

## SEMINARSKI RAD IZ PREDMETA ELEKTROMAGNETNA KOMPATIBILNOST

U rešenju zadatka treba analizirati pojave opasnih napona dodira i koraka u slučaju jednofaznog kratkog spoja na vodu na stubu broj  $N_s$ . U tu svrhu je neophodno proračunati raspodelu struje kvara u sistemu uzemljenja, potencijal uzemljivača, kao i napone dodira i koraka u blizini uzemljivača.

### *Proračun struje kvara*

Razmatra se jednofazni kratak spoj na nadzemnom vodu koji povezuje dva postrojenja. Prvi korak u proračunu jeste određivanje struje kvara koja se odvodi sa uzemljivača stuba br.  $N_k$  na kome se dogodio kvar. Vrednost te struje određuje se na osnovu grafika i tabele datih u Prilogu 1.

Prosečan raspon između stubova određuje se na osnovu ukupne dužine voda  $L$  i ukupnog broja stubova  $N_s$  :

$$L_s = \frac{L}{N_s - 1}$$

Rastojanje od postrojenja I (na početku voda) do stuba br.  $N_k$  na kome se dogodio kvar je:

$$X_k = (N_k - 1) \cdot L_s$$

Procentualno rastojanje od postrojenja I do stuba br.  $N_k$  na kome se dogodio kvar je:

$$x_k(\%) = \frac{X_k}{L} 100\%$$

Na osnovu dobijene vrednosti  $x_k$  i tabele koja je data u Prilogu 1 treba odrediti opseg procentualnih vrednosti  $x_1$  i  $x_2$  iz tabele u kome treba izvršiti interpolaciju sa ciljem da se za izračunato procentualno rastojanje  $x_k$  odrede struje kojima postrojenja I (na početku voda) i II (na kraju voda) napajaju kvar na stubu br.  $N_k$ .

Struja kojom postrojenje I napaja kvar na stubu br.  $N_k$  je:

$$I_{k1} = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

gde su  $y_1$  i  $y_2$  struje kvara iz postrojenja I koje odgovaraju procentualnim rastojanjima  $x_1$  i  $x_2$  od početka voda.

Struja kojom postrojenje II napaja kvar na stubu br.  $N_k$  je:

$$I_{k2} = y'_1 + \frac{y'_2 - y'_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

gde su  $y'_1$  i  $y'_2$  struje kvara iz postrojenja II koje odgovaraju procentualnim rastojanjima  $x_1$  i  $x_2$  od početka voda.

Ukupna subtranzijentna vrednost struje kvara pri zemljospoju na stubu br.  $N_k$  je:

$$I_k = I_{k1} + I_{k2}$$

U cilju određivanja struje koja se odvodi sa uzemljivača potrebno je odrediti uticaj zaštitnog užeta koje učestvuje u raspodeli struje prilikom jednofaznog kvara. Magnetski redukcionni faktora zaštitnog užeta koji pokazuje smanjenje struje koja se odvodi u zemlju sa uzemljivača je:

$$r_m = 1 - \frac{Z_m}{Z_e}$$

gde  $Z_m$  predstavlja međusobnu impedansu faznog i zaštitnog provodnika, a  $Z_e$  predstavlja sopstvenu impedansu zaštitnog provodnika.

Sopstvena impedansa zaštitnog provodnika se izračunava prema izrazu:

$$Z_e = 0.05 + R_1 + j \left( 0.0628 \cdot \ln \frac{D_e}{r_e} + 0.016 \mu_r \right) \quad [\Omega/\text{km}]$$

gde su:

$R_1$  – aktivna otpornost užeta na 1 km dužine

$r_e$  – poluprečnik užeta

$\mu_r$  – relativna magnetna permeabilnost užeta

$D_e$  – prividna dubina povratnog puta struje kroz zemlju,  $D_e = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}$

Međusobna impedansa faznog i zaštitnog provodnika se izračunava prema izrazu:

$$Z_m = 0.05 + j 0.0628 \cdot \ln \frac{D_e}{d_m} \quad [\Omega/\text{km}]$$

gde je sa  $d_m$  označeno srednje geometrijsko rastojanje faza od zaštitnih provodnika.

