

**EKSTREMNO VISOKE UČESTALOSTI ISPADA TRANSFORMATORA  
NA OBODU GRADSKÉ KABLOVSKE I PRIGRADSKÉ NADZEMNE  
ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE 10 kV  
UZEMLJENE PREKO OTPORNOSTI OD 20 Ω I 400 Ω**

**T. Milanov  
PD »Elektrodistribucija Beograd«  
Beograd  
Srbija**

## **UVOD**

Beogradski elektroenergetski čvor, sa mrežama 110 kV i 35 kV, počeo je da se izgrađuje počev od 1953. godine sa prvom transformatorskom stanicom (TS) 110/35 kV (Beograd II) i čitavim nizom TS 35/10 kV. Intenzivan razvoj potrošnje električne energije implicirao je izgradnju prve TS 220/110 kV oko 1960. godine (Beograd III) te prve TS 400/220 kV oko 1970. godine (Beograd VIII). Te iste, 1970. godine u elektrodistributivnoj mreži u pogonu je i prva TS sa direktnom transformacijom 110/10 kV; danas je u pogonu oko stotinak visokonaponskih TS, i oko 6000 TS 10/0,4 kV sa cca 700.000 potrošača, na površini konzuma od cca 2800 km<sup>2</sup>.

Sa aspekta proračuna nesimetričnih struja kratkih spojeva treba napomenuti da je tretman neutralne tačke svih mreža danas različit, te su mreže 400 kV, 220 kV, 110 kV i 0,4 kV sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom, mreža 35 kV uzemljena preko male otpornosti u TS 110/35 kV sa ograničenjem struje jednofaznog zemljospoja na 300 A (u kablovskim mrežama 35 kV) do 1000 A (na područjima sa ekstremno dugačkim nadzemnim vodovima 35 kV), a mreža 10 kV takođe uzemljena preko male otpornosti od 20 Ω u TS 110/10 kV i 35/10 kV sa ograničenjem struje jednofaznog zemljospoja na 300 A (kablovska mreža 10 kV, kao i neizbežno pripadajuća nadzemna mreža zanemarljive prostranosti), deo mreže na nekoliko mikrореона uzemljen preko otpornosti od 400Ω sa ograničenjem struje jednofaznog zemljospoja na 15 A (ekstremno dugačke nadzemne mreže 10 kV), dok se najveći deo nadzemnih mreža 10 kV i danas nalazi u pogonu sa izolovanom neutralnom tačkom. Ovako različiti tretmani neutralne tačke visokonaponskih i srednjenaponskih elektrodistributivnih mreža posledica su uslova koji su postavljani pred pojedine naponske nivoe mreža u pogledu ograničenja prenapona pri zemljospojevima, kao i u pogledu ograničenja vrednosti struja kvara pri svim vrstama zemljospojeva.

Ovim radom će biti iznešeni rezultati proračuna svih vrsta nesimetričnih struja zemljospojeva u nadzemnim radijalnim elektrodistributivnim mrežama 10 kV u uslovima postojećih tretmana neutralne tačke mreža na konzumu PD "Elektrodistribucije-Beograd" ( u daljem tekstu EDB). Na taj način će se doći do zaključaka o uslovima koji treba da budu ispunjeni još u fazi izrade dugoročnih planskih programa za izgradnju svih mreža da se tretmanom neutralne tačke nadzemnih mreža postignu adekvatni efekti na ograničenju svih vrsta nesimetričnih struja zemljospojeva i pripadajućih prenapona u elektrodistributivnim mrežama. Takođe, u uslovima jednofaznih zemljospojeva, biće prikazane maksimalne vrednosti prelazne otpornosti na mestu kvara koje mogu da budu registrovane tj. obuhvaćene podešenošću klasične relejne zaštite na vodovima.

To je iznešeno zbog toga da se nađu uzroci izuzetno visokim učestalostima ispada energetskih transformatora 110/10 kV na obodu gradske kablovske mreže 10 kV sa uzemljenom neutralnom tačkom napojnih transformatora preko otpornosti od 20 Ω koji napajaju električnom energijom i prigradske nadzemne mreže 10 kV.

## **PREGLED UČESTALOSTI ISPADA TRANSFORMATORA 110/10 kV NA OBODU GRADSKÉ KABLOVSKE I PRIGRADSKÉ NADZEMNE MREŽE**

Gradske kablovske mreže su toliko pouzdane da u toku jedne kalendarske godine gotovo 80 % energetskih transformatora 110/10 kV ne ispada iz pogona ( a oko 20% transformatora 110/10 kV jednom ili nekoliko puta ) , a i oko 60 % kablovskih vodova 10 kV takođe ne ispada iz pogona u toku jedne kalendarske godine; međutim, po prirodi stvari, nadzemne prigradske i vangradske mreže nose sa sobom od 5 do 6 puta više ispada, a na područjima sa teškom energetskom situacijom i 20 puta više ispada.

