



Mr.sc. Ivan Medić, dipl. ing.
Fakultet elektrotehnike,
strojarstva i brodogradnje, Split

4-03

ANALIZA IZNOŠENJA POTENCIJALA U SUSTAVU UZEMLJENJA KOMBINIRANIH KABELSKO-ZRAČNIH VODOVA 110 kV

SAŽETAK

U radu su opisane neke posebne karakteristike rasta potencijala uzemljenja i iznešenog potencijala kod stanica napajanih iz kombiniranih v.n. kabelsko zračnih vodova. Analiza zahtjeva formiranje složenog sustava uzemljenja u kojem će biti uzemljivački sustavi svih stanica koje su povezane kabelima v.n. Istaknut je i analiziran utjecaj suvremenih v.n. kabela na relativan iznos struje koji se odvodi u zemlju. Predstavljen je postupak za određivanje reduciranih struja i potencijala na složenom sustavu uzemljenja. Kao primjer dati su rezultati proračuna na složenom sustavu uzemljenja u kombiniranom dvostrukom kabelsko-zračnom v.n.vodu.

TRANSFERRED POTENTIALS ANALYSIS IN EARTHING SYSTEM OF 110 kV COMBINED CABLE-OVERHEAD LINES

ABSTRACT

The paper describes some special characteristics of both GPR and transferred potentials of power substations fed by h.v. combined cable-overhead power lines. The complex earthing system to be analyzed, generally must include earthings of all power substations interconnected by h.v. power cables. The emphasized influence of contemporary h.v. power cables on percentage of currents injected into the soil, is analyzed. A procedure to determine both the distribution of currents injected into the soil and potentials along such complex earthing systems, is presented. As an example, the calculation results of earthing systems performance of substations in combined h.v. double cable-overhead power line, are provided.

Ključne riječi: uzemljenje, uzemljivački sustavi, raspodjela struje kvara, izneseni potencijali, kabelska sprega, naponi kvara

Key words: earthing, earthing systems, fault current distribution, transferred potentials, cable coupling, fault voltages

1. UVOD

Poznato je da se kod nastanka jednofaznog kratkog spoja u 110 kV električnim

postrojenjima, može pojaviti problem iznošenja potencijala u obližnju distribucijsku s.n. i n.n. mrežu. Ako se pri tome napajanje tih postrojenja vrši putem suvremenih 110 kV kabela, kao što je to slučaj u urbanim sredinama, problem se dodatno usložnjava zbog postojanja jake elektromagnetske sprege između faznih vodiča i zaštitnih vodiča. Takva sprega uzrokuje pojavu istovremenog odvoda većih iznosa struja u zemlju ne samo u postrojenju u kvaru nego i na drugim mjestima odnosno postrojenjima sustava uzemljenja, često puta praćenu sa značajnim porastom potencijala njihovih uzemljivača.

Takva mjesta su uvijek mjesta nehomogenosti gdje se parametri napojnog voda mijenjaju. To su primjerice: prelaz 110 kV podzemnog ili podmorskog voda u zračnu napojnu mrežu ("rubna" postrojenja: TS ili KS), mjesta gdje se značajnije mijenjaju geometrijski ili geoelektrički parametri kablskih vodova (prelaz jednožilnih podmorskih kabela iz ravne formacije u moru u formaciju trokut u priobalnoj zaštiti), i mjesta gdje se mijenjaju vrijednosti faznih struja (TS sa uzemljenim transformatorima).

Ovdje nije riječ o klasičnom galvanskom načinu iznošenja potencijala iz postrojenja u

kvaru na okolinu pasivnu s.n. kablsku mrežu koji ima relativno mali radijus djelovanja. Naime, ovdje se na mjesta nehomogenosti, značajan dio struje jednofaznog kvara distribuira induktivnim putem. Relativni iznos struje, koja odlazi u zemlju na tim mjestima, ovisi o stupnju nehomogenosti tog mjesta, a ne o duljini 110 kV kablске mreže. Zbog toga se u nepovoljnim uvjetima i problemi iznošenja potencijala mogu "prenijeti" mnogo dalje od mjesta kvara, npr. iz pogođene potpuno kablirane ("unutrašnje") TS, na "rubna" postrojenja 110 kV i u njima pripadne s.n. i n.n. mreže.

