

## RASPODELA STRUJE JEDNOFAZNOG ZEMLJOSPOJA DUŽ SREDNJENAPONSKOG NADZEMNOG VODA

N. MUČALICA, EPS Distribucija DOO Beograd, Srbija  
S. LOLIĆ, EPS Distribucija DOO Beograd, Srbija

### UVOD

Kao što je poznato, prilikom projektovanja uzemljivačke rešetke visokonaponskih postrojenja potrebno je odrediti najveću moguću struju kvara koja će se preko nje odvoditi u zemlju. Da bi se to uradilo u nekim slučajevima nije dovoljno zadržati se samo na analizi delova struje kvara koja nastaje kada do kvara dođe u samom postrojenju. Kod postrojenja velikih instaliranih snaga, kakve su elektrane i velike transformatorske stanice X/35 kV, može se pokazati da je struja koja opterećuje uzemljivačku rešetku najveća kada do kvara dođe na nekom od priključenih vodova i to na određenoj kritičnoj udaljenosti, usled čega je njena vrednost znatno manja od one koja se ima kada je kvar u samom postrojenju [1]. Proračun struja kvara u ovakvim slučajevima može se sprovesti uprščćenim modelom voda u kvaru [2], usled čega se pred projektante postrojenja postavljaju nerealno strogi zahtevi, ili korišćenjem savršenijeg modela voda kojim se postiže veća tačnost, ali za praktičnu primenu dosta složenim računskim postupkom.

U ovom radu je izložena metoda za koju se može reći da ima visoku tačnost uz korišćenje relativno jednostavnih računskih operacija.

### Matematički model

Polazeći od izraza za srednji geometrijski prečnik užeta SGP, [3], uzimajući u obzir vrednosti ugiba provodnika trofaznog sistema dalekovoda može se izračunati sopstvena i međusobna impedansa provodnika koje čine matricu impedansi sistema Z

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

gde su:

- elementi na glavnoj dijagonali sopstvene impedanse provodnika i zemljovodnog užeta, a vandijagonalni elementi međusobne impedanse između provodnika i međusobne impedanse provodnika i zemljovodnog užeta,  
-  $n$  ukupan broj provodnika i zemljovodnih užadi dalekovoda.

Međusobna i sopstvena impedansa provodnika ne zavise samo od električnih osobina provodnika već i od rastojanja između provodnika (tla za slučaj sopstvene impedanse), kao i od električnih osobina tla.

Pod homogenim dalekovodom u smislu ovog razmatranja podrazumevamo dalekovod čiji su geometrijski, mehanički i električni parametri u svim njegovim rasponima isti. Pošto su i stubovi jedan od elemenata raspona, impedanse uzemljenja svih stubova homogenog voda jednake su.

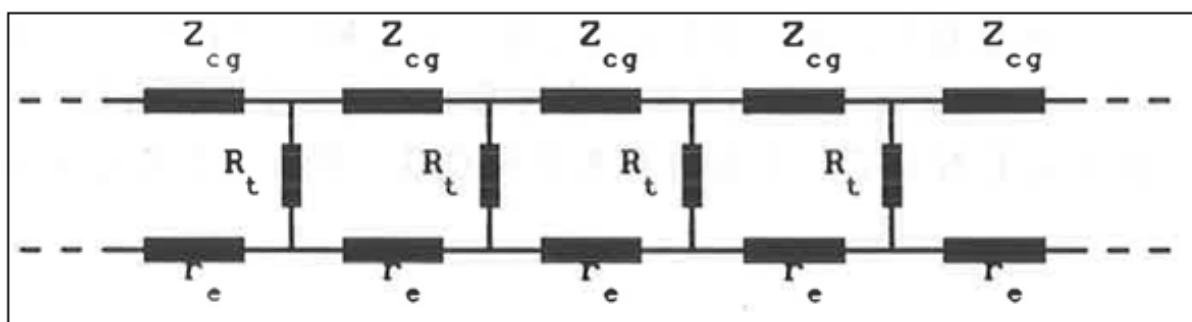
Zaštitni provodnik dalekovoda (zaštitno uže) zajedno sa uzemljenjima svih stubova preko kojih je zaštitni provodnik uzemljen, čini uzemljivački sistem dalekovoda (USDV).

