

Sandra Hutter
HEP ODS d.o.o., Elektra Zagreb
sandra.hutter@hep.hr

ISPITIVANJA ZAŠTITE PRIJE PUŠTANJA U POGON PETERSENOVE PRIGUŠNICE

SAŽETAK

Ispitivanja prije puštanja u pogon Petersenove prigušnice u postrojenju 4TS 26 Velika Gorica su provedena sa stvarnim kratkim spojevima u mreži u svrhu provjere osjetljivosti i selektivnosti zaštite.

Vatmetrička metoda zaštite je osnovna metoda otkrivanja zemljospojeva u rezonantno uzemljenim srednjenaponskim mrežama. Postojeća usmjerena zemljospojna zaštita nije pouzdano prorađivala čak ni kod niskoomskih kvarova.

U rezonantno uzemljenim SN mrežama uslijed pojave samogašenja luka se povećao broj prolaznih zemljospojeva. Da bi se odredila učestalost samogašenja kvara, snimani su kvarovi u postrojenju 4TS 23 Botinec kroz 5 mjeseci. Za snimanje događaja korištena je postojeća zaštita. Najčešći zabilježeni tip kvara je bio jednopolni kratki spoj, od kojih je preko tri četvrtine samougašeno.

Ključne riječi: ispitivanje zaštite, samogašenje luka, prolazni zemljospoj

PROTECTION TESTING BEFORE PUTING IN OPERATION PETERSEN COIL

SUMMARY

Protection testing before putting in operation Petersen coil in the substation 4TS 26 Velika Gorica were conducted with real earth faults in the network in order to prove protection sensitivity and selectivity.

The Wattmetric protection is the predominantly used method for resonantly earthed MV networks. Existing directional earth fault protection did not function properly even in the case of an low-ohmic earth fault resistance.

In the resonantly earthed MV networks number of transient earth faults is increased due to arc self-extinction. In order to determine frequency of the arc self-extinction, faults in the substation 4TS 23 Botinec were recorded during 5 months. Existing protection was used for fault recording. The most common type of fault was single phase earth fault, out of which three quarters were selfextinguished.

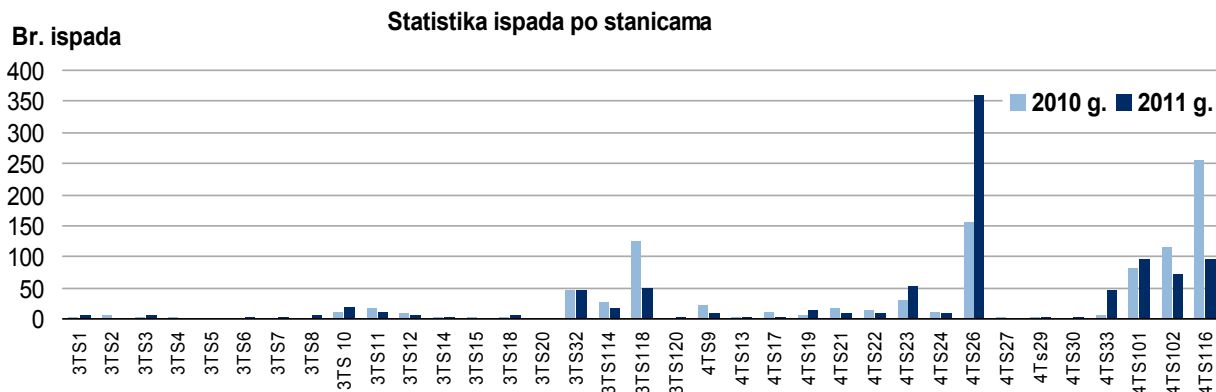
Key words: protection testing, arc self-extinction, transient earth fault

1. UVOD

Prelazak na uzemljenje neutralne točke preko kontinuirano podesive prigušnice (rezonantno uzemljenje) u nekoliko postrojenja na području DP Elektre Zagreb omogućilo je istraživanja vezana uz prorađu zaštite i određivanja struja samogašenja luka.

Ispitivanja prije puštanja u pogon su provedena sa stvarnim kratkim spojevima u mreži u svrhu provjere osjetljivosti i selektivnosti zaštite. Dosad su osim u postrojenju 4TS 26 Velika Gorica provedeni i pokusi prilikom puštanja Petersenove prigušnice u rad u 4 TS 23 Botinec i TS 110/20 kV Krapina Bobovje.

