

Redukcioni faktor 110 kV kablovskog voda: Merenje i simulacioni model

Ranko Jasika, Jovan Mrvić, Ninoslav Simić, Momčilo Petrović

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

ranko.jasika@int.bg.ac.rs, jmrvic@int.bg.ac.rs

Kratak sadržaj: U radu je prikazan postupak određivanja redukcionog faktora 110 kV kablovskog voda na osnovu rezultata merenja. Dobijeni rezultati su iskorišćeni za poređenje sa vrednostima dobijenim modelovanjem kablovskog voda u programskom alatu ATP/EMTP. Upoređene su vrednosti redukcionog faktora, kao i vrednosti indukovano napona u električnoj zaštiti (plaštu) kabla. Dobijeni rezultati ukazuju na dosta dobro slaganje simulacionog modela i merenja. U formiranom modelu, analiziran je uticaj specifične električne otpornosti tla i prostorni raspored provodnika voda na vrednosti redukcionog faktora. Pokazano je da njihov kombinovani uticaj može biti značajan.

Ključne reči: ATP/EMTP, kabl, redukcioni faktor, plašt

1. Uvod

Prilikom pojave zemljospoja u postrojenju, struja kvara se preko dva povratna puta vraća do izvora napajanja. Jednim delom se odvodi preko uzemljenja postrojenja, dok se preostali deo vraća preko zaštitnih užadi nadzemnih vodova i preko električnih zaštita kablova. U radu je analiziran slučaj kada se postrojenje napaja kablovskim vodom.

Redukcioni faktor kablovskog voda se definiše kao odnos između komponente struje jednopolnog kratkog spoja koja se zatvara kroz zemlju (uzemljivač) I_u i ukupne struje zemljospoja I_k [1, 2]:

$$r = \frac{I_u}{I_k} \quad (1)$$

Prema tome, poznavanje redukcionog faktora kablovskog voda omogućava pouzdano određivanje raspodele struje zemljospoja (I_k), odnosno određivanje njenih komponenti I_p i I_u , čije poznavanje ima višestruki značaj.

Komponenta struje kvara koja se odvodi kroz zemlju (I_u) dovodi do podizanja potencijala uzemljivača i pojave potencijalnih razlika napona dodira i koraka, tako da je njeno poznavanje od velikog značaja za pravilno dimenzionisanje uzemljenja postrojenja, kao i za ispravnu procenu bezbednosnih uslova pri pojavi zemljospoja (naponi dodira i koraka).

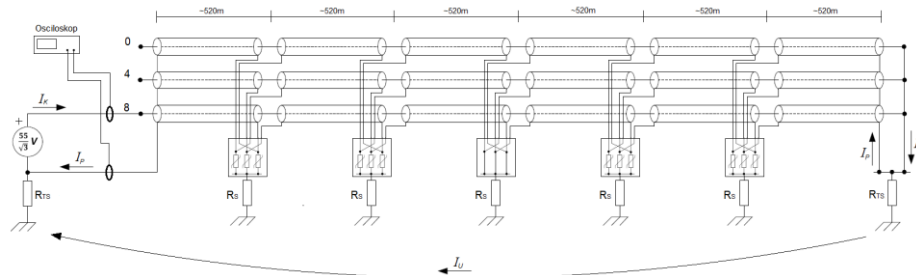
S druge strane, komponenta struje kvara koja se odvodi plaštem kabla (I_p) dovodi do njegovog termičkog naprezanja, tako da je njeno poznavanje značajno zbog pravilnog odabira poprečnog preseka plašta.

Za razliku od trožilnih kablova, redukcioni faktor jednožilnih kablovskih vodova zavisi ne samo od konstrukcije kabla već i od načina polaganja - postavljanjem u trougao ili ravan. Zbog toga je kod jednožilnih vodova za određivanje redukcionog faktora poželjno sprovesti merenje.