Uzemljivački sistem dalekovoda je, prema tome, mreža lestvičaste forme, koja se sastoji od niza rednih i niza otočnih impedansi.

Redne impedanse su sopstvene impedanse zaštitnog provodnika u jednom rasponu, a otočne impedanse su impedanse uzemljenja stubova.

Iz definicije homogenog dalekovoda proizilazi da su kod uzemljivačkog sistema homogenog dalekovoda sve redne impedanse međusobno jednake i sve otočne impedanse međusobno jednake.

Parametri uzemljivačkog sistema imaju, presudan uticaj na zamensku šemu nultog redosleda dalekovoda, tj. na raspodelu nultih struja duž voda. Kako upravo nulte struje prouzrokuju najveće magnetne uticaje na provodne strukture u okruženju, vrlo je važno ne samo predvideti njihovu veličinu, nego i poznavati prirodu njihove raspodele duž dalekovoda. Jedan ovakav uzemljivački sistem može se, dakle, predstaviti šemom kao na slici 1.



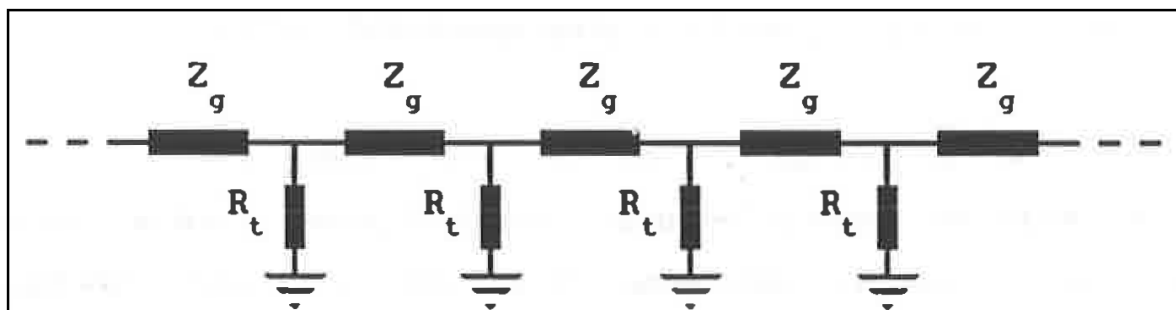
Slika 1. Lestvičasta šema USDV

$$Z_g = Z_{cg} + r_e \quad (2)$$

Impedansa  $Z_g$  predstavlja impedansu zaštitnog užeta u jednom rasponu, impedansa  $Z_{cg}$  predstavlja impedansu zaštitnog užeta u jednom rasponu umanjenu za otpornost povratnog puta kroz zemlju  $r_e$ ,  $R_t$  predstavlja otpornost stuba.

