



**ODABIR OPTIMALNOG UGLA USMERENE ZEMLJOSPOJNE ZAŠTITE IZVODA  
SREDNJENAPONSKE DISTRIBUTIVNE MREŽE UZEMLJENE PREKO NISKOOMSKE  
REZISTANSE**

**OPTIMAL ANGLE SETTINGS OF DIRECTIONAL EARTH FAULT PROTECTION OF FEEDER OF  
MEDIUM VOLTAGE POWER GRID EARTHED BY LOW RESISTANCE**

Nikola MILOŠEVIĆ, Elektrodistribucija Srbije, Ogranak ED Subotica, Srbija  
Milan MILANKO, Elektrodistribucija Srbije, Ogranak ED Subotica, Srbija

**KRATAK SADRŽAJ**

Analizom registra dugotrajnih prekida u ogranaku ED Subotica ustanovljeni su istovremeni ispadi više srednjenaponskih izvoda iz iste napojne TS 110/20 kV. Pregledom hronološkog redosleda događaja primećeno je kako zemljospoj na jednom od srednjenaponskih izvoda uzrokuje istovremeni ispada više kablovskih srednjenaponskih izvoda. Naime, učestalim povećavanjem dužine srednjenaponske mreže, odnosno uvođenjem novih srednjenaponskih, uglavnom kablovskih, vodova dolazi do povećanja modula kapacitivne struje zemljospoja u mreži preko podešene vrednosti kod „zdravih“ kablovskih izvoda, zbog čega na istim dolazi do reagovanja neusmerene zemljospojne zaštite. Takođe, učestalim uvođenjem distribuiranih izvoda električne energije, odnosno malih gasnih i biogasnih elektrana dolazi do nesimetrije u srednjenaponskoj distributivnoj mreži, koja za posledicu ima neselektivan rad neusmerene zemljospojne zaštite. Problem se praktično rešava uvođenjem usmerene zemljospojne zaštite za koju je potrebno odrediti optimalnu oblast rada, odnosno karakterističan ugao između struje i napona nultog redosleda. Neki od poznatih komercijalnih proizvođača uređaja relejne zaštite imaju različitu logiku rada, odnosno podešavanje karakterističnih parametara, što dodatno usložnjava problem. Kako bi se obezbedio pouzdan rad zaštite potrebno je što preciznije odrediti navedeni optimalni ugao. Predlog za rešavanje navedene problematike je da se isti odredi pomoću snimka kvara. U radu su predstavljena praktična rešenja podešavanja usmerene zemljospojne zaštite na TS 110/35/20 kV „Subotica 1“ i TS 110/20 kV „Kanjiža“.

**Ključne reči:** usmerena zemljospojna zaštita, simetrične komponente, distribuirani izvori električne energije, pouzdanost napajanja

**ABSTRACT**

The analysis of the long-term interruptions register in the ED Subotica determined simultaneous outages of several medium voltage feeders from the same 110/20 kV substation. By reviewing chronological sequence of events, it was noticed that earth fault on one of the medium voltage feeders causes simultaneous trip of several cable medium voltage feeders. Due to a frequent increase in the length of the medium voltage power grid, i.e. the introduction of new medium voltage, mainly cable, lines increases the RMS of the capacitive earth fault current in the power grid over the set values for "healthy" cable terminals. Also, a frequent introduction of distributed power sources, i.e. small gas and biogas power plants, leads to unbalance in the medium voltage distribution power grid, which results in improper operation of unidirectional earth fault protection. The problem is practically solved by introducing directional earth fault protection, which requires determining optimal working area, i.e. the characteristic angle between zero current and voltage. Some of the well-known commercial manufacturers of relay protection devices have different operation logic, i.e. the setting of characteristic parameters, which further exacerbates the problem. In order to ensure reliable operation of the protection, it is necessary to determine specified optimal angle as precisely as possible. The proposal for solving the mentioned problem is to determine the angle by using data from the fault record. The paper presents practical solutions for setting up directional earth fault protection on substations 110/35/20 kV Subotica 1 and 110/20 kV Kanjiža.