2. Merenje redukcionog faktora kablovskog voda

Na slici 1 prikazana je principna merna šema za određivanje redukcionog faktora kablovskog voda. Merenja su sprovedena na vodu koji čine tri jednožilna kabla Al 1x1000/95 mm² naponskog nivoa 64/110 kV sa izolacijom od umreženog polietilena (XLPE). Fazni provodnici kablovskog voda su uzemljeni na jednom kraju, dok su plaševi kabla uzemljeni na oba kraja. Kabl faze na kojoj se meri redukciono faktor (na slici 1 je to faza 8) je priključen na izolacioni transformator prenosnog odnosa 400/55V (11 kW) koji je korišćen kao izvor.

Struje kroz fazni provodnik i plašt kabla, merene su pomoću obuhvatnih kalemova Rogovskog čiji su signali dovedeni na osciloskop, što omogućava dalju obradu signala u vremenskom ili kompleksnom domenu.



Slika 1. Ispitno kolo za određivanje redukcionog faktora kablovskog voda

Prema oznakama i smerovima kao na slici 1, određena je struja koja se odvodi preko uzemljivača, kao razlika ukupne struje kvara i struje plašta:

$$I_u = I_k - I_p \quad (2)$$

Na osnovu poznate struje uzemljivača određena je i vrednost redukcionog faktora:

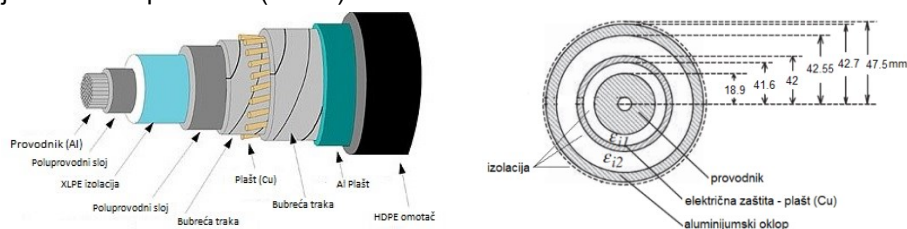
$$r = I_u/I_k = 0.1 \quad (3)$$

Osim merenja struja za određivanje redukcionog faktora, izmerena je i vrednost napona koji se indukuje u plaštu kada je odzemljen na jednom kraju. Pri propuštanju struje od 20.4 A kroz jedan fazni provodnik kablovskog voda napon na plaštu kabla je iznosio 27.1 V. Na vrednosti indukovano napona nema uticaja da li su plaštevci međusobno kratko spojeni ili razdvojeni.

3. Simulacioni model kablovskog voda

Primenom programskog alata ATP/EMTP formiran je model kablovskog voda sa ciljem da se simulacijom odredi redukциони faktor voda, a dobijene vrednosti uporede sa rezultatima merenja.

Na slici 2 (levo) prikazana je konstrukcija kabla, odnosno njegov poprečni presek. Kabl ima aluminijumski provodnik površine poprečnog preseka 1000 mm^2 . Osim električne zaštite (plašta), izrađene od bakarnih žica i trake ukupne površine poprečnog preseka od 97 mm^2 , kabl ima još jedan provodni sloj izrađen od aluminijumske trake debljine 0.15 mm. Glavna izolacija kabla je umreženi polietilen (XLPE).



Slika 2. Poprečni presek kabla i njegov ekvivalentni model

Programski alat ATP/EMTP ima mogućnost modelovanja (dobijanja električnih parametara) kablovskog voda na osnovu njegove geometrije. Ekvivalentni model kabla sa ucrtanim dimenzijama slojeva je prikazan na slici 2 (desno). Kako se može uočiti, ATP nema mogućnost direktnog uvažavanja poluprovodnih slojeva kabla, tako da njegov ekvivalentni model čine samo provodni slojevi i izolacija. Poluprovodni slojevi kabla su uvaženi kroz promenu relativne permeabilnosti. Odnosno ovi slojevi se tretiraju kao deo izolacije, čime se uvažava tačna induktivnost kabla, ali se smanjuje njegova kapacitivnost koja se može korigovati kroz povećanje zadate relativne permitivnosti izolacije [3]. Stvarna vrednost kapaciteta kabla je određena merenjem i iznosi $C = 638 \text{ nF}$ (205.8 nF/km). Da bi se kompenzovala greška u kapacitetu kabla prilikom modelovanja, za vrednost relativne permitivnosti izolacije je usvojeno:

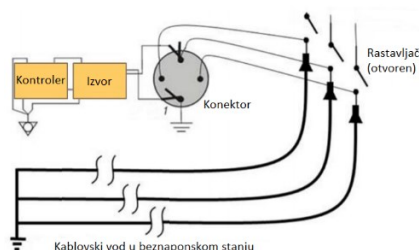
$$\epsilon_r = C \cdot \ln(r_2/r_1)/2\pi\epsilon_0 = 2.9 \quad (4)$$

gde su r_1 i r_2 spoljni i unutrašnji poluprečnik provodnika i plašta respektivno.

Kablovski vod koji čine tri jednožilna kabla je dužine 3.11 km, pri čemu su provodnici postavljeni u trouglu na dubini od 1 m. Sprovedeno je ukrštanje električne zaštite (plašta) kabla kao što je prikazano na slici 1. U modelu je usvojena vrednost specifične električne otpornosti tla na trasi voda od 50 Ωm .

3.1 Validacija modela kablovskog voda

U cilju validovanja formiranog modela kablovskog voda, sprovedeno je poređenje impedansi kabla dobijenih merenjem sa vrednostima impedansi koje se dobijaju simulacijama. Na slici 3, data je principiska šema za određivanje parametara voda. Merenje je sprovedeno uređajem proizvođača OMICRON tip CPC 100 + CP CU1.



Slika 3. Merenje impedansi kablovskog voda

Izmerene su impedanse sledećih petlji: fazni provodnik – zemlja (L_1-E , L_2-E , L_3-E), fazni provodnik – fazni provodnik (L_1-L_2 , L_2-L_3 , L_1-L_3) i impedansa između združena tri provodnika i zemlje (L_1, L_2, L_3-E). U tabeli 1 uporedo su prikazani rezultati merenja i simulacija, kao i njihovo relativno odstupanje (Δ) izraženo u procentima. Može se uočiti da su odstupanja mala (<5%) osim kod faznog ugla (φ) impedanse $Z_{L_1,2,3-E}$ gde je greška nešto veća (20%), jer je uticaj specifične električne otpornosti tla, odnosno podzemnih metalnih instalacija na nju najveći.

Tabela 1. Validacija modela kablovskog voda

	Z_{L-L}^{mer}	Z_{L-L}^{sim}	Δ [%]	Z_{L-E}^{mer}	Z_{L-E}^{sim}	Δ [%]	$Z_{L_1,2,3-E}^{mer}$	$Z_{L_1,2,3-L}^{sim}$	Δ [%]
Z [Ω]	0.821	0.835	1.82	0.443	0.446	0.52	0.209	0.214	2.32
φ [$^\circ$]	73.81	73.25	0.76	54.27	51.40	5.28	27.87	22.39	19.66

4. Komparativna analiza rezultata merenja i simulacija

Simulacijom kratkog spoja na modelu voda, formiranog na osnovu geometrijskih parametara o njemu, određena je vrednost redukcionog faktora. Takođe, određena je i vrednost indukovanog napona na krajevima odzemljenog plašta pri proticanju struje od 20.4 A kroz fazni provodnik.

U tabeli 2 upoređeno su prikazani rezultati simulacija i merenja. Date su vrednosti dobijenih redukcionih faktora (r) i indukovanih napona plašta ($U_{plašt}$) kao i relativno odstupanje simulacija i merenja izraženo u procentima.