Da bi se pravilno mogli analizirati takvi slučajevi potrebno je formirati model šireg sustava uzemljenja koji osim postrojenja u kvaru obuhvaća još i uzemljenja ostalih postrojenja koja su međusobno povezana kablskom mrežom 110 kV. Takav sustav je naravno neekvipotencijalan i za njegovo rješavanje se koristi posebna metoda proračuna i odgovarajući program za računalo pod nazivom SUZEM. Tim programom se istovremeno provodi proračun raspodjele potencijala i struje na promatranom sustavu uzemljenja kao i proračun potencijalne slike odabranih uzemljivača.

No preduvjet svakom izračunu potencijala u sustavu uzemljenja jest upravo poznavanje spomenutih karakterističnih mjesta i utvrđivanje iznosa struja koje se na tim mjestima odvođe u zemlju. U ovom radu opisuje se utjecaj v.n. kablskih vodova na veličinu i lokaciju tih struja po sustavu uzemljenja, a time i na moguću pojavu problema iznošenja potencijala.

2. INDUKTIVNI UTJECAJ KABLA 110 kV NA RASPODJELU STRUJE KVARA

- struje kvara u vodiču

$$I = \sum_{j=1}^3 I_j = 3 \cdot I \quad (1)$$

- inducirane struje u zaštitnom vodiču

$$I = \sum_{j=1}^3 I_j \quad (2)$$

Inducirana struja u ekvivalentnom zaštitnom vodiču k-tog homogenog voda, dobije se iz uvjeta ravnoteže napona induciranog faznim strujama i pada napona na zaštitnom vodiču uzrokovanim prolazom te inducirane struje (Nortonov teorem). Nadomjesni strujni izvor ima jakost:

$$I_k = \frac{Z_{mk}}{Z_k} \cdot I_{fk} \quad (3)$$

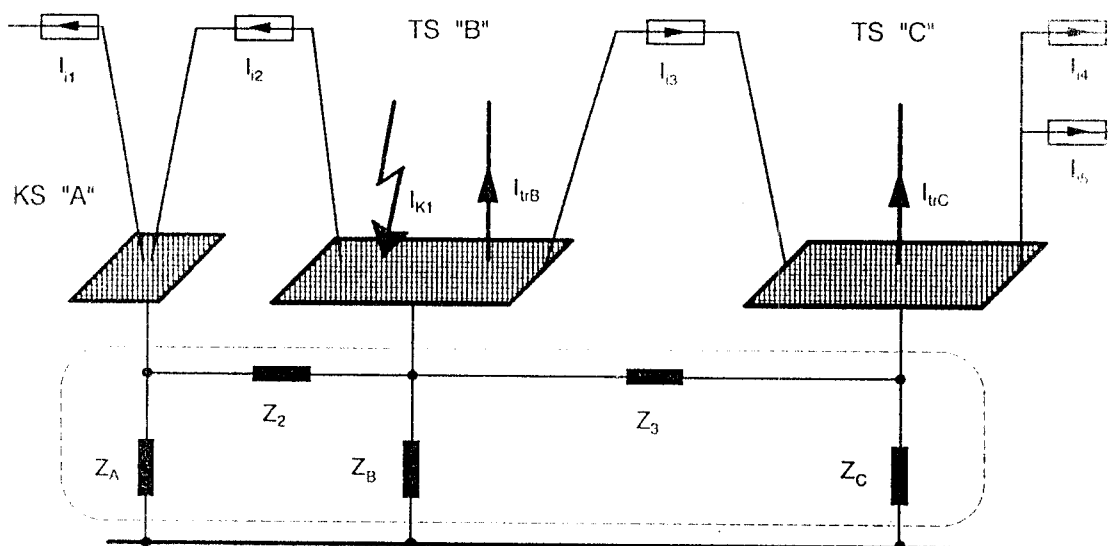
Iz ovakve definicije slijedi da njen iznos ne ovisi o razlici potencijala krajnjih točaka zaštitnog vodiča homogenog voda, odnosno da ona predstavlja ukupnu struju u zaštitnom vodiču kada bi njegov potencijal bio jednak nuli. Za daljnje proračune moguće je tada koristiti faktor redukcije voda koji se definira preko inducirane komponente struje kvara:

