

OBLOČNI ZEMELJSKI STIKI V RESONANČNO OZEMLJENIH SREDNJE NAPETOSTNIH OMREŽJIH

Miran ROŠER, Robert ŠKOF, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

Neprekinjenost napajanja odjemalcev je v neposredni povezavi z izpadi elementov omrežja, katerih velik delež so posledica zemeljskih stikov v srednje napetostnih distribucijskih omrežjih. Resonančna ozemljitev nevtralne točke predstavlja zelo učinkovit ukrep za zmanjšanje izpadov zaradi zemeljskih stikov. S kompenzacijo kapacitivnega toka skozi mesto okvare vplivamo na razmere za samougasnitev obločnih zemeljskih stikov. V članku so obravnavane razmere obločnega zemeljskega stika ob dotiku veje. Podani so merilni rezultati eksperimentalnih meritev obločnih zemeljskih stikov v RTP Krško. Pri meritvah je bil dotik veje simuliran s pomočjo namensko izdelane naprave.

ABSTRACT

Reliability of electricity supply is directly related to the supply interruptions, mostly caused by earth faults that appear in medium voltage distribution networks. One of very effective measures, that can substantially reduce the supply interruptions due to the earth fault in medium voltage distribution networks, is resonant neutral earthing. It compensates capacitive currents and reduces the current flowing through the fault which establishes better conditions for arc self-extinguishing at the earth fault location. The paper deals with conditions at the location where vegetation touches the conductor and establishes an earth fault. The results of field-testing performed in substation Krško, where earth faults were established under controlled conditions, using specially for this purpose build mechanical device, are presented and discussed.

1. UVOD

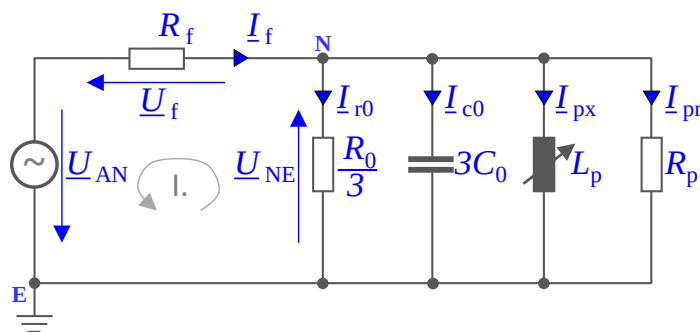
V sodobni družbi narašča potreba po kakovostni dobavi električne energije. Standardi, ki zajemajo dopustno število prekinitev dobave električne energije, so nenehno strožji. Zato so tudi ključni cilji distribucijskih podjetij usmerjeni k čim manjšemu številu izpadov. Prekinitve dobave električne energije povzročajo zmanjšanje prihodkov podjetij in pogosto tudi gospodarsko škodo priključenim odjemalcem. Povzamemo lahko, da želimo za odjemalce praktično neprekinjeno dobavo električne energije, po drugi strani pa okvare v sistemu, zaradi varnosti, terjajo njihovo izločitev oziroma izklop. Izklop okvare in zmanjšanje števila