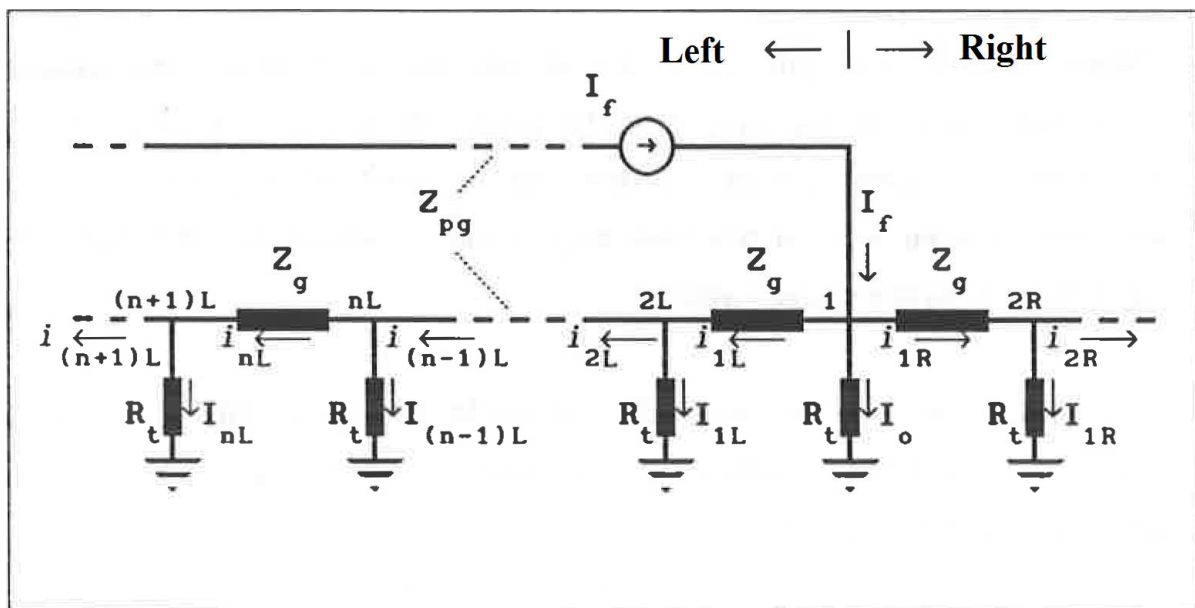
Ako impedansu povratnog puta zaštitnog provodnika "premestimo" u sam zaštitni provodnik, "dobijamo jednostavniju šemu koja je prikazana na slici 2.

Potpuno je svejedno gde se u šemi nalazi impedansa povratnog puta  $r_e$ . S obzirom da je predmet našeg interesovanja pre svega raspodela struje zemljospoja, prirodno je što ćemo se služiti šemom sa slike.



Slika 2. Pojednostavljena šema USDV

Neka se posmatra deo uzemljivačkog sistema homogenog dalekovoda (USDV) čiji su stubovi obeleženi kao na slici 3. Neka se na stubu br. 1 injektira konstantna struja  $I_f$ . Ova dispozicija odgovara spoju USDV [4] sa faznim provodnikom, tj. dozemnom kratkom spoju u tački 1 sa ukupnom strujom kvara  $I$ .



Slika 3. Ekvivalentna šema jednofaznog zemljospoja

Ako zanemarimo međusobne uticaje uzemljivača stubova za n-ti stub sa leve strane možemo napisati sledeće tri relacije:

$$I_{nL} = i_{nL} - i_{(n+1)L} \quad (3)$$

$$I_{(n-1)L} = i_{(n-1)L} - i_{nL} \quad (4)$$

$$i_{nL}Z_g - \mu I_f Z_g + I_{nL}R_t - I_{(n-1)L}R_t = 0 \quad (5)$$

Gde su:

$i_v$  -struja kroz zaštitno uže u rasponu  $V$  (računato od mesta injektiranja u USDV)

$I_v$  -struja kroz stub  $V$  (računato od mesta injektiranja u USDV)

$R_t$  - otpornost uzemljenja jednog stuba

$Z_{pg}$  - međusobna impedansa između zaštitnog užeta i faznog provodnika

$\mu = \frac{Z_{pg}}{Z_g}$  -faktor sprege zaštitnog užeta i faznog provodnika

Daljim rešavanjem sistema jednačina dolazi se do rešenja za strujnu raspodelu kroz USDV [2], [5],

$$I_{nL} = A_L r_1^n + B_L r_2^n, \quad (6)$$

$$i_{nL} = a_L r_1^n + b_L r_2^n + \mu I_f. \quad (7)$$

Gde su  $A_L, B_L, a_L, b_L$  proizvoljne konstante a  $r_1$  i  $r_2$  koreni karakteristične jednakosti uzemljivačkog sistema dalekovoda.

$$r^2 - (2+a)r + 1 = 0 \quad (8)$$

Pošto je jedini parametar ove jednakosti  $a = \frac{Z_g}{R_t}$ , njena rešenja zavise od impedanse zaštitnog užeta i impedanse uzemljenja stubova, dakle, od elemenata koji čine uzemljivački sistem.

