIH STRUJA U ELEKTRIČNOJ ZAŠTITI 110 kV KABLA

IVANA MITIĆ, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Elektromreža Srbije A.D., Srbija  
MIRKO BOROVIĆ, Elektromreža Srbije A.D., Srbija  
MILOŠ SPAIĆ, Elektromreža Srbije A.D., Srbija

## KRATAK SADRŽAJ

U radu je izvršen proračun indukovanih struja u električnoj zaštiti na konkretnom primeru 110 kV kablovskog voda. Vrednost ove struje može biti značajana, što za posledicu ima dodatno zagrevanje kabla i samim tim smanjenje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja. U radu je predstavljen matematički model za proračun indukovanih struja, a u proračunu su uzete u obzir i vrtložne i cirkulacione struje. Proračun je izvršen u zavisnosti od karakteristika električne zaštite, uslova polaganja i načina izvođenja i povezivanja električne zaštite na konkretnom primeru 110 kV kablovskog voda. Izmerene su indukovane struje u električnoj zaštiti na postojećem vodu za koji je urađen proračun, a zatim i poređenje izmerenih i proračunatih rezultata, čime je verifikovan predstavljeni matematički model.

**Ključne reči:** kabl, električna zaštita, indukovana struja

## SUMMARY

This paper is describing calculation of the induced currents in the metal sheath for a specific case of 110 kV cable. The value of this current can be significant. Which, as a consequence, can cause additional heating of the cable and decrease of the cable current capacity. In this paper is presented a mathematical model for the induced current calculation, and this calculation will take into consideration capacitance and eddy current. The calculation is performed depending on the characteristics of the metal sheath, the conditions of laying and the way of executing and connecting the metallic sheath on the specific case of 110 kV cable line. Induced currents in metal sheet is been measured in the existing modeled 110 kV cable and comparison of the calculated and measured results is made, which verify the presented mathematical model.

**Key words:** cable, metal sheath, induced current

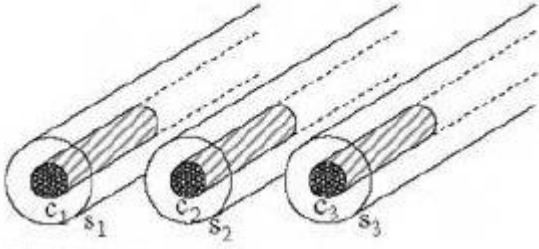
[ivana.mitic@ems.rs](mailto:ivana.mitic@ems.rs), [mirko.borovic@ems.rs](mailto:mirko.borovic@ems.rs), [milos.spaic@ems.rs](mailto:milos.spaic@ems.rs)

## 1. UVOD

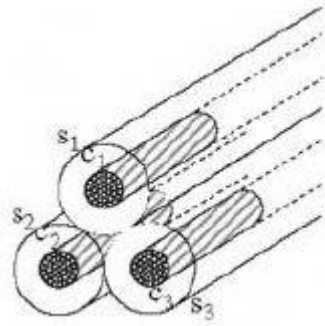
U električnoj zaštiti 110 kV kabla mogu se indukovati znatne vrednosti struja, što za posledicu ima dodatno zagrevanje kabla i samim tim smanjenje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja. Toplotni gubici u električnoj zaštiti kabla nastaju usled gubitaka koji su posledica cirkulacionih, vrtložnih i kapacitivnih struja, međutim gubici usled cirkulacionih struja su dominantni. Gubici usled cirkulacionih struja zavise od geometrije samog kabla, kao i od rasporeda kablova, materijala električne zaštite i načina uzemljavanja električne zaštite. Na smanjenje ovih vrednosti značajan uticaj ima primena cross-bonding sistema.

## 2. MODELOVANJE KABLA I PRORAČUN PARAMETARA KABLA

Trofazni kablovski vod sačinjen je od tri jednožilna kabla pa se može predstaviti kao sistem od 6 provodnika (3 provodnika i 3 električne zaštite). Na slici 1 prikazana su tri jednožilna kabla u horizontalnoj ravni, a na slici 2 u snopu. Fazni provodnici su označeni sa  $c_1$ ,  $c_2$  i  $c_3$ , a električne zaštite pojednih faza redom sa  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$ .



