

PRORAČUN FAKTORA UZEMLJENJA I NAJVEĆE STRUJE KROZ OTPOR RASPROSTIRANJA UZEMLJIVAČA U MREŽI HRVATSKE 2005. I 2010. GODINE

Mr. sc. Davor Nevećerel, Zagreb

UDK 621.316.993
STRUČNI ČLANAK

Izložena je problematika proračuna faktora uzemljenja i najveće struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine, proširene ažuriranom mrežom 2000. godine.

Ključne riječi: uzemljenje, faktor uzemljenja, struja kroz sustav uzemljenja, struja kroz otpor rasprostiranja.

Zadatak

Zadatak izloženog materijala je bio da se u dodatku studiji "Proračun struja kratkog spoja u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine", IE d.d./1999. izradi proračun faktora uzemljenja i najveće struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine. U dogovoru s Naručiteljem je za elektroenergetska postrojenja za koja ne postoje mjereni podaci (ili nisu dovoljno pouzdani) izvršena procjena potrebnih parametara (otpora rasprostiranja) prema iskustvenim podacima.

1. UVOD

Proračun faktora uzemljenja i najveće struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača temelji se na proračunu jednopolnog kratkog spoja. Stoga će se u nastavku ukratko prikazati osnove matematičkog modela proračuna kratkog spoja, zbog kasnijih izlaganja.

Proračun kratkog spoja provodi se prema [2] i [3], uz pretpostavku napona prije nastanka kvara jednakim nazivnom naponu pomnoženom sa naponskim faktorom $c = 1.1$.

Struje u čvorištu k gdje je nastao kvar određuju se prema matičnom izrazu:

$$\underline{I}_{k(F)}^{sim} = \underline{Y}_F^{sim} (1 + \underline{Z}_{kk}^{sim} \underline{Y}_F^{sim})^{-1} \underline{E}_{k(0)}^{sim} \quad (1)$$

Naponi u čvorištu k određuju se prema matičnom izrazu:

$$\underline{U}_{k(F)}^{sim} = (1 + \underline{Z}_{kk}^{sim} \underline{Y}_F^{sim})^{-1} \underline{E}_{k(0)}^{sim} \quad (2)$$

U izrazu (1) pojedine matrice u sustavu simetričnih komponenata (sim) imaju sljedeće značenje:

- \underline{Y}_F = matrica kvara [2],
- \underline{Z}_{kk} = vlastita impedancija čvorišta k
- $\underline{E}_{k(0)}$ = vektor napona prije nastanka kvara
- sim = općenita oznaka za simetrične komponente

- matrice kvara za trolpolni i jednopolni kratki spoj su:

	tropolni kratki spoj			jednopolni kratki spoj			
y_F	0	0	0	$y_F/3$	1	1	1
	0	1	0		1	1	1
	0	0	1		1	1	1

Relacija između faznih i simetričnih veličina opisana je Fortescueovom matricom transformacija \underline{T} : $\underline{A}^{faz} = \underline{T} \underline{A}^{sim}$

2. PRORAČUN FAKTORA UZEMLJENJA U MREŽI 400, 220 I 110 kV HRVATSKE

Određivanje faktora uzemljenja je od značenja kod odabira odgovarajućih odvodnika prenapona. Pri tome se faktor uzemljenja određuje na temelju rezultata proračuna jednopolnog kratkog spoja, uspoređujući veći od napona zdravih faza kod jednopolnog kratkog spoja prema nazivnom naponu elektroenergetskog sustava.

2.1. Matematički model

Naponi u faznim komponentama na mjestu jednopolnog kratkog spoja u fazi A ($\underline{U}_A = 0$), prema izrazu (2) uz $\underline{a} = 1/120^0$ i $\underline{a}^2 = 1/-120^0$ iznose:

$$\begin{matrix} U_{k(F)}^a \\ U_{k(F)}^b \\ U_{k(F)}^c \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{3z_F}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3z_F} \\ \frac{Z_{kk}^{(0)} + \underline{a}^2 Z_{kk}^{(1)} + \underline{a} Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3z_F} \\ \frac{Z_{kk}^{(0)} + \underline{a} Z_{kk}^{(1)} + \underline{a}^2 Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3z_F} \end{matrix} \quad (3)$$

Vrijednost faktora uzemljenja određuje se sada prema poznatom izrazu, koji uspoređuje veći od napona zdravih faza kod jednopolnog kratkog spoja prema nazivnom naponu elektroenergetskog sustava

$$\underline{K}_z = \sqrt{3} \max(\underline{U}_{k(F)}^b, \underline{U}_{k(F)}^c) / \underline{U}_{k(F)} \quad (4)$$

u kontroli da li je uvjet djelotvornosti uzemljenja (faktor uzemljenja $\underline{k}_z < 1.4$) zadovoljen (radi se ustvari o omjeru nulte i direktne nadomjesne impedancije elek-

troenergetskog sustava, tj. kontrolira se da li vrijede relacije $0 < X_d / X_d < 3$ i $R_d / X_d < 3$).

2.2. Proračun faktora uzemljenja

Proračun faktora uzemljenja za prijenosnu mrežu HEP-a za nazivne 2000., 2005. i 2010. godinu, prema referentnoj studiji [1] i izloženom matematičkom modelu, nalazi se kompletno u tablici 1.

Tablica 1. Pregled faktora uzemljenja i najvećih struja kroz otpor rasprostiranja uzemljivača u razdoblju 2000. do 2010. godine, svrstanih prema redoslijedu u referentnoj studiji [1] za mrežu 2010. godine.

Broj ime postrojenja	Ru (Ω)	faktor uzemljenja Kuz			Iuz(A) kroz sustav uzemljenja			Iu(A) kroz otpor rasprostiranja uzemlj.			oznaka		
		2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.
1 MELINA	.183	1.09	1.10	1.11	4195.	4400.	4540.	3157.	3312.	3417.			
2 MELI220A	.183	.98	.98	.98	9753.	9977.	10106.	7065.	7227.	7321.	*	*	*
3 T-RIJEKA	.080	.99	1.00	1.00	9913.	10119.	10257.	9244.	9436.	9564.			
4 PEHLIN	.174	1.05	1.05	1.05	7966.	7999.	8075.	6387.	6413.	6474.			
5 H-SENJ	.160	1.06	1.06	1.06	5479.	5540.	5568.	4932.	4987.	5012.	***	***	***
6 BRINJE	.176	1.16	1.16	1.16	6497.	6559.	6580.	5491.	5544.	5561.			
7 T-PL220A	.100	.96	.96	.95	6248.	6336.	5934.	5711.	5791.	5194.	***	***	***
9 VODN110A	.100	1.04	1.04	.95	5095.	5179.	5601.	4458.	4532.	5117.			***
10 MELI110A	.183	.95	.95	.95	14603.	14914.	15100.	8749.	8935.	9047.	***	***	***
11 kraljevi	.100	1.10	1.10	1.11	5936.	6006.	6177.	5344.	5407.	5561.			
12 kraljev1	.100	1.06	1.07	1.07	5772.	5843.	5998.	5195.	5259.	5399.			
13 silo	.100	1.10	1.10	1.11	2677.	2709.	2816.	2372.	2400.	2496.			
14 OMISALJ	.214	1.06	1.06	1.07	4247.	4300.	4662.	2707.	2742.	2972.	*	*	*
15 DINA	.100	1.08	1.08	1.09	2426.	2455.	2581.	2286.	2313.	2432.			
16 H-RIJEKA	.317	.98	.98	.98	8562.	8833.	8941.	6414.	6617.	6698.			
17 SUSAK	.100	1.04	1.04	1.04	7056.	7168.	7223.	5997.	6092.	6139.	***	***	***
18 PODVEZIC	.100	1.05	1.05	1.05	8877.	9016.	9085.	8282.	8412.	8476.			
19 MATULJI	.282	1.08	1.04	1.03	7961.	10188.	10387.	5618.	6519.	6644.			
20 SAPJANE	.100	1.16	1.16	1.16	4572.	4865.	4892.	4178.	4445.	4470.			
21 LOVRAN	.275	1.12	1.12	1.12	4758.	5245.	5318.	3757.	4142.	4199.			
22 H-VINODO	.190	1.01	1.01	1.02	7842.	8040.	8389.	5704.	5849.	6102.	*	*	*
23 H-SE110A	.160	.97	.97	.97	11999.	11944.	11902.	11091.	11040.	11001.	***	***	***
24 DELNICE	.641	1.12	1.13	1.12	2522.	2567.	2719.	1535.	1563.	1655.			
25 MORAVICE	.100	1.17	1.18	1.15	2730.	2802.	3057.	2517.	2584.	2817.			
26 VRATA	.100	1.10	1.11	1.11	6650.	6824.	6922.	5819.	5970.	6056.			
27 PLASE	.100	1.06	1.06	1.07	9208.	9382.	9561.	8056.	8209.	8365.			
28 PEHL110A	.174	.95	.95	.95	10053.	10816.	10981.	7731.	7640.	7122.	***	***	***
31 KRASICA	.110	1.01	1.02	1.02	13751.	13975.	14291.	12579.	12783.	13072.			
32 IVANI	.100	1.05	1.05	1.05	9825.	9958.	9914.	8915.	9036.	8995.			
33 CRIKVENI	.266	1.09	1.09	1.09	7617.	7741.	8009.	5808.	5903.	6107.			
35 KRK	.502	1.07	1.07	1.08	7525.	7607.	9203.	4284.	4330.	5239.			
36 DUNAT	.100	1.09	1.10	1.11	3871.	3895.	4159.	3537.	3559.	3800.			
38 LOSINJ	.258	1.10	1.10	1.10	616.	617.	815.	549.	550.	726.	*	*	
39 RAB	.096	1.08	1.08	1.09	2276.	2289.	2339.	2087.	2098.	2145.			
40 KARLOBAG	.100	1.09	1.09	1.09	2468.	2489.	2522.	2255.	2274.	2304.			
41 T-PL110A	.258	.92	.92	.94	13611.	13591.	15450.	9805.	8965.	10191.	***	***	***