$$k = 1 - \frac{I_i}{I_k} = 1 - \frac{Z_m}{Z} \quad (4)$$

Ovakva definicija (za razliku od nekih drugih definicija), daje uvijek vrijednost faktora redukcije koja je konstantna na bilo kojem dijelu homogenog voda. Definicija vrijedi kako za nadzemni tako i za kabelski vod.

3. NADOMJESNA SHEMA SUSTAVA UZEMLJENJA

Kada je cilj analize samo proračun potencijala uzemljivača postrojenja "A", "B" i "C", nadomjesna shema promatranog sustava uzemljenja može se dalje prikazati u minimalnoj konfiguraciji kao:



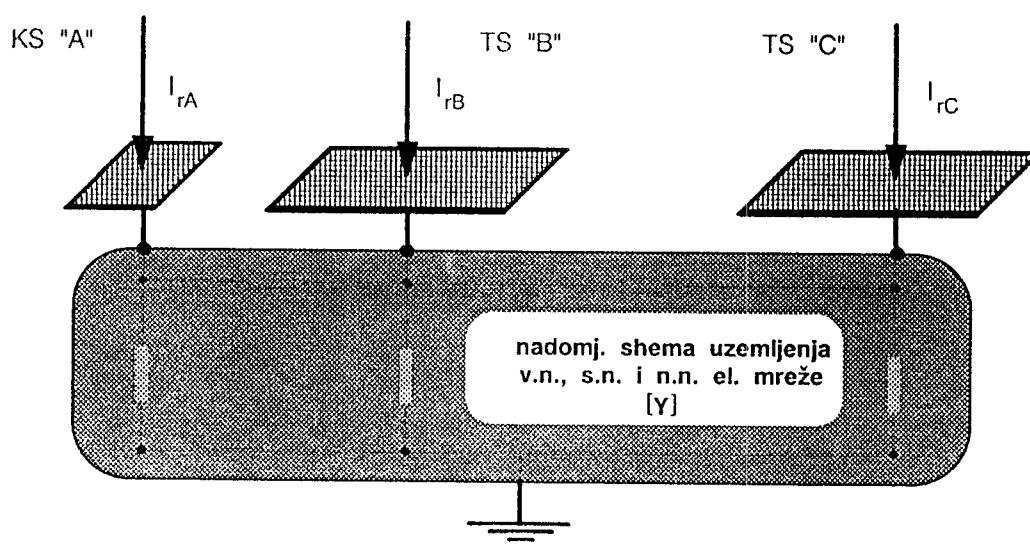
Sl. 2. Nadomjesna shema sustava uzemljenja sa Sl. 1

Kada je cilj analize detaljniji proračun iznošenja potencijala u s.n. i n.n. mreže, tada je potrebno detaljnije modelirati i njihove sustave uzemljenja. Općenito se utjecaj zaštitnih vodiča vodova na impedanciju uzemljenja postrojenja, može uvijek prikazati s jednom ili više

nadomjesnih II shema (ovisno o zahtjevima i ciljevima analize). U većim urbanim sredinama tako modelirana mreža (odnosno njezina matrica admitancija čvorova $[Y]$) može imati i nekoliko stotina čvorova. U slučaju dalekovoda v.n., uzdužna grana njegove ukupne nadomjesne sheme je u pravilu mnogo većeg iznosa od poprečne, pa se često može ispustiti.

