Broj rada: R3-11
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-11_109

VISOKOOMSKI KVAROVI U MREŽAMA UZEMLJENIM PREKO OTPORNIKA

HIGH-IMPEDANCE FAULTS IN NETWORKS GROUNDED VIA A RESISTOR

Vladanko TOMAŠ, Elektroprenos BiH a.d. Banja Luka, Bosna i Hercegovina

KRATAK SADRŽAJ

Na području Republike Srpske većina srednjenaponske mreže, koja je uzemljena, koristi niskoomski otpornik, a zanemarljiv procenat Petersenovu prigušnicu. Mreže su uzemljene tako da se struja zemljospoja ograničava na 300 A. Rad daje prikaz električnih veličina i njihovih vrijednosti koje se javljaju prilikom zemljospoja. Struja zemljospoja zavisi od napona prije kvara, podužnih parametara dalekovoda, te dominantno od prelazne otpornosti na mjestu kvara. Dugogodišnjim praćenjem i analiziranjem kvarova ustanovljeno je da se vrijednost struje zemljospoja najčešće kreće u opsegu od 200 – 300 A u zavisnosti od već navedenih parametara. Međutim, nisu toliko rijetki ni slučajevi kada struja zemljospoja ima male vrijednosti zbog velikih prelaznih otpornosti na mjestu kvaru. Rad prikazuje i dijagram struja koje imaju vrijednosti čak manje od 5 A. Osnovni cilj rada je da se da predlog podešenja za usmjerene zemljospojne zaštite u skladu sa iskustvom iz eksploatacije. S obzirom da su podešenja struja relativno malih vrijednosti, treba voditi računa da se pravilno izaberu obuhvatni strujni transformatori zbog tačnosti mjerenja.

Ključne reči: niskoomski otpornik, zemljospoj, prelazna otpornost na mjestu kvara, podešenje, obuhvatni strujni transformator

ABSTRACT

In the territory of the Republic of Srpska, most of the medium-voltage network is grounded via a low-impedance resistor and a negligible percentage uses a Peterson coil. The networks are grouned so that the earth-fault current is limited to 300 A. The paper presents the electrical quantities and their values that occur during earth-faults. The earth-fault current depends on the pre-fault voltage, the longitudinal parameters of the transmission line and predominantly on the fault resistance at the fault location. Through many years of monitoring and analyzing of faults, it has been established that the values of the earth-fault current most often ranges from 200 - 300 A, depending on the previously mentioned parameters. However, cases in which the earth-fault current has low values due to high-impedance resistances at the fault location are not uncommon either. The paper also shows diagrams of currents that have values even less than 5 A. The main goal of the paper is to propose settings for directional earth-fault protection in accordance with operational experience. Since the current setting has relatively small value, care should be taken to properly select the cable core transformers in order to ensure measurement accuracy.

* Vladanko Tomaš vladanko.tomas@elprenos.ba

Keywords: low-impedance resistor, earth-fault, fault resistance, setting, cable core transformer

UVOD

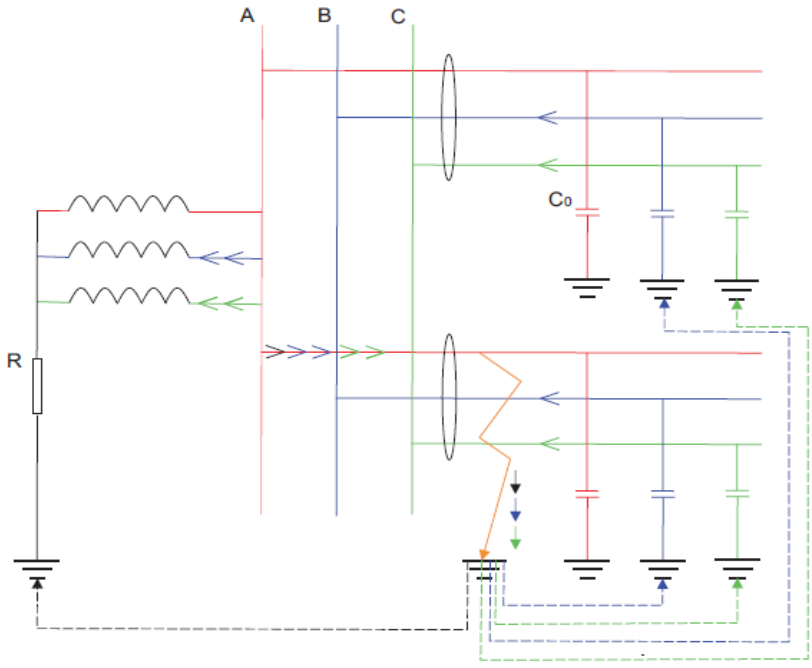
Način uzemljenja zvjezdišta transformatora ima veliku važnost za eksploataciju mreže. Uzemljenje zvjezdišta transformatora omogućava lakšu detekciju kvarova. Povećanje struje je povoljno sa stanovišta lakšeg otkrivanja kvara i električni luk postaje stabilniji što ne dozvoljava pojavu intermitirajućih prenapona. Ovaj način uzemljenja ima i nedostatak, koji se ogleda u pogoršanoj stabilnosti sistema zbog povećanih struja prilikom jednofaznih kvarova sa zemljom, te vremena reagovanja relejne zaštite moraju biti znatno brža nego kod izolovanih mreža. Uzemljenje zvjezdišta transformatora 10 kV ili 20 kV mreže preko niskoomske impedanse je u skladu sa strategijom usvojenom u tehničkim preporukama ED Srbije, obavezno ako kapacitivne struje prelaze 40 A u mreži 10 kV i 30 A u mreži 20 kV [1].