## REZULTATI

Kod postrojenja velikih instalisanih snaga, kao što su elektrane i TS X/35 kV prilikom projektovanja uzemljivača potrebno je voditi računa i o komponenti struje zemljospoja koja se zatvara kroz njihova uzemljena

zvezdišta levo od mesta injektiranja struje kvara  $I_u = \sum_1^n I_{nL}$ . Ova struja, prilikom kvara u samom postrojenju

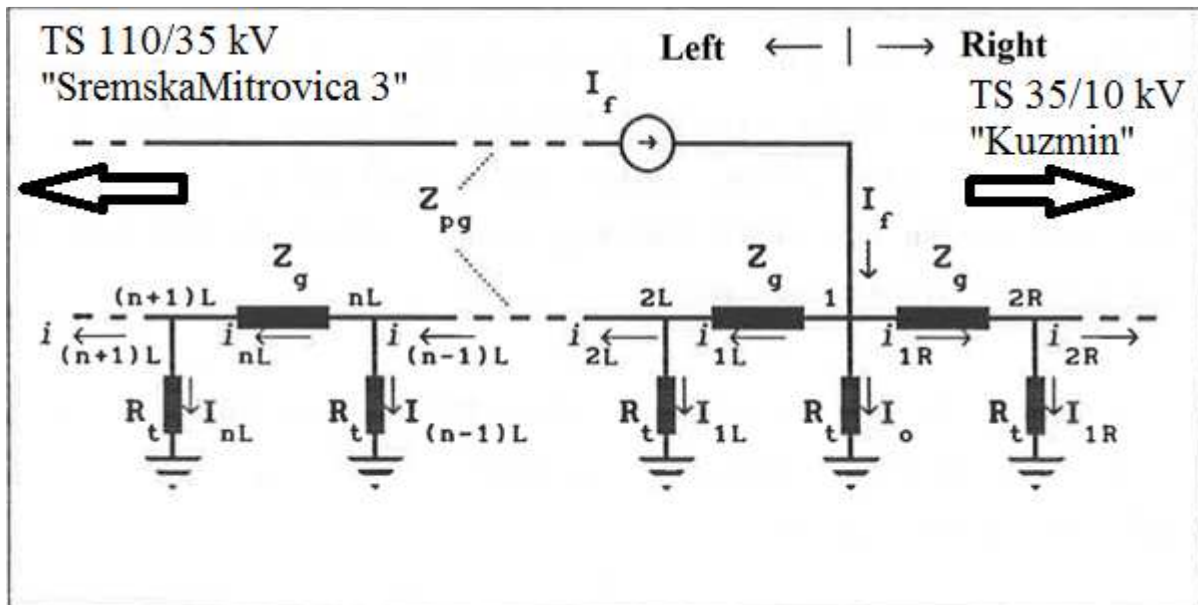
zatvara se samo aksijalnim pravcem kroz elemente uzemljivačke rešetke i prema tome ne može biti merodavna za procenu uslova bezopasnosti bez obzira na moguću vrednost. Međutim, kod kvarova na vodu jedan njen deo zatvara se i tako da stvara potencijal na uzemljivačkom sistemu postrojenja. Kako se menja vrednost deo struje kvara  $I_u$  na početku dalekovoda za različita mesta kvara duž voda, prikazano je na primeru jednostrano napajanog realnog dalekovoda 35 kV TS 110/35 kV „Sr. Mitrovica 3“ do TS 35/10 kV „Kuzmin“, sa faznim provodnicima Al/Ce uže preseka 95/15 mm<sup>2</sup>, jednim čeličnim zaštitnim uzetom preseka 50 mm<sup>2</sup> i prosečnim rasponom od 150 m. Ostali relevantni podaci o ovom vodu, za različite prirodne uslove, odnosno različitu specifičnu otpornost zemljišta duž voda, svrstani su u Tabeli 1.

Tabela 1.