Zbog prelaska pogona Velika Gorica na 20 kV značajno se povećao broj kvarova u mreži, a time i trajanje prekida u opskrbi potrošača, što je ubrzalo prelazak na pogon mreže sa uzemljenjem neutralne točke preko Petersenove prigušnice.



Slika 1. Statistika ukupnog broja ispada po stanicama za 2010 g. i 2011 g.

Raspodjela broja kvarova u toku godine po postrojenjima pokazuje velika odstupanja, te bi se smanjenjem broja kvarova u nekoliko postrojenja (Velika Gorica, Dugo Selo, Zaprešić) postigla značajna poboljšanja (slika 1.). Praćenjem broja kvarova u postrojenju 4TS 23 Botinec željeli smo dobiti uvid u trenutno stanje, kako bi se mogle dati preporuke za poboljšanja i u drugim trafostanicama.

Ukoliko je moguće postići smanjenje broja kvarova u distribucijskoj mreži, time će se automatski postići i smanjenje broja i ukupnog trajanja prekida, te vremena izvan pogona.

Prvi korak u iznalaženju mogućih tehničkih rješenja je statističko praćenje i klasifikacija kvarova. SCADA i moderne numeričke zaštite nude brojne mogućnosti za analizu događaja. Prikupljeni su oscilogramski zapisi kvara sa zaštitnih releja (struje i naponi u pogođenom vodu) kako bi se pratila učestalost samogašenja kvara.

Slijedeći korak bi bio modeliranje mreže i određivanje nužnih uvjeta za samogašenje luka, odnosno određivanje najveće moguće nekompenzirane struje kvara kod koje još uvijek dolazi do samogašenja luka.

2. ISPITIVANJA ZAŠTITE U 4TS 26 VELIKA GORICA

Prilikom ispitivanja prorađu zaštite u 4TS 26 Velika Gorica provedena su tri pokusa jednopolnog kratkog spoja na udaljenom mjestu u mreži. Izveden je pokus 1p kratkog spoja spajanjem faznog vodiča na stup dalekovoda, a zatim polaganjem vodiča na zemlju sa i bez uklopa otpornika prigušnice. Tokom prva tri pokusa vod je bio u pogonu. Također su provedeni i pokusi direktnog (metalnog) kratkog spoja i kratkog spoja vodiča položenog na zemlju na vodu u praznom hodu.

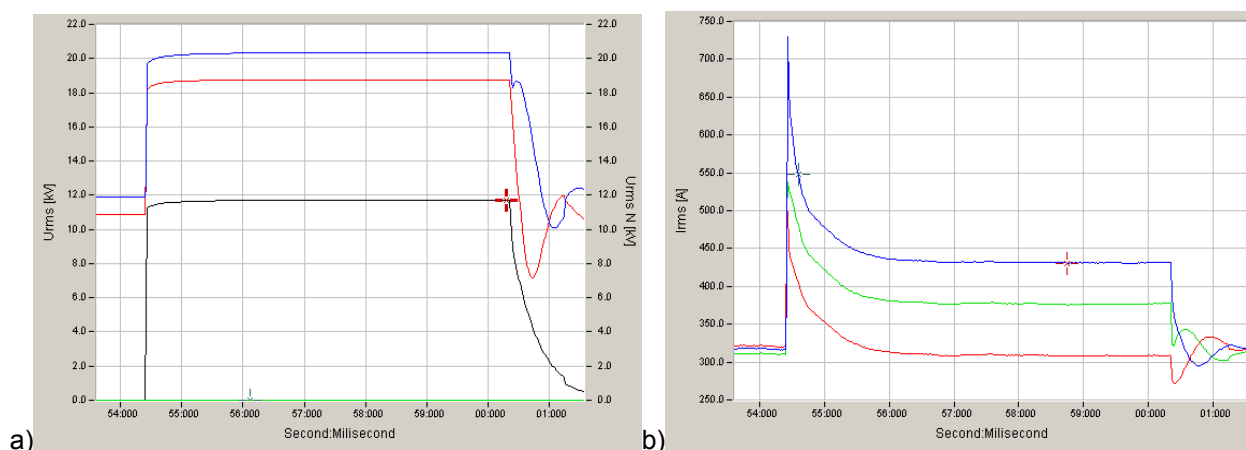
Prilikom mjerenja korišteni su višekanalni digitalni mjerni uređaji Dranetz (na vodu u kvaru) i Topas 1000 (u transformatorskom polju). Mjerene su slijedeće veličine: fazni i nulti naponi i struje na transformatoru, nulti napon i nulta struja voda, te fazne struje na pogođenom izvodu. U svim slučajevima zaštita je uspješno odradila.