Slika 1: Tri jednožilna kabla u ravnoj formaciji



Slika 2: Tri jednožilna kabla u trouganoj formaciji

Matrica međusobnih i sopstvenih impedansi provodnika i električne zaštite može se grupisati u 4 submatrice (impedansi provodnika -  $Z_C$ , impedansi električnih zaštita -  $Z_S$  i dve submatrice međusobnih impedansi provodnika i električnih zaštita -  $Z_{CS}$  i  $Z_{SC}$ ) [1]:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{C1C1} & Z_{C1C2} & Z_{C1C3} & | & Z_{C1S1} & Z_{C1S2} & Z_{C1S3} \\ Z_{C2C1} & Z_{C2C2} & Z_{C2C3} & | & Z_{C2S1} & Z_{C2S2} & Z_{C2S3} \\ Z_{C3C1} & Z_{C3C2} & Z_{C3C3} & | & Z_{C3S1} & Z_{C3S2} & Z_{C3S3} \\ \hline Z_{S1C1} & Z_{S1C2} & Z_{S1C3} & | & Z_{S1S1} & Z_{S1S2} & Z_{S1S3} \\ Z_{S2C1} & Z_{S2C2} & Z_{S2C3} & | & Z_{S2S1} & Z_{S2S2} & Z_{S2S3} \\ Z_{S3C1} & Z_{S3C2} & Z_{S3C3} & | & Z_{S3S1} & Z_{S3S2} & Z_{S3S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_C & Z_{CS} \\ Z_{SC} & Z_S \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Sopstvene impedanse provodnika računaju se na osnovu formule 2.2:

$$Z_{C1C1} = Z_{C2C2} = Z_{C3C3} = R_{AC} + \pi^2 10^{-4} f + j4\pi f 10^{-4} \ln \left( \frac{D_{ekv}}{0,779 r_s} \right), \quad (2.2)$$

gde je  $R_{AC}$  otpornost provodnika,  $f$  frekvencija,  $r_s$  spoljašnji poluprečnik provodnika, a  $D_{ekv}$  dubina povratnog provodnik koja se određuje na osnovu izraza:

$$D_{ekv} = 660 \sqrt{\frac{\rho t l a}{f}}. \quad (2.3)$$

Otpornost provodnika kablovskog voda za naizmjeničnu struju može se odrediti na osnovu otpornosti provodnika za jednosmernu struju  $R_{DC}$  za odgovarajuću radnu temperaturu:

$$R_{AC} = R_{DC} (1 + y(k_s + k_p)), \quad (2.4)$$

gde  $y$  ima vrednost 1 za jednožilne, dvožilne i trožilne kablove, a vrednost 1.5 za cevaste kablove, koeficijenti  $k_s$  i  $k_p$  su koeficijenti koji uvažavaju površinski efekat i efekat blizine, respektivno.

Koeficijent koji uvažava površinski efekat računa se na osnovu formule 2.5:

$$k_s = \begin{cases} \frac{z^4}{0,8z^4 - 192} & 0 < z \leq 2,8 \\ 0,0563z^2 - 0,0177z - 0,136 & 2,8 < z \leq 3,8 \\ 0,354z - 0,773 & z > 3,8 \end{cases} \quad (2.5)$$

gde je

$$z = \sqrt{\frac{8\pi f a_z}{10^4 R_{DC}}} \quad (2.6)$$

Za standarnde bakarne okrugle i sektorske provodnike koeficijent  $a_z$  ima vrednost 1, dok za segmentne ili Miliken provodnike ima vrednost 0,43. U slučaju cilindričnog provodnika isti se računa na osnovu formule:

$$a_z = \frac{r_s - r_u}{r_s + r_u} \left( \frac{r_s + 2r_u}{r_s + r_u} \right)^2, \quad (2.7)$$

gde su  $r_s$  i  $r_u$  spoljašnji i unutrašnji poluprečnik provodnika.

Koeficijent koji uvažava efekat blizine računa se:

$$k_p = \begin{cases} 2,9 F(p) & \text{za jednožilne i dvožilne kablove} \\ F(p) \left( \frac{2r_s}{a} \right)^2 (0,312 \left( \frac{2r_s}{a} \right)^2 + \frac{1,18}{F(p)+0,27}) & \text{za trožilne i tri jednožilna kabla} \end{cases} \quad (2.8)$$

gde je  $a$  je aksijalni razmak između provodnika, a  $F(p)$  se računa na osnovu formule 2.9, a  $p$  pomoću 2.10:

$$F(p) = \frac{p^4}{0,8p^4 + 192}, \quad (2.9)$$

$$p = \sqrt{\frac{8\pi f a_p}{10^4 R_{DC}}} \quad (2.10)$$

Nezavisno od materijala provodnika (i za bakar i za aluminijum)  $a_p$  ima istu vrednost, za okrugle, sektorske i cilindrične provodnike ima vrednost 0,8, dok za okrugle segmentne provodnike ima vrednost 0,37.