1 STRUJE I NAPONI PRI JEDNOFAZNIM KVAROVIMA

Na slici 1 je prikazana raspodjela struja pri jedonafaznom kvaru u mreži uzemljenoj preko niskoomske impedanse. Zbog dozemnih kapaciteta i dalje postoje kapacitivne struje ali se javlja dominantna komponenta struje koja ima rezistivni karakter zbog ugradnje otpornika. Kapacitvne struje zavise od geometrije dalekovoda, koja određuje otočne kapacitete, kao i napona mreže.

$$\underline{I_C} = j3V_f\omega C_0 \tag{1}$$

Struja koju mjeri obuhvatni strujni transformator na dalekovodu, koji je pogođen kvarom, ima rezistivni dio koji proističe iz struje koja teče kroz otpornik, te kapacitvni dio koji je jednak zbiru kapacitivnih struja “zdravih“ dalekovoda.



Slika 1 – Raspodjela struja kvara

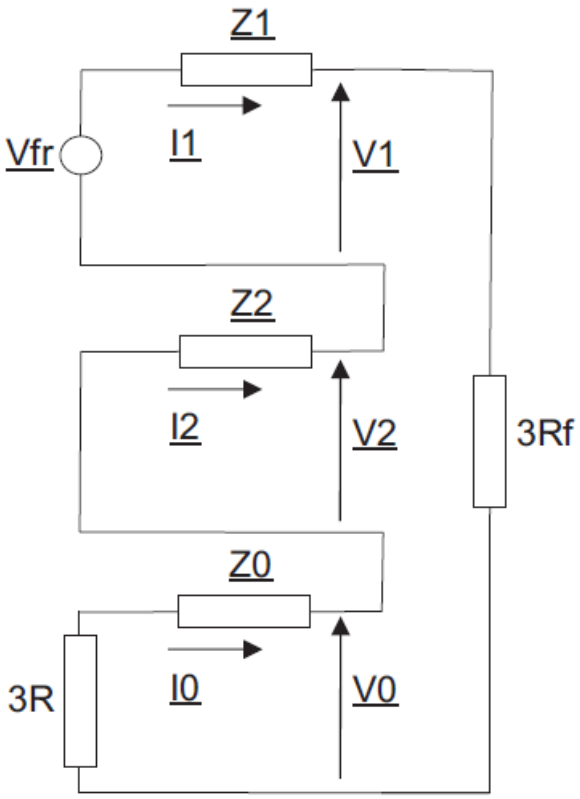
S obzirom da se radi o nesimetričnom kvaru, sistem se može rastaviti na tri simetrična sistema, direktni, inverzni i nulti, odakle proizilaze mnogi zaključci i prijedlozi za podešenja. Ako pretpostavimo da je srednjenaponski (SN) odvod radijalno napojen, važi slika 2, gdje Z_1, Z_2 i Z_0 predstavljaju direktnu, inverznu i nultu zbirnu impedansu dalekovoda, transformatora, i napojne mreže, V_{fr} fazni radni napon prije kvara, sa faznim stavom jednakim nuli, R_f prelazna otpornost kvara. Shodno prethodnim pretpostavkama mogu se izvesti sljedeće jednačine za direktni, inverzni i nulti napon respektivno, te trostruku nultu struju.

$$\underline{V_1} = \frac{\underline{Z_2} + \underline{Z_0} + 3R + 3R_f}{\underline{Z_1} + \underline{Z_2} + \underline{Z_0} + 3R + 3R_f} V_{fr} \tag{2}$$

$$\underline{V_2} = -\frac{\underline{Z_2}}{\underline{Z_1} + \underline{Z_2} + \underline{Z_0} + 3R + 3R_f} V_{fr} \tag{3}$$

$$\underline{V_0} = -\frac{\underline{Z_0} + 3R}{\underline{Z_1} + \underline{Z_2} + \underline{Z_0} + 3R + 3R_f} V_{fr} \tag{4}$$

$$3\underline{I_0} = \frac{V_{fr}}{\underline{Z_1} + \underline{Z_2} + \underline{Z_0} + 3R + 3R_f} \tag{5}$$