Tipičan predstavnik visokopouzdanih gradskih mreža je TS 110/10 kV Slavija – za koju su u priloženoj tabeli dati uobičajeni pokazatelji pouzdanosti napajanja. Neutralna tačka napojnih transformatora je uzemljena preko preko otpornosti od 20 Ω.

### TS 110/10 KV SLAVIJA

	1985.	1991.	2001..	2005.
<b>Ukupno vodova 110 kV</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Ukupno ispada vodova 110 kV	0	0	0	0
Prosečno trajanje prekida	0 h	0 h	0 h	0 h
<b>Ukupno TS 110/10 kV</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
S <sub>inst.</sub> TS 110/10 kV- MVA	2x40	2x40	2x40	2x40
S <sub>max</sub> TS 110/10 kV- MVA	59,5	81	73,2	51
Ukupno ispada transformatora 110/10kV	1	0	0	0
Prosečno trajanje prekida	0,4 h	0 h	0 h	0 h
<b>Ukupno izvoda 10 kV</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>32</b>	<b>32</b>
Ukupno ispada izvoda 10 kV	9	33	13	14
Prosečno trajanje prekida	1,2 h	1,3 h	1,1 h	1,2 h
<b>SAIFI (prekida/potr. god.)</b>	<b>0,6</b>	<b>1,5</b>	<b>0,54</b>	<b>0,45</b>
<b>SAIDI (h/potr. god.)</b>	<b>0,74 h</b>	<b>0,76 h</b>	<b>0,6 h</b>	<b>0,54 h</b>
<b>CAIDI (h/prekidu)</b>	<b>0,44 h</b>	<b>0,51 h</b>	<b>0,55 h</b>	<b>0,45 h</b>
<b>Veličina ukupne neisporučene električne energije</b>	<b>22 MWh</b>	<b>60 MWh</b>	<b>28 MWh</b>	<b>31 MWh</b>
<b>% potrošača bez prekida zbog događaja u svim mrežama</b>	<b>40 %</b>	<b>0 %</b>	<b>46 %</b>	<b>55 %</b>
Ukupno TS 10/0,42 kV-kom.	128	173	195	122
Ukupno TS 10/0,42 kV-MVA	99,36	134,13	151,33	118,1

Međutim, na obodu gradske kablovske mreže 10 kV nalazi se i čitav niz TS 110/10 kV sa uzemljenom neutralnom tačkom napojnih transformatora preko otpornosti od 20 Ω a koje napajaju i prigradske slabopouzdana nadzemne mreže 10 kV; tipični predstavnici su TS 110/10 kV Mirijevo i Voždovac; očigledan je značajno veći broj ispada transformatora 110/10 kV u TS 110/10 kV Voždovac.

U ovoj TS 110/10 kV prekidači 10 kV su i danas maloujni, a zaštitni uređaji klasični.

Dalje su u produžetku rada dati uobičajeni pokazatelji pouzdanosti napajanja i troaonske TS 110/35/10 kV Rajla na prigradskom i vangradskom delu konzuma EDB gde se zapaža nešto veći broj ispada transformatora koji napajaju i dugačke nadzemne mreže 10 kV; energetski transformatori u njima su uzemljeni preko otpornosti od 400 Ω .

Ovde odmah treba napomenuti da su eksploataciona iskustva o pouzdanosti rada klasične relejne zaštite u elektrodistributivnim i prenosnim mrežama na potrošačkom području „ Elektrodistribucije Beograd“ u dosadanjem periodu bila izuzetno povoljna; pokazatelji govore o izuzetno pouzdanom radu klasičnih releja i danas u uslovima postepenog prelaska mreža EDB na eksploataciju integrisane zaštite sa računarskom podrškom u svakom objektu, sa čijim se uvođenjem u mrežama EDB otpočelo u prvim godinama dvadesetprvog veka.

### TS 110/10 KV VOŽDOVAC

	1985.	1991.	2001	2005.
<b>Ukupno vodova 110 kV</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
Ukupno ispada vodova 110 kV	0	0	1	0
Prosečno trajanje prekida	0	0	0,2	0
<b>Ukupno TS 110/10 kV</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
S <sub>inst.</sub> TS 110/10 kV- MVA	2x31,5	2x31,5	2x31,5	2x31,5
S <sub>max</sub> TS 110/10 kV- MVA	37,5	51	64	61,8
Ukupno ispada transformatora 110/10kV	8	10	12	9
Prosečno trajanje prekida	0,4 h	0,5 h	0,6 h	29,6 min.