Otpornost uzemljenja stuba	Specifična otpornost tla
$R_t=10 \Omega$	$\rho=50 \Omega m$
$R_t=20 \Omega$	$\rho=100 \Omega m$
$R_t=30 \Omega$	$\rho=150 \Omega m$

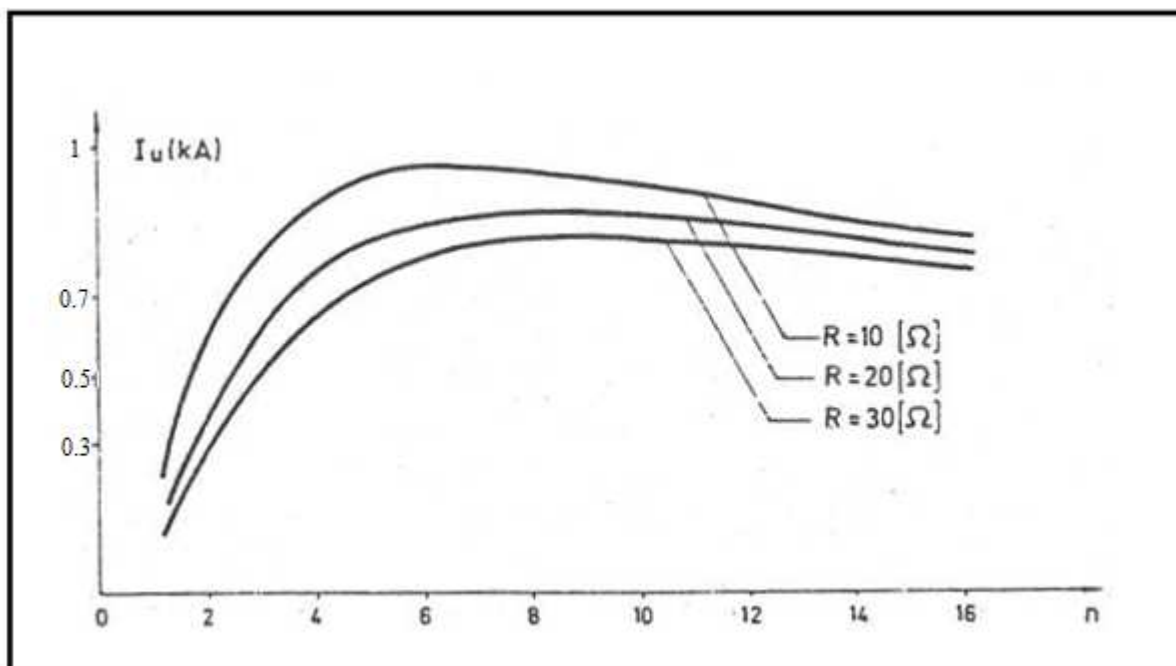
Pri proračunima usvojena vrednosti impedanse uzemljivača izvorne TS Mitrovica 3 je  $Z_{uzemljivača}=0,1\Omega$ , a za maksimalnu vrednost struje jednopolnog kratkog spoja je uzeto  $I_{ks}=1000A$ . (ograničena uzemljenjem mreže 35kV preko peterenove prigušnice).

Napomena: Posmatran je model realnog dalekovoda napajan sa jedne strane od TS110/35 kV „Sr. Mitrovica 3“ do TS 35/10 kV „Kuzmin“, što odgovara trenutnom uklopnom stanju mreže (ekvivalentna šema USDV posmatranog voda je prikazana na slici 4.)



Slika 4. Ekvivalentna šema jednofaznog zemljospoja nadzemnog srednjenaponskog voda 35 kV TS 110/35 kV „Sremska Mitrovica 3“ do TS 35/10 „Kuzmin“

Rezultati proračuna struja jednozemnog kratkog spoja kroz uzemljivački sistem izvornog postrojenja u zavisnosti od mesta kvara prikazani su u vidu dijagrama na slici 5.