Slika 2 – Direktni, inverzni i nulti sistem

Pretpostavkom da je prelazna otpornost bliska nuli, te da je *3R* dosta veće od zbira direktne, inverzne i nulte impedanse mogu se izvesti sljedeće jednačine:

$$\underline{V_1} = V_{fr} \tag{6}$$

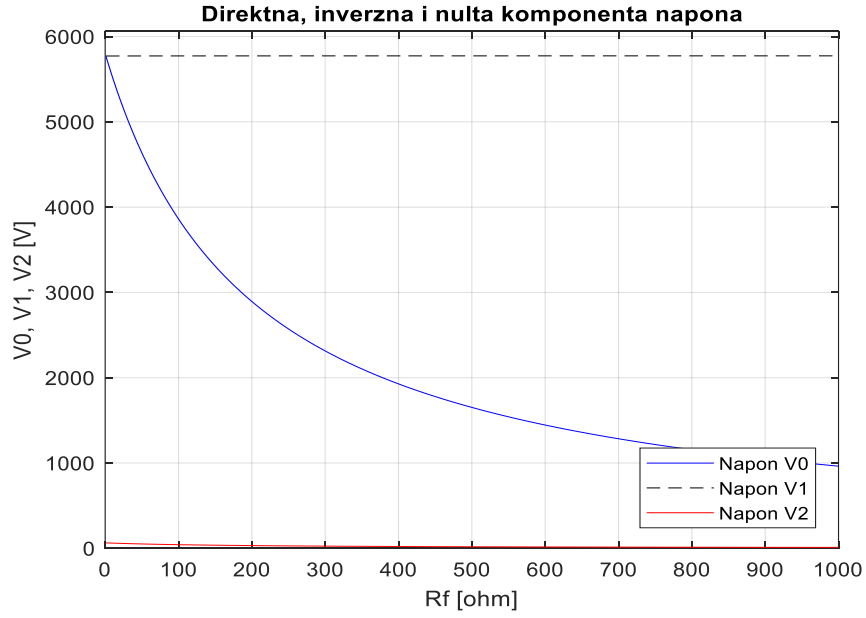
$$\underline{V_2} \approx 0 \tag{7}$$

$$\underline{V_0} = -V_{fr} \tag{8}$$

$$3\underline{I_0} = \frac{V_{fr}}{3R} \tag{9}$$

Direktna komponenta napona postoji i ona je jednaka faznom radnom naponu prije kvara u fazi koja je pogođena kvarom. Inverzna komponenta napona je zanemarljiva, dok fazor nulte komponente napona ima vrijednost faznog radnog napona, faze koja je pogođena kvarom, ali sa negativnim predznakom. Formula 9 predstavlja obrazac za računanje vrijednosti otpornika, zavisno na koju struja se ograničava zemljospoj.

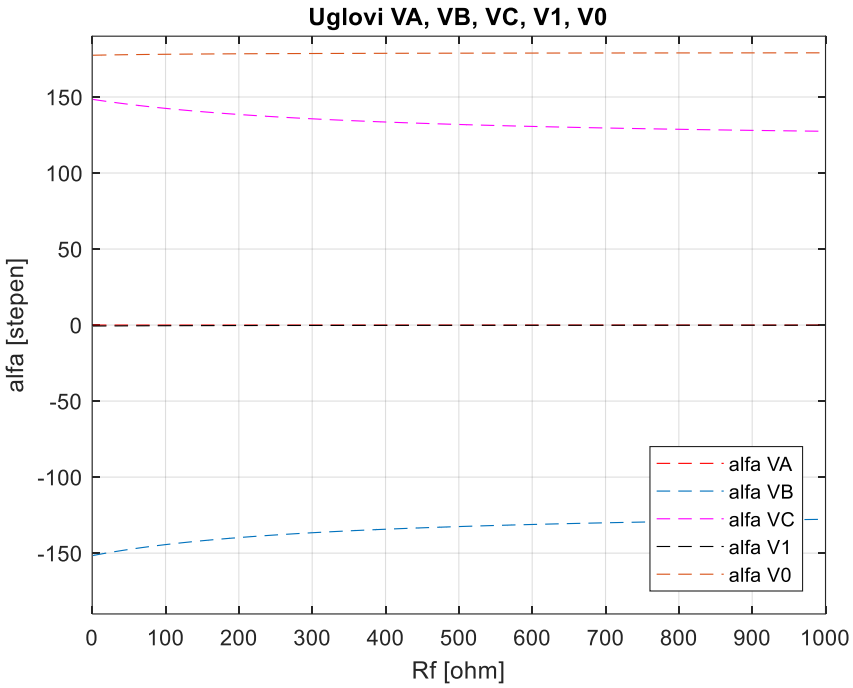
Ako se uobziri impedansa najtipičnijeg transfromatora, 110/10 kV i snage 20 MVA, u elektroenergetskom sistemu, važi slika 3. Takođe, pretpostavka je da se kvar desio u režimu praznog hoda.