prekinitev sta protislovni zahtevi; »nenehno napajaj, a vendar vsako okvaro izklopi«. Če želimo doseči zmanjšanje prekinitev, je potrebno obratovanje brez izklopov vodov, ki napajajo nekatere vrste okvar. Ključna težava v obratovanju distribucijskega sistema je, da lahko na okvare vplivamo v zelo omejenem območju. Velika večina okvar, ki se pojavijo na distribucijski infrastrukturi, je namreč posledica vplivov okolice. Tako na primer zemeljski stiki [1] predstavljajo 50 % do 80 % delež vseh okvar v srednje napetostnem omrežju. Neposreden vpliv na vzrok nastanka zemeljskega stika ni mogoč, zato so rešitve usmerjene predvsem v zmanjšanje toka skozi mesto okvare. Znana rešitev, ki omogoča izboljšanje razmer glede prekinitev napajanja, je kompenzacija toka ob zemeljskem stiku. V literaturi jo najdemo pod imenom resonančna ozemljitev nevtralne točke. Princip delovanja [2] bazira na tem, da se kapacitivni tok omrežja kompenzira z induktivnim tokom dušilke priključene v nevtralno točko transformatorja. Z ustrezno stopnjo kompenzacije lahko tok okvare vzdržujemo v mejah, ki dopuščajo bistveno daljše izklopne čase in teoretično omogočajo celo trajno obratovanje ob okvari. Poleg možnosti kompenzacije kapacitivne komponente toka ob zemeljskem stiku, se v resonančno ozemljenih omrežjih zelo počasi vzpostavlja povratna napetost na mestu okvare. Počasno vzpostavljanje povratne napetosti na mestu okvare pomeni ugodne razmere za ugasnitev obloka. Na ta način je na razpolago dovolj časa za de-ionizacijo na mestu okvare. Tako se lahko izolacija na mestu okvare, ki jo predstavlja zrak, regenerira. Vendar je treba upoštevati, da tudi ob popolni kompenzaciji kapacitivne komponente toka zemeljskega stika, na mestu okvare lahko tečejo toki, ki jih resonančna dušilka ne more kompenzirati. To so predvsem višje harmonske komponente, ki tečejo ob zemeljskem stiku v omrežju, zaradi prisotnosti nelinearnih bremen. Resonančna dušilka ravno tako ne kompenzira delovnih komponent toka, ki so posledica izgub zaradi nepopolnih lastnosti izolacijskih materialov in izgub v resonančni dušilki. Nadalje je obratovanje v resonančni točki, zaradi morebitnih visokih napetostnih asimetrij, neželeno. V praksi se večinoma obratuje s pet ali deset odstotno nad-kompenzacijo. Mogoče je tudi obratovanje s pet ali deset odstotkov pod-kompenzacije, ki se praktično uporablja zelo redko. V obeh primerih obratovanja, teče skozi mesto okvare ob zemeljskem stiku preostali tok, ki predstavlja razliko med kapacitivno komponento in induktivno komponento toka. V kolikor se izolacija na mestu okvare ne regenerira in imamo opravka z nestabilno upornostjo, se na mestu okvare vzpostavlja oblok. V prispevku podajamo rezultate meritev v primeru zemeljskega stika ob padcu veje na fazni vodnik v resonančno ozemljenem omrežju. Eksperimentalne meritve so bile izvedene v RTP Krško. Uporabljena je bila daljinsko krmiljena naprava za simulacijo padca veje na fazni vodnik. Rezultati meritev so podani grafično v obliki časovnih potekov. V sklepu so kratko podane ugotovitve in zaključki posameznih meritev in analiz.

2. RESONANČNA OZEMLJITEV NEVTRALNE TOČKE

Obratovanje SN distribucijskega omrežja v praksi poteka z napajanjem distribucijskih vodov preko energetskih transformatorjev VN/SN v razdelilni transformatorski postaji (RTP). Nevtralne točke energetskih transformatorjev so v splošnem ozemljene preko nizko ohmskega upora ali preko resonančne dušilke, imenovane tudi Petersenova dušilka. Na sistemu zbiralk

večinoma obratuje vzporedno priključenih več SN vodov. Poenostavljeno nadomestno vezje prikazuje slika 1. Prikazano vezje je izpeljano iz trifaznega nadomestnega vezja z uporabo Theveninovega teorema [3].



Slika 1: Poenostavljeno nadomestno vezje z resonančno ozemljeno NT

Iz poenostavljenega nadomestnega vezja lahko zapišemo s pomočjo prvega Kirchhoffovega zakona enačbo (1). Za napetosti v zanki I. pa enačbo (2).

$$\underline{I}_f = \underline{I}_{r0} + \underline{I}_{c0} + \underline{I}_{px} + \underline{I}_{pr} \quad (1)$$

$$\underline{U}_{AN} + \underline{U}_f + \underline{U}_{NE} = 0 \Rightarrow \underline{U}_f = -\underline{U}_{AN} - \underline{U}_{NE} \quad (2)$$

Pri tem je $\underline{I}_f$ tok skozi mesto okvare, $\underline{I}_{px}$ induktivna komponenta toka dušilke, $\underline{I}_{pr}$ je delovna komponenta toka skozi dušilko, $\underline{I}_{c0}$ tok skozi dozemno kapacitivnost sistema ter $\underline{I}_{r0}$ tok skozi odvodnosti sistema. Napetost $\underline{U}_{AN}$ je napetost faze A, pred nastankom zemeljskega stika, $\underline{U}_f$ pa napetost na mestu okvare ter $\underline{U}_{NE}$ napetost nevtralne točke N proti zemlji E.