**Key words:** directional earth fault, symmetrical components, distributed sources of electrical energy

**25**  
godina

13. SAVETOVANJE O ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA sa regionalnim učešćem  
13<sup>th</sup> CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION with regional participation

12-16 / 09 / 2022, Kopaonik, Srbija



## ZBORNIK RADOVA | PROCEEDINGS



## UVOD

Zbog pojave učestalih istovremenih isključenja više sredjenaponskih izvoda u transformatorskim stanicama na distributivnom području ogranka Subotica javila se potreba da se navedena problematika detaljnije analizira i razume kako bi se doprinelo njenom rešavanju. U prethodih nekoliko godina u više transformatorskih stanica izvršena je zamena uređaja relejne zaštite starijih generacija sa mikroprocesorskim zaštitno upravljačkim uređajima najnovije generacije koji imaju mogućnost oscilografskog snimanja kvara. Analizom se došlo do zaključka kako je uvođenjem novih dugačkih kablovskih izvoda značajno povećana kapacitivnost sredjenaponske mreže, što za posledicu ima pojavu kapacitivne struje sa modulom dovoljnim da prouzrokuje proradu zemljospojne zaštite na izvodima na kojima ne postoji kvar. Takve situacije zabeležene su na TS 110/35/20 kV „Subotica 1“ i TS 110/20 kV „Kanjiža“. Na navedenim trafostanicama izvršena je zamena zaštite sa digitalnim uređajima relejne zaštite različitih proizvođača, odnosno različitom logikom prilikom obrade navedene problematike.

U ovom radu biće analiziran princip rada usmerene zemljospojne zaštite u sredjenaponskoj 20 kV mreži uzemljenoj preko niskoomske rezistanse, postojeće preporuke pri odabiru oblasti rada, odnosno karakterističnog ugla između struje kvara i referentnog naponona i predstavljena konkretna situacija na TS 110/35/20kV „Subotica 1“.

## USMERENA ZEMLJOSPOJNA ZAŠTITA U 20 kV DISTRIBUTIVNOJ MREŽI UZEMLJNOJ PREKO NISKOOMSKE REZISTANSE

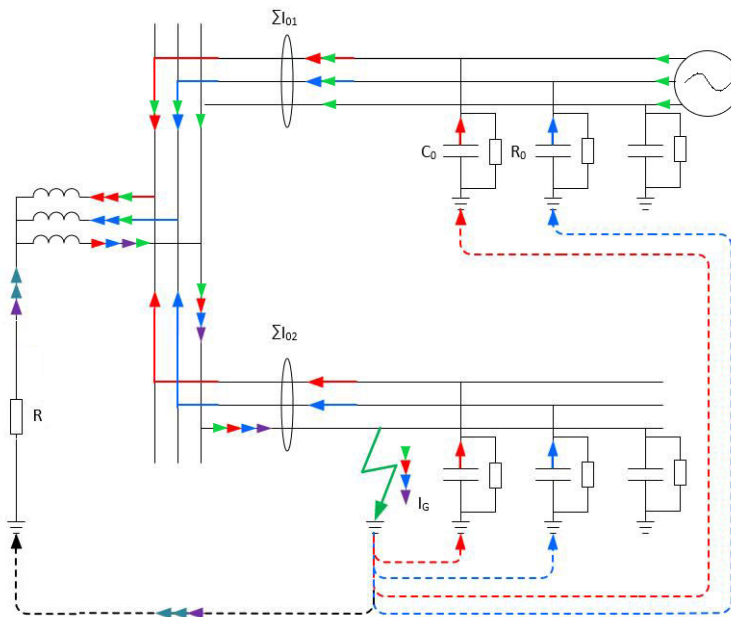
Iako na distributivnom području ogranka ED Subotica postoji srenjenaponska distributivna mreža sa izolovanim neutralnom tačkom (10 kV), mreža sa neutralnom tačkom na principu kompenzacije struje zemljospoja (35 kV), pažnja će u nastavku biti posvećena 20 kV sredjenaponskoj distributivnoj mreži uzemljenoj preko niskoomske rezistanse jer je predmetna problematika vezana za istu. Vrednost otpornosti niskoomske rezistanse iznosi 40  $\Omega$ , zbog čega je struja zemljospoja ograničena na 300 A.

Kapacitivne struje u distributivnom mreži su posledica kapacitivnosti dalekovoda prema zemlji, ali i kapacitivnosti jedne faze prema drugim fazama. Uticaj ovakvih struja veći je kod kablovskog voda jer je i kapacitivnost veća. U režimima bez kvara, kapacitivne struje se mogu smatrati konstantnim jer zavise samo od napona i kapacitivnosti.