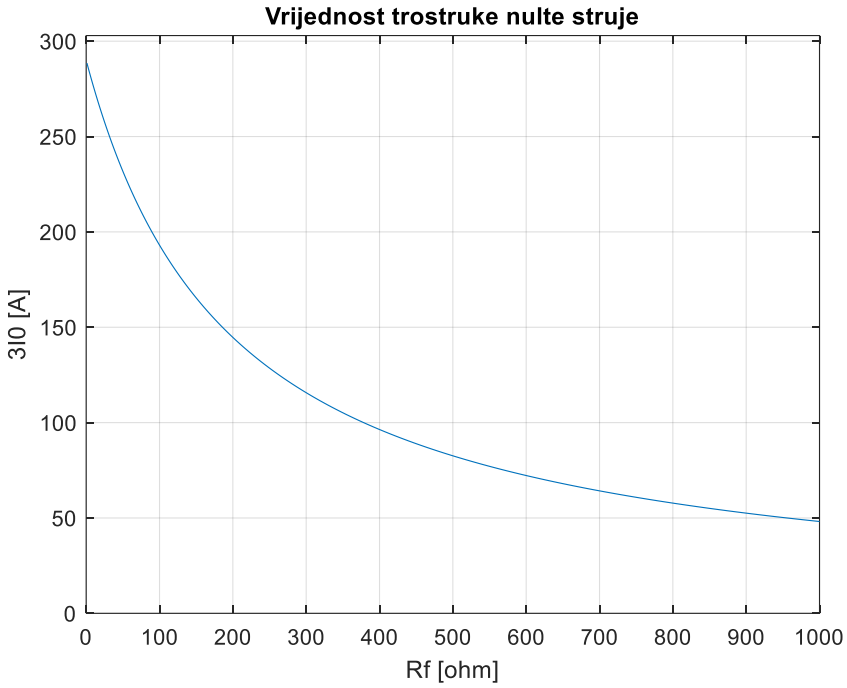
Slika 3 – Efektivne vrijednosti napona V_0, V_1, V_2

Važan zaključak je da efektivna vrijednost trostrukog nultog napona, napona koji se podešava u releju za funkciju usmjerene zemljospojne zaštite, zavisi od prelazne otpornosti. Vrijednosti uglova u zavisnosti od prelazne otpornosti su prikazani na slici 4. Fazor napona direktne komponente ima isti fazni stav kao i napon faze u kojoj se desio kvar. Inverzna komponenta napona ima malu vrijednost te se može zanemariti. Nulta komponeta napona ima suprotan fazni stav u odnosu na fazu u kojoj se desio kvar. Ako se uobziri prelazna otpornost, teret, kapaciteti mreže, uglovi mogu biti pomjerneni u odnosu na navedene vrijednosti zavisno od uticaja navedenih parametara. Slika 5 predstavlja zavisnost trostruke nulte struje od prelazne

otpornosti, čija vrijednost pri metalnom kratkom spoju spoju i nominalnom radnom naponu dostiže vrijednost 289 A.



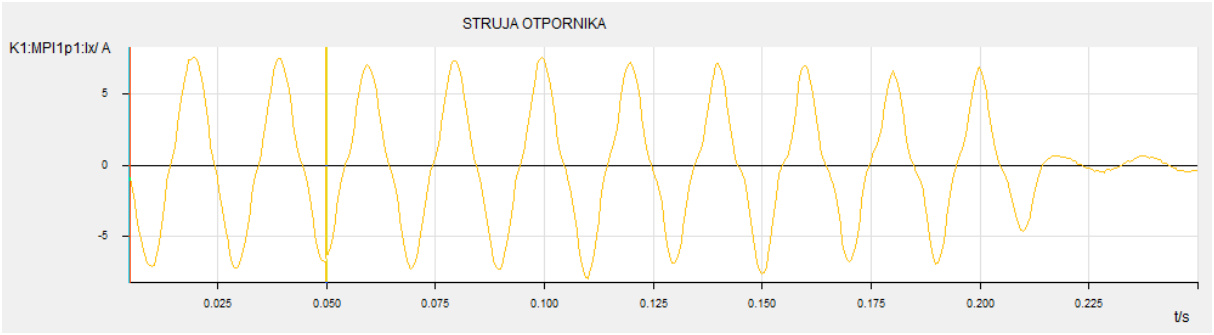
Slika 4 – Uglovi napona V_A, V_B, V_C, V_1, V_0