2.1. Pokus kratkog spoja izazvan pomoću žice na čeličnom stupu u vodnom polju Turopolje

U slučaju maloomskog zemljospoja ($Z_F = 0$) u mrežama s rezonantno uzemljenom nultočkom će napon faze u kojoj se dogodio kvar pasti na potencijal zemlje dok će obje zdrave faze doći na potencijal $\sqrt{3} U_f$. Linijski naponi na NN ostaju očuvani što omogućuje neprekinuti pogon mreže i tokom zemljospoja.

U ovom pokusu su fazni naponi (plava i crvena krivulja na slici 2.a) dosegli najveće efektivne vrijednosti od $U_A = 20,3$ kV i $U_B = 18,8$ kV. Kvar je zaštita isključila nakon 5,96 s.

Efektivne vrijednosti faznih napona prije kvara su iznosile $U_A = 11,9$ kV i $U_B = 10,9$ kV. Do ove nesimetrije napona dolazi zbog pomaka neutralne točke odnosno neutralnog napona koji se javlja na prigušnici u normalnom pogonu.

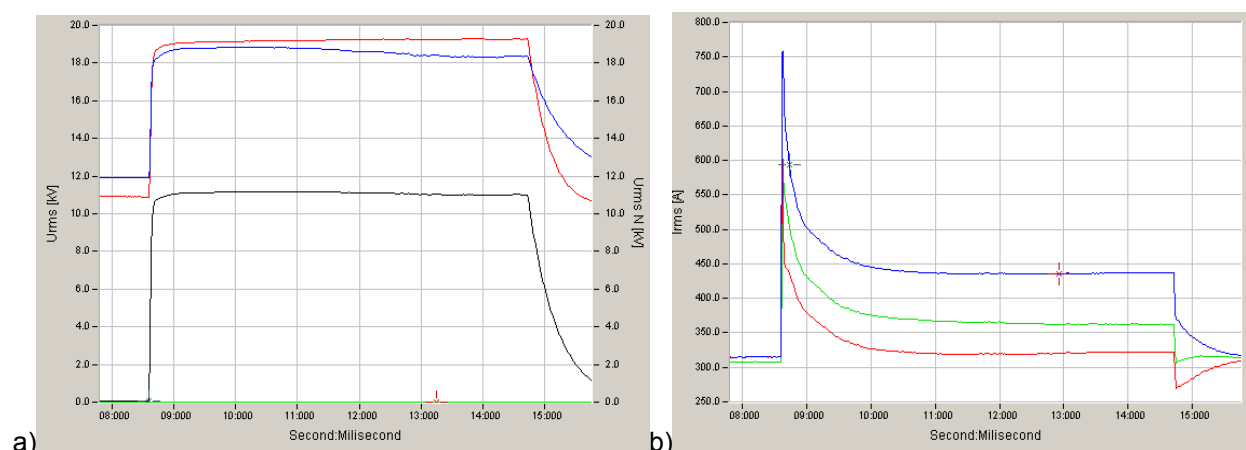


Slika 2. a) Efektivne vrijednosti faznih napona u fazama A i B i nulti napon na transformatoru
b) Efektivne vrijednosti faznih struja na transformatoru

Sa slike 2.a) je vidljivo da napon zvjezdista poprima vrijednost malo manje od faznog napona. Napon zvjezdista uzrokuje induktivnu struju kroz prigušnicu i mjesto kvara. Efektivna vrijednost nultog napona je 11,7 kV, dok je nulti napon prije kvara iznosio $U_0 = 19,6$ V.

2.2. Pokus kratkog spoja izazvan pomoću žice na suhoj travi u vodnom polju Turopolje

U ovom pokusu su fazni naponi (plava i crvena krivulja na slici 3.a) dosegli najveće efektivne vrijednosti od $U_A = 18,8$ kV i $U_B = 19,3$ kV. Efektivne vrijednosti faznih napona prije kvara su iznosile $U_A = 11,9$ kV i $U_B = 10,9$ kV. Kvar je trajao 6,1 s.