Tabela 2. Poređenje rezultata merenja i simulacija

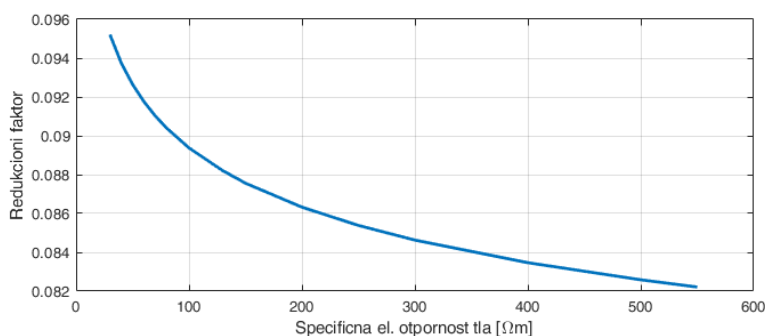
Redukcioni faktor			Indukovani napon plašta (V)		
r^{sim}	r^{mer}	Δ [%]	$U_{plašt}^{sim}$	$U_{plašt}^{mer}$	Δ [%]
0.1	0.093	7	27.1	26.5	2.2

Iz table 2 se može uočiti da odstupanje u dobijenim rezultatima nije veliko (do 7%) i da se formirani model kablovskog voda može iskoristiti za analize koje podrazumevaju određivanje raspodela struje zemljospoja, struje plašta, indukovanih napona plašta i slično, za različite načine polaganja voda.

4.1 Analiza uticaja parametara

Formirani model kablovskog voda iskorišćen je za analizu uticaja parametara, kao što su specifična električna otpornost tla i rastojanje između osa provodnika, na vrednosti redukcionog faktora.

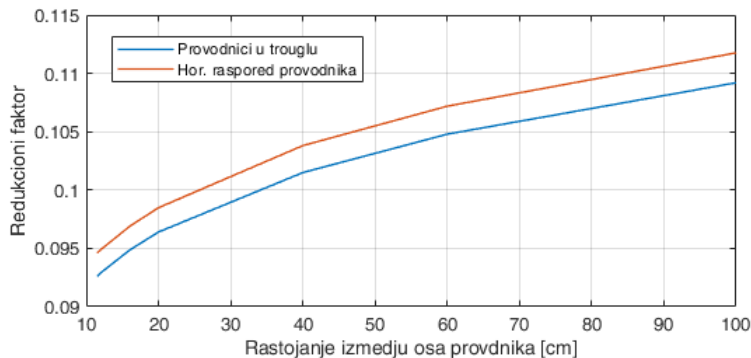
Varirana je vrednost specifične električne otpornosti tla u opsegu od 30 Ω m do 500 Ω m, i beležene su vrednosti proračunatog redukcionog faktora. Dobijena zavisnost prikazana je na slici 4. Sa grafika se može uočiti da bi se usvajanjem niže vrednosti ekvivalentne specifične električne otpornosti tla dobilo bolje slaganje sa rezultatima merenja.



Slika 4. Vrednost redukcionog faktora u funkciji specifične el. otpornosti tla

Razlog za to je verovatno postojanje brojnih podzemnih metalnih instalacija u okolini kablovskog voda (gradska sredina), čiji je uticaj ekvivalentan smanjenju specifične električne otpornosti tla u modelu [4].

U sledećem slučaju je varirano rastojanje između osa provodnika u opsegu od 10 cm do 100 cm, i beležene su vrednosti redukcionog faktora. Pri tome su posmatrane dve konfiguracije rasporeda provodnika voda: provodnici postavljeni u trouglu i provodnici postavljeni u horizontalnoj ravni. Dobijena zavisnost prikazana je na slici 5. Sa povećanjem međusobnog rastojanja između provodnika uvećava se i vrednost redukcionog faktora pri čemu je za horizontalni raspored ta vrednost za nekoliko procenata veća.



Slika 5. Vrednost redukcionog faktora u funkciji horizontalnog rastojanja između provodnika voda

5. Zaključak

U radu su prikazani rezultati i postupak merenja redukcionog faktora 110 kV kablovskog voda, koji čine tri jednožilna kabla postavljena u trouglu.