<b>Ukupno izvoda 10 kV</b>	<b>24+1</b>	<b>28</b>	<b>33</b>	<b>33</b>
Ukupno ispada izvoda 10 kV	0+31	36+30	13	35
Prosečno trajanje prekida	(3,8) h	1,2 ( 2,6 )	1,5	2,5
<b>SAIFI (prekida/potr. god.)</b>	<b>9,24</b>	<b>12,3</b>	<b>13,4</b>	<b>10,7</b>
<b>SAIDI (h/potr. god.)</b>	<b>18,5</b>	<b>12,3</b>	<b>10,7</b>	<b>10,7</b>
<b>CAIDI (h/prekidu)</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>10,8</b>	<b>1</b>
<b>Veličina ukupne neisporučene električne energije</b>	<b>250 MWh</b>	<b>240 MWh</b>	<b>148 MWh</b>	<b>230 MWh</b>
<b>% potrošača bez prekida zbog događaja u svim mrežama</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>
Ukupno TS 10/0,42 kV-kom.	129	174	227	214
Ukupno TS 10/0,42 kV-MVA	87,96	120,43	155,79	153,51

Takođe, treba naglasiti i to da elektrodistributivnu mrežu EDB i dalje treba izgrađivati na principima stalne interpolacije novih objekata u postojeće mreže - kako zbog nedovoljnih rezervi u kapacitetima visokonaponskih mreža ( u kojoj su mnogi objekti punooptrećeni ili čak i sistematski preopterećivani i u normalnim pogonu ), tako i zbog svakodnevnog pogona sa ispoljenim sniženim nivoima ukupne tehnookonomije eksploatacije ( pri tome dispečerskim aktivnostima omogućiti ispoljavanje što većih nivoa maksimuma Gauss – ovog zakona normalne raspodele procentualnih opterećenja i TS i vodova oko srednje vrednosti za sve mreže, pa tek tada odrediti prioritete u izgradnji nove kapitalne mreže ). Prosečni nivoi starosti velikih elektrodistributivnih mreža svuda u svetu se iz dana u dan neumitno povećavaju, a održavanju ispoljavanja ukupne tehnookonomije elektrodistributivne delatnosti na potreban nivo mora se u nas regulisati na krajnje zaoštrenim principskim relacijama; revitalizacija postojećih objekata mreža treba da bude sistematska svakodnevna aktivnost samo službi u eksploataciji mreža a ne i službi koje sprovode kapitalno investiranje kroz nove objekte mreža - jer čak i obimne rekonstrukcije objekata postojećih mreža impliciraju ulaganje neuporedivo manjih finansijskih sredstava nego kapitalno investiranje u nove objekte mreža.

#### TS 110/35/10 KV RALJA

	1985.	1991.	2001	2005.
<b>Ukupno vodova 110 kV</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
Ukupno ispada vodova 110 kV	4	0	4	4
Prosečno trajanje prekida	1,1	0 h	0,4 h	0,5
<b>Ukupno TS 110/10 kV</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
S <sub>inst.</sub> TS 110/10 kV- MVA	2x31,5/21	2x31,5/21	2x31,5/21	2x31,5/21
S <sub>max</sub> TS 110/10 kV- MVA	6,7	17,6	15,1	13,1
Ukupno ispada transformatora 110/10kV	10	6	3	2
Prosečno trajanje prekida	1 h	1,2 h	1,2 h	0,5 h
<b>Ukupno izvoda 10 kV</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>11</b>
Ukupno ispada izvoda 10 kV	33	50	33	8
Prosečno trajanje prekida	7,5 h	6,4	2,3	2,2
<b>SAIFI (prekida/potr. god.)</b>	<b>13,1</b>	<b>9,25</b>	<b>8,5</b>	<b>5,7</b>
<b>SAIDI (h/potr. god.)</b>	<b>64</b>	<b>39,8</b>	<b>17</b>	<b>5,7</b>
<b>CAIDI (h/prekidu)</b>	<b>4,9</b>	<b>4,3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Veličina ukupne neisporučene električne energije</b>	<b>552 MWh</b>	<b>361 MWh</b>	<b>146 MWh</b>	<b>75 MWh</b>
<b>% potrošača bez prekida zbog događaja u svim mrežama</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>
Ukupno TS 10/0,42 kV-kom.	70	97	128	133
Ukupno TS 10/0,42 kV-MVA	18 95	29,59	40,28	42,28

Zbog oduvek višestruko viših nivoa ispoljavanja pokazatelja pouzdanosti TS u odnosu na kablovske i naročito nadzemne mreže na konzumu EDB, nameće se imperativ da se nastavi sa započetim aktivnostima na zamenu raubovanih rasklopnih elemenata novim zbog visokih nivoa starosti mnogih TS ( ne kao dosada pojedinačnim intervencijama već zamenom u kompletnim postrojenjima ).

Zato ćemo u nastavku rada nešto više pažnje pokloniti proračunima nesimetričnih struja kratkih spojeva u nadzemnim mrežama 10 kV – kako bi smo došli do očiglednog zaključka o stvarnim uzrocima nešto veće učestalosti ispada energetskih transformatora 110/10 kV koji pored gradske kablovske napajaju električnom energijom i prigradске nadzemne mreže.