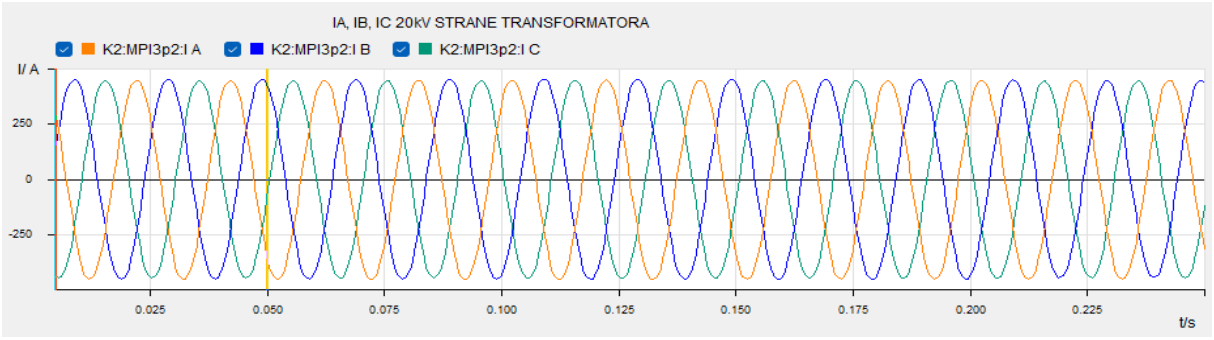
Slika 5 – Efektivna vrijednost trostruke nulte struje

2 ZAPIS VISOKOOMSKOG KVARA

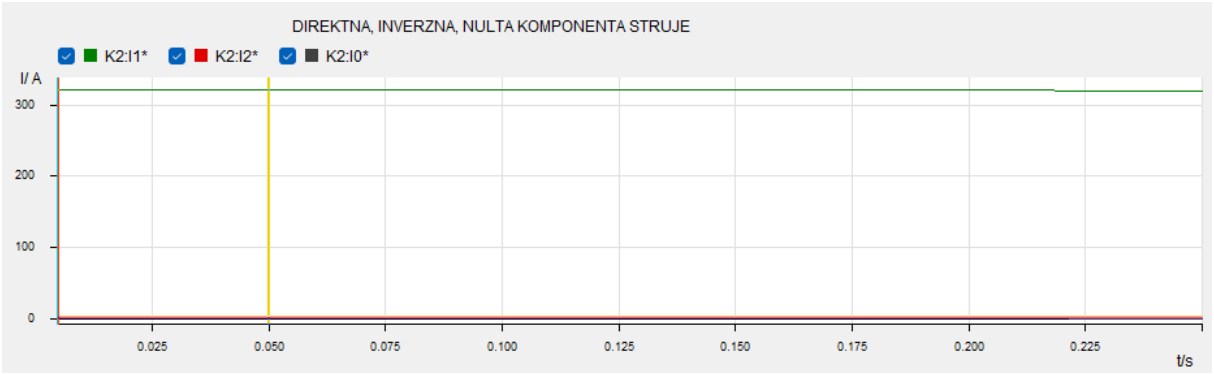
Sljedeće slike su disturbance snimci u COMTRADE formatu, analizirani sa pogramom SIGRA, sa releja iz jednog transformatorskog polja 110/20 kV. Struje i naponi su iz transformatorske ćelije. Disturbance je podešen tako da snima pobude i tripove. Snimak je zapravo pobuda prekostrujne zaštite otpornika na SN strani transformatora. Pri bilo kojem kvaru u SN mreži, struja se zatvara kroz otpornik, te relej registruje kvar. Sve navedene vrijednosti napona i struja će biti uzete u istom vremenskom trenutku T=50 ms. Slike 6 i 7 prikazuju struju otpornika i fazne struje prilikom visokoomskog kvara. Efektivna vrijednost struje otpornika iznosi 4,67 A. Fazne struje imaju vrijednosti 320,7 A, 323,16 A i 319,03 A respektivno. Razlika u faznim strujama je zanemarljiva, što nije čudno jer se desio visokoomski kvar za izrazito malom trostrukom nultom strujom.