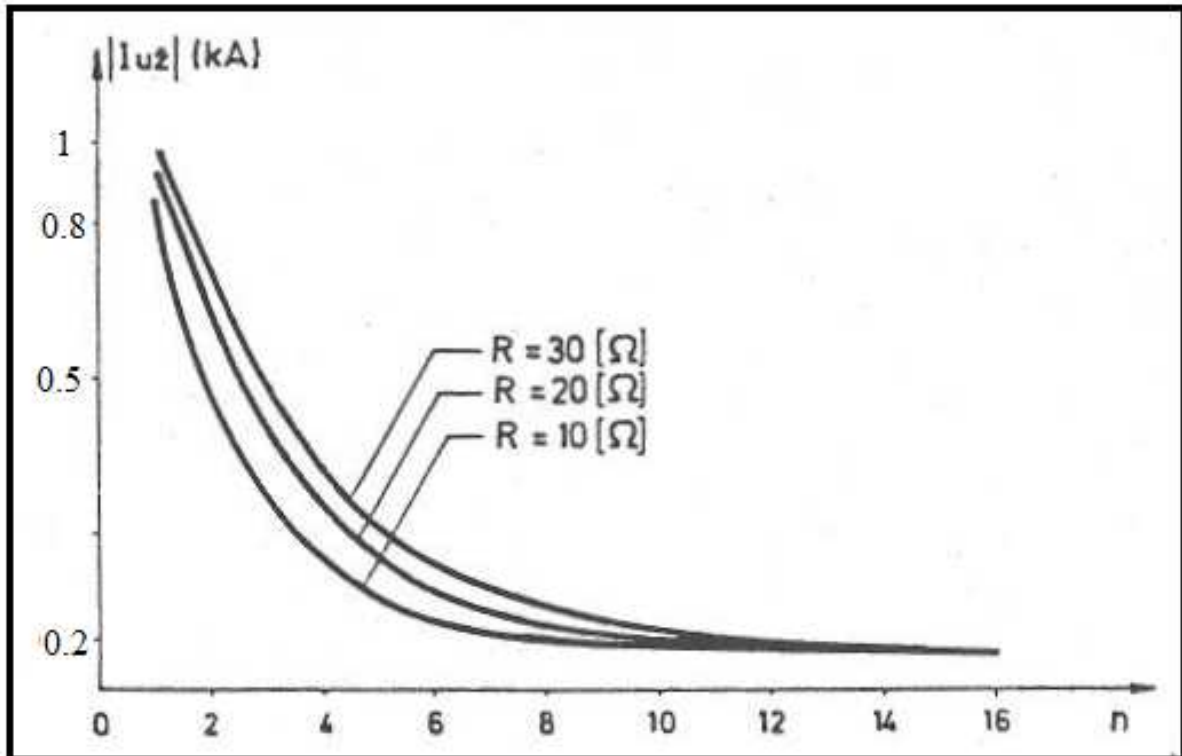
Slika 5. Struja jednozemnog kratkog spoja kroz uzemljivački sistem izvornog postrojenja u zavisnosti od mesta kvara na priključnom dalekovodu

U sva tri razmatrana slučaja, kod bliskih kvarova, sa udaljavanjem mesta kvara povećava se vrednost struje  $I_u$ . Tek na određenom, kritičnom rastojanju ova struja dostiže svoju maksimalnu vrednost, a posle toga, sa daljim povećanjem  $n$ , opada.

Kada je kvar bliži ukupna struja kvara ima veću vrednost, ali se znatan deo ove struje zbog blizine postrojenja (male vrednosti impedanse  $Z_g$ ) vraća u izvorno postrojenje preko zemljovodnog užeta.