Model analiziranog kablovskog voda, formiran u programskom alatu ATP/EMTP na bazi geometrijskih parametara kablovskog voda, daje rezultate koji se dosta dobro slažu sa merenjem. U konkretnom slučaju, pokazano je da se formirani model može koristiti za određivanje raspodele struje zemljospoja, odnosno određivanje komponenti struje kvara koje se odvođe kroz zemlju i kroz plašt kabla, što bi pomoglo projektantima pri optimizaciji uzemljivačkog sistema transformatorske stanice, kao i pri odabiru optimalnog preseka električne zaštite kabla.

Analiziranjem sprovedenog modela došlo se do zaključaka da bi na vrednosti redukcionog faktora kablovskog voda značajan uticaj mogle imati podzemne metalne instalacije tipične za gradske sredine. Njihov uticaj u modelu se može uvažiti smanjenje ekvivalentne specifične električne otpornosti tla, na vrednosti znatno niže od tipičnih za posmatrano tlo.

Takođe, analiza prostornog rasporeda polaganja jednožilnih kablova pokazala je da njegov uticaj na vrednosti redukcionog faktora napojnog voda nije veliki. Promena rastojanja između provodnika sa 10 cm na 100 cm dovodi do uvećanja vrednosti redukcionog faktora za oko 20%. Pokazalo se da horizontalni raspored provodnika daje nešto veće vrednosti redukcionog faktora.

Literatura

- [1] Lj. Popović, "Determination of the reduction factor for feeding cable lines consisting of three single-core cables," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 736–743, July 2003. [DOI: 10.1109/TPWRD.2003.813814](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813814)

- [2] M. Petrović, M. Šupić, "Određivanje redukcionog faktora 110 kV kablovskog voda 'Beograd 17 - Obilić'", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"* 2005, br. 17, str. 115-118 <http://www.zbornik-eint.org/wp-content/uploads/2015/04/11Odredjivanje-redukcionog-faktora-110.pdf>
- [3] B. Gustavsen, "Panel session on data for modeling system transients insulated cables," 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA, 2001, pp. 718-723 vol.2, [doi: 10.1109/PESW.2001.916943](https://doi.org/10.1109/PESW.2001.916943).
- [4] Lj. Popović, "Determination of Actual Reduction Factor of HV and MV Cable Lines Passing through Urban and Suburban Areas", *Facta Universitatis, Ser: Electronics and Energetics*, Vol. 27, num. 1, March 2014, pp.25-39. <http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUElectEnerg/article/view/167>
- [5] D. Tasić, M. Stojanović, "Reduction Factor of Aerial Bundled Cables", *Facta Universitatis, Ser: Electronics and Energetics*, Vol. 19, num. 1, April 2006, pp.63-70, ISSN 0353-3670. <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0353-3670/2006/0353-36700601063T.pdf>
- [6] M. Stojanović, D. Tasić, D. Vučković, "Generalized Approach for Calculation of Reduction Factor of a Cable Line Consisting of Three Single-Core Cables", *International Review on Modeling and Simulation (I.R.E.M.O.S)*, Vol. 5, num. 4, 2012, pp. 1758-1763, ISSN 1974-9821.

Abstract: The procedure for determining the reduction factor for 110 kV feeding cable lines based on the measurement results is presented in this paper. The obtained results were compared with the values obtained by cable line modeling by ATP/EMTP software tool. The values obtained for reduction factor are compared, as well as the values of induced voltage in the cable sheath. The obtained results show a fairly good agreement between the simulation model and measurements. In the created model, the influence of soil resistivity and conductors arrangement on the values of the reduction factor were analyzed. It has been shown that their combined impact can be significant

Keywords: ATP/EMTP, cable, reduction factor, sheath

Reduction Factor of 110kV Cable Line: Measurement and Simulation Model

Ranko Jasika, Jovan Mrvić, Ninoslav Simić, Momčilo Petrović

Rad primljen u uredništvo: 28.08.2020. godine.

Rad prihvaćen: 19.10.2020. godine.