### VREDNOSTI NESIMETRIČNIH STRUJA KRATKIH SPOJEVA U NADZEMNOJ ELEKTRODISTRIBUTIVNOJ MREŽI 10 kV NA KONZUMU EDB

Proračuni nesimetričnih struja svih vrsta zemljospojeva baziraju na rešavanju opštih i dopunskih jednačina kratkih spojeva sa impedansama direktnog, inverznog i nultog redosleda od napojne TS do mesta kvara. Ovde su u priloženoj tabeli I prikazani rezultati proračuna vrednosti struja zemljospojeva u zavisnosti od tretmana neutralne tačke mreža te dužine radialnih nadzemnih vodova 10 kV. Proračuni su rađeni za slučaj da prelazna impedansa na mestu kvara ima vrednost  $Z_k=0\Omega$  (tzv. "metalnizemljospoj").

**TABELA I - Vrednosti simetričnih i nesimetričnih struja kratkih spojeva u funkciji od dužina dalekovoda 10 kV pri različitom tretmanu neutralne tačke mreže 10 kV**

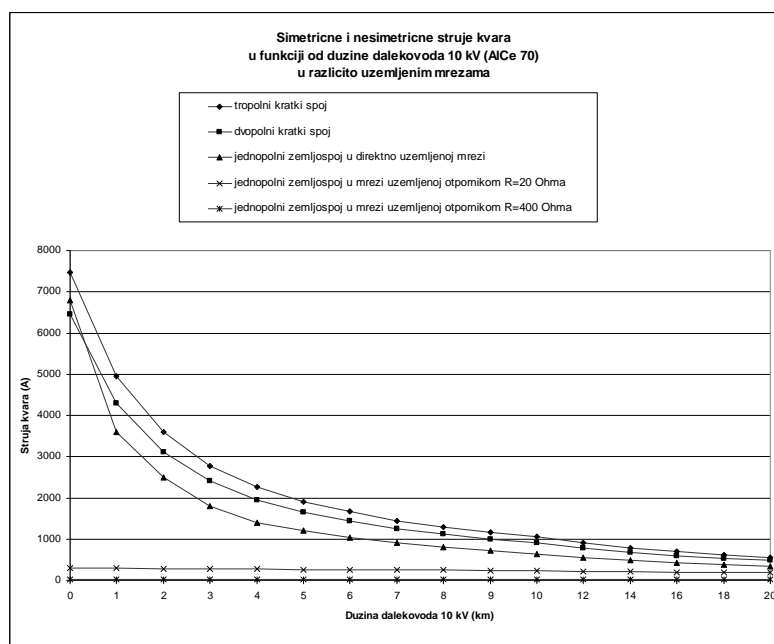
Dužina dalekovoda 10 kV AIČ 3x70mm <sup>2</sup>	Tropolni kratki spoj (A)	Dvopolni kratki spoj (A)	JEDNOPOLNI ZEMLJOSPOJ					
			Direktno uzemljena mreža		Mreža uzemljena preko $R_{NT} = 20\Omega$		Mreža uzemljena preko $R_{NT} = 400\Omega$	
			(A)	$\underline{Z}_o / \underline{Z}_d$	(A)	$\underline{Z}_o / \underline{Z}_d$	(A)	$\underline{Z}_o / \underline{Z}_d$
0 km	7470	6460	6800	1 (0°)	298	67,98 (-84,7°)	14,99	1357,5 (-84,8°)
1 km	4960	4290	3600	1,77 (8,4°)	291	45,6 (-65,1°)	14,97	902,7 (-67,2°)
5 km	1900	1644	1200	2,39 (22,47°)	263	18,2 (-42,2°)	14,91	347,5 (-49°)
10 km	1060	917	640	2,52 (26,5°)	232	10,7 (-31,8°)	14,83	193,5 (-43,9°)
12 km	900	778	550	2,55 (27,2°)	221	9,3 (-28,8°)	14,77	164,3 (-42,9°)
14 km	780	675	480	2,56 (27,8°)	210	8,3 (-26,1°)	14,76	142,8 (-42,1°)
16 km	690	597	420	2,57 (28,3°)	200	7,5 (-23,7°)	14,73	126,3 (-41,5°)
18 km	620	536	380	2,57 (28,6°)	191	6,87 (-21,5°)	14,68	112,6 (-40,9°)
20 km	560	484	340	2,6 (28,9°)	183	6,4 (-19,4°)	14,6	102,6 (-40,4°)