S pomočjo Ohmovega zakona opišemo toke skozi upornosti z izrazi (3). Kjer je R_f upornost na mestu okvare, R_0 predstavlja izgube v sistemu in R_p izgube v resonančni dušilki.

$$\underline{I}_f = \frac{\underline{U}_f}{R_f}; \quad \underline{I}_{r0} = \frac{3\underline{U}_{NE}}{R_0}; \quad \underline{I}_{pr} = \frac{\underline{U}_{NE}}{R_p} \quad (3)$$

Tok skozi dozemno kapacitivnost sistema $\underline{I}_{c0}$ je podan s (4), tok skozi dušilko $\underline{I}_{px}$ pa s (5).

$$\underline{I}_{c0} = j3\omega C_0 \underline{U}_{NE} \quad (4)$$

$$\underline{I}_{px} = \frac{\underline{U}_{NE}}{j\omega L_p} \quad (5)$$

Kjer je ω krožna frekvenca, $3C_0$ nadomestna dozemna kapacitivnost celotnega sistema ter L_p induktivnost resonančne dušilke. Tok zemeljskega stika $\underline{I}_f$ za primer kovinskega zemeljskega stika, kadar velja $R_f=0 \Omega$ zapišemo z enačbo (6).

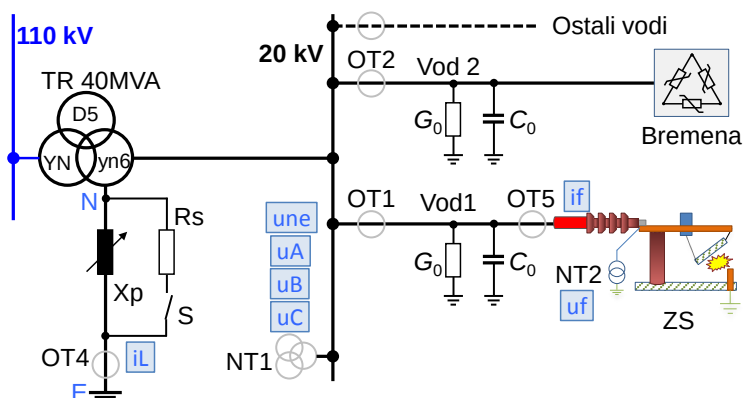
$$\underline{I}_f = -\underline{U}_{AN} \left(\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_0} + j \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_p} \right) \right) \quad (6)$$

Iz (6) je razvidno, da tok zemeljskega stika sestavljata delovna in reaktivna komponenta. Delovna komponenta je odvisna od izgub dušilke modeliranih z R_p in izgub zaradi nepopolne izolacije v omrežju modeliranih z R_0 . Reaktivna komponenta je enaka razliki med kapacitivno komponento, ki jo pogojuje velikost dozemne kapacitivnosti celotnega SN sistema $3C_0$. Induktivno komponento pa določa induktivnost dušilke L_p . Na slednjo vplivamo z uglasitvijo dušilke, s spreminjanjem induktivnosti dušilke preko spreminjanja zračne reže v dušilki. Če dušilko uglasimo s kapacitivnostjo omrežja, potem postane imaginarni del (6) enak nič. V tem primeru obratujemo v resonančni točki in preostali tok okvare predstavlja le še delovna komponenta toka. Velikost slednje je odvisna od izgub v dušilki R_p ter izgub R_0 v omrežju in je podana s (7).

$$\underline{I}_f = -\underline{U}_{AN} \left(\frac{1}{R_p} + \frac{3}{R_0} \right) \quad (7)$$