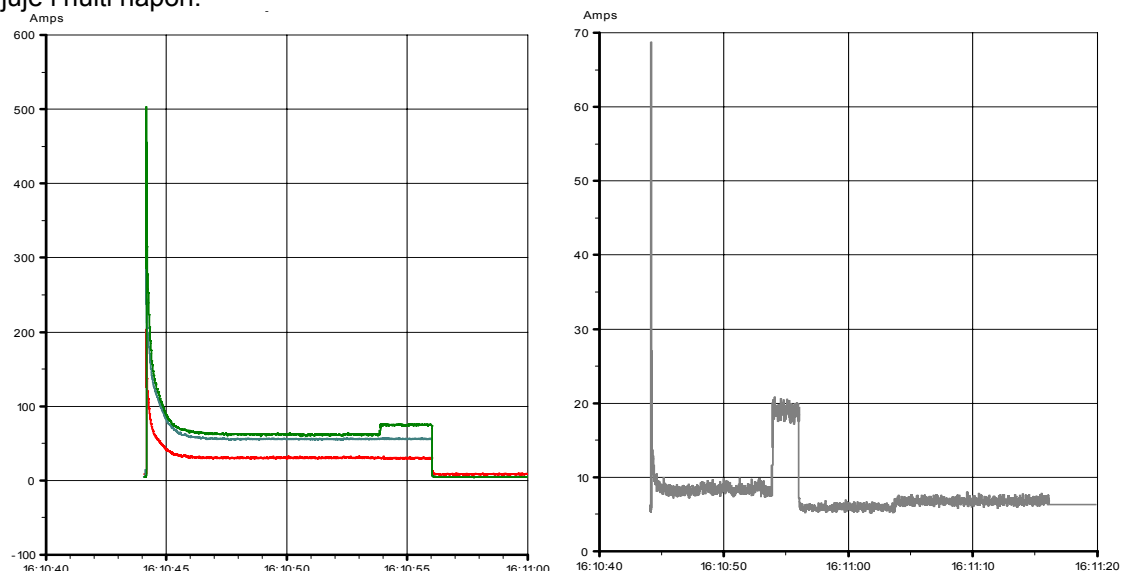
Slika 3. a) Efektivne vrijednosti faznih napona u fazama A i B i nulti napon na transformatoru
b) Efektivne vrijednosti faznih struja na transformatoru

Najveće efektivne vrijednosti faznih struja na transformatoru T3 su iznosile redom 758A, 700 A i 580 A, dok je transformator prije kvara bio opterećen $I_A = 315$ A, $I_B = 314$ A i $I_C = 308$ A.

2.3. Pokus kratkog spoja izazvan pomoću žice na zemlji u vodnom polju Turopolju uz uklop otpornika prigušnice

Radi povećanja radne komponente nulte struje, obično se spaja otpornik na pomoćni namot kompenzacijske zavojnice (slika 4.). U ovom pokusu otpornik prigušnice je uklopljen nakon 9,7 s. Prilikom uklopa otpornika prigušnice, dolazi do smanjenja napona neutralne točke, dok se struja zemljospoja povećava.

Međutim, pri visokoomskim zemljospojevima kvaliteta otkrivanja se neće povećati, jer je u tim slučajevima struja dominantno određena otporom na mjestu kvara. Osim toga se dodavanjem otpornika smanjuje i nulti napon.



Slika 4. Efektivne vrijednosti faznih struja u vodnom polju Turopolje $I_{Amax} = 204 \text{ A}$, $I_{Bmax} = 320 \text{ A}$, $I_{Cmax} = 503 \text{ A}$ i b) nulta struja $I_{o \max} = 69 \text{ A}$

U svim slučajevima proradila je osjetljiva zemljospojna zaštita EOR-D, koja dobiva podatke o nultim strujama iz vodnih polja i naponima iz mjernih polja. Zaštita je podešena na proradu kod 2A za vatmetričku metodu i 3A za tranzijentnu metodu uz vrijeme zatezanja od 6,5 s u oba slučaja.

Postojeća usmjerena zemljospojna zaštita u vodnim poljima GEC nije pouzdano prorađivala čak ni kod niskoomskih kvarova. Zaštita je podešena na 8A i u ovom slučaju je startala međutim nije prorađivala. Pokazalo se da ova zaštita nije dovoljno osjetljiva, jer uzima u obzir kut između struje i napona i ima relativno visoka strujna podešenja, u ovom slučaju 8A.

Vatmetrička metoda zaštite je osnovna metoda otkrivanja zemljospojeva i u rezonantno uzemljenim sredjenaponskim mrežama. Međutim, zbog malih struja zemljospoja u ovim mrežama, ona je i uz upotrebu novih tipova releja i uz dodavanje otpornika u paralelu s kompenzacijskom zavojnicom, ograničena samo na kvarove s otporom do 3 k Ω . Neki autori smatraju ovu zaštitu pouzdanom samo do kvarova s otporom do 1 k Ω .