**Napomena:** Mreža 10 kV se napaja iz TS 35/10 kV sa energetskim transformatorima 35/10 kV sprege namotaja Dy5

Na priloženom dijagramu na sl.1 prikazane su simetrične i nesimetrične struje kratkih spojeva u funkciji od dužine vodova 10kV pri tretmanu neutralne tačke kao u tabeli I. Priložena tabela i dijagram sa proračunatim vrednostima nesimetričnih struja zemljospojeva govore da se direktnim uzemljenjem neutralne tačke nadzemnih mreža postižu značajno veće vrednosti struja nesimetričnih zemljospojeva pri "bliskim kvarovima" do napojnih TS, dok se uzemljenjem neutralne tačke mreža preko male otpornosti postižu veoma stabilne vrednosti struja zemljospojeva maltene nezavisno od dužine vodova koji su pogođeni kvarom. Sa povećanjem vrednosti otpornosti u neutralnoj tački mreža (npr. za mrežu 10 kV na vrednost od 400  $\Omega$ ) struje jednofaznih zemljospojeva se značajno redukuju i dobijaju vrednosti kao u uslovima da je neutralna tačka mreže izolovana; Međutim, u ovim uslovima se postiže pouzdano registrovanje i ovih malih vrednosti struja kvara odgovarajućom relejnom zaštitom (npr. vatmetarskim relejima) kao i selektivno isključenje vodova pogođenih kvarom.

### MAKSIMALNE VREDNOSTI PRELAZNE OTPORNOSTI NA MESTU KVARA KOJE MOGU BITI OBUHVAĆENE PODEŠENOŠĆU RELEJNE ZAŠTITE NA VODOVIMA U IZVORNIM TS

Vrednosti nesimetričnih struja zemljospojeva u radialnim nadzemnim elektrodistributivnim mrežama, u zavisnosti od tretmana neutralne tačke mreža i dužine vodova, određene su za slučaj da prelazna impedansa na mestu kvara ima vrednost  $Z_k=0\Omega$  (tzv. "metalni zemljospoj"). Međutim, u realnim uslovima prelazna otpornost na mestu kvara može da ima i značajne vrednosti, npr. kao prematabelili:



Sl. 1. Simetrične i nesimetrične struje kvara u funkciji od dužine dalekovoda 10 kV (AIČe 70) u različito uzemljenim mrežama

**TABELA II - Prelazna otpornost na mestu kvara  $R_k$  ( $\Omega$ )**

Mesto pada provodnika i temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Prelazni otpor $R_k$ ( $\Omega$ )
Zemljani put sa blatom (glina)	8-20 $\Omega$
Suva zemlja ( $-1^{\circ}\text{C}$ )	400 $\Omega$
Put popločan kamenom	750 $\Omega$
Zemlja sa vlažnom travom ( $-12^{\circ}\text{C}$ )	800 $\Omega$
Jarak kraj puta bez vode ( $0^{\circ}\text{C}$ )	100 $\Omega$
Jarak kraj puta sa vodom	4 $\Omega$
Izorana nađubrena zemlja	140 $\Omega$
Asfalt na betonskoj podlozi	$\infty$ $\Omega$

Relejna zaštita za trolpolne kratke spojeve prekostrujnim relejima IR10 je u mreži 10 kV podešena na cca  $I_z = 1600 \text{ A}$  - što znači da su do dužine dalekovoda 10 kV reda 5 Km svi elementi postrojenja 10 kV u TS 10/0,4 kV štice relearnom zaštitom. Na delovima sa dugačkom mrežom 10 kV relej IR10 može da štiti mrežu i sa podešenjem na  $I_z = 800 \text{ A}$ , čime bi se obuhvatili svi dalekovodi dužine do cca 10 Km. Pri tome se može obuhvatiti i prelazni otpor na mestu kvara - kako je to prikazano tabelom III.

**TABELA III**

Dužine dalekovoda 10 kV, AIČ 70	Prelazna otpornost na mestu kvara $R_k$ max	
	$I_z = 1600 \text{ A}$	$I_{z_{\min}} = 800 \text{ A}$
0 Km	max 3,9 $\Omega$	max 8,1 $\Omega$
1 Km	max 3,4 $\Omega$	max 7,6 $\Omega$
5 Km	max 0,93 $\Omega$	max 5,6 $\Omega$
10 Km	-	max 2,6 $\Omega$
20 Km	-	-

Maksimalne vrednosti prelaznog otpora na mestu kvara određene su prema relacijama:  
- za trolpolni kratki spoj i podešenost relejne zaštite na 1600 A (800 A) :

$$I_z = \frac{1,1 \cdot U_{fr}}{\sqrt{(R_d + R_k)^2 + X_d^2}} = 1,6 \text{ (ili 0,8) kA}$$

odnosno:

$$R_k = \sqrt{\left(\frac{1,1 U_{fr}}{1,6}\right)^2 - X_d^2} - R_d$$

Kako je zemljospojna zaštita na nadzemnim vodovima na konzumu JP EDB podešena na 60 A (odnosno 4 A), to se maksimalna vrednost prelaznog otpora na mestu kvara koja može da bude obuhvaćena podešenošću zemljospojne relejne zaštite može odrediti prema relaciji:

$$I_z = \frac{3U_{sr}}{\sqrt{(2R_d + R_o + R_k)^2 + (2X_d + X_o)^2}} = 0,06kA \text{ (ili } 0,004kA)$$

odnosno:

$$3R_k = \sqrt{\left(\frac{3U_{fr}}{0,06}\right)^2 - (2X_d + X_o)^2} - (2R_d + R_o)$$

Za nadzemnu mrežu 10 kV tipskih preseka maksimalne vrednosti prelazne otpornosti na mestu kvara koje mogu biti obuhvaćene podešenošću zemljospojne relejne zaštite su date u tabeli IV.