Broj ime postrojenja	Ru (Ω)	faktor uzemljenja Kuz			Iuz(A) kroz sustav uzemljenja			Iu(A) kroz otpor rasprostiranja uzemlj.			oznaka		
		2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.
43 DOLINKA	.526	1.03	1.01	1.02	2996.	3042.	3695.	1963.	1996.	2424.			
44 otc.pula	.100	1.07	1.10	1.12	4104.	3477.	3767.	3749.	3242.	3512.			
45 SIJANA	.150	1.02	1.00	.99	4190.	3967.	5304.	3545.	3260.	4358.			
47 BUJE	.421	1.06	1.07	1.08	4052.	4240.	4336.	2660.	2784.	2847.			
48 RASA	.280	1.02	1.01	1.04	7617.	7221.	8144	5918.	5350.	6033.			
49 PAZIN	.438	1.05	1.02	1.04	4845.	6164.	6576.	3372.	3718.	3966.			
50 BUTONIGA	.100	1.06	1.05	1.07	2860.	3342.	3471.	2613.	3054.	3172.			
51 BUZET	.100	1.07	1.07	1.08	2882.	3173.	3265.	2633.	2899.	2983.			
52 POREC	.239	1.04	1.02	1.03	3396.	4028.	4290.	2747.	3258.	3470.			
53 ROVINJ	.131	1.06	1.04	1.05	2529.	2723.	3093.	2249.	2421.	2751.			
54 KATORO	.100	1.07	1.08	1.09	2985.	3161.	3242.	2783.	2948.	3022.			
56 L.OSIK	.110	1.08	1.08	1.07	3296.	3335.	3464.	2839.	2873.	2853.			
58 H-SKLOPE	.701	1.12	1.12	1.11	1733.	1745.	1793.	1469.	1479.	1520.			
59 OTOCAC	.526	1.14	1.14	1.14	2987.	3001.	3031.	2352.	2363.	2387.			
60 GRACAC	.354	1.11	1.12	1.12	3927.	4114.	4145.	2700.	2829.	2850.			
61 D.LAPAC	.570	1.12	1.13	1.13	2314.	2511.	2527.	1475.	1600.	1611.			
62 ERNESTIN	.100	1.03	1.12	1.12	2185.	6703.	6974.	2065.	5470.	5692.	***		
63 DAKOVO	.100	1.06	1.07	1.07	5287.	5776.	5833.	4892.	5177.	5228.	***	***	***
64 ERNE110A	.100	.95	.96	.95	9785.	19607.	19990.	7394.	14035.	13348.	*	***	***
65 DAKO110A	.100	1.00	1.01	1.01	7180.	9245.	9599.	6227.	7701.	7996.	*	*	*
66 OSIJEK-1	.100	.98	1.03	1.03	13986.	17509.	18119.	12989.	15274.	15805.			
67 OSIJEK-2	.100	.96	1.00	1.00	10169.	13688.	14002.	4271.	5619.	5748.			
68 OSIJEK-3	.100	.99	1.04	1.03	5943.	8024.	8211.	5100.	6886.	7046.			
69 OSIJEK-4	.100	.98	1.03	1.02	4751.	6288.	6380.	3865.	5115.	5170.	*	*	*
70 TO-OSIJE	.100	.96	1.00	1.00	9819.	13111.	13588.	6184.	8257.	8557.			
71 PTE-OSIJ	.100	.96	1.00	1.00	9838.	13162.	13645.	6195.	8289.	8593.			
75 B.MANAST	.100	1.10	1.10	1.10	4298.	4238.	4119.	3837.	3783.	3677.			
76 D.MIHOLJ	.100	1.12	1.14	1.14	5144.	5396.	4025.	4592.	4817.	3753.			
77 DAKOVO-2	.100	1.05	1.07	1.07	10969.	12251.	12475.	10440.	11660.	11874.			
78 VALPOVO	.100	1.05	1.07	1.07	5204.	5712.	5770.	4364.	4789.	4838.			
79 VINKOVCI	.100	1.05	1.09	1.07	6722.	9082.	11325.	5827.	7872.	9429.			
81 ZUPANJA	.100	1.10	1.12	1.12	1407.	4245.	5103.	1338.	3865.	4647.	*		
82 SL.BROD	.100	1.06	1.07	1.06	5461.	5664.	6172.	4734.	4909.	5130.			
83 SL.BROD2	.100	1.08	1.09	1.08	5173.	5292.	5712.	4921.	5034.	5433.			
85 POZEGA	.100	1.10	1.10	1.09	2485.	2510.	3011.	2364.	2387.	2807.			
87 NASICE	.100	1.12	1.12	1.10	6680.	7369.	8144.	5684.	6024.	6658.			
88 SLATINA	.100	1.13	1.13	1.13	2536.	2595.	2701.	2365.	2420.	2518.			
89 VUKOVAR	.100	1.05	1.07	1.08	4695.	6515.	6825.	4275.	5803.	6078.			
92 NIJEMCI	.100	1.09	1.14	1.14	1776.	2398.	2409.	1622.	2098.	2108.			
94 ANDRIJEV	.100	1.15	1.16	1.16	6233.	6580.	6697.	5930.	6259.	6371.			
96 JANKOVCI	.100	1.13	1.18	1.19	5721.	6837.	7797.	5442.	6504.	7417.			
97 KAPELA ^{sl}	.100	1.22	1.23	1.22	3157.	3191.	3283.	3004.	3036.	3123.			
98 NA-CEMEN	.100	1.14	1.14	1.12	5288.	5807.	7188.	5031.	5524.	6545.			
99 BELISCE	.100	1.06	1.08	1.08	2994.	3210.	3235.	2859.	3065.	3089.			
100 H-VELEBI	.260	1.00	1.01	.99	3303.	7563.	10618.	2521.	6415.	9006.	***		

Broj ime postrojenja	Ru (Ω)	faktor uzemljenja Kuz			Iuz(A) kroz sustav uzemljenja			Iu(A) kroz otpor rasprostiranja uzemlj.			oznaka		
		2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.
103 KONJSKO	.127	1.04	1.10	1.11	2981.	5087.	5557.	2775.	4202.	4590.	***		
104 KONJ220A	.127	.98	1.00	.98	6545.	12283.	12706.	5132.	10242.	10215.	*	***	***
106 BILICE	.976	1.00	1.01	1.01	6786.	7428.	7573.	3815.	4176.	4257.	***	***	***
107 H-ZAKUCA	.076	.99	1.00	1.00	7790.	8154.	6961.	7262.	7601.	6489.	***	***	*
108 H-ORLOVA	1.400	1.03	1.04	1.05	5192.	5500.	3763.	3192.	3381.	2313.	***	***	*
110 PLAT	.100	.99	1.01	1.01	7360.	7485.	8518.	6360.	6240.	7101.			
111 PLAT-TR	.100	.99	1.01	1.01	7166.	7550.	8363.	6320.	6659.	7376.			
112 H-VE110A	.260	.97	.98	.98	6381.	7418.	7661.	5680.	6603.	6819.	***	***	***
115 ZADAR-1	.160	1.01	1.02	1.02	4179.	4274.	4317.	3579.	3660.	3696.	***	***	***
116 bilibrig	.690	1.01	1.01	1.01	2057.	2107.	2133.	1097.	1123.	1137.	*	*	*
117 ZD-CENTA	.520	1.01	1.02	1.02	923.	946.	961.	522.	535.	543.			
118 NIN	.110	1.03	1.03	1.04	3154.	3198.	3232.	2724.	2763.	2792.			
119 PAG	.436	1.08	1.08	1.08	2648.	2672.	2695.	1852.	1869.	1885.			
120 NOVALJA	.100	1.06	1.06	1.07	2726.	2752.	2790.	2385.	2408.	2441.			
121 OBROVAC	.305	1.03	1.04	1.04	7126.	7934.	8059.	4883.	4925.	5002.			
122 BIOGRAD	.858	1.11	1.12	1.12	2923.	2981.	3123.	2150.	2192.	2296.			
123 BENKOVAC	.017	1.15	1.16	1.16	3441.	3554.	3571.	3416.	3529.	3546.			
124 STRMICA	.100	1.14	1.16	1.15	1659.	1889.	2124.	1516.	1726.	1940.			
125 KONJ110A	.127	.95	.95	.95	10555.	15019.	14247.	8975.	11256.	10189.	***	***	***
126 H-ZA110A	.070	.94	.95	.95	14980.	16237.	16669.	13178.	14284.	14663.	***	***	***
127 H-DALE	.770	1.05	1.06	1.05	2251.	2355.	2327.	1634.	1709.	1689.			
128 METERIZE	.150	.98	.99	.96	13896.	15002.	18870.	11798.	12381.	15574.			
129 SUCIDAR	.070	.99	.98	.95	2818.	3179.	4062.	2714.	2934.	3762.			
131 VISOKA	.100	.97	.97	.93	3057.	3414.	4234.	2738.	3057.	3792.			
132 KAST110A	.120	1.05	1.06	1.00	5546.	8062.	10072.	4992.	6141.	7643.			
137 VRBORAN	.070	.98	.98	.94	10031.	10405.	16647.	8187.	8492.	14008.			***
138 DOBRI	.100	1.01	1.00	.98	2688.	3080.	3850.	2530.	2729.	3366.			
141 DUGI_RAT	.083	.98	.99	1.00	9202.	9871.	10217.	7455.	7996.	8277.			
142 kk-d.rat	.065	.98	.99	1.00	2999.	3152.	3252.	2652.	2787.	2875.			
143 kk-posti	.310	1.14	1.15	1.15	5003.	5158.	5258.	3893.	4014.	4091.	*		
144 kk-lozna	.100	1.06	1.07	1.08	3570.	3712.	3802.	3212.	3339.	3420.	*	*	*
145 NEREZISC	1.570	1.06	1.07	1.07	7317.	7535.	7696.	2802.	2885.	2947.			
146 kk-slati	.009	1.10	1.11	1.11	4605.	4676.	4727.	4570.	4640.	4691.			
147 kk-travn	.210	1.10	1.11	1.11	2611.	2651.	2701.	2214.	2248.	2290.	*	*	*
148 STARIGRA	.243	1.10	1.11	1.11	3689.	3729.	3791.	3314.	3350.	3406.			
149 kk-medve	.095	1.12	1.13	1.12	2514.	2530.	2532.	2320.	2334.	2337.			
150 kk-prapa	.134	1.12	1.13	1.13	2072.	2089.	2172.	1852.	1866.	1941.			
151 BLATO	1.070	1.11	1.12	1.11	1932.	1946.	2016.	1069.	1076.	1115.			
152 KORCULA	.100	1.12	1.13	1.10	1146.	1153.	1046.	1042.	1048.	951.			*
153 kk-perna	.013	1.12	1.12	1.10	1224.	1243.	1231.	1209.	1227.	1215.			
154 STON	.420	1.12	1.12	1.12	3976.	4229.	4112.	2379.	2239.	2461.			
156 IMOTSKI	.357	1.18	1.14	1.14	3851.	4960.	4925.	3213.	4138.	4108.			
157 KRALJEVA	.100	1.03	1.04	1.05	10775.	12842.	13106.	10193.	12147.	12398.			
158 H-KRALJE	.140	1.04	1.04	1.05	7819.	9780.	10005.	8687.	10867.	11116.			
159 TROGIR	.180	1.11	1.08	1.04	4708.	5673.	5900.	4193.	4195.	4363.			