3. SAMOGAŠENJE LUKA

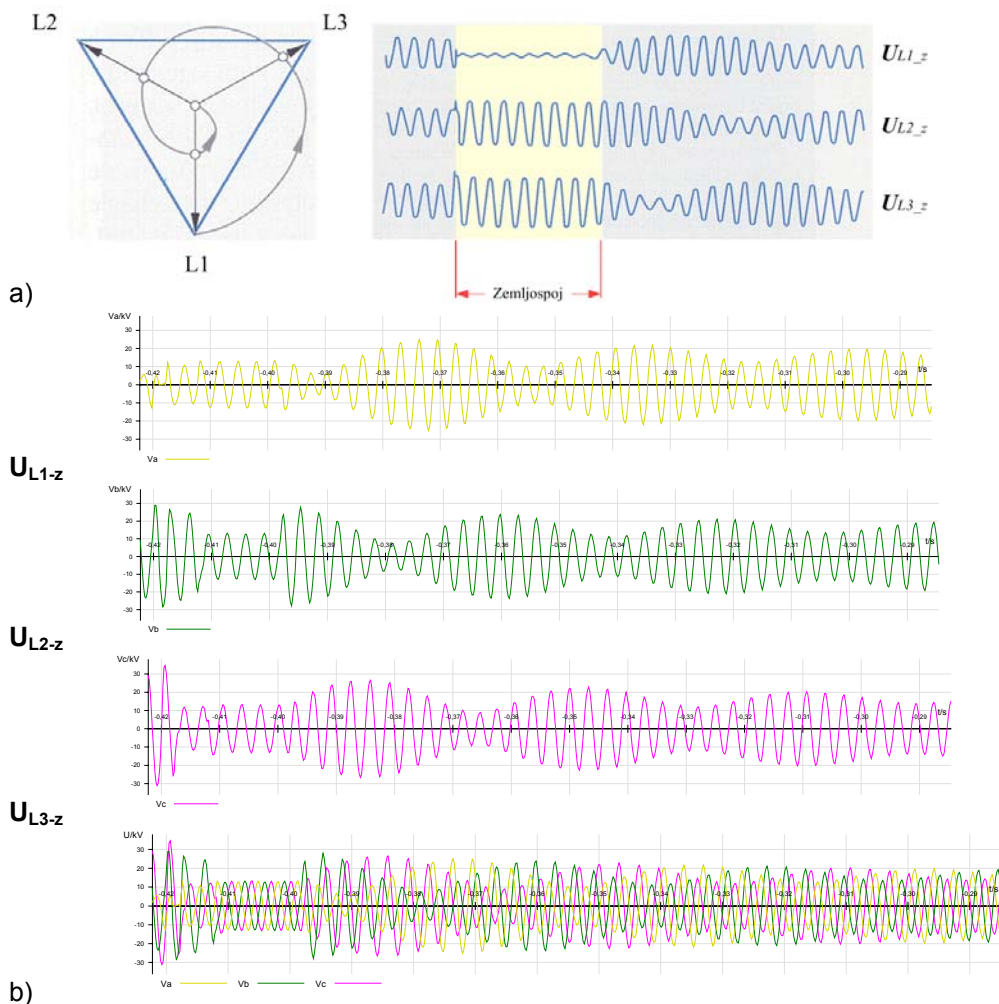
U nekim radovima je navedeno [1] da nesimetrija u SN mreži može nepovoljno utjecati na samogašenje luka. Na naponsku nesimetriju je moguće utjecati pod ili nadkompenzacijom struje prigušnice.

Ukoliko se prigušnica nalazi u rezonanciji su struja i naponi na mjestu kvara prilikom kratkog spoja manji, te time lakše dolazi i do samogašenja luka.

Samogašenje luka nije određeno samo strujom koja teče kroz točku kvara, nego i iznosom prijelaznog povratnog napona nakon uspješnog gašenja luka pri prolasku struje kroz nulu.

Mreže s izoliranom neutralnom točkom imaju vrlo brz porast napona oporavka i prema tome, mogućnost ponovnog paljenja zemljospojeva je puno veća nego u rezonantno uzemljenim mrežama. U rezonantno uzemljenim mrežama, vrijeme porasta je znatno povećano u usporedbi s mrežama s izoliranom neutralnom točkom. Induktivitet kompenzacijske zavojnice pri prirodnoj frekvenciji mreže (50

Hz), posebno pri potpunom podešenju, s dozemnim kapacitetima mreže tvori oscilatorni krug uz prisutne dodatne elemente prigušenja (otpori u mreži i zavojnici), koji utječu na sporu i prigušenu prijelaznu reakciju napona oporavka nakon prvog gašenja luka. Slika 5. prikazuje vektorski dijagram i oscilogram faznih napona pri povratu napona neutralne točke nakon zemljospoja u malo nadkompensiranoj mreži. Oscilogram prikazuje fazne napone iz kojih se može vidjeti porast napona oporavka pogođene faze nakon zemljospoja [2].