Prilikom zemljospoja, kod nadzemnih vodova 20kV vrednost modula kapacitivne struje veoma je niska i iznosi oko 0,07 A/km, dok je kod kablovskih vodova znatno viša i iznosi oko 3 A/km [1]. Međutim, ukoliko se uzme u obzir ukupna dužina razgranatog kablovskog voda, koja može da iznosi i do nekoliko desetina kilometara, moduo ukupne vrednosti kapacitivne struje zemljospoja može da bude dovoljan da pobudi zemljospojnu zaštitu, iako na predmetnom vodu ne postoji kvar. Kako zemljospojna zaštita nepotrebno ne bi isključila vod, nije dovoljno posmatrati samo moduo vektora zemljospojne struje, već i njegov fazni stav, odnosno ugao prema referentnom naponu.

Na Slici 1 nalazi se pojednostavljen prikaz srenjenaposke distributivne mreže kod koje je neutralna tačka sekundarnog namotaja distributivnog transformatora uzemljena preko male otpornosti. Mreža je predstavljena sa dva izvoda. U slučaju zemljospoja na jednom od izvoda, na oba će kao posledicu biti moguće registrovati nultu komponentu vektora struje ( $3I_0$ ), međutim one će se osim po modulu razlikovati i po faznom stavu, koji će biti skoro dijametralno suprotan (u idealnom slučaju). Na slici je ovo grafički predstavljeno stelicama, tako da suma struja nultog redosleda u „zdravim“ fazama prvog voda ima smer ka sabirnicama (obuhvatni strujni transformator registruje  $\Sigma I_{01}$ ), dok se preko „zdravih“ faza voda pogođenog zemljospojem kapacitivne struje preko zvezdišta distributivnog transformatora iste sabiraju sa kapacitivnim strujama prvog voda, tako da suma ukupne struje kvara na drugom vodu ( $\Sigma I_{02}$ ) ima smer od sabirnica prema mestu kvara (jednopolni karatak spoj sa zemljom  $I_G$ ).

Problem se dodatno usložnjava ukoliko je na neki od izvoda priključena i mala elektrana. Snaga, odnosno struja koju generiše mala elektrane takođe napaja mesto kvara i mora biti uzeta u obzir pri podešenju zaštite (problem nesimetrije i zaštite od ostrvskog rada), zbog čega se u ovakvim situacijama javlja potreba za aktiviranjem usmerene zemljospojne zaštite i na nadzemnom vodu ukoliko je na isti priključana mala elektrana.



Slika 1 – zemljospoj u sredjenaponskoj distributivnoj mreži uzemljenoj preko niskoomske rezistanse

### ODABIR OPTIMALNOG UGLA USMERENE ZEMLJOSPOJNE ZAŠTITE

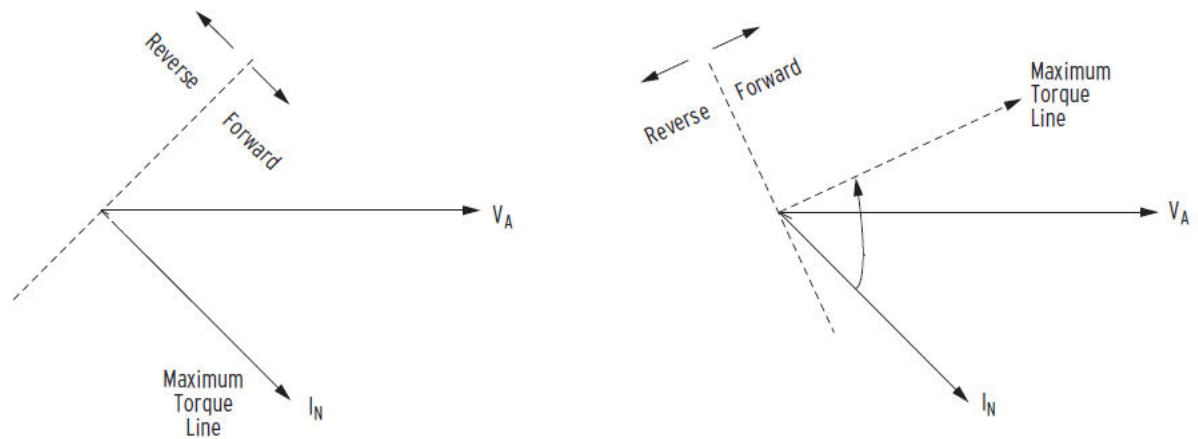
Kako bi odredili pouzdanu oblast rada usmerene zemljospojne zaštite, potrebno je definisati što tačniji ugao između očekivane struje kvara i referentnog napona. Struju kvara prilikom zemljospoja praktično je moguće dovesti direktno na poseban strujni ulaz, bilo da se meri preko posebnog obuhvatnog strujnog mernog transformatora ili preko neutrane sekundarne veze strujnih mernih transformatora faza  $I_A$ ,  $I_B$  i  $I_C$ , odnosno računski odrediti odgovarajuću komponentu nultog redosleda  $I_0$ , tako da važi:

$$3I_0 = I_N = I_A + I_B + I_C$$

Naravno, ukoliko se merenje zemljospojne struje vrši preko obuhvatnog strujnog mernog transformatora, potrebno je obratiti pažnju da je kod kablovskih vodova ekran sve tri žile vraćen kroz obuhvatni transformator u odgovarajućem smeru pre povezivanje na sistem uzemljenja transformatorske stanice.