Međusobna impedansa provodnika kod tri jednožilna kabla postavljena u trouglastom snopu se računa kao:

$$Z_{C1C2} = Z_{C2C1} = Z_{C1C3} = Z_{C3C1} = Z_{C2C3} = Z_{C3C2} = \pi^2 10^{-4} f + j4\pi f 10^{-4} \ln \left( \frac{D_{ekv}}{a} \right), \quad (2.11)$$

gde je  $a$  raspojanje između osa kablova.

Za kablove položene u ravnom snopu na međusobnoj udaljenosti  $a$ ,  $Z_{C1C2} = Z_{C2C1} = Z_{C2C3} = Z_{C3C2}$  računa se na osnovu formule 2.11, a impedanse  $Z_{C1C3} = Z_{C3C1}$  računaju se na osnovu formule 2.12.

$$Z_{C1C3} = Z_{C3C1} = \pi^2 10^{-4} f + j4\pi f 10^{-4} \ln \left( \frac{D_{ekv}}{2a} \right). \quad (2.12)$$

Sopstvene impedanse električne zaštite se računaju na osnovu formule 2.13:

$$Z_{S1S1} = Z_{S2S2} = Z_{S3S3} = R_{SAC} + \frac{(R_{TS-A} + R_{TS-B})}{l} + \pi^2 10^{-4} f + j4\pi f 10^{-4} \ln \left( \frac{D_{ekv}}{\frac{r_{SS} + r_{US}}{2}} \right), \quad (2.13)$$

gde su  $R_{SAC}$  otpornost električne zaštite kabla,  $R_{TS-A}$  i  $R_{TS-B}$ , otpornosti uzemljenja transformatorskih stanica koje povezuje kablovski vod,  $l$  dužina kablovskog voda,  $r_{SS}$  spoljašnji poluprečnik električne zaštite i  $r_{US}$  unutrašnji poluprečnik električne zaštite.

Međusobne impedanse električnih zaštita se računaju na osnovu formule 2.14:

$$Z_{S_i S_j} = Z_{S_j S_i} = \pi^2 10^{-4} f + j4\pi f 10^{-4} \ln\left(\frac{D_{ekv}}{S_{ij}}\right), \quad (2.14)$$

gde je  $S_{ij}$  srednje geometrijsko rastojanje između električnih zaštita  $i$  i  $j$  ( $1 \leq i, j \leq 3, i \neq j$ ).

Za praktične primere međusobna impedansa provodnika i električne zaštite može se odrediti kao:

$$Z_{C_i S_i} = Z_{C_i S_i} = \pi^2 10^{-4} f + j4\pi f 10^{-4} \ln\left(\frac{D_{ekv}}{(r_{ss} + r_{us})/2}\right), \quad (2.15)$$

$$Z_{C_i S_j} = Z_{C_j S_i} = Z_{S_i C_j} = Z_{S_j C_i} = \pi^2 10^{-4} f + j4\pi f 10^{-4} \ln\left(\frac{D_{ekv}}{S_{ij}}\right), \quad (2.16)$$

gde su  $r_{ss}$  spoljašnji poluprečnik električne zaštite,  $r_{us}$  unutrašnji poluprečnik električne zaštite i  $S_{ij}$  srednje geometrijsko rastojanje između provodnika i električne zaštite.

### 3. MODEL ZA PRORAČUN STRUJE ELEKTRIČNE ZAŠTITE

Pad napona po jedinici dužine provodnika i električne zaštite kabla računa se na osnovu matrice međusobnih i sopstvenih impedansi provodnika i električne zaštite [1]:

$$\begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ \hline U_{S1} \\ U_{S2} \\ U_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_C \\ U_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{C1C1}Z_{C1C2}Z_{C1C3} & | & Z_{C1S1}Z_{C1S2}Z_{C1S3} \\ Z_{C2C1}Z_{C2C2}Z_{C2C3} & | & Z_{C2S1}Z_{C2S2}Z_{C2S3} \\ Z_{C3C1}Z_{C3C2}Z_{C3C3} & | & Z_{C3S1}Z_{C3S2}Z_{C3S3} \\ \hline Z_{S1C1}Z_{S1C2}Z_{S1C3} & | & Z_{S1S1}Z_{S1S2}Z_{S1S3} \\ Z_{S2C1}Z_{S2C2}Z_{S2C3} & | & Z_{S2S1}Z_{S2S2}Z_{S2S3} \\ Z_{S3C1}Z_{S3C2}Z_{S3C3} & | & Z_{S3S1}Z_{S3S2}Z_{S3S3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{C1} \\ I_{C2} \\ I_{C3} \\ \hline I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_C & Z_{CS} \\ Z_{SC} & Z_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_C \\ I_S \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

gde su  $I_C = [I_C a^2 I_C a I_C]^T$  struje koje teku kroz provodnik u normalnom režimu, gde je  $a = -\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}$ , a  $I_S$  struje koje teku kroz električnu zaštitu.