Broj ime postrojenja	Ru (Ω)	faktor uzemljenja Kuz			Iuz(A) kroz sustav uzemljenja			Iu(A) kroz otpor rasprostiranja uzemlj.			oznaka		
		2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.
162 H-PERUCA .410		1.04	1.06	1.06	2971.	3285.	3296.	2455.	2714.	2724.	*		
163 B.BLATO .100		1.08	1.09	1.10	3181.	3383.	3414.	2955.	3141.	3170.			
164 SINJ .200		1.06	1.07	1.07	4225.	4982.	4976.	3833.	4520.	4514.			
165 MAKARSKA.430		1.12	1.12	1.11	3591.	3809.	3971.	2725.	2891.	3014.			
168 BILI110A .976		.93	.93	.93	10424.	11560.	11599.	3470.	3025.	3035.	***	***	***
169 RAZINE .100		.94	.95	.94	7319.	8406.	8652.	6730.	7730.	7956.			
171 KNIN .348		1.13	1.14	1.13	1649.	2051.	2492.	978.	1217.	1341.			
172 KNIN-evp .100		1.13	1.14	1.13	1961.	2269.	2794.	1742.	2016.	2482.			
173 DRNIS .100		1.14	1.12	1.11	3199.	3942.	3955.	3043.	3589.	3452.			
174 PODI .100		1.05	1.03	1.01	8773.	8038.	7772.	8218.	6878.	6650.			
176 PLOCE .100		1.11	1.10	1.10	2205.	2372.	2416.	2015.	2168.	2208.			
177 OPUZEN .026		1.13	1.13	1.13	3739.	3886.	3915.	3647.	3790.	3818.			
178 KOMOLAC .065		1.03	1.04	1.00	6512.	6693.	7541.	6089.	6257.	6625.			
180 PLAT110A .100		.96	.96	.95	4217.	4092.	4340.	3733.	3624.	3841.	*	*	*
181 H-DUBROV.100		.96	.96	.95	5589.	5803.	5975.	5314.	5517.	5681.			
182 TUMBRI .052		1.05	1.09	1.09	6426.	8045.	9996.	5925.	7254.	8812.			
183 ZERJAVIN .100		1.10	1.13	1.13	4720.	5369.	6086.	4138.	4706.	5569.			
184 ZERJ220A .100		1.09	1.10	1.10	4950.	5176.	5204.	4629.	4841.	4868.	*	*	*
186 MRACLIN .020		1.05	1.06	1.06	5686.	6477.	6480.	5571.	6303.	6306.	*	*	*
187 T-SISAK .100		.99	1.00	1.00	8438.	8766.	8803.	7891.	8199.	8233.	***	***	***
188 MEDURIC .039		1.09	1.10	1.10	4775.	4973.	4990.	4570.	4759.	4776.			
189 MEDU110A .039		1.02	1.02	1.02	8188.	8352.	8393.	7678.	7833.	7871.	***	***	***
190 NOVSKA .100		1.17	1.18	1.18	5973.	6044.	6063.	5682.	5750.	5768.			
191 IVANIC .105		1.11	1.11	1.11	3096.	3153.	3164.	2938.	2992.	3002.			
192 N.GRADIS .113		1.13	1.13	1.13	3740.	3768.	3701.	3366.	3391.	3257.			
193 DARUVAR .058		1.13	1.13	1.12	2302.	2321.	2354.	2184.	2203.	2232.			
194 KUTINA .100		1.07	1.07	1.07	6261.	6183.	6211.	5814.	5742.	5768.			
195 KOPRIVNI .077		1.02	1.02	1.01	5386.	5487.	5959.	4687.	4775.	5186.			
197 LUDBREG .122		1.09	1.09	1.09	6240.	6308.	6396.	5873.	5937.	6020.			
198 VIROVITI .094		1.09	1.09	1.07	2556.	2589.	2637.	2306.	2335.	2321.	*	*	
200 VIRJE .296		1.09	1.10	1.09	2794.	2818.	2878.	2170.	2189.	2235.			
201 KRIZEVCI .075		1.10	1.10	1.07	2774.	2804.	2501.	2591.	2619.	2336.			
202 BJELOVAR .052		1.07	1.06	1.06	3114.	2931.	2944.	2959.	2785.	2798.			
203 MLINOVAC.048		1.07	1.06	1.06	2205.	2327.	2329.	2154.	2273.	2275.			
204 H-CAKOVE.158		1.01	1.01	1.01	5748.	5888.	6055.	4665.	4778.	4914.			
205 CAKOVEC .132		1.06	1.07	1.07	6359.	6591.	6638.	5956.	6174.	6218.			
206 PRELOG .100		1.02	1.02	1.02	4734.	4789.	4846.	4325.	4375.	4428.			
207 H-DUBRAV.117		1.00	1.00	1.00	2922.	2956.	3021.	2630.	2661.	2719.			
208 NEDELJAN .200		1.02	1.02	1.02	11894.	12523.	12102.	8083.	8510.	8522.			
209 IVANEC .068		1.12	1.13	1.13	4308.	4417.	4435.	4106.	4210.	4227.			
210 H-VZ110A .125		1.07	1.07	1.08	5313.	5458.	5491.	5093.	5231.	5263.			
211 H-VZ110B .125		1.07	1.07	1.08	5300.	5444.	5477.	5081.	5218.	5250.			
212 VARAZDIN.089		1.06	1.07	1.06	6045.	6193.	6414.	5679.	5818.	6021.			
215 ZABOK .230		1.11	1.12	1.12	5379.	5960.	6033.	4571.	5064.	5127.			
217 T-JERTOV .112		1.05	1.01	1.02	5027.	17174.	17835.	4629.	15080.	15660.	*	***	***