Narinuta reducirana struja u nekom čvoru sustava uzemljenja, konačno se dobije kao zbroj svih strujnih izvora narinutih na taj čvor.

Nadomjesna shema za promatrani slučaj sa (simultano) narinutim reduciranim strujama kvara mjerodavnim za određivanje potencijala, općenito se može prikazati kao:



Sl. 3. Reducirane struje na sustavu uzemljenja sa sl. 1.

Nadomjesna mreža može se opisati matricnim jednadžbama, a rješenje će se potražiti metodom čvorova [1]. Kao rezultat dobiju se potencijali čvorova u sustavu uzemljenja, odnosno naponi prema referentnom čvoru tj. referentnoj, dovoljno udaljenoj zemlji:

$$U = Y^{-1} \cdot J \quad (5)$$

gdje je:

U - vektor stupac napona čvorova

J - vektor stupac narinutih reduciranih struja čvorova

Y - kvadratna matrica admitancija čvorova nadomjesne mreže sustava uzemljenja.

Matrica admitancija nadomjesne mreže određuje se na temelju poznate primitivne matrice impedancija grana i matrice incidencije čvor-grana zadane nadomjesne mreže :

$$Y = m \cdot z^{-1} \cdot m^t \quad (6)$$

gdje je:

m - matrica incidencije čvor-grana

z - matrica impedancija grana

4. REDUCIRANE STRUJE I FAKTORI REDUKCIJE VODOVA

Ako je moguće u izračunu koristiti reduksijske faktore vodova, tada je također moguće reducirane struje izraziti preko sume umnožaka faktora redukcije i pripadnih parcijalnih struja kvara vodova incidentnih sa promatranim čvorom. U sumi treba voditi računa o smjerovima tih struja u odnosu na promatrani čvor

$$I = \sum_k (k_k \cdot I_{rk}) \quad (7)$$

Za različita mjesta nastanka jednopolnog kvara na shemi sa Sl. 1., reducirane struje izražene preko reduksijskih faktora iznose (tablica I.):

Tablica I.

	$I_{rA} = \sum (k \cdot I_r)$	$I_{rB} = \sum (k \cdot I_r)$	$I_{rC} = \sum (k \cdot I_r)$
Kvar u KS "A"	$k_1 I_{F1} + k_2 I_{F2}$	$k_3 I_{F3} - k_2 I_{F2} =$ $(k_3 - k_2) I_{F3} - k_2 I_{rB}$	$k_4 I_{F4} + k_5 I_{F5} - k_3 I_{F3} =$ $(k_4 - k_3) I_{F4} + (k_5 - k_3) I_{F5m}$ $- k_3 I_{rC}$
Kvar u TS "B"	$k_1 I_{F1} - k_2 I_{F2}$ $= (k_1 - k_2) I_{F2}$	$k_2 I_{F2} + k_3 I_{F3}$	$k_4 I_{F4} + k_5 I_{F5} - k_3 I_{F3} =$ $(k_4 - k_3) I_{F4} + (k_5 - k_3) I_{F5}$ $- k_3 I_{rC}$

Tabela III.

NADZEMNI VODOVI 110 kV:	redukcijski faktor "k"
DV: uže od Če 35 mm ²	0,977 / -3,8°
DV: uže od Če 50 mm ²	0,965 / -4,9°
DV: uže od AlMg(Si) 95/55 mm ²	0,630 / -11,6°

Uvrštenjem vrijednosti redukcijskih faktora iz tablica II. i III. u relacije iz tablice I., u nepovoljnim uvjetima ($k_1=k_4=k_5=0,965/-4,9^\circ$) i uz jednake podzemne KB vodove ($k_2=k_3=0,133/-78,6^\circ$), dobije se:

Tablica IV.