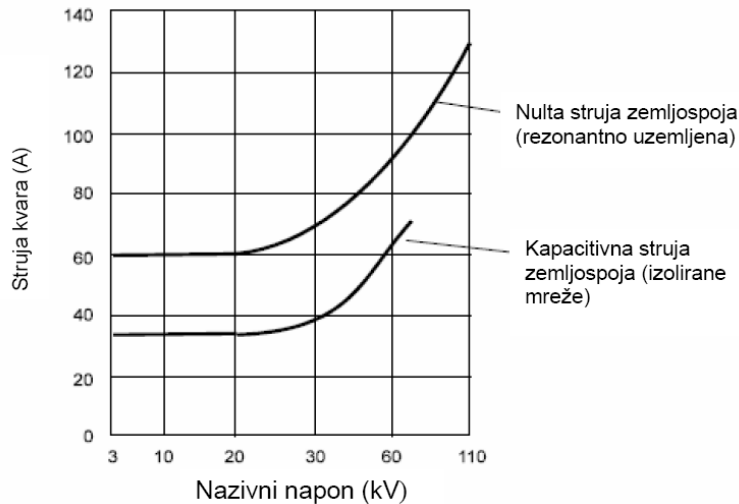
Slika 5. Vektorski dijagram prikazuje povrat napona neutralne točke nakon zemljospoja u formi spirale u malo nadkompensiranoj mreži b) Snimka faznih napona

Kod podesive Petersen prigušnice se vrijednost vlastitog induktiviteta prigušnice automatski prilagođuje (pomoću regulatora) različitim konfiguracijama mreže nakon svake promijene uklopnog stanja mreže. Podesive prigušnice u odnosu na fiksne prigušnice stoga daju bolje rezultate što se tiče broja prekida, ali su i zahtjevnije za održavanje.

Kod podesivih (regulacijskih) prigušnica potrebno je periodički provjeravati podešenja prigušnica i stupanj kompenzacije, kako bi se poboljšale sposobnosti prigušnice za "otklanjanjem / premošćivanjem" kvarova, te kako bi se izbjegli problemi vezani uz sustave uzemljenja.

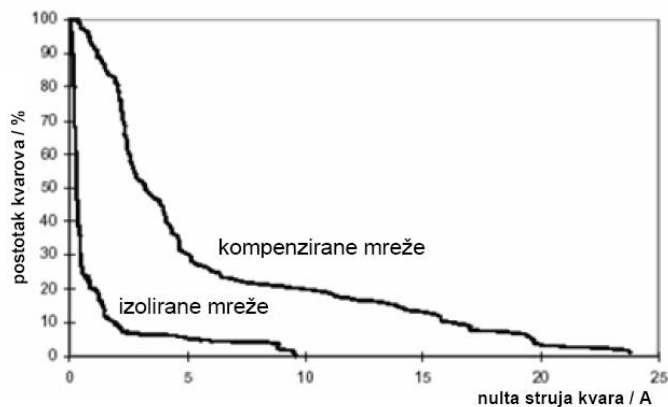
Pri trajnom zemljospoju pogon se može nastaviti tijekom nekoliko sati zbog malih struja zemljospoja. Posljedica malih struja zemljospoja je ispunjenje uvjeta za povećanu sigurnost ljudi, te su istodobno smanjeni i ostali negativni učinci struja zemljospoja (manja naprezanja opreme i produljenje životne dobi uslijed smanjenih zagrijavanja, smanjeni utjecaj na telekomunikacijske kabele, itd...).

Uvjeti za samogašenje električnog luka su prikazani na slici 6. za izolirane i rezonantno uzemljene mreže (DIN krivulje struja samogašenja).



Slika 6. Struje samogašenja u izoliranim i kompenziranim mrežama prema DIN VDE 0228

U praksi je međutim uočeno da postoje odstupanja od dijagrama sa slike 6. Prema rezultatima studije provedene u Finskoj [3] dijelom prikazanih na slici 7. iznosi struja samogašenja su znatno manji od onih navedenih po DIN VDE 0228.