Za slučaj jednog zaštitnog provodnika srednje geometrijsko rastojanje faza od zaštitnih provodnika je:

$$d_m = (d_{az} \cdot d_{bz} \cdot d_{cz})^{\frac{1}{3}}$$

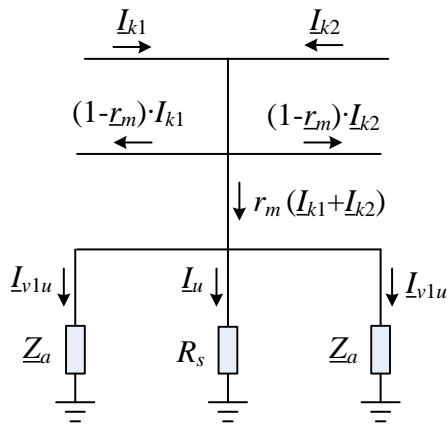
gde su sa  $d_{az}$ ,  $d_{bz}$  i  $d_{cz}$  označena rastojanja faznih provodnika  $a$ ,  $b$  i  $c$  od zaštitnog provodnika:

Za slučaj dva zaštitna provodnika  $z_1$  i  $z_2$  srednje geometrijsko rastojanje faza od zaštitnih provodnika je:

$$d_m = (d_{az_1} \cdot d_{bz_1} \cdot d_{cz_1} \cdot d_{az_2} \cdot d_{bz_2} \cdot d_{cz_2})^{\frac{1}{6}}$$

### **Raspodela struje kvara i određivanje struje uzemljivača**

Raspodela struja pri zemljospoju na stubu je prikazana na slici 1:



Slika 1: Raspodela struja pri zemljospoju na stubu

Na slici 1 sa  $Z_a$  je označena impedansa uzemljenja dugačkog voda koja uključuje impedanse zaštitnih provodnika  $Z_e$  i otpore uzemljenja stubova  $R_s$ . Impedansa  $Z_a$  se vidi levo i desno od stuba na kome se dogodio zemljospoj.

Impedansa uzemljenja  $Z_a$  dugačkog voda se izračunava na osnovu:

$$Z_a = \frac{Z_e}{2} + (Z_e R)^{\frac{1}{2}}$$

Prema zamenskoj šemi, izraz za struju uzemljivača je:

$$I_u = r_m (I_{k1} + I_{k2}) \cdot \frac{Z_a}{Z_a + 2R_s}$$

### **Određivanje otpora rasprostiranja uzemljivača**

Za uzemljivač koji je prikazan u Prilogu 2 potrebno je izračunati otpor rasprostiranja. Najpre je potrebno odrediti raspodelu struje u pojedinim elementima uzemljivača. Pravolinijski provodnik uzemljivača predstavlja jedan element uzemljivača. Jednačine koje povezuju potencijale elemenata uzemljivača i struje koje se odvođe sa njih su oblika:

$$[r] \cdot [I] = [1] \cdot U_u$$

gde su:

$U_u$  – napon uzemljivača prema referentnoj zemlji

$I$  –  $n \times 1$  vektor struja koje se odvođe sa elemenata uzemljivača

$[1]$  –  $n \times 1$  vektor jedinica

$[r]$  –  $n \times n$  matrica sopstvenih otpornosti  $r_{ii}$  i međusobnih otpornosti  $r_{ik}$  elemenata uzemljivača

Matrica  $[r]$  je simetrična jer je  $r_{ik} = r_{ki}$

Međusobna otpornost  $r_{ik}$  se definiše kao odnos potencijala na koji dolazi element  $k$  usled odvođenja struje sa elementa  $i$  i ove struje.

Sopstvena otpornost  $r_{ii}$  se definiše kao odnos potencijala na koji dolazi element  $i$  usled odvođenja struje sa elementa  $i$  i ove struje.

Zbir struja koje se odvede sa elemenata jednak je ukupnoj struji koja se odvodi u tlo sa uzemljivača:

$$I_u = \sum_{i=1}^n I_i = [1]^T \cdot [I] = [1]^T \cdot [r]^{-1} \cdot [1] \cdot U_u$$

gde T označava transpoziciju matrice, odnosno vektora.