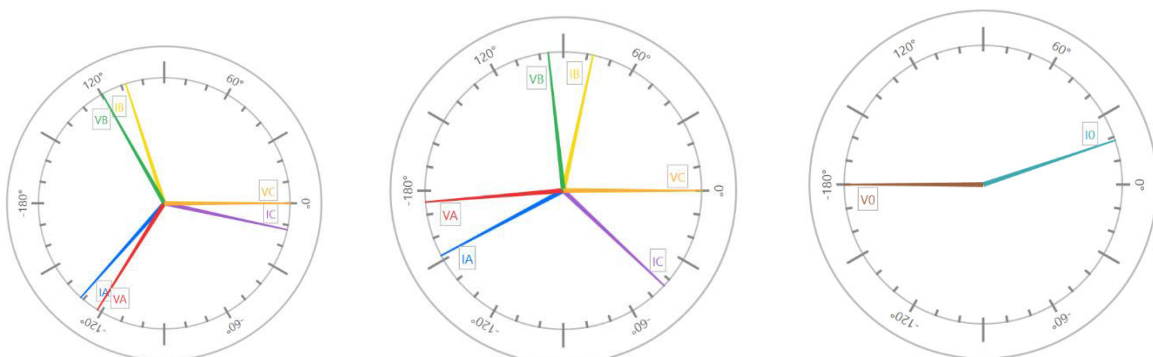
Iako razni poznati proizvođači digitalnih uređaja relejne zaštite imaju različita rešenja za referentni napon, verovatno je najjednostavnije posmatrati napon nultog redosleda, čija vrednost, kao i kod struje, može da se meri direktno, preko posebnog naponskog ulaza, na koji se dovodi napon otvorenog trougla tri naponska merna transformatora, ili da se izračuna iz vektorskog zbira faznih napona ( $V_0$ , odnosno  $3V_0$ ).

Karakterističan ugao uglavnom podešavamo iskustveno, često na osnovu predloga proizvođača zaštitnog uređaja. Kako mreža uzemljena preko male otpornosti uglavnom ima induktivan karakter, odnosno fazna struja kasni za faznim naponom, prilikom zemljospoja očekivano bi bilo da fazor struje zemljospoja  $I_N$  kasni za referentnim naponom (vektor  $V_0$  u slučaju zemljospoja ima suprotan smer u odnosu na vektor faznog napona faze na kojoj se desio kvar). Na Slici 2 predstavljen je primer zemljospoja u fazi A. U zavisnosti od toga da li se radi o čisto kablovskom, čisto nadzemnom ili mešovitom vodu, preporuke za podešavanje ovog ugla su uglavnom  $30-60^\circ$ , odnosno u ovom slučaju  $-30$  do  $-60^\circ$  (često  $-45^\circ$ ), uzimajući u obzir pozitivan matematički smer. Oblast delovanja se tada definiše u odnosu na taj ugao, uglavnom  $\pm 90^\circ$  (u praksi često nešto manji, npr.  $\pm 86^\circ$ ), uzimajući smer vektora  $I_N$  kao smer napajanja kvara od sabirnice ka izvodu („Forward“). Ukoliko se ima u vidu napred navedeno tumačenje, a posmatra snimak kvara sa karakterističnim fazorima, može se primetiti kako se pravac, odnosno ugao očekivanog i stvarnog vektora  $I_N$  znatno razlikuju (ponekad i do  $30^\circ$  u pozitivnom matematičkom smeru). Ovo se dešava ukoliko kapacitivna komponentna struje zemljospoja nema zanemarljivu vrednost, što je slučaj uglavnom sa dugačkim kablovskim vodovima. U ovom slučaju moguće je da stvarni fazor struje zemljospoja bude veoma blisko granici oblasti reagovanja tako da pouzdan rad bude doveden u pitanje. Ovo je praktično moguće rešiti podešavanjem karakterističnog ugla na vrednost očekivanog ugla maksimalnog momenta opterećenja („Maximum Torque Line“).