Struje u električnoj zaštiti kabla se računaju kao:

$$I_S = Z_S^{-1}(U_S - Z_{SC}I_C), \quad (3.2)$$

Za slučaj da su električne zaštite sva tri kablauzemljene na oba kraja, pad napona na krajevima električne zaštite je nula  $U_S = [0 \ 0 \ 0]^T$ , pa je struje u električnoj zaštiti moguće izračunati na osnovu formule 3.4:

$$I_S = -Z_S^{-1}Z_{SC}I_C. \quad (3.3)$$

U idealnom slučaju ukoliko su deonice kablovskog voda na kojima je izvršeno preplitanje električnih zaštita jednake, za slučaj tri jednožilna kabla postavljena u trougaonu formaciju i koji se međusobno dodiruju, struje u metalnim električnim zaštitama su jednake nuli, a za tri jednožilna kabla postavljena u ravnu formaciju na jednakom međusobnom rastojanju struje u električnim zaštitama su jednake i iznose:

$$I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = \frac{Z_{C1C2} - Z_{C1C3}}{3Z_{S1S1} + 4Z_{C1C2} + 2Z_{C1C3}} a^2 I_C. \quad (3.4)$$

gde se  $Z_{C1C2}$  računa na osnovu formule 2.11,  $Z_{C1C3}$  na osnovu formule 2.12 i  $Z_{S1S1}$  na osnovu 2.13.

Formula 3.4 važi na slučajevima kada su deonice na kojima se vrši transpozicija električnih zaštita jednake, što je u praksi teško postići. Za slučaj tri deonice na kojima je primenjeno preplitanje električnih zaštita na deonicama različitih dužina submatrice  $Z_S$  i  $Z_{SC}$  se razlikuju duž sekcija:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_S^{1 \text{ sekcija}} &= \begin{bmatrix} Z_{S1S1} & Z_{S1S2} & Z_{S1S3} \\ Z_{S2S1} & Z_{S2S2} & Z_{S2S3} \\ Z_{S3S1} & Z_{S3S2} & Z_{S3S3} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_S^{2 \text{ sekcija}} = \begin{bmatrix} Z_{S2S2} & Z_{S2S3} & Z_{S2S1} \\ Z_{S3S2} & Z_{S3S3} & Z_{S3S1} \\ Z_{S1S2} & Z_{S1S3} & Z_{S1S1} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_S^{3 \text{ sekcija}} = \begin{bmatrix} Z_{S3S3} & Z_{S3S1} & Z_{S3S2} \\ Z_{S1S3} & Z_{S1S1} & Z_{S1S2} \\ Z_{S2S2} & Z_{S2S1} & Z_{S2S2} \end{bmatrix}, \\
\mathbf{Z}_{SC}^{1 \text{ sekcija}} &= \begin{bmatrix} Z_{S1C1} & Z_{S1C2} & Z_{S1C3} \\ Z_{S2C1} & Z_{S2C2} & Z_{S2C3} \\ Z_{S3C1} & Z_{S3C2} & Z_{S3C3} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{SC}^{2 \text{ sekcija}} = \begin{bmatrix} Z_{S2C1} & Z_{S2C2} & Z_{S2C3} \\ Z_{S3C1} & Z_{S3C2} & Z_{S3C3} \\ Z_{S1C1} & Z_{S1C2} & Z_{S1C3} \end{bmatrix}, \\
\mathbf{Z}_{SC}^{3 \text{ sekcija}} &= \begin{bmatrix} Z_{S3C1} & Z_{S3C2} & Z_{S3C3} \\ Z_{S1C1} & Z_{S1C2} & Z_{S1C3} \\ Z_{S2C1} & Z_{S2C2} & Z_{S2C3} \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Zbog obima rada formulom 3.6 prikazana je jednačina na osnovu koje se računaju struje u električnoj zaštiti na kojoj je izvršena transpozicijaza prvi kabl. Za napon između krajeva metalnog električne zaštite prvog kabla može se napisati sledeća formula:

$$L_1(Z_{S1C1}I_{C1} + Z_{S1C2}I_{C2} + Z_{S1C3}I_{C3} + Z_{S1S1}I_{S1} + Z_{S1S2}I_{S2} + Z_{S1S3}I_{S3}) + L_2(Z_{S2C1}I_{C1} + Z_{S2C2}I_{C2} + Z_{S2C3}I_{C3} + Z_{S2C3}I_{C3} + Z_{S2S2}I_{S1} + Z_{S2S3}I_{S2}) + L_3(Z_{S2S1}I_{S3} + Z_{S3C1}I_{C1} + Z_{S3C2}I_{C2} + Z_{S3C3}I_{S1} + Z_{S3S1}I_{S2} + Z_{S3S2}I_{S3}) = 0 \tag{3.6}$$