Slika 7. Struje samogašenja u realnoj mreži

Zbog ovih značajnih odstupanja pokušali smo analizirati kvarove i pojavu samogašenja u rezonantno uzemljenoj SN mreži postrojenja 4TS 23 Botinec.

Obrađeni su podaci o 89 stvarnih kvarova zabilježenih u postrojenju 4TS 23 Botinec, u kojem je neutralna točka uzemljena preko Petersenove prigušnice, snimljeni u periodu od 5 mjeseci u ljetnom i jesenskom periodu.

Distribucijska mreža je uglavnom nadzemna, ali s značajnim udjelom kabela mreže oko 200 km. Za snimanje događaja korištena je postojeća zaštita. U mreži 4TS 23 Botinec je blokiran APU, nakon puštanja prigušnice u rad.

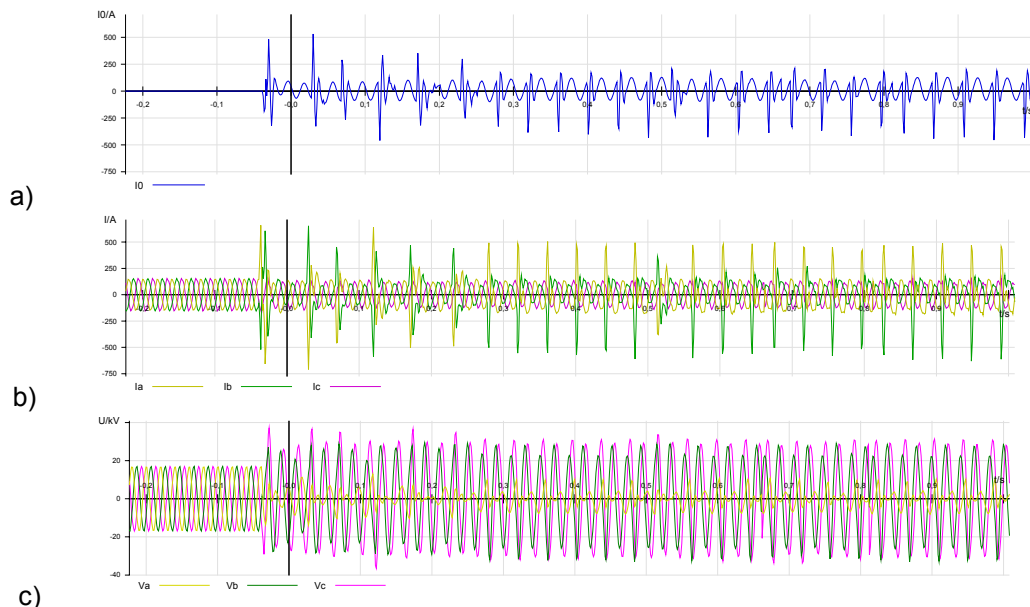
Zaštita je trigerirana startom zemljospojne zaštite (podešena je na 1W sekundarno) i u slučaju kvara na vodu snima oscilogram. Snimane su fazne struje i nulte struje pojedinih vodova, te fazni i nulti napon na sabirnicama. Za sve događaje je usporedbom sa podacima u SCADA-i provjereno da li je došlo do isklopa prekidača u vremenskom trenutku koji je zabilježila zaštita. Ukoliko nije zabilježen isklon prekidača događaj bi bio karakteriziran kao samogaseći kvar.

Ukupno je došlo do 69 samogašenja kvara, dok je kvar bio isklonjen pomoću prekidača 20 puta. Prikupljeni su oscilogrami zaštite u 22 vodna polja. Najveći broj kvarova je samogašen na tri voda. Na KV 2048 zabilježeno je 21 samogašenje, na KV 2047 je došlo do 15 samogašenja, i na KV 1968 je zabilježeno 11 samogašenja. U četiri vodna polja je zabilježeno samo po jedno samogašenje, te je dakle broj samogašenja varirao od jednog do 21 po vodnom polju.

Najvažniji faktori koji određuju da li će doći do samogašenja luka su povratni napon i preostala struja kratkog spoja na mjestu kvara [3].

Najčešći tip kvarova je jednopolni kratki spoj sa zemljom, te su samo nekoliko puta zabilježeni i dvopolni kratki spojevi. Podaci za mrežu sa neuzemljenom neutralnom točkom u pogonu Samobor su u toku prikupljanja.