Slika 2 – određivanje ugla između struje zemljospoja i referentnog napona (kvar u fazi A)

Ukoliko se analiziraju fazori karakterističnih veličina prilikom zemljospoja, uglavnom se dolazi do istog zaključka u velikoj većini slučajeva. Kao primer, na Slici 3 je dat prikaz karakterističnih fazorskih dijagrama prilikom jednog zemljospoja na 20 kV izvodu I205 „Gunaroš“ iz TS 110/20 „Bačka Topola 2“. Na prvoj slici predstavljen je fazorski dijagram struja i napona u stacionarnom režimu koji prethodi kvaru (kvar se dešava u fazi C, zbog čega je fazni napon  $V_C$  inicijalno postavljen na  $0^\circ$ ). Na istom se može uočiti da struje sve tri faze kasne u odnosu na fazne napone za oko  $10^\circ$ . Na drugom dijagramu predstavljen je prikaz karakterističnih fazora u ustaljenom režimu za vreme zemljospoja, nakon prelaznih procesa na početku kvara. Na ovom dijagramu uočljivo je da dolazi do izvesnih pomeranja. Ukoliko bi mogli da se vidimo i module prikazanih veličina, primetili bi da je vrednost modula faznog napona faze u kvaru  $V_C$  znatno opala, dok je vrednost struje iste faze značajno porasla. Kada se vektor napona  $V_0$  postavi na ugao  $180^\circ$ , zbog kapacitivne komponente struje zemljospoja, ugao vektora  $I_0$  umesto vrednosti  $-10^\circ$  ima vrednost oko  $20^\circ$ , odnosno menja se oblast rada. Ukoliko bi ova razlika bila veća, vektor struje zemljospoja bio bi blizak granici oblasti rada, zbog čega bi pouzdan rad zaštite bio doveden u pitanje.



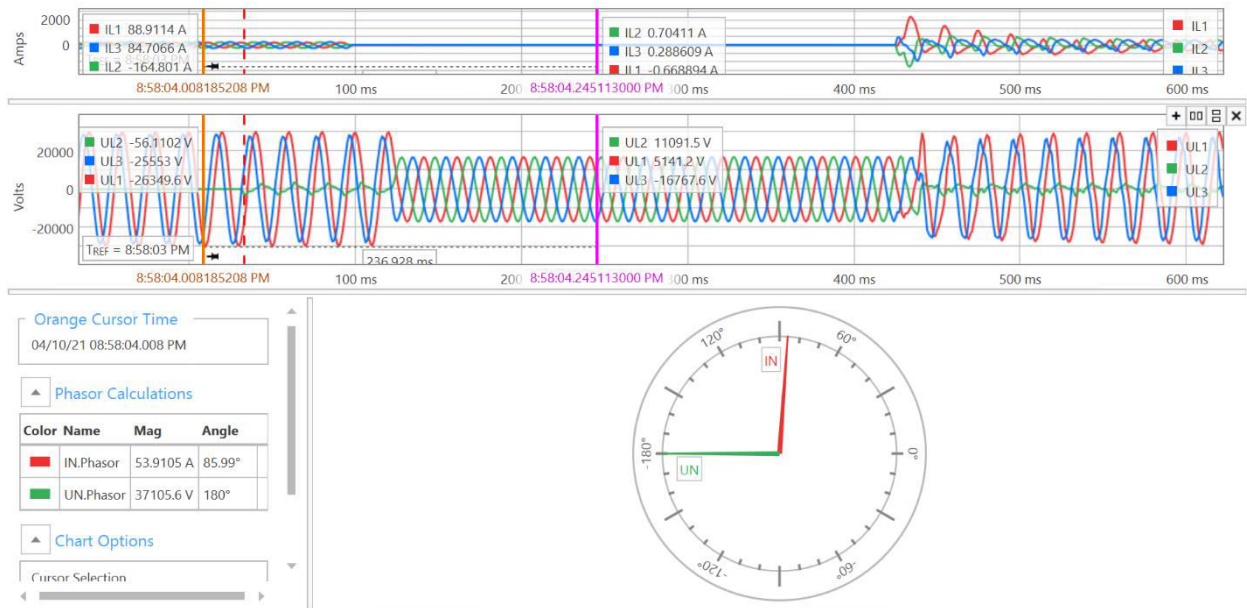
Slika 3 – karakteristični fazorski dijagrami stacionarnih stanja zemljospoja na 20 kV izvodu Gunaroš iz TS 110/20 kV „Bačka Topola 2“