	$I_{rA} = \sum(k \cdot I_i)$	$I_{rB} = \sum(k \cdot I_i)$	$I_{rC} = \sum(k \cdot I_i)$
Kvar u KS "A"	$0,965/-4,9^\circ \cdot I_{F1} + 0,133/-78,6^\circ \cdot I_{F2}$	$-0,133/-78,6^\circ \cdot I_{rB}$	$0,936/2,9^\circ \cdot (I_{F4} + I_{F5}) - 0,133/-78,6^\circ \cdot I_{rC}$
Kvar u TS "B"	$0,936/2,9^\circ \cdot I_{F1}$	$0,133/-78,6^\circ \cdot (I_{F2} + I_{F3})$	$0,936/2,9^\circ \cdot (I_{F4} + I_{F5}) - 0,133/-78,6^\circ \cdot I_{rC}$
Kvar u TS "C"	$0,936/2,9^\circ \cdot I_{F1}$	$-0,133/-78,6^\circ \cdot I_{rB}$	$0,965/-4,9^\circ \cdot (I_{F4} + I_{F5}) + 0,133/-78,6^\circ \cdot I_{F3}$

Iz tablice IV. slijedi da:

1. Na "unutarnjim" (kabliranim) stanicama kvar ne donosi velike iznose reduciranih struja neovisno o mjestu nastanka jednopolnog kratkog spoja. Taj relativni iznos je određen redukcijskim faktorom kabela i za odabrani kabel iznosi cca 13,3% od struje $3I_0$ dovedene pripadnim kabelskim vodovima (za kvar u stanici) ili uzemljenim transformatorima (za kvar izvan stanice).
2. Na "rubnim" stanicama se istovremeno uspostavi znatno veći iznos reducirane struje. Na nepogođenim "rubnim" stanicama on može u nepovoljnim uvjetima iznositi do 93,6% od struje $3I_0$ pripadnih zračnih vodova, a ako se radi o "rubnoj" stanici pogođenoj kvarom onda je još veći i može imati iznos 96,5% od struje $3I_0$ dovedene pripadnim zračnim vodovima, uvećan još za iznos 13,3% od struje $3I_0$ dovedene pripadnim kabelskim vodovima.
3. Najveći iznosi reducirane struje u nekoj stanici 110 kV nastupi kada je jednopolni kvar u njoj samoj.

Iz gornjih rezultata može se zaključiti da, sa stajališta veličine struje koja se odvodi u zemlju, kablirane stanice slabije "osjećaju" nastanak jednopolnog kvara, pa se najveći dio od ukupne struje odvedene u zemlju, raspodijeli na lokalne sustave uzemljenja "rubnih" stanica. Kao direktna posljedica slijedi zaključak da se, uz ostale jednake uvjete, kabliranjem postojećih v.n. dalekovoda u stanici može očekivati smanjenje potencijala uzemljivača, a da se veličina reducirane struje na rubnim stanicama može smanjiti smanjenjem iznosa redukcijskih faktora pripadnih zračnih vodova (na primjer primjenom zemnih užadi bolje vodljivosti barem na nekoliko prvih raspona voda).

Potencijali stanica međutim ne ovise samo o veličini reducirane struje nego i o površini uzemljivača, specifičnom el. otporu tla na lokaciji stanice i impedanciji priključenog sustava uzemljenja lokalne distribucijske mreže.

5. PRIMJER: KABELSKO-ZRAČNA VEZA 110 kV TS "DUGI RAT" - TS "NEREŽIŠĆA"

Između TS 110/30/15 kV "Dugi Rat" na kopnu i TS 110/35 kV "Nerežišća" na otoku Braču, postoji kombinirani kabelsko-zračni vod 110 kV. Planovima razvoja HEP-a predviđena je realizacija nove veze na istom potezu i u sklopu toga izgradnja nove KS "Lozna Mala", a isto tako kabliranje postojeće kratke nadzemne dionice TS "Dugi Rat" - KS "Dugi Rat", pa će uzemljivači ove dvije stanice biti direktno povezani višestrukim metalnim vezama. Zbog ograničenog prostora, u ovom radu iznijet će se samo osnovni rezultati vezani za istraživanje iznošenje potencijala u mjestu Dugi Rat kod nastanka jednopolnog kvara na objektima ove dvostruke kabelsko-zračne veze [3].