Otpor rasprostiranja uzemljivača je:

$$R_u = \frac{U_u}{I_u} = \left( [1]^T \cdot [r]^{-1} \cdot [1] \right)^{-1}$$

Otpor rasprostiranja uzemljivača je veličina koja zavisi isključivo od konstruktivnih parametara uzemljivača i parametara tla. To je otpor koji se suprotstavlja odvođenju struje sa uzemljivača i ima praktično aktivan karakter. Određuje se kao odnos potencijala uzemljivača (tj. napona uzemljivača) pri odvođenju struje ka referentnoj zemlji i te struje.

Napon uzemljivača je:

$$U_u = R_u \cdot I_u$$

Svi potencijali se određuju u odnosu na referentnu zemlju. Napon uzemljivača  $U_u$  se definiše kao razlika potencijala na koji dolazi uzemljivač prilikom odvođenja struje u tlo i potencijala referentne zemlje. Za male dužine elemenata uzemljivača mogu se zanemariti padovi napona na njima tako da se smatra da su svi elementa na istom potencijalu, tj. na naponu uzemljivača  $U_u$ .

Struje u elementima uzemljivača se izračunavaju na osnovu:

$$[I] = [r]^{-1} \cdot [1] \cdot U_u$$

Potencijal neke tačke  $M$  u okolini uzemljivača u neograničenom homogenom tlu je:

$$V_M = \sum_{i=1}^n V_{iM} = \sum_{i=1}^n r_{iM} \cdot I_i = [r_M] \cdot [I] = [r_M] \cdot [r]^{-1} \cdot [1] \cdot U_u$$

gde  $[r_M]$  predstavlja  $1 \times n$  vektor međusobnih otpornosti  $r_{iM}$  elemenata uzemljivača i tačke  $M$ .

Međusobna otpornost provodnika  $i$  dužine  $L$  i tačke  $M$  je:

$$\alpha_{iM} = \frac{V_{iM}}{I} = \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \int_L \frac{dl}{r} = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{D+L}{D-L}$$

Sopstvene otpornosti elemenata (pravolinijskih provodnika) uzemljivača se određuju iz izraza:

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d}$$

gde je  $\rho$  specifična otpornost tla,  $L$  je dužina provodnika, a  $d$  je prečnik provodnika.

Međusobne otpornosti provodnika  $i$  i  $k$  uzemljivača se određuju iz izraza:

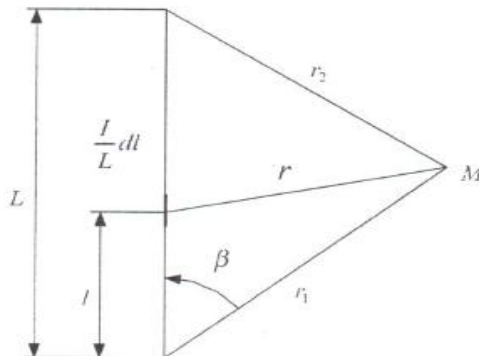
$$\alpha_{ik} = \frac{1}{L_k} \cdot \int_{L_k} \left( \frac{\rho}{4\pi L_i} \ln \frac{D+L_i}{D-L_i} \right) dl_k$$

gde su:

$L_i$  - dužina provodnika sa koga se odvodi struja,

$L_k$  - dužina provodnika po kome se pomera tačka  $M$  za elementarne dužine  $dl_k$

$D$  - zbir rastojanja krajeva provodnika  $i$  do tačke  $M$  na provodniku  $k$ ,  $D=r_1+r_2$



Slika 2: Pravolinijski provodnik i tačka u neograničenom homogenom tlu

Zbog male dubine ukopavanja uzemljivači se nalaze u ograničenom homogenom tlu, tako da se uticaj površine zemlje na proračun međusobnih otpornosti obuhvata uvođenjem lika uzemljivača, simetrično u odnosu na površinu tla. Sa lika provodnika se odvodi ista struja koja se odvodi sa samog provodnika.