## REŠAVANJA PROBLEMATIKE VIŠETRUKIH ISPADA 20kV IZVODA PRIMENOM USMERENE ZEMLJOSPOJNE ZAŠTITE U ED SUBOTICA

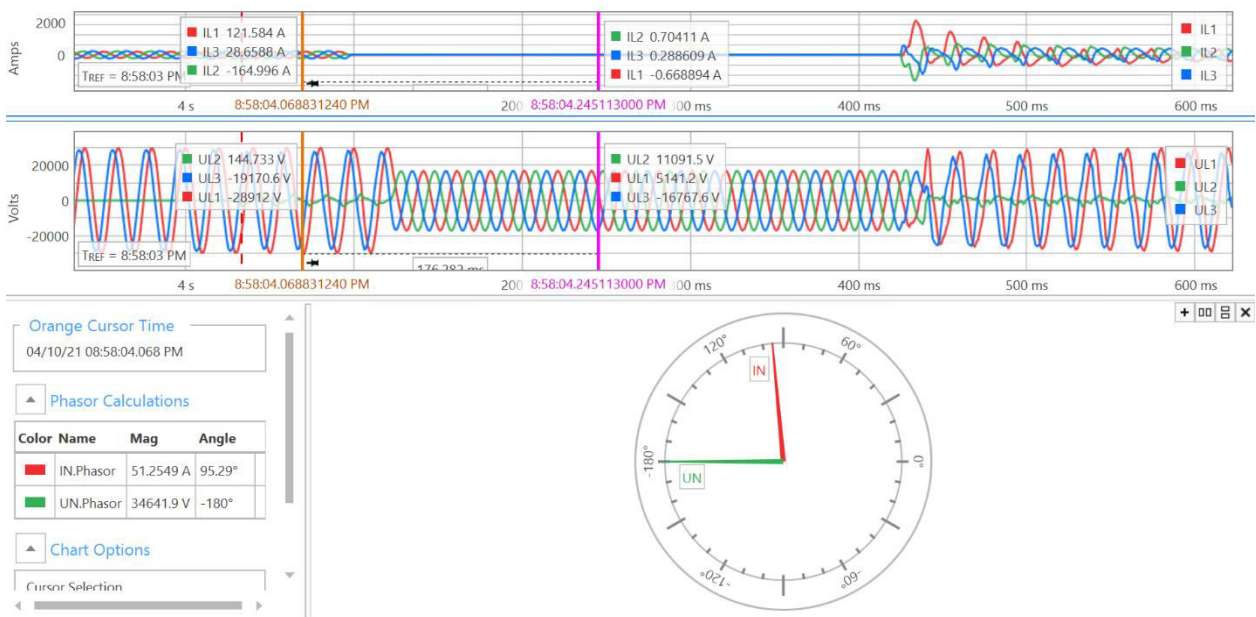
Kao što je napomenuto, ukoliko oblast delovanja usmerene zemljospojne zaštite nije pravilno definisana, moguć je neselektivni rad, odnosno istovremeno isključenje jednog ili više izvoda na kojima ne postoji kvar ako moduo kapacitivne struje zemljospoja ima vrednost dovoljnu da pobudi zaštitu ( $> 50A$ ). Navedeni slučaj desio se više puta u prethodnom periodu na pojedinim 20 kV izvodima u TS 110/35/20kV „Subotica 1“ i TS 110/20kV „Kanjiža“, zbog čega je bilo potrebno ispravno podesiti oblast delovanja usmerene zemljospojne zaštite.

Kao primer navedene problematike u nastavku je opisan jedan od događaja od 10.04.2021. godine (istog dana više puta je došlo do istovremenog isključenja više 20 kV kablovskih vodova iz TS 110/35/20 kV „Subotica 1“); događaj na dva 20 kV izvoda, I213 „Pačirski put“ i I219 „Industrija B“. Na Slikama 4 i 5 prikazan je kvar na izvodu I219 „Industrija B“. Na slikama se može uočiti da se radi o zemljospoju u fazi L2. Na Slici 4 je prikazan fazorski dijagram sa fazorima  $V_N$  i  $I_N$  ( $U_N$  i  $I_N$ ) u trenutku dok je odgovarajući pol zemljospojnog prekidača uključen, dok je na Slici 5 predstavljen slučaj nakon isključenja pola. Na istima se može primetiti kako je

vrednost vektora  $I_N > 50A$ , kao i da se ugao ne menja značajno, što nam sugeriše da na tom izvodu verovatno ne postoji kvar, međutim prekidač navedenog izvoda biva isključen po isteku predviđene vremenske zadržke.