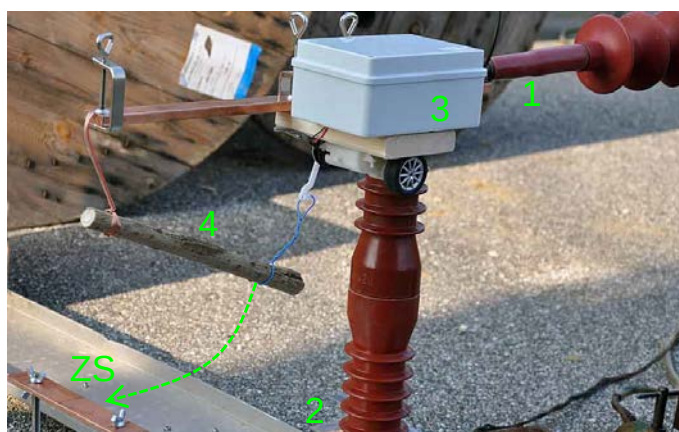
3. OPIS MERILNE PROGE

Poenostavljeno enočrtno shemo obratovanja ob izvajanju testnih meritev prikazuje slika 2. Napajalni vir predstavlja 110 kV omrežje, ki napaja energetski transformator 110/20 kV moči 40 MVA in vezne skupine YNyn6d5. Zvezdišče transformatorja N je ozemljeno preko resonančne dušilke s tokom kompenzacije 200 A. Na sliki 2 je reaktanca dušilke označena z X_p . Upor R_s se lahko s stikalom S priklopi vzporedno k dušilki in poveča delovno komponento toka, zaradi lažje detekcije okvarjenega voda.



Slika 2: Poenostavljena enočrtna shema obratovanja ob izvajanju testnih meritev v RTP Krško

Pri testih je omrežje obratovalo resonančno ozemljeno s kapacitivno komponento toka celotnega priključenega sistema okrog 103 A. Ob meritvah je bil z objemnim tokovnim transformatorjem OT4 merjen tok skozi dušilko i_L . Sistemske napetosti u_A , u_B , u_C in u_{NE} so bile merjene na zbiralkah z napetostnim instrumentnim transformatorjem NT1. Napetost na mestu okvare u_f je bila merjena z napetostnim instrumentnim transformatorjem NT2. Pri testih so obratovali na istih zbiralkah še ostali vodi na katere so bila priključena bremena. Dozemne odvodnosti in kapacitivnosti vodov so označene z G_0 in C_0 . Objemni tokovniki za meritev residualnih tokov pa so označeni z OT1, OT2. Dolžina nadzemnega voda 1 do mesta ZS kjer je simuliran zemeljski stik je znašala okrog 26 km. Tok na začetku voda 1 je bil merjen s tokovnim instrumentnim transformatorjem OT1. Neposredno na mestu okvare je bil izmerjen tudi tok i_f skozi mesto okvare, s tokovnim instrumentnim transformatorjem OT5. Vsi navedeni kanali so bili merjeni s sistemom Dewe5000, s frekvenco vzorčenja 10 kHz. Na mestu ZS je bila priključena naprava za simulacijo dotika veje s faznim vodnikom, katere fotografijo prikazuje slika 3.