**TABELA IV- Maksimalna vrednost prelazne otpornosti na mestu kvara  $R_k$  ( $\Omega$ ) za vod 10 kV koja može da bude registrovana klasičnom relejnom zaštitom**

Dužina dalekovoda 10 kV AlČ 3x70 mm <sup>2</sup>	Prelazna otpornost na mestu kvara $R_k$ ( $\Omega$ )	
	Mreža uzemljenja preko otpornosti od 20 $\Omega$ a zemljospojna zaštita podešena na 60 A	Mreža uzemljena preko otpornosti od 400 $\Omega$ a zemljospojna zaštita podešena na 4 A
0 km	max 79,9 $\Omega$	max 1099 $\Omega$
1 km	max 79,5 $\Omega$	max 1099 $\Omega$
5 km	max 77,3 $\Omega$	max 1097 $\Omega$
10 km	max 75 $\Omega$	max 1095 $\Omega$
20 km	max 69,7 $\Omega$	max 1091 $\Omega$

#### NAPONI ISPRAVNIH FAZA NA MESTU KVARA PRI ZEMLJOSPOJEVIMA

Naponi ispravnih faza pri svim vrstama nesimetričnih kratkih spojeva u mrežama zavise od odnosa impedansi nultog i direktnog redosleda od napojne TS do mesta kvara. Vrednosti odnosa impedansi  $Z_o/Z_d$  u zavisnosti od dužine radialnih nadzemnih vodova i tretmana neutralne tačke mreže su prikazane u Tabeli I pri jednofaznim zemljospojevima za radialne nadzemne vodove 10 kV.

Kako govori tabela I, odnosi  $\frac{Z_o}{Z_d}$  u nadzemnoj mreži 10 kV su u opsegu od 1 do 2,6 u direktno uzemljenoj mreži 10 kV sa

vodovima dužine do 20 km, u mrežama uzemljenim preko otpornosti od 20  $\Omega$  u opsegu od 67 do 6,4, a u mreži uzemljenoj preko otpornosti od 400  $\Omega$  u opsegu od 1357 do 102,6.

U priloženoj tabeli V su prikazane vrednosti napona ispravnih faza na mestu kvara pri jednofaznim zemljospojevima pri različitom tretmanu neutralne tačke mreže 10 kV, a na sl. 2 i adekvatni dijagrami, naravno u funkciji od dužine radialnih nadzemnih vodova.

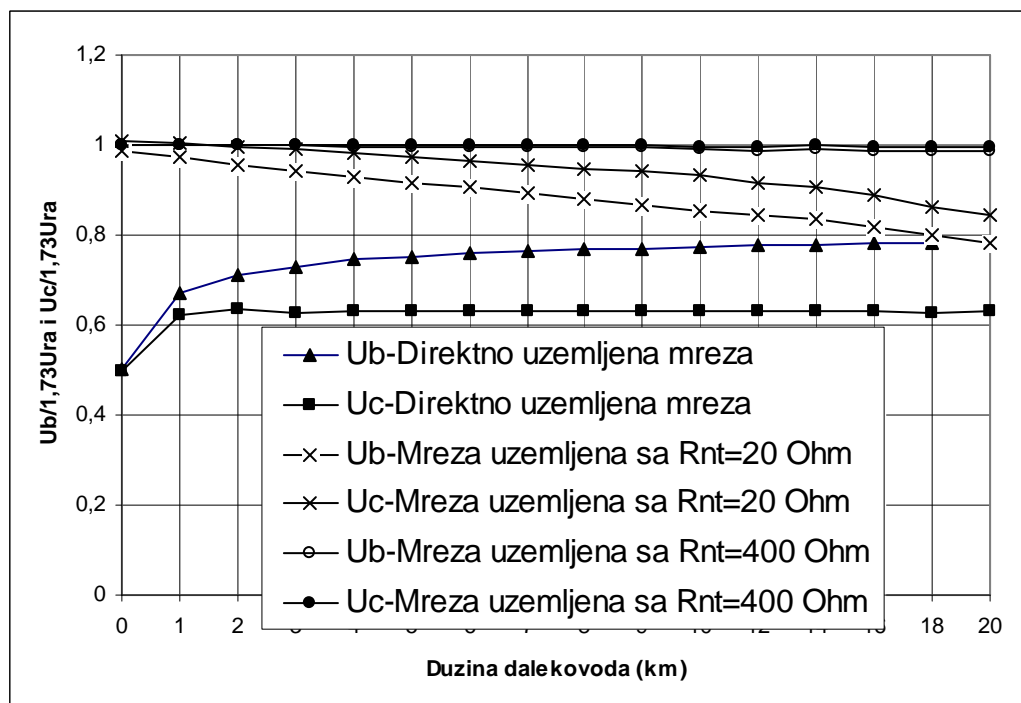
Kako priložene tabele i dijagram kazuju, pri direktno uzemljenoj neutralnoj tački nadzemne mreže 10 kV postižu se prenaponi na ispravnim fazama u granicama do 80% vrednosti međufaznog radnog napona mreže, a mreže uzemljene preko otpornosti od 20  $\Omega$  i 400  $\Omega$  ponašaju se u ovom smislu kao mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, sa stabilnim naponima ispravnih faza skoro nezavisno od dužine vodova 10 kV.