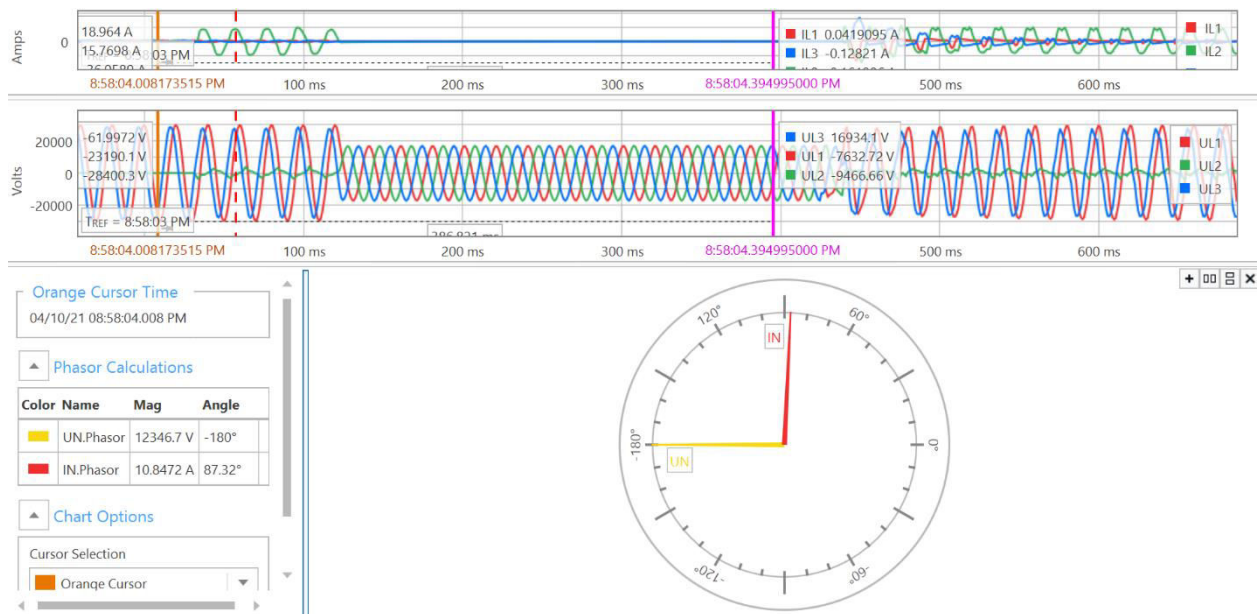
Slika 4 – zemljospoj na 20 kV I219 „Industrija B“ iz TS 110/35/20 kV „Subotica 1“; stacionarni režim pri uzemljenom odgovarajućem polu zemljospojnog prekidača



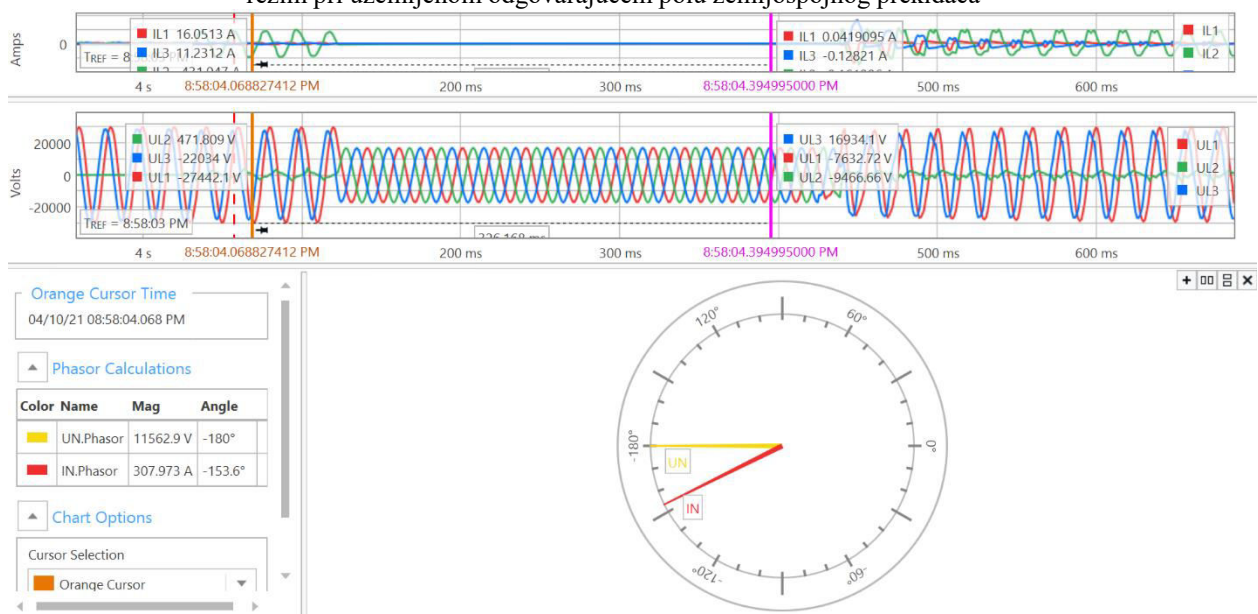
Slika 5 – zemljospoj na 20 kV I219 „Industrija B“ iz TS 110/35/20 kV „Subotica 1“; stacionarni režim nakon isključenja odgovarajućeg pola zemljospojnog prekidača