Broj ime postrojenja	Ru (Ω)	faktor uzemljenja Kuz			Iuz(A) kroz sustav uzemljenja			Iu(A) kroz otpor rasprostiranja uzemlj.			oznaka		
		2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.
218 STRAZA	.060	1.08	1.08	1.09	2423.	2631.	2643.	2322.	2522.	2533.	*		
219 T-SI110A	.100	.96	.97	.96	15597.	16607.	16493.	13833.	14729.	14628.	***	***	***
220 PRACNO	.068	1.01	1.02	1.02	14705.	16001.	16193.	12564.	13303.	13464.			
221 SUNJA	.100	1.19	1.21	1.21	6065.	6284.	6311.	5770.	5978.	6004.			
222 SISCIA	.100	1.14	1.15	1.15	4965.	5087.	5129.	4536.	4647.	4686.			
225 PETRINJA	.110	1.06	1.08	1.08	4858.	5770.	5819.	4400.	5226.	5270.			
226 RAFI110A	.100	1.02	1.03	1.03	12759.	13373.	13391.	12447.	13047.	13064.			
227 RAFI110B	.100	1.09	1.11	1.10	6394.	6726.	6772.	6234.	6558.	6603.			
228 ZELJE-SI	.100	1.02	1.03	1.03	12141.	12975.	13043.	11550.	12344.	12408.			
229 GLINA	.100	1.09	1.11	1.10	1965.	3233.	3304.	1877.	2954.	3019.			
232 POKUPLJE	.141	1.06	1.07	1.07	4636.	5243.	5310.	4071.	4604.	4663.			
233 H-GOJAK	.851	1.05	1.05	1.04	3756.	3594.	3762.	1631.	1304.	1365.	***	*	*
234 OSTARIJE	.146	1.06	1.06	1.05	3262.	3866.	3689.	2863.	3393.	3238.			
236 ZDENCINA	.129	1.12	1.14	1.14	8097.	8402.	8493.	7595.	7881.	7967.			
237 SVARCA	.183	1.06	1.07	1.07	3808.	5113.	5447.	2996.	3750.	4062.			
238 DUBOVAC	.230	1.05	1.06	1.06	3429.	4346.	4435.	2793.	3539.	3612.			
240 TUMB110A	.052	.96	.97	.97	26824.	29323.	30897.	23891.	26116.	27519.	***	***	***
241 ZERJ110A	.100	1.02	1.02	1.00	7267.	10000.	15561.	6097.	8055.	12534.	*		***
243 RESNIK	.170	1.05	1.04	1.03	19318.	21935.	24602.	14313.	15509.	15421.			
246 TETO-ZG	.100	.95	.95	.96	23964.	24060.	24250.	17716.	17455.	17592.	***	***	***
249 TRNJE-2	.100	1.02	1.02	1.03	4303.	4499.	4601.	4066.	4251.	4348.			
250 VOLOVCIC	.100	1.02	1.02	1.04	4202.	4388.	4456.	3737.	3902.	3903.			
251 LUDINA	.100	1.19	1.20	1.20	4790.	4852.	4863.	4557.	4615.	4626.			
252 MRAC110A	.020	1.00	1.01	1.00	16643.	17806.	17540.	15681.	16777.	16409.	***	***	***
253 MRAC110B	.020	1.31	1.32	1.32	5576.	5651.	5697.	5547.	5623.	5668.			
254 SOPOT	.100	1.04	1.05	1.05	10914.	11239.	11395.	9938.	10234.	10377.			
255 JARUN	.054	1.00	1.00	.98	7739.	7444.	7665.	7085.	6815.	6796.			*
256 ELTO-ZG	.004	1.01	.99	.97	2361.	3027.	3490.	2350.	3006.	3467.			
258 RAKITJE	.043	1.01	1.01	.98	15768.	17278.	19071.	13580.	14881.	15828.			
260 STENJEVA	.100	1.09	1.03	.99	6956.	5978.	8003.	6641.	5378.	7044.			*
262 PODSUSED	.052	1.07	1.08	1.07	14139.	15119.	16152.	13522.	14460.	15448.			
263 TS-PODSU	.100	1.08	1.09	1.08	8627.	9211.	9842.	8606.	9188.	9818.			
265 SAMOBOR	.185	1.07	1.08	1.06	6221.	6521.	6953.	5285.	5540.	5907.			
266 V.GORICA	.100	1.05	1.06	1.05	9747.	10140.	10357.	8882.	9241.	9439.			
267 D.SELO	.046	1.08	1.09	1.09	7307.	7715.	8303.	6862.	7245.	7797.			
268 ZAPRESIC	.052	1.06	1.06	1.04	6109.	6453.	7004.	5825.	6153.	6666.			
269 KSAVER	.100	1.17	1.18	1.19	421.	442.	461.	398.	418.	435.			
270 DUBEC	.039	1.07	1.06	1.07	12907.	13792.	15876.	12197.	12738.	14662.			
271 BOTINEC1	.033	1.04	1.05	1.04	12152.	13351.	14273.	11565.	12706.	13583.			
272 BOTINEC2	.033	1.06	1.07	1.08	15234.	15784.	16063.	14344.	14861.	15124.			
273 TRPIMIRO	.100	1.08	1.09	1.15	3502.	3629.	3035.	3302.	3422.	2857.			
274 TRPIMIRx	.100	1.07	1.05	1.04	2387.	2945.	3208.	2248.	2793.	3042.			
29 TURNIC	.100		.97	.96		3956.	4097.		3523.	3672.			
34 NOVI	.100		1.11	1.10		6957.	6722.		6618.	6395.			
42 DUBROVA	.100		1.02	1.04		9217.	10120.		8768.	9627.			

Broj ime postrojenja	Ru (Ω)	faktor uzemljenja Kuz			Iuz(A) kroz sustav uzemljenja			Iu(A) kroz otpor rasprostiranja uzemlj.			oznaka		
		2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.
46 MEDULIN .100			1.05	1.07		3083.	3450.		2817.	3152.			
55 FUNTANA .100			1.02	1.03		2661.	2877.		2431.	2628.			
72 NEMETIN .100			1.11	1.11		8652.	8814.		8249.	8403.			
80 VINKOV-2 .100			1.13	1.10		7327.	9470.		6971.	8623.			
90 VUKOVAR2.100			1.08	1.09		6153.	6281.		5483.	5597.			
91 VUKOVAR3.100			1.09	1.10		5427.	5529.		4955.	5049.			
93 ILOK .100			1.18	1.18		1520.	1524.		1452.	1456.			
95 TS-ANDRI .100			1.15	1.15		6190.	6305.		5888.	5998.			
101 BRAVAR .100			1.01	.98		10043.	11993.		7429.	8144.			
102 T-ZATON .100			1.00	.97		4302.	4324.		4039.	3821.			*
109 ZAGVOZD .100			1.12	1.14		5439.	5857.		4872.	5247.			
113 POLICNIK .100			1.09	1.09		3348.	3371.		3059.	3080.			
114 MODRIC .100			1.11	1.11		2915.	2933.		2785.	2802.			
133 KAST110B .100			1.02	1.00		3018.	3756.		2674.	3328.			
134 KAST-evp .100			1.07	1.02		5688.	7156.		5094.	6409.			
155 ZAGV110A .100			1.03	1.03		7573.	7504.		6785.	7018.		***	***
160 DOLAC .100			1.11	1.10		6987.	7387.		6647.	7027.			
161 SADINE .100			1.09	1.06		5982.	7039.		5464.	6423.			
167 BRIST .100			1.11	1.11		2483.	2545.		2269.	2325.			
170 KAPELAdl .100			1.10	1.08		2828.	5426.		2702.	4983.			
175 ZITNIC .100			1.16	1.15		2854.	2878.		2607.	2630.			
213 VARAZD-2 .100			1.08	1.08		8314.	8354.		7909.	7947.			
216 KRAPINA .100			1.12	1.12		4788.	4811.		4554.	4577.			
224 KOSTAJNI .100			1.19	1.19		2927.	2936.		2796.	2805.			
230 VOJNIC .100			1.10	1.10		4008.	4097.		3507.	3585.			
239 H-LESCE .100			1.05	1.05		2716.	2773.		2481.	2534.			
244 ZITNJAK .100			1.06	1.07		11235.	11616.		10239.	10586.			
257 PIEROTTI .100			1.02	1.01		2849.	3179.		2560.	2857.			
275 MAKSIMIR .100			1.13	1.14		2482.	2719.		2337.	2559.			
246 VODNJAN .100				1.02			2740.			2618.			
246 ZAMET .100				.96			9712.			8314.			***
246 CRES .100				1.11			5221.			4660.			
246 PLITVICE .100				1.11			1017.			972.			
246 DARDA .100				1.14			7142.			6794.			
246 CEPIN .100				1.06			10709.			9739.			
246 SL.BROD3 .100				1.09			4328.			4126.			
246 POZEGA-2 .100				1.10			4054.			3547.			
246 VRBO220A .100				1.00			11119.			10072.			
246 MILJEVAC .100				1.08			9034.			8594.			
246 KASTELA2 .100				1.00			9618.			7989.			
246 SOLIN .100				1.03			8003.			7341.			
246 BRODOGRA.100				.97			3948.			3519.			
246 GRIPE .100				.97			4206.			3680.			
246 PODGORA .100				1.11			2945.			2691.			
246 BOSANKA .100				1.00			6006.			5436.			

Broj ime postrojenja	Ru (Ω)	faktor uzemljenja Kuz			Iuz(A) kroz sustav uzemljenja			Iu(A) kroz otpor rasprostiranja uzemlj.			oznaka		
		2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.	2000.	2005.	5010.
246 VELESEVE	.100		1.13			12211.			9668.				
246 KOPRIV-2	.100		1.05			6580.			6259.				
246 VIROVI-2	.100		1.07			3268.			3054.				
246 KNEGINEC	.100		1.06			5633.			5142.				
246 SISAK-2	.100		1.08			10409.			9682.				
246 GVOZD	.100		1.11			3282.			2999.				
246 VRBOVSKO	.100		1.15			2177.			1989.				
246 SESVETE	.100		1.10			18490.			17594.				
246 H-DRENJE	.100		1.11			12412.			11544.				
246 TRNJE-1	.100		1.10			2465.			2192.				
246 TRNJE-2x	.100		1.13			2475.			2339.				
246 JANKOMIR	.100		1.01			13763.			12203.				
246 ZAPAD-1	.100		.98			3465.			3095.				
246 H-PODSUS	.100		1.02			8539.			7748.				

3. ANALIZA MJERNIH PODATAKA O IMPEDANCIJAMA UZEMLJENJA I OTPORIMA RASPROSTIRANJA ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA 400, 220 I 110 kV HEP-a

Za potrebe proračuna faktora uzemljenja i najveće struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine poslan je upit na sva mjerodavna mjesta. Prijenosna područja Opatije, Splita i Zagreba poslala su tražene podatke, dok su podaci iz Prijenosnog područja Osijek nažalost izostali, vjerojatno zbog posljedica ratnih razaranja.

Interesantno je da su sve anketirane službe priložile podatke o otporu rasprostiranja, jedino je proizvodno područje HE JUG Sektora za hidroelektrane priložilo podatke o impedanciji uzemljenja (modul, bez faznog kuta).

Svi nepostojeći podaci o otporima rasprostiranja pojedinih razmatranih visokonaponskih postrojenja su pretpostavljeni u iznosu 0.1Ω , polazeći od opredjeljenja da treba težiti izvedbi boljih uzemljivača, sa dovoljno malenim otporom rasprostiranja uzemljivača.

Mjerenje otpora rasprostiranja i potencijala uzemljenja uobičajeno se provodi niskonaponskom U-I metodom. Da bi se osigurali uvjeti za mjerenje struje kroz otpor rasprostiranja uzemljenja postrojenja, prije mjerenja se odspajaju priključena zaštitna užeta dalekovoda i vodljivi plaštevci visokonaponskih kabela (gdje je to moguće). Uvjet za provedbu mjerenja je postizanje dovoljno velike mjerne struje (minimalno 50 A).