Međusobna otpornost provodnika  $i$  i tačke  $M$  je:

$$r_{iM} = \alpha_{iM} + \alpha_{i'M}$$

jer se potencijal tačke  $M$  dobija sabiranjem potencijala od provodnika  $i$  i njegovog lika  $i'$ . Ako se tačka  $M$  nalazi na površini tla biće:

$$r_{iM} = 2\alpha_{iM}$$

Međusobna otpornost provodnika  $i$  i  $k$  uzemljivača je:

$$r_{ik} = \alpha_{ik} + \alpha_{i'k}$$

### Određivanje napona dodira i napona koraka

Potencijalna razlika dodira se određuje kao razlika potencijala uzemljivača  $U_u$  i potencijala  $V_M$  tačke  $M$  na površine zemlje na rastojanju 1 m od uzemljivača:

$$E_d = U_u - V_M$$

Napon dodira kome će biti izložen čovek je:

$$U_d = \frac{R_\xi}{R_\xi + \frac{R_s}{2}} \cdot E_d$$

gde je otpor čovekovog tela  $R_c = 1000 \Omega$ , a  $R_s$  je prelazna otpornost tlo-stopalo koja se izračunava kao otpor rasprostiranja kružne ploče sa prečnikom  $D_e = 0.16 \text{ m}$ :

$$R_s = \frac{\rho}{2D_e}$$

Pri određivanju napona dodira treba birati najkritični položaj tačke  $M$  na površine zemlje na rastojanju  $1 \text{ m}$  od uzemljivača. U slučaju kvadratnog oblika uzemljivača, najveći napon dodira se obično postiže u produžetku dijagonale uzemljivača.

Potencijalna razlika koraka  $E_k$  je potencijalna razlika koja na površini zemlje može da se premosti korakom dužine  $1 \text{ m}$ :

$$E_d = U_u - V_M$$

Napon koraka kome će biti izložen čovek je:

$$U_k = \frac{R_c}{R_c + 2R_s} \cdot E_k$$

Pri određivanju napona koraka treba takođe naći najkritičniji slučaj, tj. najveću potencijalnu razliku koja na površini zemlje može da se premosti korakom dužine  $1 \text{ m}$ . U slučaju kvadratnog oblika uzemljivača, najveći napon korak se obično postiže na pravcu dijagonale uzemljivača. Duž tog pravca je potrebno odrediti potencijalnu razliku koraka i naći njenu najveću vrednost, a onda izračunati napon koraka.

Izračunate napone dodira i koraka treba uporediti sa dozvoljenom vrednošće napona koja je bezbedna za čoveka. Za izračunavanje ove vrijednosti treba znati vreme reagovanja zaštite. Ukoliko ovaj podatak nije poznat usvaja se vreme od  $0.2 \text{ sekunde}$ . Dozvoljeni napon  $U_{doz}$  u zavisnosti od vremena trajanja kvara  $t$  se određuje na osnovu:

$$U_{doz} = \begin{cases} 1000 \text{ V}, & t \leq 0.075 \text{ s} \\ \frac{75}{t}, & 0.075 \text{ s} < t \leq 1.153 \text{ s} \\ 65 \text{ V}, & t \geq 1.153 \text{ s} \end{cases}$$

Ukoliko se dobije da je napon dodira ili napon koraka veći od dozvoljene vrednosti napona potrebno je preduzeti određene mjere za njihovo smanjenje. Jedan od načina je veštačko povećavanje specifične otpornosti površine tla prekrivanjem tla iznad i oko uzemljivača materijalom sa većom specifičnom otpornošću  $\rho$ . Na primer, može se nasuti pesak čija je specifična otpornosti  $2500 \Omega \text{ m}$  tako da debljina sloja peska bude do  $0.5 \text{ m}$ . Otpornost ovog sloja iznosi:

$$R_t = \frac{\rho \cdot l}{\frac{D^2 \pi}{4}}$$

gde je  $l$  debljina sloja, a  $D$  je prečnik kružne ploče kojom je modelovano stopalo.

Naponi dodira i koraka sa nasutim slojem peska su:

$$U_d = \frac{R_c}{R_c + \frac{R_s}{2} + R_t} \cdot E_d$$

$$U_k = \frac{R_c}{R_c + 2R_s + R_t} \cdot E_k$$

## **Literatura:**

- [1] Jovan Nahman, Vladica Mijailović ,  
**“ODABRANA POGLAVLJA IZ VISOKONAPONSKIH POSTROJENJA”**  
Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd, 2002.
- [2] Jovan Nahman, Vladica Mijailović ,  
**“RAZVODNA POSTROJENJA”**  
Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd, 2005.
- [3] Jovan Nahman, Vladica Mijailović ,  
**“VISOKONAPONSKA POSTROJENJA”**  
Beopres, Beograd, 2000.
- [4] Jovan Nahman,  
**“UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE DISTRIBUTIVNIH MREŽA”**  
Naučna knjiga, Beograd, 1980.