5.1. Podaci o trasi i vodovima 110 kV

Osnovni podaci vodova 110 kV od značaja za sustav uzemljenja, dati su u tablici V.

Tablica V.

Rn. br.	Naziv voda / dionice	Kabel / Zemno uže	duljina (m)	redukcijski faktor
1.	DV Zakućac 1.	Če 50 mm ²	5229	0,965 / -4,9°
2.	DV Zakućac 2.	Če 50 mm ²	4995	0,965 / -4,9°
3.	KB TS D. Rat - KS L. Mala	FXBTV 3x1x400Cu (ABB)	7000	0,135 / -65,6°
			1386	0,048 / -85,9°
4.	KB TS D. Rat - KS D. Rat	3x1x1000 Al (SILEC)	607	0,216 / -73,1°
5.	KB KS D. Rat - KS Postira	3x95 Cu (OKRA)	8019	(0,160 / -61,6° - 0,42 / -56,2°)
6.	DV KS L. Mala - TS Nerežišća	AlMgSi 95/55 mm ²	6100	0,630 / -11,6°
7.	DV KS Postira - TS Nerežišća	Če 50 mm ²	4981	0,965 / -4,9°
8.	DV TS Nerežišća - KS Slatina	Če 50 mm ²	8225	0,965 / -4,9°

5.2. Reducirane struje sustava uzemljenja

Na sl. 4. prikazana je raspodjela (iznosa) struja $3I_0$ za 2005 g., kod nastanka jednopolnog kratkog spoja u TS "Dugi Rat". Jednako su poznate raspodjele za slučaj nastanka kvara u drugim stanicama sustava [4]. Međutim za izračun potencijala na sustavu uzemljenja potrebno je poznavati reducirane struje u karakterističnim čvorovima sustava.

TS "DUGI RAT"

TS "NEREŽIŠĆA"

DV Zakučac 1

1102 A

KS "LOZNA MALA"

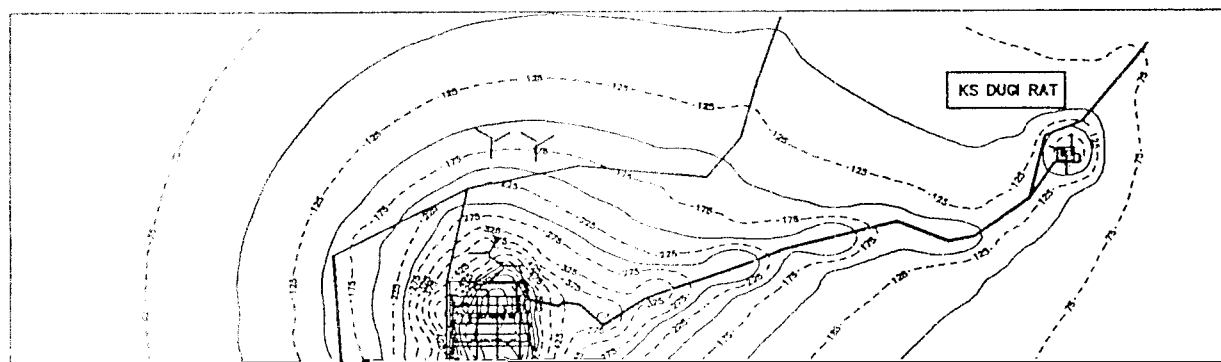
DV 17 KS Stari

5.3 Potencijali u sustavu uzemljenja TS 110/30 kV "Dugi Rat" - KS 110 kV "Dugi Rat"

TS 110/30 kV "Dugi Rat" nalazi se unutar istoimenog mjesta tako da je praktički okružena sa 3 strane stambenim objektima osim na istočnoj strani gdje je rasplet 110 kV dalekovoda. U takvoj situaciji bilo je potrebno modelirati složeni sustav uzemljenja koji za buduću konfiguraciju mreže 110 kV, obuhvaća slijedeće sastavnice:

- mrežasti uzemljivač TS 110/30 kV "Dugi Rat" zajedno sa uzemljivačima prvih stupova zračnih vodova (110 kV i 30 kV).
- mrežasti uzemljivač KS 110 kV "Dugi Rat" (udaljen cca 500m).
- uzemljivači u kopnenim trasama 110 kV kabela (Cu vodiči $2 \times 50 \text{ mm}^2$).
- uzemljivači u trasi s.n. kabelskih vodova na potezu Dugi Rat - Omiš.
- uzemljenja priobalne zaštite (Cu vodiči $2 \times 50 \text{ mm}^2$).
- sustav uzemljenja kabelske n.n. distribucijske mreže u mjestu Dugi Rat.
- nadomjesna ulazna impedancija dozemnih užadi 110 kV i 30 kV DV i plašta 30 kV kabelskog voda prema Postirama (Brač), incidentnih sa TS "Dugi Rat",
- nadomjesne impedancije ekrana/plašteva ostalih 10, 30 i 110 kV kabela.

Prikaz obuhvaćenog složenog neekvipotencijalnog uzemljivača na širem području Dugog Rata, sa ucrtanim ekvipotencijalnim linijama dobivenim proračunom za buduću konfiguraciju 110 kV mreže, vidljiv je na sl. 5.



Pokazuje se da u stanicama 110 kV oni iznose prema tablici VII., dok u lokalnoj distribucijskoj mreži ne prelaze vrijednosti od 100 V.

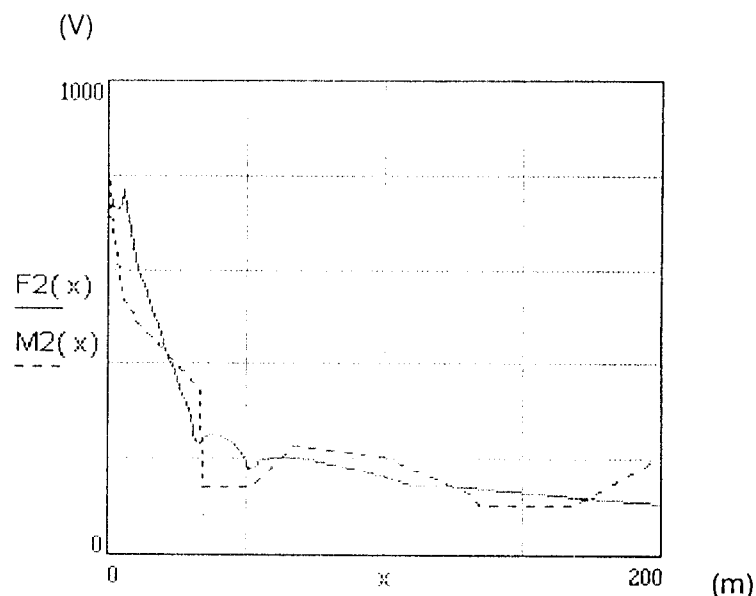
Naziv čvora	Kvar u TS "DUGI RAT"	Kvar u KS "DUGI RAT"
	Potencijal (V)	
TS "DUGI RAT"	695,0	638,1
KS "DUGI RAT"	184,6	326,6

U odnosu na postojeće stanje (1995.g), gdje su dobivene vrijednosti prema tablici VIII., najveći potencijali u TS "Dugi Rat" odnosno KS "Dugi Rat", smanjit će se za 31,7% odnosno 80%, premda je struja jednogpolnog kratkog spoja za 2005.g., veća za 10% odnosno 13%.