Mjerene vrijednosti se kasnije preračunavaju na stvarne pogonske struje. Preračunavanje se provodi u relaciji prema izračunatoj struji kroz otpor rasprostiranja postrojenja za određenu nazivnu godinu u kojoj se razmatraju prilike iznošenja potencijala i utjecaja na susjedne objekte. Kod preračunavanja treba voditi računa da se preračunavanja provode između ekviva-

lentnih sustava u odnosu na struju kroz uzemljivač, tj. mjerenje treba biti kompatibilno s proračunom.

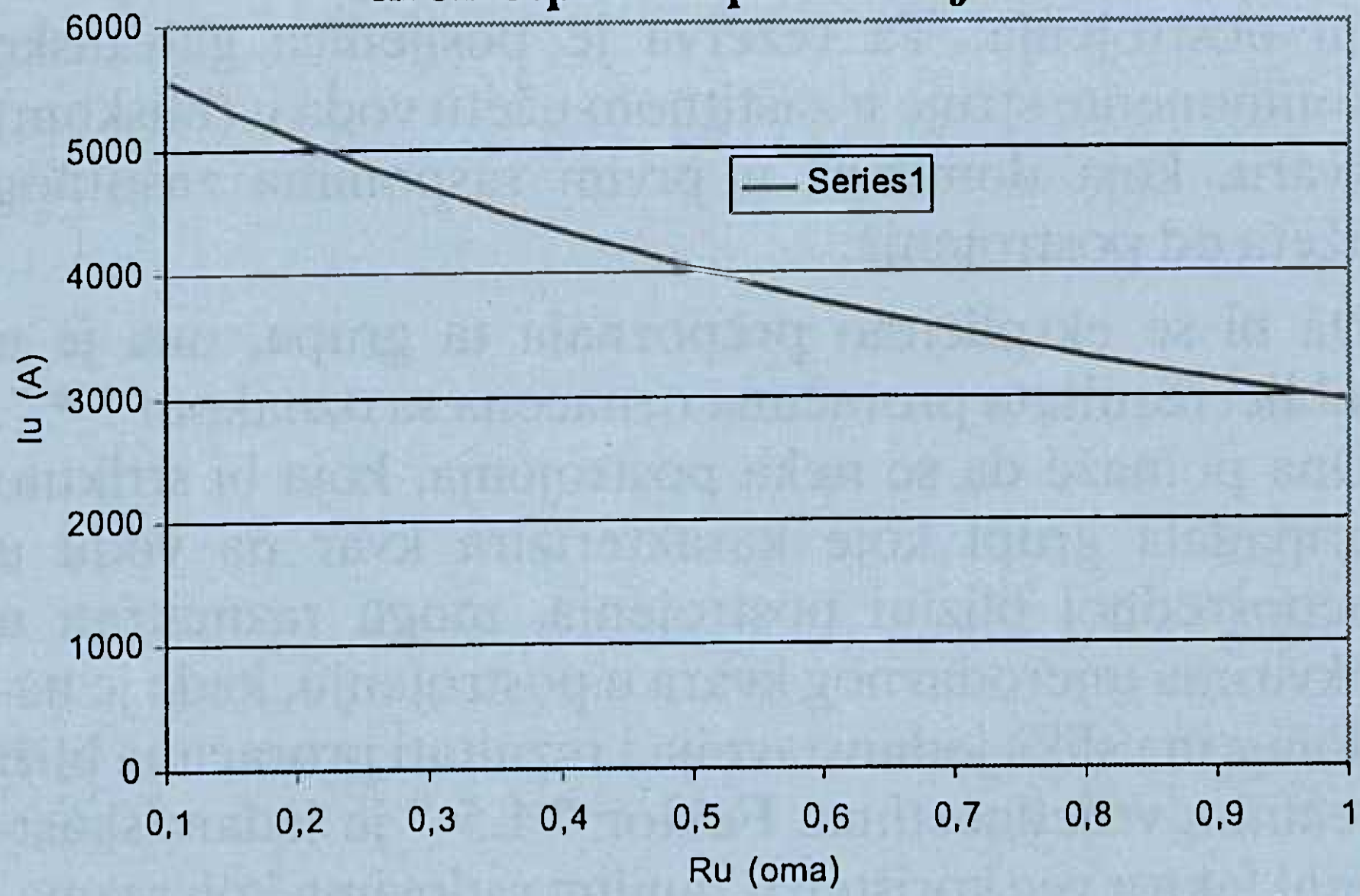
Konačni cilj svih aktivnosti oko određivanja otpora rasprostiranja i struje kroz otpor rasprostiranja je određivanje potencijala uzemljivača razmatranog postrojenja. Veličina potencijala uzemljivača je direktno proporcionalna veličini otpora rasprostiranja i veličini struje kroz otpor rasprostiranja. Međutim, struja kroz otpor rasprostiranja je dio struje kroz sustav uzemljenja uzemljivača koji čine otpor rasprostiranja uzemljivača u paraleli s ekvivalentnim uzemljivačkim sustavima priključenih vodova, kabela i eventualnih paralelnih horizontalnih uzemljivača (slika 3). Određivanje struje kroz impedanciju sustava uzemljenja prikazano je u točki 4. Otpor rasprostiranja uzemljivača je dominantne vodljivosti u odnosu na ostale paralelne otpore, tako da njegovom određivanju treba posvetiti posebnu pažnju.

Na primjeru TS Žerjavinec 400 kV u nazivnoj 2010. godini, sa $I_{k3}/I_{k1} = 19171/15497$ A, pokazat će se utjecaj veličine otpora rasprostiranja na veličinu struje kroz otpor rasprostiranja.

Iz popratnog proračuna slijedi, da se za promjenu iznosa otpora rasprostiranja $R_u = 0.1 - 1.0 \Omega$, $I_{uz} = 6086$ A, struja kroz otpor rasprostiranja smanjila od $I_u = 5569$ na $I_u = 2999$ A. Prema tome, za deseterostruki porast otpora rasprostiranja, smanjenje struje kroz otpor rasprostiranja nije niti 50 %. Očito je gradijent porasta otpora rasprostiranja dominantan u odnosu na smanjenje struje kroz otpor rasprostiranja, tako da porast potencijala prvenstveno ovisi o veličini promjene otpora rasprostiranja.

Gornja konstatacija posebnu pažnju skreće na **točno određivanje otpora rasprostiranja uzemljivača postrojenja**, jer on direktno određuje veličinu potencijala postrojenja.

Utjecaj veličine otpora rasprostiranja R_u na struju kroz otpor rasprostiranja I_u



Uzemljivač postrojenja sastoji se od površinskog uzemljivača, vertikalnih štapnih uzemljivača i horizontalnih vanjskih uzemljivača, vidjeti sliku 3. Obično se vanjski horizontalni uzemljivači ne mogu jednostavno odvojiti od glavnog površinskog uzemljivača, ali se njihov doprinos može izmjeriti. U našem slučaju zbog nedostatka tih podataka je pretpostavljeno da su horizontalni uzemljivači integralni dio uzemljivača postrojenja.

Olakšavajuća okolnost je da u slučaju izmjerenih veoma malih iznosa otpora rasprostiranja dominantnu struju u zemlju sigurno preuzima sam uzemljivač, jer se paralelni nadomjesni otpori uzemljenja nadzemnih vodova i podzemnih kabela ipak kreću u predvidljivim granicama višestruko većim od 0.1Ω .

Pregled priloženih podataka mjerenja otpora rasprostiranja pokazuje, da su u nekim postrojenjima izgrađeni respektabilni uzemljivači, sa otporom rasprostiranja uzemljivača $< 0.1 \Omega$, za koje vrijedi gornja konstatacija.

4. PRORAČUN NAJVEĆE STRUJE KROZ IMPEDANCIJU UZEMLJENJA U MREŽI 400, 220 I 110 kV HRVATSKE 2000., 2005. I 2010. GODINE

U konačnom izvješću o uzemljenju postrojenja međunarodne radne grupe STK 36 CIGRE, objavljen u časopisu "Elektra" 1980. godine [4], dane su preporuke za proračun najvećih struja koje podižu potencijal uzemljivača. One razlikuju dva slučaja:

- kratki spoj u postrojenju
- kratki spoj u neposrednoj blizini postrojenja.

Takva podjela je općenito prihvaćena i ugrađena je u važeće standarde (DIN/VDE 0141/1989) i pravilnike (Pravilnik o uzemljenju elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona višeg od 1 kV - pročišćeni tekst prednacrt).

4.1. Matematički model

Kod kratkog spoja na sabirnicama u postrojenju, struja kroz uzemljivač postrojenja određuje se kao vektorski zbroj umnožaka trostrukih nultih struja u vodičima i pripadajućih faktora redukcije zaštitnih užeta, prema slici 1.