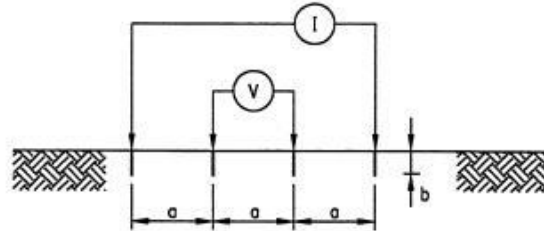
Na identičan način se mogu izvesti i formule za preostala dva kabla, čime se dobija sistem jednačina, koji kao rešenje daje struje u električnoj zaštiti kabla.

Prema [3] za kablove sa metalnim ekranom sastavljenim od žica sa izjednačavajućom trakom ili ekranizujućom folijom oko žica gubici usled vrtložnih struja se mogu zanemariti. Metalni električna zaštita kabla je napravljen od nemagnetnih materijala zato su gubici usled vrtložnih struja mali.

Kapacitivna struja u električnoj zaštiti kabla naponskog nivoa 110 kV je takođe mala u poređenju sa cirkulaciom komponentom struje u električnoj zaštiti, a za slučaj da su kabloviuzemljeni na oba kraja eliminiše se ova komponenta.

#### 4. MERENJE OTPORNOSTI TLA

Za merenje otpornosti tla može se koristiti Wenner-ove i Schlumberger-ove metoda. Na slici 4 je prikazana Wenner-ova metoda, koja je korišćena prilikom merenja specifične otpornosti tla za potrebe ovog rada.



Slika 4: Wenner-ova metoda

Specifična otpornost zemljišta dobija se na osnovu sledeće formule:

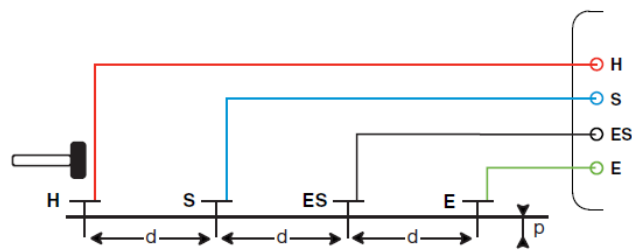
$$\rho_E = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R_W}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}, \tag{4.1}$$

gde su  $\rho_E$  izmerena specifična otpornost zemljišta [ $\Omega m$ ],  $a$  razmak između elektroda [ $m$ ],  $b$  dubina elektroda [ $m$ ],  $R_W$  Wenner-ova otpornost.

Ako je  $b$  malo u pređenju sa  $a$ , kao što je u slučaju sonde koje prodiru u teren, prethodna jednačina može su uprostiti:

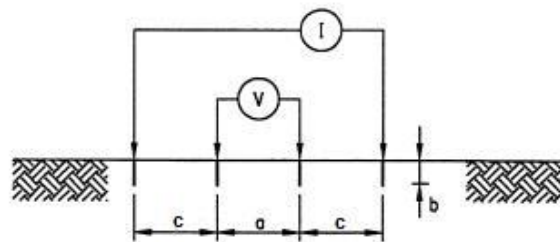
$$\rho_E = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_W. \tag{4.2}$$

Na slici 5 prikazano je povezivanje uređaja za merenje specifične otpornosti tla Wenner-ovom metodom. Postavljaju se 4 elektrode u pravoj liniji, na udaljenosti  $d$  jedna od druge, a na dubini  $r < 1/3d$ . Rastojanje  $d$  mora biti između 2 i 30m. Važno je napomenuti da se za rastojanje  $d$  dobija vrednost specifične otpornosti tla na dubini koja iznosi  $3d/4$ .