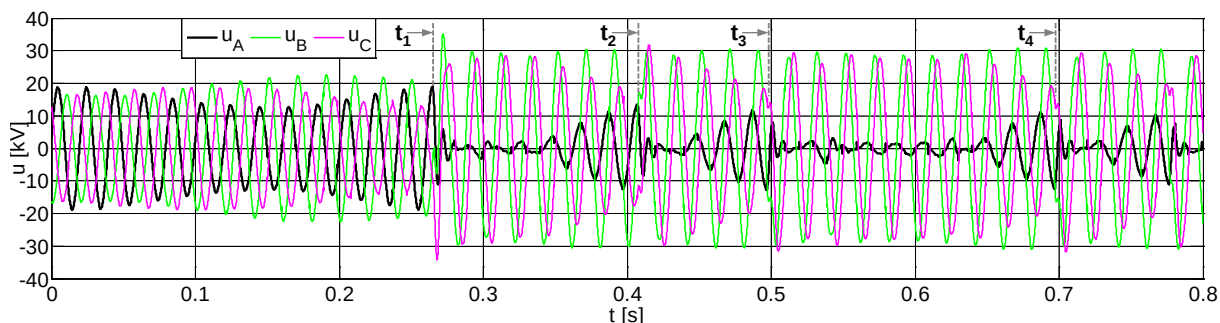


Slika 3: Fotografija naprave za simulacijo zemeljskega stika

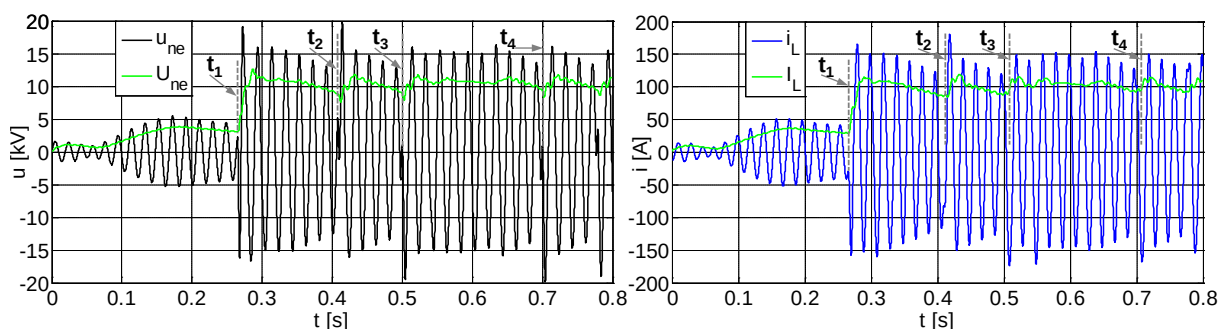
Naprava je sestavljena iz podnožja (2) na katerem je nameščen podporni izolator, ki nosi ogrodje za krmiljenje (3) in zbiralko na katero je priključen napetost faze A. Spodnji bakreni del (ZS) je ozemljen, zgornji pa preko kabla (1) priključen na fazno napetost U_A . Z daljinsko krmiljeno napravo (3) se sprostí spodaj pripeti kos stebela iz sveže posekanega bezga (4). Ta zaniha proti ozemljenemu delu, ki je na potencialu zemlje in tako povzroči obločni zemeljski stik (ZS). Tako se približamo realnim razmeram, kadar veja pade ali se dotakne faznega vodnika in povzroči zemeljski stik.

4. REZULTATI MERITEV IN ANALIZA POSAMEZNIH OBRATOVALNIH STANJ

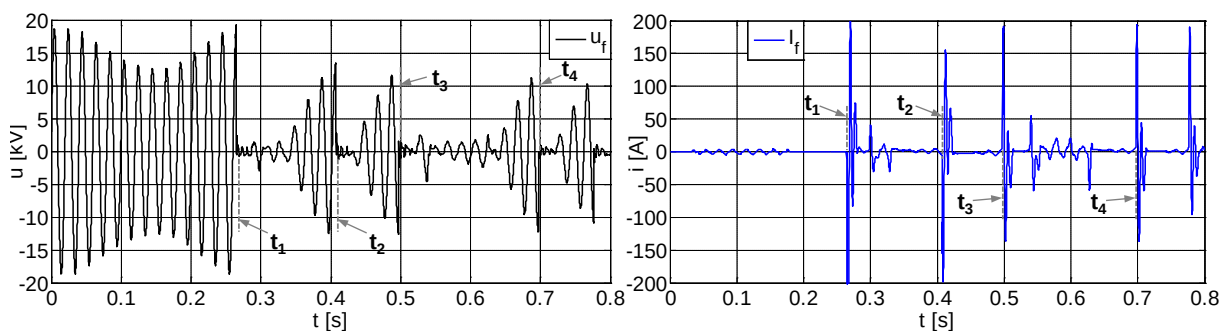
V nadaljevanju prikažimo izmerjene veličine v primeru simulacije zemeljskega stika, ko je sistem obratoval z 10 % nad-kompensacije. Okvaro je napajala faza A, slika 4 kaže časovne poteke linijskih napetosti u_A , u_B in u_C na 20 kV zbiralkah sistema. V trenutku t_1 je napetost v okvarjeni fazi A upadla na potencial zemlje, istočasno sta na medfazno vrednost narastli zdravi fazi B in C. V tem trenutku se je na mestu okvare na lesenem predmetu prižgal oblok. Slika 5 kaže trenutne vrednosti residualne napetosti u_{ne} in njeno efektivno vrednost U_{ne} . Prikazuje tudi trenutne vrednosti toka skozi dušilko i_L in njegovo efektivno vrednost I_L . V trenutku nastanka obloka t_1 naraste residualna napetost u_{ne} na fazno vrednost, $U_{ne} \approx 11,5$ kV. Zaradi napetosti u_{NE} steče tok i_L skozi dušilko, ki na mestu okvare kompenzira kapacitivno komponento. Nastavljena 10 % nad-kompensacija povzroči, da na mestu okvare teče preostala induktivna komponenta toka. Napetost u_{ne} in tok skozi dušilko se po vžigu obloka prične zmanjševati, kar pomeni, da se prične počasi vzpostavljati povratna napetost u_f na mestu okvare. V trenutku t_2 amplituda napetosti na mestu okvare, ki jo kaže slika 6, naraste čez 13 kV, temu sledi ponoven vžig obloka. V trenutku t_1 je skozi mesto okvare prisoten tudi impulz toka i_f prikazan na sliki 6. Med časovnim intervalom t_2 in t_3 , ter t_3 in t_4 se opisano dogajanje ponavlja, vse dokler je sistem priključen na napajanje. Oblok se v ciklih, kot so razvidni iz toka i_f na sliki 6, ponavlja praktično vse dokler, se na mestu okvare predmet okvare mehansko ne uniči ali odstrani oziroma se izklopi okvarjeni vod.