Na Slikama 6 i 7 prikazan je isti događaj na izvodu I213 „RP Pačirski put“ (nalog za isključenje, kao i u prvom slučaju je u trenutku 8:58:04.050). Na slikama mogu da se primete dva ustaljena režima; dok je pol zemljospojnog prekidača uzemljen (Slika 6) i kada je isključen (Slika 7). Sada je moguće primetiti da po isključenju pola zemljospojnog prekidača fazor struje zemljospoja menja smer (i moduo), što znači da je zemljospoj na ovom izvodu, nakon čega biva isključen zbog ubrzanja zemljospojne zaštite od zemljospojnog prekidača (za vreme dok je pol zemljospojnog prekidača bio uključen zemljospojna zaštita se razbudila).





Slika 6 - zemljospoj na 20 kV I213 „RP Pačirski put“ iz TS 110/35/20 kV „Subotica 1“; stacionarni režim pri uzemljenom odgovarajućem polu zemljospojnog prekidača



Slika 7 - zemljospoj na 20 kV I213 „RP Pačirski put“ iz TS 110/35/20 kV „Subotica 1“; stacionarni režim nakon isključenja odgovarajućeg pola zemljospojnog prekidača

Dakle, aktiviranjem usmerene zemljospojne zaštite i pravilnim odabirom karakterističnog ugla, odnosno oblasti rada na TS 110/35/20 kV „Subotica 1“, kao i na TS 110/20 kV Kanjiža prevaziđena navedeni problem.

## ZAKLJUČAK

Usled pojave učestalih istovremenih ispada više srednjenaponskih izvoda zbog zemljospoja na jednom izvodu pristupilo se detaljnoj analizi predmetne problematike. Nakon pregleda oscilografskih snimaka kvarova i hronološkog registra događaja došlo se do zaključka da mesto kvara napajaju između ostalog i struje koje potiču od „zdravih“ izvoda. Radi se o kapacitivnim strujama dugačkih kablovskih vodova, odnosno strujama izvoda na kojima postoje distribuirani izvori električne energije. Kako bi se postigla selektivnost, odnosno isključio samo izvod sa greškom, potrebno je aktivirati usmerenu zemljospojnu zaštitu i odabrati optimalnu oblast rada. Navedeno podešenje usmerene zemljospojne zaštite zavisi od proizvođača mikroprocesorskih zaštitnih uređaja, odnosno od načina i logike rada konkretnog uređaja. U radu je izvršen opis konkretne problematike i rešenja.

## LITERATURA

1. JP ELEKTROPRIVREDA SRBIJE, „Tehnička preporuka br.4a1 Zaštita elektrodistributivnih vodova 10Kv, 20kv i 35 kV“
2. N. Rajaković, D. Tasić, 2008, Distributivne i industrijske mreže, Akademska misao, Beograd, 2008.
3. Tomislav Rajić, Zoran Stojanović, Podužna diferencijalna zaštita vodova sa primenom automatskog ponovnog uključanja, INFOTEH-JAHORINA Vol. 14, March 2015.
4. JP EPS – DIREKCIJA ZA DISTRIBUCIJU ELEKTRIČNE ENERGIJE, „Tehnička preporuka br. 6 Uzemljenje neutralnih tačaka u elektrodsitributivnim mrežama “
5. Anniken Liland Fredriksen, „Earth fault protection in isolated and compensated power distribution systems“, Norwegian University of Science and Technology, June 2016