Pri dvofaznim zemljospojevima i dvofaznim kratkim spojevima napon ispravne faze je istog reda veličine kao naponi ispravnih faza pri jednofaznom zemljospoju.

**TABELA V - Naponi ispravnih faza na mestu kvara pri jednofaznom zemljospoju**

Dužina dalekovoda 10 kV, AlČ 3x70 mm <sup>2</sup>	Direktno uzemljena mreža		Mreža uzemljena preko $R_{NT}=20 \Omega$		Mreža uzemljena preko $R_{NT}=400 \Omega$	
	$U_b/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_c/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_b/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_c/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_b/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_c/\sqrt{3}U_{ra}$
0 Km	0,5	0,5	0,985	1,00	1,00	1,00
1 Km	0,6699	0,6208	0,973	1,00	0,9999	1,00
5 Km	0,7527	0,6298	0,915	0,973	0,995	0,999
10 Km	0,7728	0,6296	0,855	0,935	0,99	0,996
12 Km	0,7767	0,63	0,846	0,917	0,988	0,996
14 Km	0,7792	0,63	0,834	0,906	0,991	0,999
16 Km	0,7817	0,63	0,817	0,887	0,989	0,998
18 Km	0,7825	0,628	0,789	0,853	0,986	0,996
20 Km	0,785	0,629	0,783	0,844	0,985	0,994

Vrednosti prenapona na ispravnim fazama pri jednofaznim i dvofaznim zemljospojevima su u dozvoljenim granicama u odnosu na izolacioni nivo mreže 10 kV - Si 12.



Sl. 3 Naponi ispravnih faza pri jednofaznom zemljospoju u različito uzemljenim mrežama

#### UZROCI VEĆE UČESTALOSTI ISPADA TRANSFORMATORA 110/10 KV KOJI NAPAЈAJU I NADZEMNE MREŽE

Ovde iznešeni proračuni govore da pri izuzetno velikim vrednostima otpornosti na mestu kvara zaštitni uređaji na izvodima 10 kV ne mogu da registruju ovako male vrednosti struja zemljospoja i da tada posle određene vremenske zadržke iz pogona ispada energetski transformator 110/10 kV koji ipak detektuje i još manje struje zemljospoja; situacija je retka kod objekata koji na izvodima 10 kV imaju vatmetarsku zaštitu preko klasičnih releja RE 55, ali izuzetno česta kod objekata koji na izvodima 10 kV imaju klasičnu prekostrujnu zemljospojnu zaštitu.

Svakako da i podešavanje nivoa detekcije struja zemljospoja na energetskom transformatoru ( na otporniku za uzemljenje neutralne tačke transformatora ) treba da bude iznad nivoa reagovanja zaštite na izvodima 10 kV, kako bi energetski transformator ispao iz pogona samo ukoliko »zakaže« isključenje na izvodu 10 kV, naravno, detektujući možda i veće vrednosti struje zemljospoja ( normalno, i sa »dovoljno« dužom vremenskom zadržkom nego na izvodu 10 kV ). Ovo podešavanje selektivnosti ne zavisi od vrednosti otpora u neutralnoj tački energetskog transformatora.

## ZAKLJUČAK

*Brza elektrifikacija svih naselja počev od 1950. godine i intenzivan razvoj potrošnje električne energije na konzumu JP EDB, kao uostalom i u svim elektrodistributivnim preduzećima u Srbiji, nametali su veoma oštre uslove pred eksploataciju svih mreža. Čak i danas su na mnogim područjima sa nadzemnim vodovima 35 kV i 10 kV simetrične trolne struje kvara manje od minimalno dozvoljenih, naravno sa aspekta dovoljno pouzdanog registrovanja klasičnom relejnom zaštitom. Međutim, kako su jednofazni zemljospojevi neuporedivo češći (u ukupnom broju kvarova njihovo učešće je preko 90%) tretmanom neutralne tačke mreža postignuto je dovoljno pouzdano registrovanje nesimetričnih struja kratkih spojeva sa vremenskim zatezanjem od cca 0,5-1 sec. Na taj način su sve mreže u ovom periodu intenzivne izgradnje bile štichene prema raspoloživim mogućnostima klasične relejne zaštite.*