Slika 6 – Struja otpornika

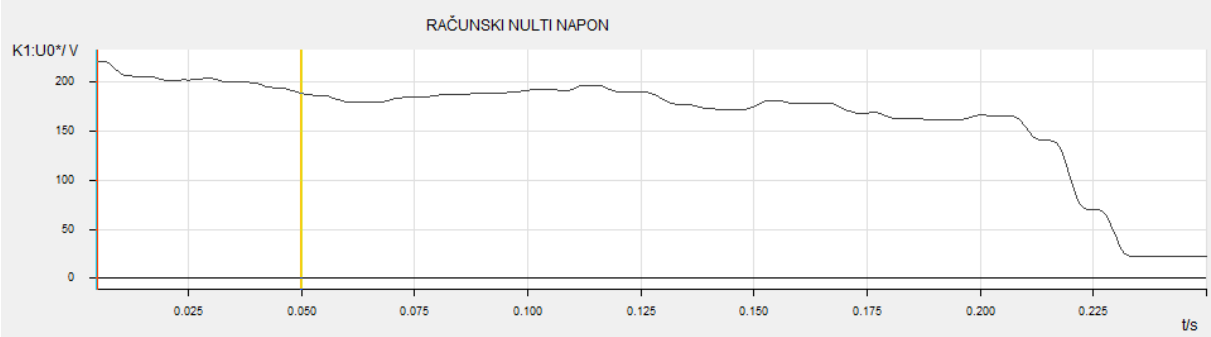


Slika 7 – Fazne struje

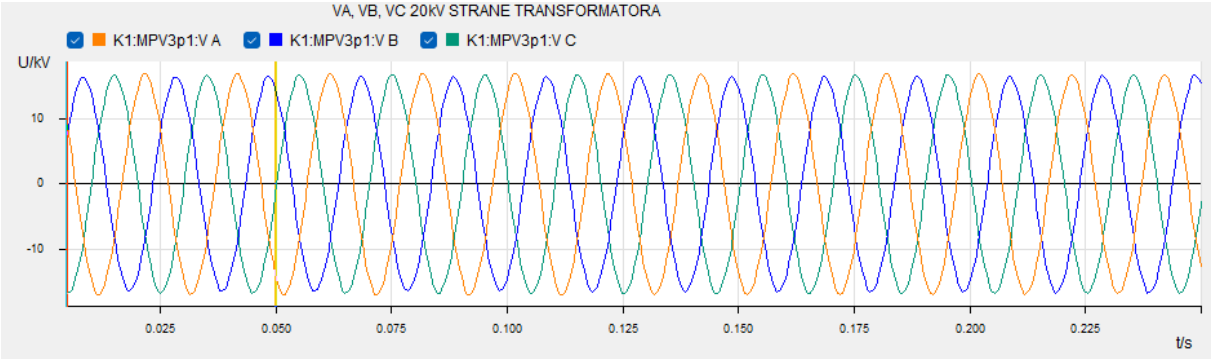


Slika 8 – Vrijednosti struja I_0, I_1, I_2

Direktna, inverzna i nulta komponenta struje iznose 320,94 A, 1,34 A i 1,5 A respektivno. Ovdje treba napomenuti da slika 8 prikazuje nultu komponentu struje, a ne trostruku nultu struju, pa odatle i razlika u vrijednosti u odnosu na struju otpornika. Na zaštitni uređaj transformatorskog polja se nije vodio trostruki nulti napon iz mjerne SN ćelije, ali jesu tri fazna napona sa SN sabirnica. Shodno tome se mogao odrediti računski nulti napon. Slika 9 prikazuje računski nulti napon koji dostiže vrijednost 188,03 V, što se može preračunati u sekundarnu vrijednost od 0,543 V. Trostruki nulti napon, koji se mjeri na otvorenom toruglu naponskih mjernih transformatora, iznosi 1,63 V. Vrijednost nultog napona ima veoma malu vrijednost, što je posljedica visokoomskog kvara i neznatne nesimetrije faznih napona prikazanih na slici 10. Fazni naponi imaju vrijednosti 11,87 kV, 11,55 kV i 11,78 kV respektivno.

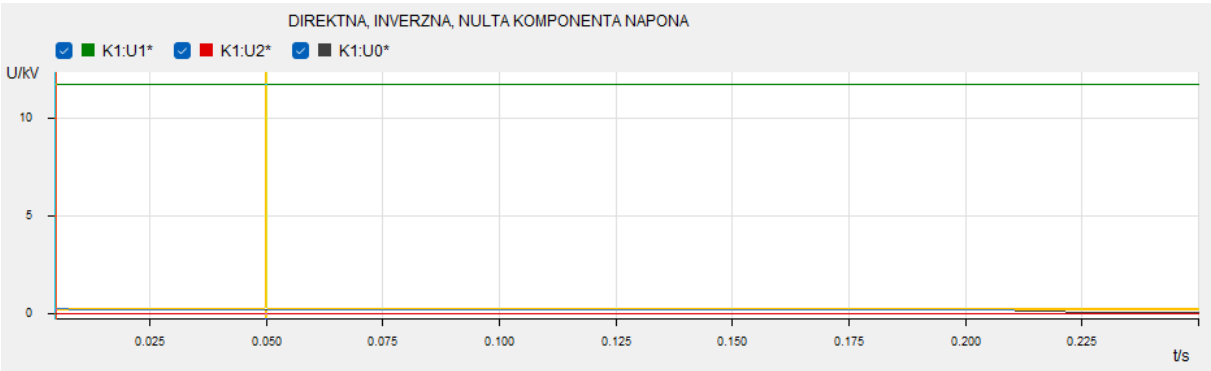


Slika 9 – Računski nulti napon V_0



Slika 10 – Efektivne vrijednosti napona V_A, V_B, V_C

Direktna, inverzna i nulta komponeta napona iznose 11,73 kV, 0,00556 kV i 188,03 V respektivno. Ovime se potvrdila tačnost formula (6), (7), (8).