Sa udaljavanjem mesta kvara struja  $I_u$  raste i pored toga što vrednost ukupne struje kvara opada, jer se usled naglog povećanja ukupne ekvivalentne impedanse užeta  $Z_g$  naglo menja i relativna raspodela ukupne struje kvara. Prema tome, može se reći, sve dok se "oseća" uticaj zemljovodnih užadi kao direktne galvanske sprege struja  $I_u$  javlja se kao funkcija faktora kojima je određena ukupna struja kvara  $I_f$  i faktora kojima je određena njena promenljiva relativna raspodela ( $\alpha$ ,  $r_1$  i  $r_2$ ). Maksimalnu vrednost naravno dostiže pri rastojanjima pri kojima se međusobno suprotni efekti koje izaziva prometa ovih faktora duž voda, u potpunosti anuliraju [3]. Kod još većih rastojanja, uticaj faktora koji određuju ukupnu struju kvara postaje dominantan, pa struja  $I_u$  sa udaljavanjem mesta kvara opada. Zbog svega toga, sve tri prikazane krive imaju zajednički opšti oblik, ali kao što se vidi sa povećanjem impedanse uzemljenja stubova  $R$  udaljuje se kritično mesto kvara i smanjuje maksimum struje  $I_u$ , što je i sasvim logično s obzirom da raste i ukupna impedansa povratnog puta kroz zemlju.

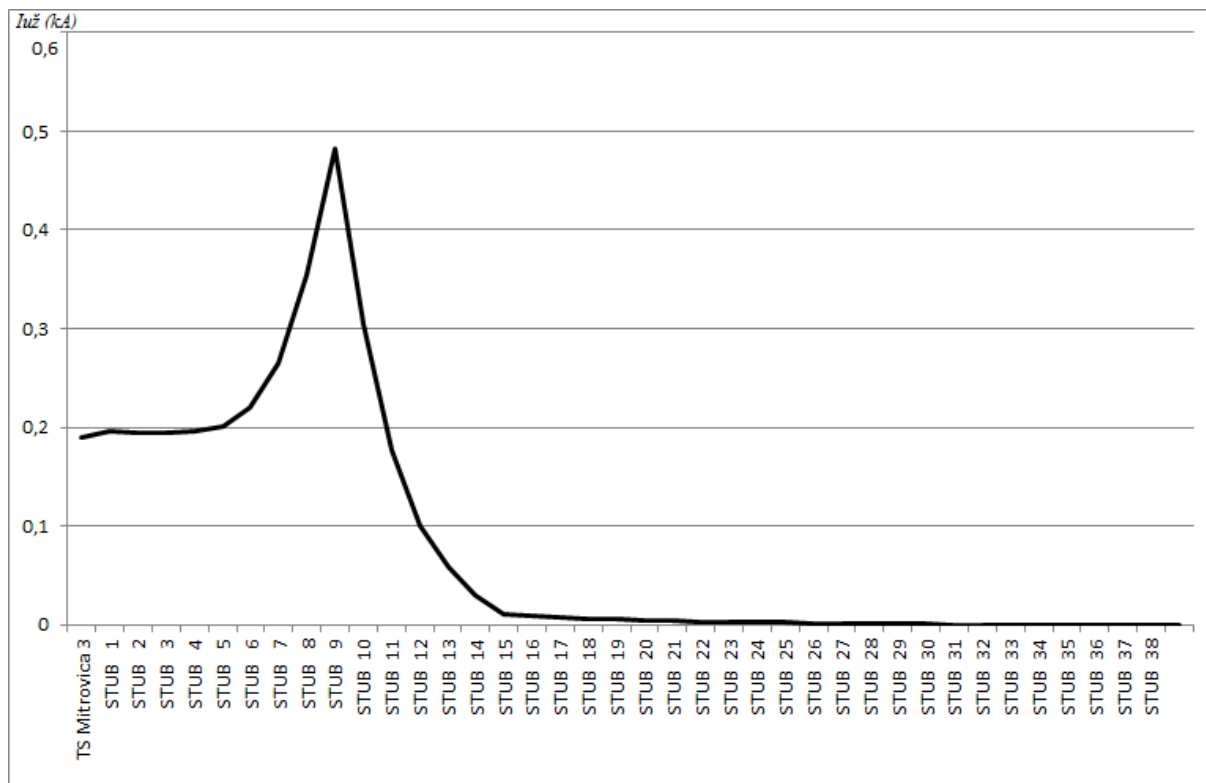
Celokupno prethodno razmatranje prihvatljivo je samo pod uslovom da zemljovodno uže može da podnese termičko naprezanje usled dela struje kvara koji se preko njega vraća izvornom postrojenju. Kolike su ove struje na prvom rasponu voda od izvornog postrojenja vidi se sa slike 3. (slučaj kada je izvorno postrojenje sa leve strane pa je struja  $I_{u\check{z}} = \dot{I}_{nL}$  -struja u prvom rasponu dalekovoda od izvornog postrojenja), kada struje koje se vraćaju kroz tlo imaju vrednosti prikazane na slici. 5, prikazane su na slici 6.