*U narednim periodima izgradnje i eksploatacije elektrodistributivnih mreža trebalo bi preduzeti sve mere na polju što bržeg uvođenja savremene zaštite svih slabopouzdatih mreža, a svakako i adekvatnu izgradnju izvora u visokonaponskim i sredjenaponskim mrežama. Jedino na taj način može da se omogući dovoljno pouzdano registrovanje struja kvara u svim nadzemnim mrežama i maksimalno redukuje razaranje elementa mreže koji je u kvaru.*

## KORIŠĆENA LITERATURA

(Lit. 1) Park.R.H., »Two reaction Theory Synchronous Machines, part I, Generalized Method of Analysis«, Transaction AIEE, vol.48.,p.p. 716-30, 1929.

(Lit. 2) Clarke E., »Circuit Analysis of a-c Power Systems«, Vol. I and II, John &Wiley, New York, 1956

(Lit. 3) Dr. Lj. Popović, dipl. el. Inž., »General Equations of the Line Represented by Descret Parametres part I – Steady States«, IEEE Transactions of Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991

(Lit. 4) Prof. Dr. Jovan Nahman, dipl.el.inž., »Uzemljenje neutralne tačke elektrodistributivnih mreža«, knjiga, Beograd, 1980.



**EXTREMELY HIGH LEVELS OF INTERRUPTIONS OF TRANSFORMERS  
IN 10 kV CABLE AND OVERHEAD POWER DISTRIBUTION NETWORK  
EARTHED VIA RESISTANCE 20  $\Omega$  AND 400  $\Omega$**

T. Milanov

*This paper presents the values of calculated asymmetrical short-circuit currents and associated overvoltages in power distribution networks with radial 10 kV overhead lines, of the type cross sections, and depending on neutral point treatment and the length of the lines. The calculations were carried out for the values of transition impedance on the fault location  $Z_k=0\Omega$  (so called metallic earth fault).*

*The second part of the paper determines the maximal values of transition resistance on the fault location,  $R_k (\Omega)$ , which may be encompassed by the conventional relay protection in source TS, naturally as a function of the length of the lines, relay protection settings, as well as a network neutral point treatment.*

*It is concluded that upon a construction of the prospective power distribution network the care should be taken that the overhead power networks must be isolated from cable power networks in order not to conclude extremely high levels of interruptions of transformers X/10 kV.*

**Key words:**

- overhead networks
- asymmetrical short circuits currents
- transition resistively on fault location
- over voltages due to single pole earth faults

**EKSTREMNO VISOKE UČESTALOSTI ISPADA TRANSFORMATORA  
NA OBODU GRADSKÉ KABLOVSKÉ I PRIGRADSKÉ NADZEMNE  
ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE 10 kV  
UZEMLJENE PREKO OTPORNOSTI OD 20  $\Omega$  I 400  $\Omega$**

T. Milanov

PD »Elektrodistribucija Beograd«

Beograd

Srbija

**Kratak sadržaj:**

*Radom se iznose iznose učestalosti ispada energetskih transformatora 110/10 kV na obodu gradske kablovske i prigradske nadzemne mreže 10 kV koje su toliko visoke da su implicirale obimna studijska istraživanja uzroka ovih ispada*

*U drugom delu rada iznose se proračunima dobijene vrednosti nesimetričnih struja kvara i pripadajućih prenapona u elektrodistributivnim mrežama sa radijalnim nadzemnim vodovima 10 kV, tipskih preseka, a u zavisnosti od tretmana neutralne tačke mreža i dužine vodova. Proračuni su rađeni za vrednost prelazne impedanse na mestu kvara  $Z_k=0\Omega$  (tzv. metalni zemljospoj).*

*U trećem delu rada određene su maksimalne vrednosti prelaznog otpora na mestu kvara,  $R_k (\Omega)$ , koje može da obuhvati klasična relejna zaštita u izvornim TS, naravno u funkciji od dužine vodova, podešenosti reagovanja relejne zaštite, kao i tretmana neutralne tačke mreža.*

*Zaključuje se da pri izgradnji perspektivne elektrodistributivne mreže treba itekako voditi računa o tome da se područja sa nadzemnim mrežama »odvoje« od gradskih kablovskih mreža 10 kV sa uzamlenom neutralnom tačkom transformatora preko otpornosti od 20  $\Omega$ , i nadzemne mreže napajaju električnom energijom iz prigradskih TS X/10 kV sa uzemljenom neutralnom tačkom transformatora preko otpornosti od 400  $\Omega$ .*

**Ključne reči:**

- nadzemne mreže
- nesimetrične struje kratkih spojeva
- prelazna otpornost na mestu kvara
- prenaponi pri jednopolnim zemljospojevima