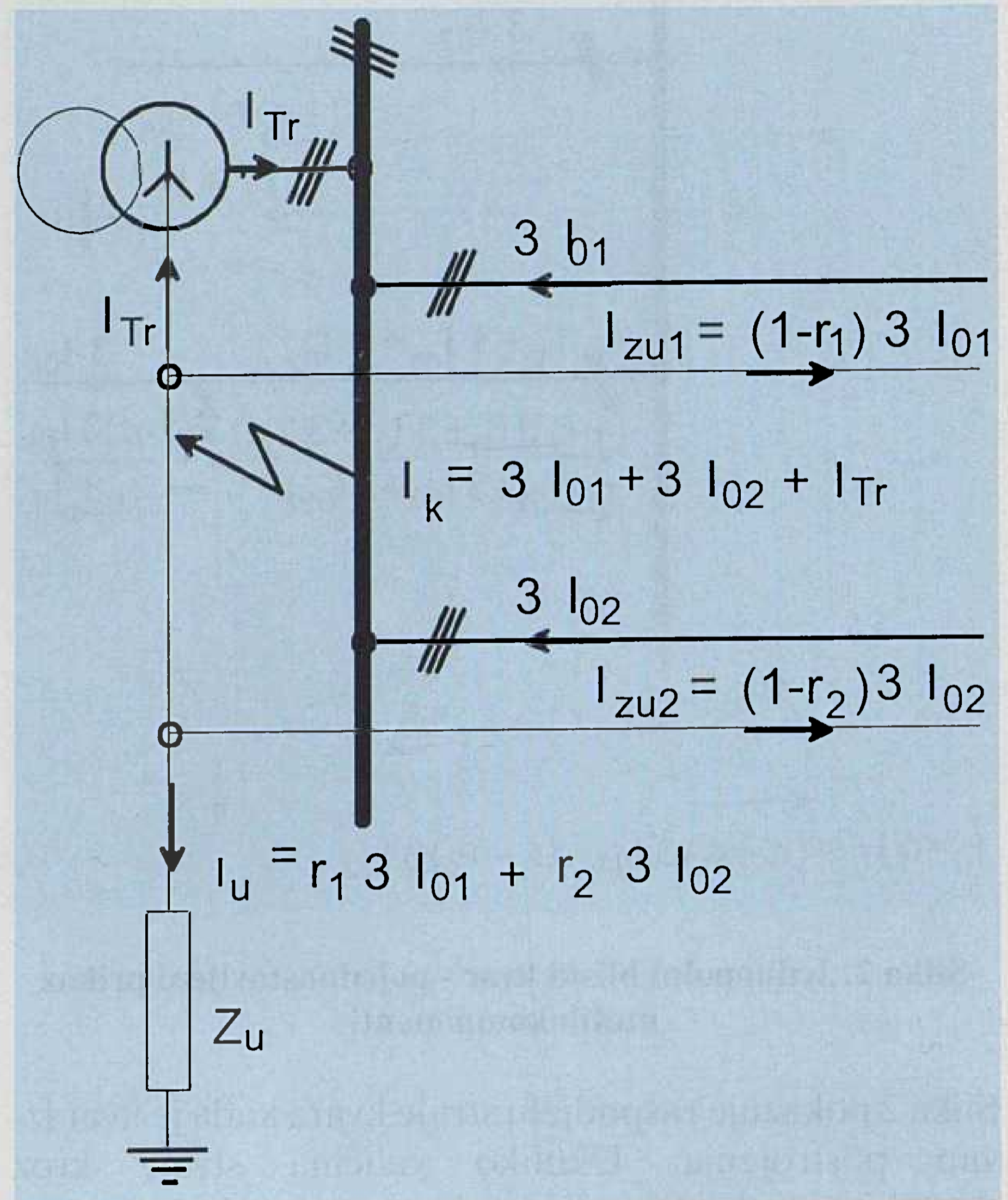
Kratki spoj u postrojenju (sabirnički kvar)

Prema slici 1, struja kroz uzemljivač postrojenja određuje se prema izrazu:

$$I_u = \sum r_i 3I_{0i} \quad (5)$$

gdje su:

- I_u - struja kroz sustav uzemljenja postrojenja
- $3I_{0i}$ - struja u vodičima i-tog dalekovoda 110 kV
- r_i - redukциони faktor zaštitnog užeta voda "i".



Slika 1. Jednopolni kvar u postrojenju - pojednostavljeni prikaz nultih komponenti

Kratki spoj u neposrednoj blizini postrojenja (bliski kvar)

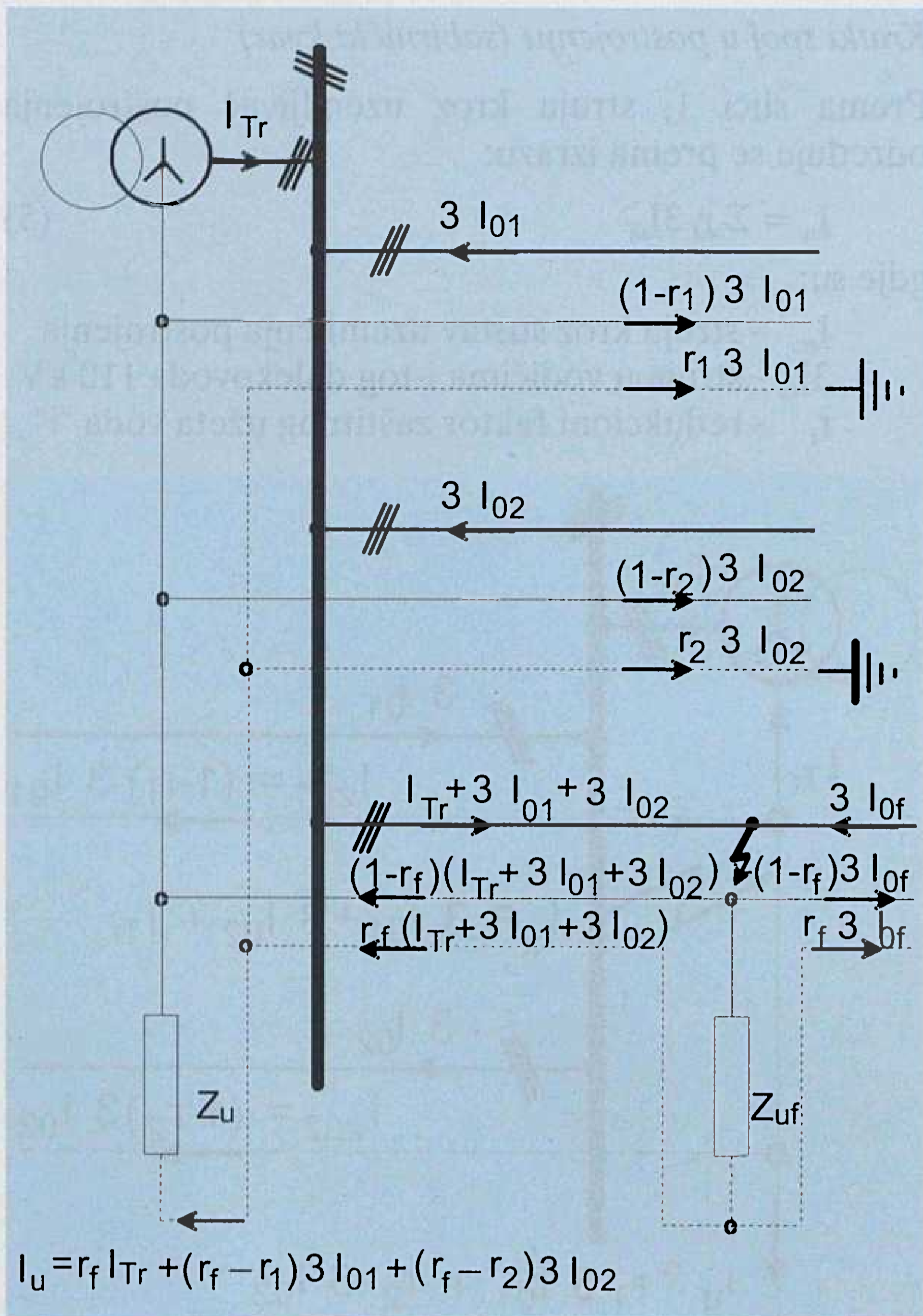
U drugom slučaju, kod kratkog spoja izvan postrojenja (bliski kratki spoj - rjeđi slučaj), struja kroz uzemljivač postrojenja određuje se uz zanemarenje nadomjesnih impedancija voda između (bliskog) bolesnog čvorišta i zamišljenog mjesta kvara. Principijelnu shemu bliskog kratkog spoja prikazuje slika 2 s time da je vod u kvaru označen indeksom "f".

Prema slici 2 struju kroz sustav uzemljenja određuje se prema izrazu:

$$I_u = r_f I_{Tr} + \sum (r_f - r_i) 3I_{0i} \quad (6)$$

gdje su:

- I_u - struja kroz sustav uzemljenja postrojenja
- I_{Tr} - struja kratkog spoja iz neposredno priključenih (blok) transformatora
- $3I_{0i}$ - trostruka nulta struja u vodičima i-tog dalekovoda
- r_i - redukcijski faktor zaštitnog užeta voda "i"
- r_f - redukcijski faktor zaštitnog užeta voda u kvaru "f".



Slika 2. Jednopolni bliski kvar - pojednostavljeni prikaz nultih komponenti

Slika 2 pokazuje raspodjelu struje kvara kada je kvar izvan postrojenja. Ukoliko veličina struje kroz uzemljivač, određena prema izrazu (6) pokaže nedozvoljeno velike vrijednosti, preporuča se proračun provesti sa složenijim matematičkim modelom temeljenim na fizikalnom modelu koji uzima u obzir kompletni uzemljivački sustav u blizini postrojenja (impedanciju uzemljenja postrojenja, otpore uzemljenja stupova dalekovoda, impedancije sustava uzemljenih zaštitnih užeta, specifični otpor tla itd.).