Slika 6. Struja jednozemnog kratkog spoja kroz zemljovodno uže na prvom rasponu dalekovoda u zavisnosti od mesta

Kao što se vidi struja  $I_{uz}$  najveća je kada do kvara dođe na prvom stubu voda, pa je prema tome prvi stub kritično mesto kvara sa stanovišta termičke opteretljivosti zemljovodnog užeta. (posebno ako se koristi OPGW zemljovodno uže). Struje tada kao što se vidi iz datog primera mogu biti toliko velike da usled termičkog opterećenja koje izazivaju mogu da dovedu do kidanja zemljovodnog užeta, bez obzira na veoma kratko vreme reagovanja savremene distantne zaštite (0,05-0,1 sec). U takvim slučajevima imajući u vidu i automatsko ponovno uključanje voda u kvaru bilo bi neophodno na prvom rasponu upotrebiti uže veće termičke izdržljivosti. Naravno, za zemljovodno uže na ostalom delu voda tada bi bio merodavan kvar na drugom stubu, a tada je struje kvara kroz zemljovodno uže ipak znatno manja što se vidi na slici 6.

Za konkretan primer dalekovoda urađena je i analiza rasprostiranja struje kroz zemljovodno uže po rasponima za dva slučaja kada je dalekovod jednostrano napajan i kada je dalekovod dvostrano napajan. Za slučaj kada je dalekovod napajan jednostrano za struju kvara uzeta je vrednost od  $I_f = 1000 \text{ A}$  i mesto kvara je na 10 stubu, a raspodela struje po rasponima dozernog užetu je prikazana na slici 7.



Slika 7. Struja jednozemnog kratkog spoja kroz zemljospono uže po rasponima dalekovoda jednostrano napajanog voda

Na slici 6. može se uočiti da desna komponenta struje kvara kroz uže od mesta injektiranja opada posle mesta kvara (stub br. 10) pošto se lokalna impedansa petlje kvara sa svakim sledećim rasponom povećava. Struja kroz uže posle 38 stuba jednaka je nuli tako da se ostatak nadzemne mreže 35 kV može zanemariti.

## ZAKLJUČAK

U radu je prikazana jedna metoda za analizu struja u sistemu uzemljenja visokonaponskih postrojenja kako kod kvarova na priključenim vodovima tako i u samom dalekovodu tj. po rasponima priključnog dalekovoda. Pokazan je metod računanja preraspodele struje kvara kroz USDV kada je dalekovod napajan jednostrano. Primena metode prikazana je kroz realan primer dalekovoda 35 kV iz kojih se sagledava uticaj relevantnih parametara. Ukazuje se i na tehničke, uslove o kojima treba voditi računa da bi se struja kvara na određenoj udaljenosti od postrojenja mogla smatrati kritičnom za njegov uzemljivački sistem.

## LITERATURA

- [1] J.Nahman: „Proračun raspodele struja u sistemu uzemljenja postrojenja kod bliskih kvarova na vodovima“, JUKO CIGRE, Ref. 23.26, Opatija 1983.
- [2] Lj.Popović: „Mesta zemljospoja pri kojima se Javljaaju najveće struje koje opterećuju uzemljivače TS X/110 kV i TS 110/X ky“, JUKO CIGRE Ref.,23-03. Beograd 1981.
- [3] B. Popović, „Elektromagnetika“, Beograd, Građevinska knjiga 1986.
- [4] V.balkovoj, „Rešavanje lestvičastih šema konačne dužine“, Novi Sad 1999.