Slika 11 – Direktna, inverzna, nulta komponenta napona

2.1 Harmonijski sadržaj

U tabeli I prikazan je harmonijski sadržaj faznih struja, napona i struje otpornika.

Tabela I – Harmonijski sadržaj struja i napona

	DC [%]	1 [%]	2 [%]	3 [%]	5 [%]	7 [%]
IA	0,2	100	0,1	0,4	1,1	0,6
IB	0,1	100	0,1	0,2	1	0,5
IC	0,1	100	0,2	0,2	0,9	0,6
3I0	4,1	100	4,7	11,4	3,3	0,8
VA	0,3	100	0,2	0,2	0.9	0,3
VB	0,1	00	0,2	0,3	0,9	0,3
VC	0	100	0,2	0,1	1	0,2

U faznim strujama i naponima postoji neznatan dio viših neparnih harmonika. Interesanno je sa trostrukom nultom strujom koja ima značajne vrijednosti DC komponente, 2., 3. i 5. harmonika. Razlog za to je prisutvo električnog luka na mjestu kvara.

3 PODEŠENJA

Struja koja teče kroz otpornik ograničena je na maksimalnih 300 A, međutim od interesa je da se obuhvate kvarovi sa maksimalnim prelaznim otpornostima. Kako nije moguće predvidjeti maksimalne vrijednosti, podešenje trostruke nulte struje je iskustveno. Na osnovu analize raznih snimaka sa releja ustanovljeno je da su struje kvarova najčešće u opsegu od 150-300 A. Međutim sa slike 6 se vidi da te struje mogu biti i ispod 5 A. Zbog tačnosti mjerenja trostruku nultu struju na odovodima treba mjeriti sa obuhvatnim mjernim transformatorima.

PREPORUKA za podešenje trostruke nulte struje u OP Banja Luka: 3 A

Obuhvatni strujni mjerni transformatori mogu biti raznih prenosnih odnosa, pa treba voditi računa o minimalnoj struji koja se može podesiti u releju. Tabela II ima značaj za izbor releja jer je veoma bitno pravilno izabrati opsege strujnih kanala kao i minimalno podešenje struje za usmjerenu zemljospojnu zaštitu. S obzirom da se trostruka nulta struja podešava na 3 A u skladu s tim treba podesiti i nulti napon inače neće biti prorade zaštitne funkcije. Nulti napon je zapravo napon na otporniku, kroz koji teče trostruka nulta struja. Uvažavajući prethodno rečeno i jednačinu 4 lako se dolazi do zaključka da će pri struji kvara od 3 A, napon na otvorenom trouglu naponskih mjernih transformatora imati vrijednost cca 1 V. Za zemljospoj bez prelazne otpornosti taj napon će biti 100 V.

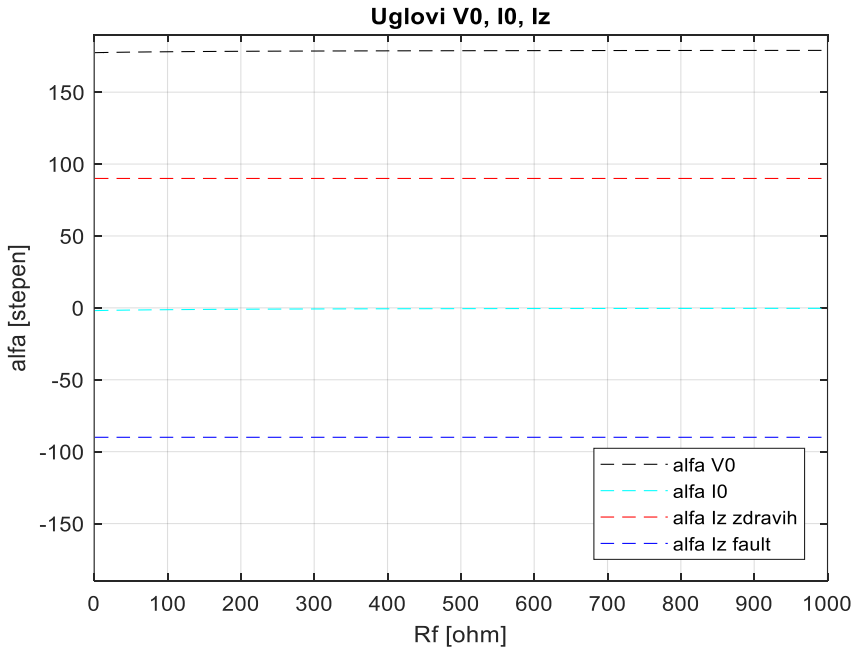
PREPORUKA za podešenje trostrukog nultog napona u OP Banja Luka: 1 V