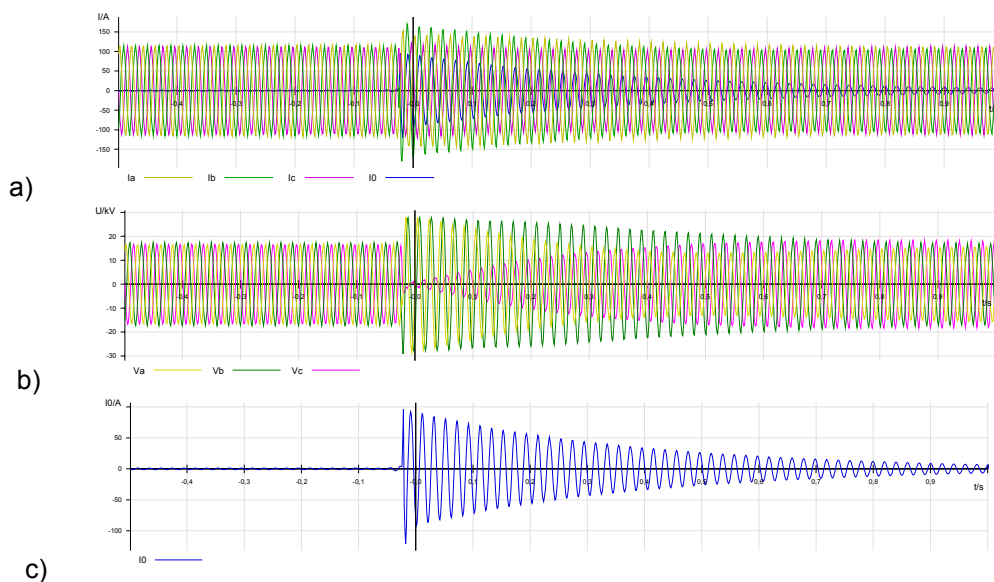
Slika 8. prikazuje tipične oscilogramе struja i napona kod intemitirajućeg kvara, kod kojeg dolazi do ponovnog paljenja luka. Na grafovima su vidljiva 25 ponovna paljenja (i gašenja) luka, ali se ovaj kvar nastavio razvijati.



Slika 8. a) Nulta struju snimljena na vodu b) fazne struje voda c) fazni i nulti napon prilikom intemitirajućeg kvara

Na slici 9. prikazani su oscilogrami struja i napona kod samogašenja kvara. Vidljiv je oporavak faznih napona. Zaštita je podešena da snima događaje 0,5 s prije i 1 s nakon nastanka kvara, tako da je nemoguće odrediti koliko je trajao cijeli oporavak.

Nulta struja koju mjeri obuhvatni strujni transformator u vodnom polju je zbroj kapacitivnih struja dvije zdrave faze i struje koja teče kroz mjesto kvara.



Slika 9. a) Nulta struju snimljena na vodu b) fazne struje voda c) fazni i nulti napon prilikom intemitirajućeg kvara

4. ZAKLJUČAK

Prilikom ispitivanja prorada zaštite u 4TS 26 Velika Gorica provedena su pokusi jednopolnog kratkog spoja na udaljenom mjestu u mreži sa i bez uklopa otpornika prigušnice. Pri uklopu otpornika prigušnice, dolazi do smanjenja napona neutralne točke, dok se struja zemljospoja povećava.

U svim pokusima proradila je osjetljiva zemljospojna zaštita EOR-D, koja koristi vatmetričku i tranzijentnu metodu.

Obrađeni su podaci o 89 kvarova zabilježenih u postrojenju 4TS 23 Botinec snimljenih u periodu od 5 mjeseci, kako bi smo odredili učestalost samogašenja kvara. Ukupno je došlo do 69 samogašenja jednopolna kvara, dok je kvar bio isklopljen pomoću prekidača 20 puta. Ukoliko se prigušnica nalazi u rezonanciji struja i naponi su na mjestu kvara prilikom kratkog spoja manji, te time lakše dolazi do samogašenja luka.

LITERATURA

- [1] P. Toman, M. Paar, J. Orsagova, „Possible Solutions to Problems of Voltage. Asymmetry and Localization of Failures in MV Compensated Networks“, IEEE Power Tech, Lausanne, 2007.
- [2] S. Žutobradić, I.G. Kuliš, "Mjerenja prije puštanja u pogon prigušnice za rezonantno uzemljenje neutralne točke energetskog transformatora u 4TS 23 Botinec“, studija IE, Zagreb 2004.
- [3] Dr. Seppo Hänninen "Single phase earth faults in high impedance grounded networks Characteristics, indication and location", VTT publications, 453, Technical research centre of Finland, ESPOO, 2001.