Slika 5: Merenje specifične otpornosti tla Wenner-ovom metodom

Na slici 6 prikazan je Schlumberger-ov metod:



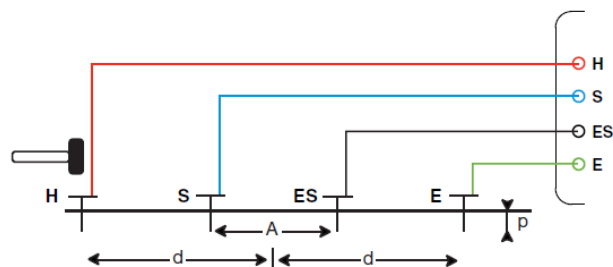
Slika 6: Schlumberger-ov metod

Prilikom merenja otpornosti tla Schlumberger-ovm metod ukoliko je dubina  $b$  mnogo manja u poređenju sa  $a$  i  $s$ , i ako je  $s > 20a$  otpornost rasprostiranja tla može se računati na osnovu formule 4.3:

$$\rho_E = \pi \frac{c(c+a)}{a} R_s, \quad (4.3)$$

gde su  $\rho_E$  izmerena specifična otpornost zemljišta [ $\Omega m$ ],  $a$  razmak između elektroda [ $m$ ],  $b$  dubina elektroda [ $m$ ],  $s$  – razmak između elektroda [ $m$ ],  $R_s$  Schlumberger-ova otpornost.

Na slici 7 prikazano je povezivanje uređaja za merenje specifične otpornosti tla Schlumberge-ovom metodom. Postavljaju se elektrode S i ES na udaljenosti  $A$ , zatim se postavljaju elektrode N i E u istoj liniji sa drugim elektrodama, na rastojanju  $d$  merene na sredini rastojanja  $A$ . Elektrode se postavljaju na dubini  $r < 1/3 d$ . Rastojanje  $d$  mora biti između 2 i 30m.



Slika 7: Merenje specifične otpornosti tla Schlumberger-ov metodom

Razlika između ove dve metode je u pozicioniranju elektroda. Češće se koristi Wenner-ova metoda, koja omogućava da se pri merenju premeštaju samo 2 elektrode, a ne 3, što je čini jednostavnijom za merenje.

## 5. MERENJE SPECIFIČNE OTPORNOSTI TLA I INDUKOVANIH STRUJA

Merenje indukovanih struja u električnoj zaštiti obavljeno je u TS Beograd 17 u 110 kV polju kablovskog voda broj 1203/3 koji povezuje TS Beograd 17 i TS Beograd 36 (radni naziv Obilić). Duž trase ovog kablovskog voda merena je i specifična otpornosti tla.

Prilikom merenja vreme je bilo sunčano, a posledenje padavine nisu zabeležene u prethodne tri nedelje. Izvršena su po dva merenja specifične otpornosti tla na dve lokacije. Prvo merenje je izvršeno Wenner-ovom metodom i ova vrednost je korišćena u daljem proračunu, dok je drugo merenje izvršeno Schlumberger-ov metodom i ono predstavlja kontrolno merenje. Važno je napomenuti da prilikom merenja sa obe metodenisu izmeštane elektrode, i da su iste bile na udaljenosti od 2 m, pa dobijene vrednosti specifične otpornosti tla odgovaraju dubini od 1,5 m. Izmerene vrednosti i Wenner-ovom i Schlumberger-ov metodom su identične. Prva lokacija na kojoj je izvršeno merenje se nalazi u samoj TS Beograd 17 i tom prilikom je zabeležena vrednost od 49,9  $\Omega m$ . Druga lokacija na kojoj je izvršeno merenje se nalazi u ulici Vojislava Ilića i tom prilikom je zabeležena vrednost od 86,2  $\Omega m$ . Na osnovu merenja na dve lokacije prosečna vrednost specifične otpornosti tla iznosi 68,1  $\Omega m$ , pa se za potrebe proračuna može usvojiti vrednost od 70  $\Omega m$ .

Prilikom merenja indukovanih struja u električnoj zaštiti kablovskog voda ambijentalna temperatura je iznosila 20 °C i nije se menjala. U periodu merenja strujno opterećenje u fazi 4 kablovskog voda se nije menjalo i iznosilo je 105 A. Merenja strujnog opterećenja u fazama 0 i 8 kablovskog voda nisu poznata, jer se na lokalnom SCADA sistemu ne vrši akvizicija istih. Pretpostavka je da ne postoje amplitudskakao ni ugaona nesimetrija. Amper kleštima, čija se preciznost merenja za podešeni opseg do 200 A prema podacima proizvođača kreće u opsegu +/- 1,5%, pojedinačno su merene struje u električnim zaštitama kablova. Efektivne vrednosti struja koje su izmerene su prikazane u tabeli 1 i na osnovu kojih se može zaključiti da postoji razlika ovih struja po fazama, koja iznosi 5%, što je posledica amplitudske i ugaone nesimetrije, kao i različitih uslova polaganja.