Slika 4: Časovni potek trenutnih vrednosti napetosti u_A , u_B in u_C na zbiralkah 20 kV sistema za obločni ZS z 10 % nad-kompensacije

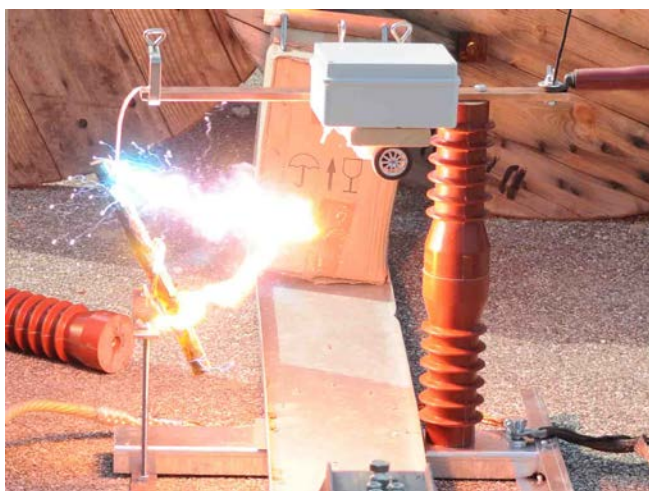


Slika 5: Časovni potek trenutne vrednosti residualne napetosti u_{ne} in njena efektivna vrednost U_{ne} ter trenutne vrednosti toka skozi dušilko i_L in njegova efektivna vrednost I_L za oblačni ZS z 10 % nad-kompenzacije



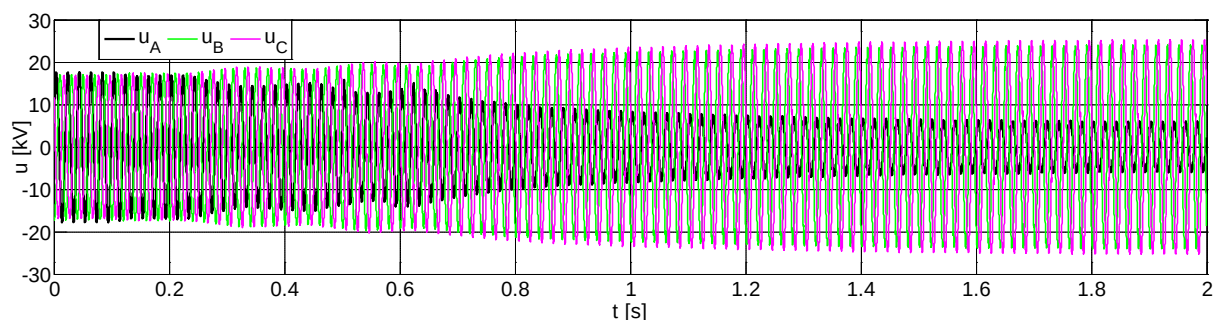
Slika 6: Časovni potek trenutne vrednosti napetosti na mestu okvare u_f ter trenutne vrednosti toka skozi mesto okvare i_f za oblačni ZS z 10 % nad-kompenzacije

Slika 7 kaže fotografijo posneta ob dotiku kosa lesenega predmeta z zbiralko na potencialu zemlje. Razviden je plamen električnega obloka, ki se je vzpostavil takoj po dotiku in se je ciklično prižigal in ugašal dokler se vod ni izklopil.