Određivanje najveće struje kroz sustav uzemljenja

Najveću struju kroz sustav uzemljenja postrojenja određujemo izborom veće od navedenih struja kroz sustav uzemljenja u slučajevima kvara u postrojenju prema izrazu (5) i kvara izvan postrojenja (bliski kvar) prema izrazu (6). Posebno izdvajamo grupu sa

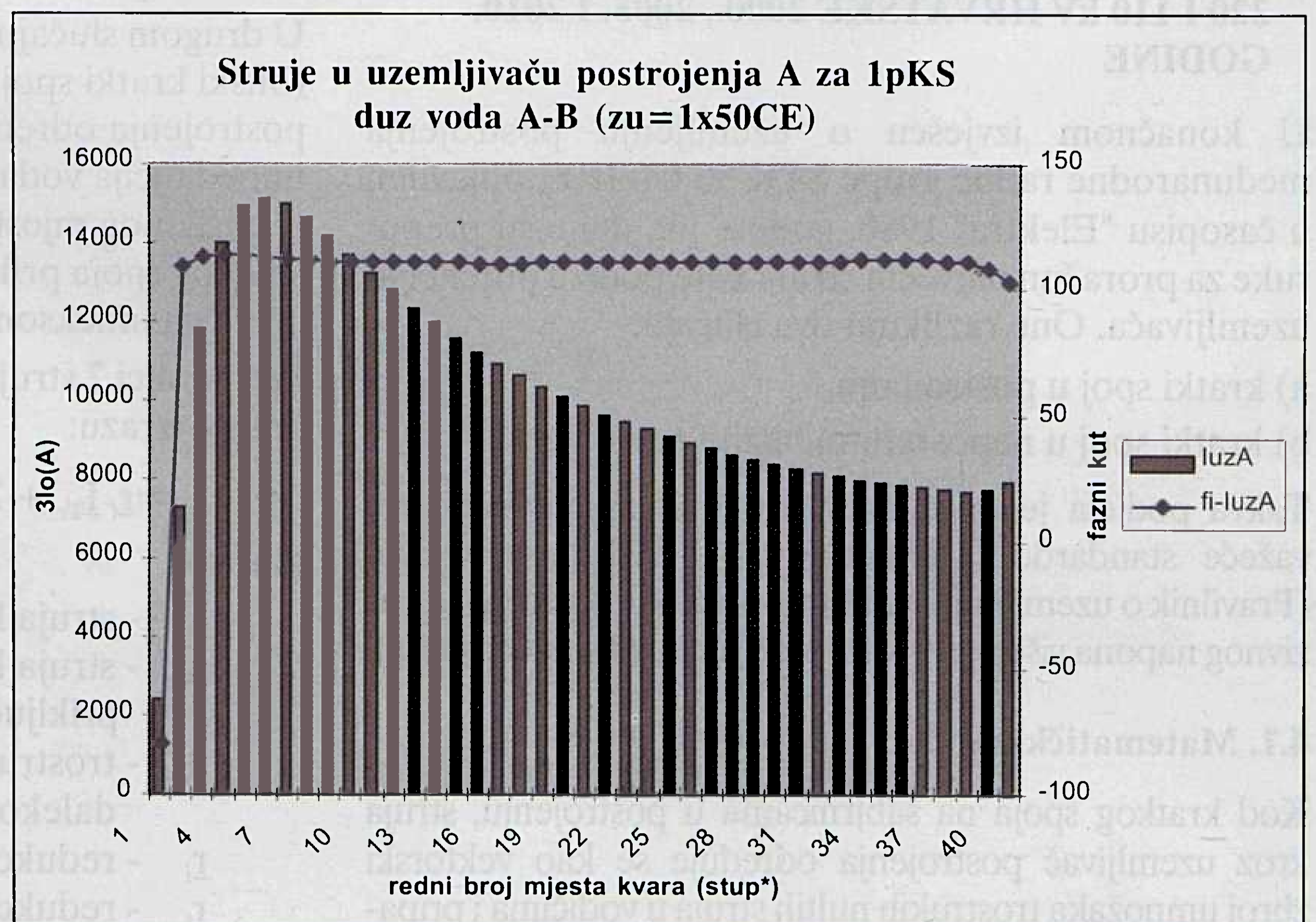
$$1.5 \sum r_i 3I_{0i} > r_f I_{Tr} + \sum (r_f - r_i) 3I_{0i}$$

zbog rezerve koju ima proračun struje kroz uzemljivač postrojenja u slučaju kratkog spoja u neposrednoj blizini postrojenja. Ta rezerva je posljedica galvanske komponente struje u zaštitnom užetu voda u (bliskom) kvaru, koja dominira u prvim rasponima zaštitnog užeta od postrojenja.

Da bi se eksplicitno prepoznala ta grupa, ona je u tablici rezultata proračuna označena sa oznakom " * ". Ona pomaže da se neka postrojenja, koja bi striktno pripadala grupi koje karakterizira kvar na vodu u neposrednoj blizini postrojenja, mogu razmatrati u okvirima mjerodavnog kvara u postrojenju, kada je nadomjesna slika jednostavnija i rezultati proračuna bliži realnim vrijednostima. Faktor " 1.5 " je jedan iskustveni faktor već korišten u ranijim radovima koji razmatraju mjerodavni kvar za određivanje najvećeg potencijala uzemljivača.

Nakon određivanja postrojenja sa mjerodavnim kvarom u postrojenju $I_u = \sum r_i 3I_{0i}$, proširenih sa grupom $1.5 \sum r_i 3I_{0i} > r_f I_{Tr} + \sum (r_f - r_i) 3I_{0i}$, ostaje još grupa s mjerodavnim kvarom na vodu u neposrednoj blizini postrojenja $I_u = r_f I_{Tr} + \sum (r_f - r_i) 3I_{0i}$, označena sa " *** ". Neko daljnje približavanje realnijim vrijednostima proračuna (rezerva u proračunu zbog zanemarenja galvanske komponente) nije više moguće bez složenijeg modeliranja uzemljivačkog sustava u okolici razmatranog postrojenja. Stoga rezultate proračuna označene s " *** " **treba uzeti sa rezervom, i u graničnim slučajevima potrebne zaštite provesti dodatne proračune**, a po potrebi i visokonaponska mjerenja.

U priloženom primjeru, koji je samo ilustrativan, prikazan je općenito vod A – B sa 41 rasponom i nevodljivim zaštitnim užetom 1x50Č. Distribucija najvećih struja u rasponima kod kvarova duž razmatranog voda pokazuje da kod kvara na vodu postoji neka maksimalna vrijednost manja od one izračunate prema izrazu (6).



Maksimalna vrijednost struje u sustavu uzemljenja postrojenja A u gornjem grafu iznosi u 6. rasponu 15054 A, dok bi po izrazu (6) dobili vrijednost struje u sustavu uzemljenja u iznosu od 19899 A. No, za takav proračun treba puno širi opseg ulaznih podataka, koji takvom proračunu daje poseban značaj. U selektivnom pristupu proračunima najveće struje kroz sustav uzemljenja postrojenja, proračun tolikog opsega treba naći opravdanje u kritičnim slučajevima iznošenja potencijala iz postrojenja, prema prilikama koje daje praksa.

Proračun najveće struje kroz impedanciju uzemljenja Z_u , prema izrazima (5) i (6) proveden je za mrežu Hrvatske nazivne 2000., 2005. i 2010. godine. Rezultati proračuna osnova su daljnjem proračunu struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača.

5. PRORAČUN NAJVEĆE STRUJE KROZ OTPOR RASPROSTIRANJA UZEMLJIVAČA U MREŽI 400, 220 I 110 kV HRVATSKE 2000., 2005. I 2010. GODINE

Impedancija uzemljenja pojedinog razmatranog elektroenergetskog postrojenja prema nadomjesnoj slici sastoji se od paralelne kombinacije otpora rasprosti-

ranja razmatranog postrojenja, i paralelnih uzemljivačkih sustava priključenih nadzemnih vodova i podzemnih kabela.

U paralelu s navedenim otporima/impedancijama treba uzeti i impedanciju eventualnog vanjskog horizontalnog uzemljivača, prema slici 3.

U nedostatku mjerenih podataka horizontalni uzemljivač je moguće razmatrati i kao dio otpora rasprostiranja uzemljivača.

5.1. Matematički model

Nadomjesni otpor uzemljivačkog sustava priključenog nadzemnog voda na razmatrano postrojenje može se odrediti za dovoljno dugi lanac četveropola prema izrazu iz literature [4]:

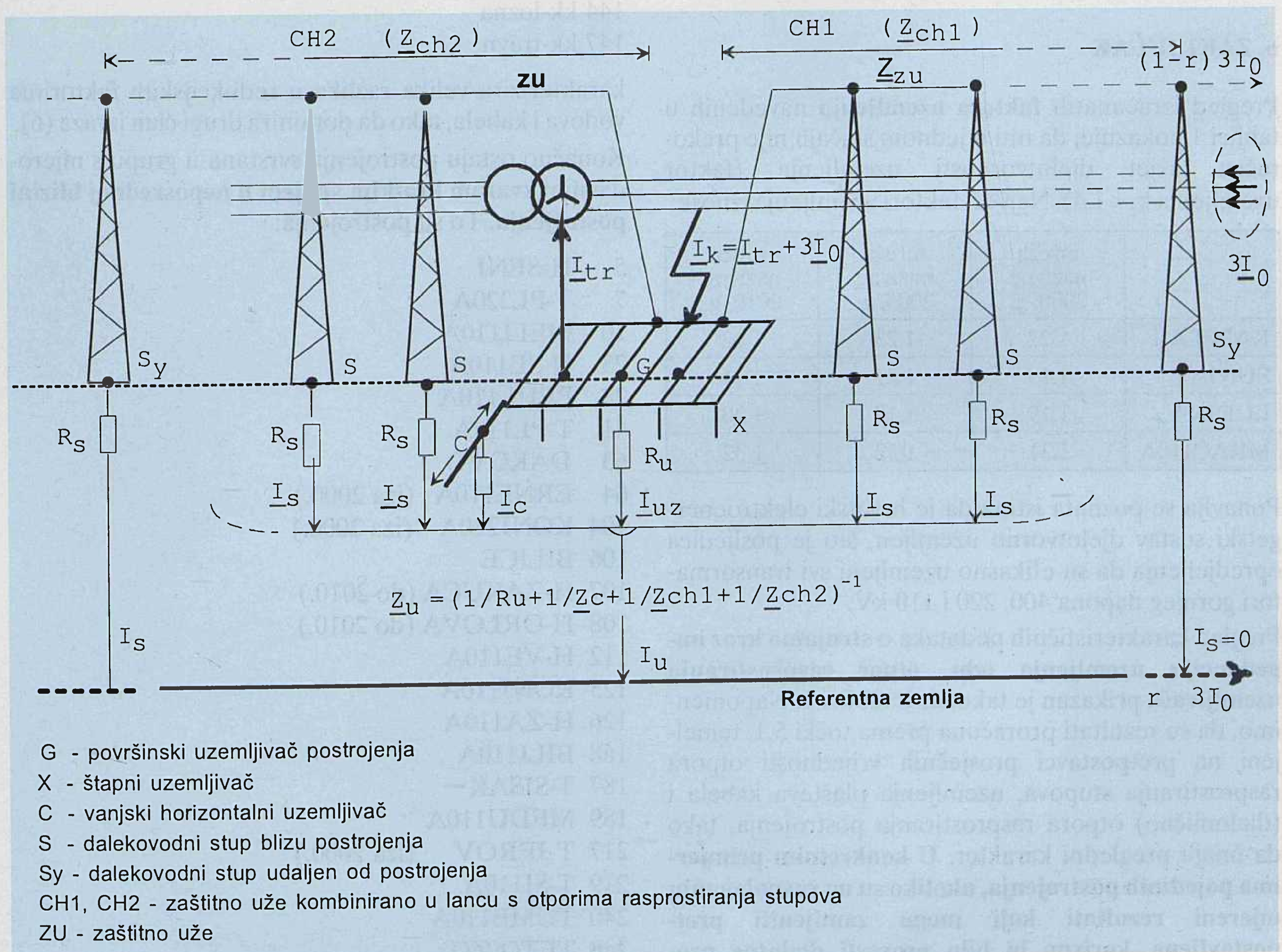
$$\underline{Z}_{ch} \approx s \underline{Z}_s / 2 + \sqrt{(s \underline{Z}_s R_t)} \quad (7)$$

gdje su:

$s \underline{Z}_s$ - impedancija prosječnog raspona zaštitnog užeta

R_t - otpor rasprostiranja uzemljenja stupa nadzemnog voda.

Na isti način se određuje i nadomjesni otpor uzemljivačkog sustava priključenog podzemnog ka-



Slika 3. Uzemljivački sustav visokonaponskog elektroenergetskog postrojenja

bela, uz napomenu da impedanciju zaštitnog užeta nadomještava u ovom slučaju impedancija vodljivog plašta podzemnog kabela. Napomenimo, da su za potrebe ove razrade korišteni podaci o prosječnom rasponu i prosječnom otporu rasprostiranja uzemljenja stupa (1/3 km i 10Ω).odn. plašta kabela (1 km, 1Ω). U slučaju kratkog voda (kabela) u račun treba uzeti i nadomjesni otpor uzemljenja na drugom kraju voda (kabela), vidjeti [5].

5.2. Proračun najveće struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača

Rezultati proračuna najveće struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača nalaze se u tablici 1 za prijenosne mreže Hrvatske nazivne 2000. – 2010. godine. Podaci postrojenja prikazani su u istom poretku kao i referentna studija kratkog spoja [1]. Nakon opisa postrojenja navedene su veličine mjerene (ili pretpostavljene) veličine otpora rasprostiranja u Ω , faktora uzemljenja, struje kroz sustav uzemljivača postrojenja i struje kroz otpor rasprostiranja postrojenja. Svi navedeni podaci prikazani su u istom retku koji završava s oznakom mjerodavnog kvara za proračun najveće struje kroz otpor rasprostiranja uzemljivača, vidjeti poglavlje 4.

6. ZAKLJUČAK

Pregled izračunatih faktora uzemljenja navedenih u tablici 1 pokazuje, da niti u jednom slučaju nije prekoračen uvjet djelotvornosti uzemljenja (faktor uzemljenja $k_z < 1.4$). Najveći faktori uzemljenja iznose:

	mreža nazivne 2000. g.	mreža nazivne 2005. g.	mreža nazivne 2010. g.
KAPELAsl	1.22	1.23	1.22
SUNJA	1.19	1.21	1.21
LUDINA	1.19	1.19	1.20
MRAC110A	1.31	1.32	1.32

Ponavlja se poznata istina da je hrvatski elektroenergetski sustav djelotvorno uzemljen, što je posljedica opredjeljenja da su efikasno uzemljeni svi transformatori gornjeg napona 400, 220 i 110 kV.

Pregled karakterističnih podataka o strujama kroz impedanciju uzemljenja odn. otpor rasprostiranja uzemljivača prikazan je također u tablici 1. Napomenimo, da su rezultati proračuna prema točki 5.1. temeljeni na pretpostavci prosječnih vrijednosti otpora rasprostiranja stupova, uzemljenja plašteva kabela i (djelomično) otpora rasprostiranja postrojenja, tako da imaju pregledni karakter. U konkretnim primjerima pojedinih postrojenja, ukoliko su na raspolaganju mjereni rezultati koji mogu zamijeniti pretpostavljene, korisno bi bilo provesti dodatne proračune.

Nakon rednog broja i opisa postrojenja 400, 220 ili 110 kV i podatka o otporu rasprostiranja (mjereni ili pretpostavljeni u iznosu od 0.1Ω) slijede podaci o strujama kroz otpor rasprostiranja uzemljivača za mreže nazivne 2000., 2005. i 2010. godine. Tri oznake na kraju podataka odnose se na vrstu mjerodavnog kvara, kako je opisano u poglavlju 4.

Rezultati proračuna najvećih struja kroz otpor rasprostiranja uzemljivača u razdoblju 2000. do 2010. godine. pokazuju, da je dominantan kvar **kratki spoj u postrojenju** $I_u = \sum r_i 3I_{oi}$ (sabirnički kvar).

Manju grupu postrojenja možemo svrstati u grupu 1.5 $\sum r_i 3I_{oi} > r_r I_{Tr} + \sum (r_r - r_i) 3I_{oi}$. To su postrojenja:

2 MELI220A
14 OMIŠALJ
22 H-VINODO
65 DAKO110A
180 PLAT110A
184 ZERJ220A
186 MRACLIN

koje karakterizira veći udio struja u transformatorima od struja u vodovima. Postrojenja

69 OSIJEK-4
116 bilibrig
144 kk-lozna
147 kk-travn

karakterizira velika razlika u redukcijskim faktorima vodova i kabela, tako da dominira drugi član izraza (6).

Konačno ostaju postrojenja svrstana u grupu s mjerodavnim kvarom **kratkim spojem u neposrednoj blizini postrojenja**. To su postrojenja:

5 H-SENJ
7 T-PL220A
10 MELI110A
23 H-SE110A
28 PEHL110A
41 T-PL110A
63 DAKOVO
64 ERNE110A (iza 2000.)
104 KONJ220A (iza 2000.)
106 BILICE
107 H-ZAKUCA (do 2010.)
108 H-ORLOVA (do 2010.)
112 H-VE110A
125 KONJ110A
126 H-ZA110A
168 BILI110A
187 T-SISAK
189 MEDU110A
217 T-JEROV (iza 2000.)
219 T-SI110A
240 TUMB110A
246 TETO-ZG
252 MRAC110A

U toj grupi nalazimo i postrojenja koje karakterizira velika razlika u redukcionskim faktorima vodova i kabela, tako da dominira drugi član izraza (6).

17 SUSAK

115 ZADAR-1

Ponovimo ovdje razmatranja iz poglavlja 4., da u ovom slučaju daljnje približavanje realnijim vrijednostima proračuna (rezerva u proračunu zbog zanemarenja galvanske komponente) nije više moguće bez složenijeg modeliranja uzemljivačkog sustava u okolici razmatranog postrojenja. Stoga te rezultate proračuna treba uzeti s rezervom, i u graničnim slučajevima potrebne zaštite provesti **dodatne proračune**, a po potrebi i visokonaponska mjerenja.

LITERATURA

- [1] D. NEVEČEREL: "Proračun kratkog spoja u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine", IE Zagreb, 1999.
- [2] G. W. STAGG, A. H. EL. - ABIAD: "Computer Methods iz Power System Analysis", McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [3] IEC 909/First edition 1988.: "Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems".
- [4] H. SELJESETH, A. CAMPLING, K. H. FEIST, M. KUUSSAARI: "Station Earthing - Safety and Interference Aspects" - Electra, No 71, - July 1980.
- [5] B. MARKOVČIĆ: "Zaštitno uže na vodovima 110 kV i 220 kV ", IE Zagreb, 1963.

CALCULATION OF THE GROUNDING COEFFICIENT AND THE GREATEST CURRENT THROUGH GROUNDING RESISTANCE IN THE CROATIAN NETWORK FOR THE YEAR 2005 AND 2010

The article deals with the problems of the grounding coefficient calculation and the greatest resistance grounding current in the Croatian network for the year 2005 and 2010.

DIE BERECHNUNG DES ERDUNGSFAKTORS UND DES MAXIMALSTROMES DURCH DEN AUSBREITUNGSWIDERSTAND DES ERDERS IM NETZ KROATIENS IN DEN JAHREN 2005 UND 2010

Dargestellt ist der Fragenbereich der Berechnung des Erdungsfaktors und des Maximalstromes durch den Ausbreitungswiderstand des Erders im Netz Kroatiens für die Jahre 2005 und 2010.

Naslov pisca:

Mr. sc. Davor Nevečerel, dipl. ing.
Institut za elektroprivredu
i energetiku d.o.o.
Ulica grada Vukovara 37
10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
 2000-05-17.