TABELA 1 - Izmerene efektivne vrednosti struja u električnim zaštitama po fazama

$I_{\text{ef1}} = I_{\text{ef0}}$	30,5 A
$I_{\text{ef2}} = I_{\text{ef4}}$	29,5 A
$I_{\text{ef3}} = I_{\text{ef8}}$	30,9 A

## 6. PRORAČUN INDUKOVANIH STRUJA U ELEKTRIČNOJ ZAŠTITI

Prema raspoloživoj tehničkoj dokumentaciji dužina trase kablovskog voda 110 kV broj 1203/3 iznosi 2,19 km i nije primenjena transpozicija provodnika kao ni električnih zaštita. Primenja su dva tipa jednožilnih kablova za naponski nivo 110 kV. Osnovna deonica datira iz 1989. godine i prilikom gradnje voda polagani su jednožilni kablovi tipa XHE 48-A. Uvođenje u TS Beograd 36 (radni naziv Obilić) izvedeno je 2005. godine i tom prilikom polagani su jednožilni kablovi tipa XHE 49-A. Karakteristike kablova XHE 48-A i XHE 49-A, preuzete iz postojeće tehničke dokumentacije, potrebne za proračun, su date u tabeli 2. Kako je kabl tipa XHE 48-A ugrađen na čak 72,2 % deonice čitavog kablovskog voda broj 1203/3, radi jednostavnosti proračuna izvršena je pretpostavka da je isti ugrađen čitavom dužinom. Tehničkom dokumentacijom predviđeno je polaganje kablova u formaciju trougao. Procenjeno je da na 8% deonice ne postoje uslovi za polaganje kablova na ovaj način i da se na mestima izrade spojnice (4 duž trase), mestima uvođenja u TS kao i na mestima ukrštanja kabla sa saobraćajnicama, isti polažu u horizontalnu ravan. Važno je napomenuti da je na deonici uvođenja u TS Beograd 36 na više mesta predviđen toplotni monitoring, merni moduli se napajaju pomoću strujnih obuhvatnih transformatora zbog čega je narušena geometrija pa su rastojanja između faza veća što u određenoj meri utiče na vrednosti indukovanih struja.

TABELA 2 - Karakteristike kablova XHE 48-A i XHE 49-A

Karakteristične veličine	XHE 48-A	XHE 49-A
Poprečni presek provodnika [mm <sup>2</sup> ] i materijal	1000 (Al)	1000 (Al)
Presek provodnika [mm]	39	38,3
Debljina izolacije [mm]	16	18

Prečnik preko izolacije [mm]	72,2	77,3
Prečnik preko električne zaštite[mm]	79,1	82,6
Poprečni presek električne zaštite[mm <sup>2</sup> ] i materijal	95 (Cu)	95 (Cu)
Debljina spoljnog plašta[mm]	3,9	4
Spoljni prečnik kabla [mm]	87,4	93

Za otpornosti krajnjih transformatorskih stanica usvojene je vrednost od 0,01  $\Omega$ . Pretpostavljeno je da je prosečna dubina polaganja kablovskog voda na čitavoj trasi 1,5 m, kao i da je toplotna otpornost tla po vrednosti 1 Km/W.

U [3] su date formule na osnovu kojih se za geometriju kabla i poznate ambijentalne uslove polaganja može odrediti trajno dozvoljeno strujno opterećenje, koje se mogu koristiti kako bi se odredile vrednosti za temperaturu provodnika i električne zaštite kada je poznato strujno opterećenje. Za potrebe proračuna usvaja se da temperatura na dubini od 1,5 m duž čitave trase iznosi 20°C. Nominalno strujno opterećenje primenjenih kablova za date uslove polaganja iznosi približno 800 A. Opterećenje koje je zabeleženo prilikom merenja je skoro 8 puta manje.

Za usvojene ulazne podatke toplotna otpornost izolacije  $\rho_{iz}$  iznosi 0,344 Km/W, toplotna otpornost spoljašnjeg plašta  $\rho_{sp}$  iznosi 0,052 Km/W, a toplotna otpornost okolnog tla  $\rho_{t}$  1,799 Km/W. Faktor gubitaka  $\gamma$  dobijen prema poznatoj analitičkoj formuli, datoj u [3], iznosi 0,3. Dozvoljenom strujnom opterećenju od 105 A odgovara temperatura provodnika od 22 °C, i temperatura električne zaštite od 21 °C.

Za gorenavedene podatke, proračunate vrednosti indukovanih struja u električnoj zaštiti, u slučaju polaganja kablova u snop prikazane su u tabeli 4, dok su vrednosti u slučaju polaganja kablova u horizontalnoj ravni date u tabeli 5.