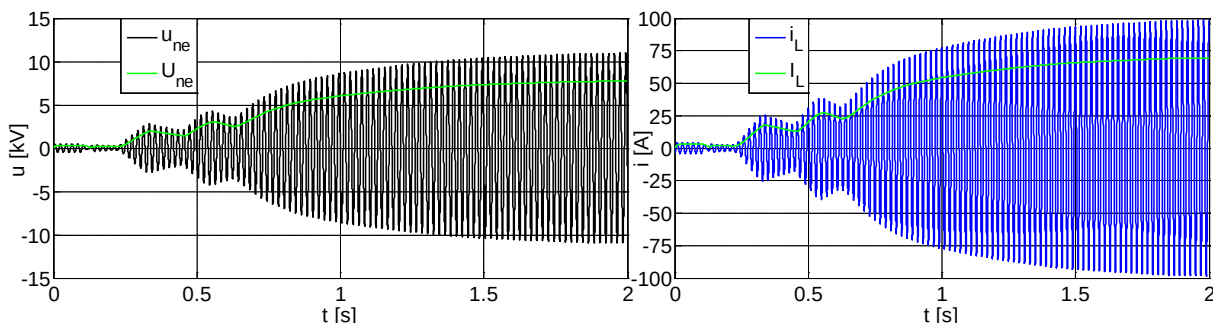


Slika 7: Fotografija obloka ob dotikanju stebra z zemljo

Obravnavajmo še primer simulacije zemeljskega stika z napravo iz slike 3, kadar sistem obratuje v točki popolne kompenzacije. Slika 8 kaže časovne poteke linijskih napetosti u_A , u_B in u_C na 20 kV zbiralkah sistema. Pred trenutkom $t=0$ s, je bila z daljinsko krmiljeno napravo sprožena okvara. Napetost v okvarjeni fazi A je pričela upadati, ob tem se je na mestu okvare prižgal oblok. Po času okrog ene sekunde se je oblok praktično popolnoma stabiliziral. Potencial zdravih faz B in C je porastel, vendar ne na polno medfazno vrednost, saj je bila okvarjena faza še vedno na potencialu, okrog 4,1 kV. Po nastanku okvare se je pojavila na dušilki napetost u_{NE} , ki povzroči tok i_L skozi dušilko in na mestu okvare popolnoma kompenzira kapacitivno komponento. Časovne poteke veličin kaže slika 9.

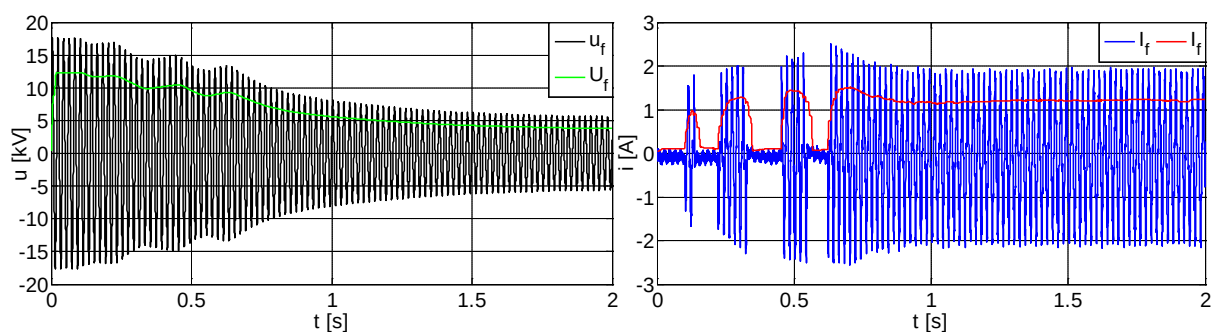


Slika 8: Časovni potek trenutnih vrednosti napetosti u_A , u_B in u_C na zbiralkah 20 kV sistema za oblačni ZS s popolno kompenzacijo

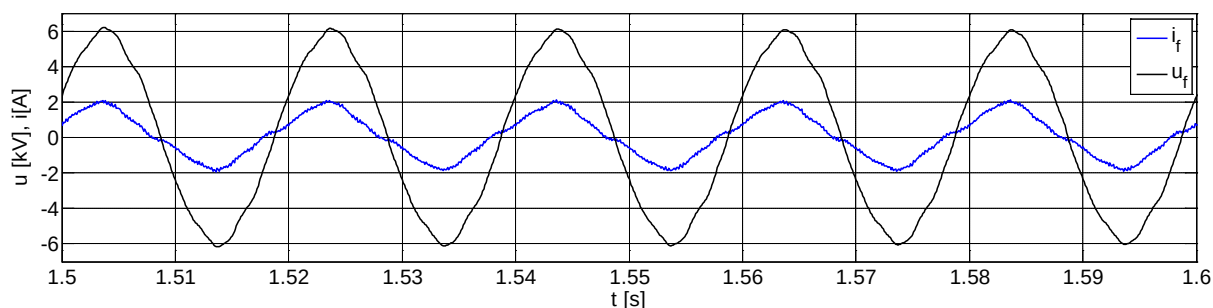


Slika 9: Časovni potek trenutne vrednosti napetosti u_{ne} na mestu okvare in njena efektivna vrednost U_{ne} ter trenutne vrednosti toka skozi dušilko i_L in njegova efektivna vrednost I_L za oblačni ZS s popolno kompenzacijo