Sljedeća bitna stavka je izbor ugla. Na slici 12 prikazani su uglovi nultog napona i struje, kao i kapacitivnih struja zdravih dalekovoda i dalekovoda koji je pođen kvarom. Releji kao

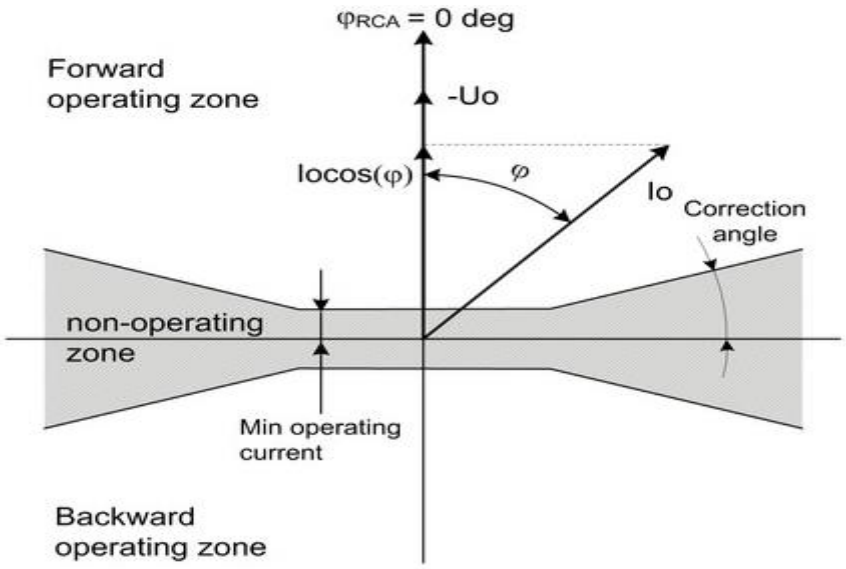
polarizacionu veličinu koriste nulti napon sa negativnim predznakom, jer je to zapravo fazor napon između zvjezdišta energetskog transformatora i zemlje. Fazni stav negativnog fazora nultog napona iznosi 0°, što je u fazi sa nultom strujom. Karakteristika koju koriste neki releji nalazi se na slici 13. Porastom kapacitivnih komponenti struja zdravih dalekovoda dolazi do razlike između uglova negativnog fazora nultog napona i fazora nulte struje. Zbog male rezistivne komponente struje kvara, a velike reaktivne, proizvođači releja rade korekcije karakterisitke. Proporučuje se da se korisiti kosinusni kriterijum.

Tabela II –Minimalna podešenja struja

Prenosni odnos	Primarna vrijednost struje [A]	Sekundarna vrijednost struje [mA]
50/1	3	60
100/1	3	30
150/1	3	20
100/5	3	150
50/5	3	300



Slika 12 – Fazni stavovi nultog napona, nulte struje, kapacitivnih struja



Slika 13 – Karakteristika, izvor: [2]

4 ZAKLJUČAK

U radu je dat predlog podešenja za usmjerenu zemljospojnu zaštitu u mreži uzemljenoj preko niskoomskog otpornika. Razne distributivne firme imaju drugačije pravilnike za podešenja, te često idu sa velikm vrijednostima podešenja, često ne ispod 5 V a mnogo češće i više. Usljed nerjetkih visokoomskih kvarova treba da se ide sa niskim podešenjima, od 3 A primarno i 1 V sa sekundara otvorenog trougla. U normalnim pogonskim uslovima napon otvorenog trougla najčešće ne bude iznad 200-300 mV. Takođe nema bojazni da bi moglo doći do neželjenog ispada usljed neke nesimetrije, jer treba da budu dovoljno niske vrijednosti struje i napona, kao i da bude odgovarajući ugao između navedenih veličina.

LITERATURA

[1] JP ERS, 2004, “Uzemljenje neutralnih tačaka u elektrodistributivnim mrežama 110 kV, 35 kV, 20 kV, 10 kV i 0,4 kV. Tehnička preporuka br.6“
[2] Tehničko uputstvo za ABB releje dostupno na: https://techdoc.relays.protection-control.abb/r/REX610-Technical-Manual/1.1/en-US/Directional-earth-fault-principles