TABELA 4 - Vrednosti indukovanih struja za slučaj polaganja u snopu

Struja	Kompleksna vrednost	Apsolutna vrednost i ugao
$I_{1} = I_{10}$	$-6,96 - 26,12i$	$27,03^{-104,92}$
$I_{2} = I_{4}$	$-19,14 + 19,09i$	$27,03^{+135,07}$
$I_{3} = I_{8}$	$26,10 + 7,03i$	$27,03^{+15,07}$

TABELA 5 - Vrednosti indukovanih struja za slučaj polaganja u horizontalnoj ravni

Struja	Kompleksna vrednost	Apsolutna vrednost i ugao
$I_{1} = I_{10}$	$-48,44 - 43,18i$	$64,89^{-138,28}$
$I_{2} = I_{4}$	$-24,94 + 54,26i$	$59,71^{+114,68}$
$I_{3} = I_{8}$	$75,26 - 9,61i$	$75,87^{-7,27}$

U skladu sa dužinama deonice kablovskog voda postavljenim u trougaonom snopu i ravnoj formaciji u tabeli 6 date su vrednosti indukovanih struja u električnim zaštitama i razlika između izračunatih i izmerenih efektivnih vrednosti indukovanih struja u električnoj zaštiti.

TABELA 6 - Vrednosti indukovanih struja i razlika u izmerenim i proračunatim vrednostima

Struja	Kompleksna vrednost	Apsolutna vrednost i ugao	Razlika [%]
$I_{1} = I_{10}$	$-22,51 - 60,19i$	$29,34^{-110,50}$	-4,0 %
$I_{2} = I_{4}$	$-42,93 + 47,97i$	$29,40^{-131,83}$	-0.35 %
$I_{3} = I_{8}$	$65,77 + 12,48i$	$30,57^{10,74}$	-1.08 %



## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata iz tabele 6 može se zaključiti da je razlika između proračunatih i izmerenih vrednosti neznatna, što potvrđuje ispravnost matematičkog modela. Međutim treba imati u vidu da su napravljene i pretpostavke prilikom proračuna, a da je za sam proračun i verifikaciju modela potrebno nakon samog polaganja znati sledeće podatke:

1. Tačnu geometriju kabla.
2. Tačnu dužinu kablovskog voda.
3. Tačne dužine, a samim tim i odnos deonica na kojima su kablovi polegnuti u snopu odnosno u horizontalnoj ravni.
4. Tačne podatke o rasporedu faza duž trase kablovskog voda.
5. Tačne podatke o načinu uzemljavanja električnih zaštita kabla i u slučaju transpozicije električne zaštite dužine deonica između transpozicionih spojnica.
6. Tačne podatke o specifičnoj otpornosti tla, strujnim opterećenjima sve tri faze kao i podatke o ambijentalnim uslovima polaganja.

Kada su u pitanju podaci koji su navedeni u stavkama od 1-5 iste je potrebno precizno definisati u Projektu izvedenog objekta, za nove kablovske vodove, kako bi se u budućnosti imali adekvatni podaci za proračun.

Može se zaključiti da su indukovane struje u električnoj zaštiti kablovskog voda znatne. Takođe po samom polaganju novih, a zatim u eksploataciji kako novih tako i postojećih kablova, u određenim vremenskim periodima potrebno je proveravati vrednosti indukovanih struja u električnoj zaštiti i porediti ih sa proračunatim vrednostima. Nominalna strujna opterećenja postojećih kablova određena su na osnovu projektne dokumentacije u kojoj su dati faktori gubitaka za projektovano stanje, koje nije uvek u skladu sa izvedenim stanjem. Na osnovu tih podataka moguće je odrediti vrednosti indukovanih struja i merenjem potvrditi ista. Za slučaj da su indukovane struje veće, što se može desiti ukoliko se odstupilo od projektovanog stanja u pogledu redosleda faza duž trase kablovskog voda i načina uzemljavanja zaštita ili preplitanja, potrebno je izvršiti proveru i odrediti nove vrednosti dozvoljenog strujnog opterećenja.

## LITERATURA

1. Tleis N., 2008, Power Systems Modelling and Fault Analysis Theory and Practice, Newnes
2. Stojanović M., Tasić D., Cvetković N., Vučković D., 2016, An approach to calculation of circulation current of single-core cables, MedPower
3. IEC 60287-1-1 Electric cables – Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –General
4. Đurić M., 2009, Elementi EES-a, Beopres
5. Upustvo proizvođača za upotrebu uređaja za merenje specifične otpornosti tla