Pred nastankom okvare je napetost u_f na mestu okvare enaka fazni napetosti. Takoj, ko se pojavi oblok, prične napetost u_f na mestu okvare upadati, kot kaže slika 10. Po času okrog ene sekunde se oblok popolnoma stabilizira. Skozi mesto okvare teče le delovna komponenta toka zaradi izgub v sistemu in višje harmonske komponente, efektivna vrednost toka znaša $I_f \approx 1,3$ A. Vendar je tudi ta velikost toka dovolj velika, da se na mestu okvare vzdržuje oblok. Slika 11 kaže izrez intervala od 1,5 do 1,6 sekunde iz slike 10. Iz slike 11 je razviden praktično delovni karakter toka. Razvidna je tudi prisotnost višjih harmonskih komponent v toku zemeljskega stika i_f kot tudi v napetosti na mestu okvare u_f .



Slika 10: Časovni potek trenutne vrednosti residualne napetosti u_{ne} in njena efektivna vrednost U_f ter trenutne vrednosti toka skozi mesto okvare i_f in njegova efektivna vrednost I_f za obločni ZS s popolno kompenzacijo



Slika 11: Časovni potek trenutne vrednosti residualne napetosti u_{ne} in trenutne vrednosti toka skozi mesto okvare i_f za obločni ZS s popolno kompenzacijo

5. SKLEP

V prispevku so s pomočjo meritev prikazane razmere ob obločnih zemeljskih stikih v resonančno ozemljenih omrežjih. Namensko izdelana naprava se je izkazala kot zelo dober približek simulacije realnih razmer, ki dejansko nastopajo ob obločnih zemeljskih stikih. Bistven prispevek predstavljenega eksperimentalnega preizkušanja je fizikalna slika in časovni poteki ključnih veličin na mestu zemeljskega stika. Ob normalnem obratovanju, kadar okvaro zabeležijo oscilografije, namreč merilni instrumenti na mestu okvare praktično nikoli niso nameščeni. Eksperimentalne meritve kažejo, da se ob dotiku veje, zaradi počasnega vzpostavljanja povratne napetosti na mestu okvare, ponovni preboj zgodi vedno, kadar je amplituda napetosti na maksimumu. Nadalje je pomembna potrditev, da tudi v primeru popolne kompenzacije, skozi mesto okvare teče delovna komponenta toka. Ta je posledica izgub v sistemu in resonančni dušilki. Ugotovimo še, da je nekompenzirani tok lahko velikostnega reda komaj nekaj amperov, vendar je energije na mestu okvare dovolj za nenehno vzdrževanje obloka. Razmere se dodatno poslabšajo tudi zaradi prisotnosti višjih harmonskih komponent v toku zemeljskega stika, ki jih dušilka ne kompenzira.

6. LITERATURA

- [1] S. Hanninen, M. Lehtonen, *Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing*, Electric Power System Research, 1998, vol. 44, No. 3, pp 155–161
- [2] J. H. Sumner M.Sc, Tech., Associate Member, The theory and operation of Petersen coils, Government Electricity Department, Malaya, pp. 283-298, 1946
- [3] Gernot Druml, Andreas Kugi, B. Parr, *Control of Petersen Coils*, XI International Symposium of Theoretical Electrical Engineering, 2001 Linz

NASLOV AVTORJEV

Miran Rošer, univ. dipl. inž. el.¹

Robert Škof, dipl.inž. el.¹

prof. dr. Gorazd Štumberger, univ. dipl.inž.el.²

¹Elektro Celje, d.d., Vrunčeva 2.a, 3000 Celje

Email: miran.rosar@elektro-celje.si;

Tel: +386 3 420 14 40

Email: robert.skof@elektro-celje.si

²Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Email: gorazd.stumberger@uni-mb.si

Tel: + 386 2 220 70 75