Tablica VIII.

Naziv čvora	Potencijal (V)	Struja I_{k1} (A)
TS "DUGI RAT"	1017,6	14936
KS "DUGI RAT"	1620,2	13814

Vršena je također usporedba proračunatih vrijednosti potencijalnog lijevka TS "Dugi Rat" sa vrijednostima izmjerenim prema [5]. Mjerenja su vršena duž tri pravca, a relativno najbolje slaganje dobiveno je duž najinteresantnijeg pravca "zapad" (sl. 6), koji prolazi od ograde stanice TS "Dugi Rat" prema centru mjesta.



Sl. 6. Usporedba izmjerenog (M2) i izračunatog (F2) potencijalnog lijevka TS "Dugi Rat" na pravcu "zapad", za postojeće stanje 1995.g.

6. ZAKLJUČCI

1. Postavljanje suvremenih kabela 110 kV sa dobro vodljivim ekranima/plaštovima i armaturama, zahtjeva kod analiza raspodjele struja i potencijala nastalih pri jednopolnom kratkom spoju, modeliranje sustava uzemljenja složenog od više 110 kV stanica te određivanje mjesta "nehomogenosti" vodova i reduciranih struja na tim mjetima. Rubne točke tog sustava su na krajevima pripadne kabelske mreže 110 kV.
2. Najveći iznosi reducirane struje u nekoj stanici 110 kV nastupi kada je jednopolni kvar u njoj samoj.
3. Na "unutarnjim" (kabliranim) stanicama jednopolni k.s. ne donosi velike iznose reduciranih struja neovisno o pložaju stanice u kojoj je nastao jednopolni kratki spoj. Taj relativni iznos je određen redukcijским faktorom kabela priključenih na tu stanicu. Posljedica toga jest da se kabliranjem zračnih vodova 110 kV u postojećim stanicama, značajno smanjuju potencijala njihovog uzemljenja, a time i opasnosti od iznošenja istih. Istovremeno bi se uzemljivač novih kabliranih stanica, uz jednake preostale parametre uzemljenja, mogao izvesti sa manjim utroškom metala.
4. Na "rubnim" stanicama Istovremeno se uspostavljaju znatno veći iznosi reduciranih struja. Na nepogođenim "rubnim" stanicama taj on može u nepovoljnim uvjetima iznositi i do 93,6% od struje $3I_0$ pripadnih zračnih vodova, a ako se radi o "rubnoj" stanici pogođenoj kvarom onda je još veći i može iznositi 96,5% od struje $3I_0$ dovedene pripadnim zračnim vodovima, uvećan još za iznos 13,3% od struje $3I_0$ dovedene pripadnim podzemnim kabelskim vodovima. Navedeni iznosi mogu se smanjiti primjenom zemnih užeta bolje vodljivosti barem na prvim rasponima od stanice.
5. Moguće je zamisliti situaciju kada jednopolni kvar na kabliranoj trafo-stanici donese veće opasnosti od iznesenih potencijala na rubnim stanicama nego kada je kvar u njima samima. Takva situacija može nastupiti ako kod tog kvara, iznos reducirane struje u rubnoj stanici nije bitno manji od iznosa kada je kvar u njoj samoj, ali je vrijeme prorade zaštite kod kvara u kabliranoj TS manje od vremena prorade zaštite kod kvara u rubnoj stanici.
6. Kod dvostrukih vodova 110 kV potrebno je da izlazne liste proračuna jednopolnog kratkog spoja daju raspodjelu istovremenih struja kvara po fazama duž oba voda, bez obzira na kojem vodu je nastao jednopolni kvar, što danas nije slučaj.

7. POPIS LITERATURE

- [1] Medić I.: "Proračun velikih uzemljivača odnosno uzemljivačkih sustava",
Elektricitet, Zagreb, br. 40, 1994, str. 40-42.