

Eksperimenti z obločnimi zemeljskimi stiki, izvedeni v resonančno ozemljenem srednjenapetostnem omrežju

Miran Rošar¹, Robert Škof¹, Gorazd Štumberger²

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

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: miran.rosar@elektro-celje.si, robert.skof@elektro-celje.si, gorazd.stumberger@um.si

Povzetek. V srednjenapetostnih omrežjih zemeljski stiki pomenijo največji delež okvar. Kadar na mestu zemeljskega stika teče dovolj velik tok okvare in so razdalje, ki ločujejo potencial vodnika od potenciala zemlje, majhne, so izpolnjeni pogoji za vzpostavitev obloka. Resonančna ozemljitev nevtralne točke je zelo učinkovit ukrep za zmanjšanje izpadov zaradi zemeljskih stikov. Z resonančno ozemljeno nevtralno točko omogočimo kompenzacijo kapacitivnega toka skozi mesto okvare ter tako vplivamo na razmere za samougasnitev obločnih zemeljskih stikov. V članku so obravnavane razmere obločnega zemeljskega stika ob simulaciji dotika lesenega predmeta s faznim vodnikom. Predstavljeni so rezultati eksperimentalnih meritev obločnih zemeljskih stikov, izvedenih v distribucijskem omrežju na območju razdelilne transformatorske postaje Krško. Pri meritvah je bil dotik veje simuliran s pomočjo namensko izdelane naprave, predstavljene v članku.

Ključne besede: resonančno ozemljena omrežja, zemeljski stiki, obločni stiki

Experiments with the Arcing Earth Faults performed in Resonant Earthed Medium Voltage Network

Earth faults in medium voltage distribution networks represent the biggest share of all faults. Reliability of electricity supply is directly related with the supply interruptions, which are in medium voltage distribution networks mostly caused by earth faults. 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

Zagotavljanje distribucije električne energije z minimalnim številom prekinitev je primarna zahteva odjemalcev. V zadnjem desetletju se je precej povečala potreba po kakovostni dobavi električne energije. Standardi, ki obravnavajo dopustno število prekinitev dobave električne energije, so torej čedalje 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

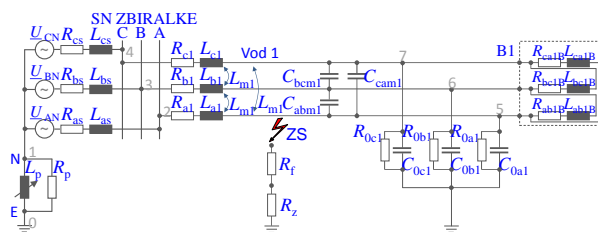
odjemalcem. Za odjemalce torej želimo tako rekoč neprekinjeno dobavo električne energije. Seveda pa okvare v sistemu, predvsem zaradi varnosti, zahtevajo njihovo izločitev oziroma izklop. Izklop okvare in zmanjšanje števila prekinitev sta protislovni zahtevi, ki ju lahko povzamemo z: »nenehno napajaj, a vendar vsako okvaro izklopi«. Ključna težava v obratovanju distribucijskega sistema je, da lahko na okvare vplivamo v zelo omejenem območju. Velika večina okvar, ki nastanejo na distribucijski infrastrukturi, je namreč posledica vplivov okolice. Tako na primer zemeljski stiki po [1], [2], [3] pomenijo od 50- do 80-odstotni delež vseh okvar v srednjenapetostnem 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 [4] temelji na tem, da se kapacitivni tok omrežja kompenzira z induktivnim tokom dušilke, priključene v nevtralno točko transformatorja. Z ustrežno 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 na mestu okvare zelo počasi vzpostavlja povratna napetost. Počasno

vzpostavljane povratne napetosti na mestu okvare pomeni ugodne razmere za ugasnitev obloka [5]. Tako je na voljo dovolj časa za deionizacijo na mestu okvare. Tako se lahko izolacija na mestu okvare, ki jo pomeni 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. Prav tako je obratovanje v resonančni točki zaradi morebitnih visokih napetostnih asimetrij neželjeno. V praksi se večinoma obratuje s petali desetodstotno nadkompenzacijo. Mogoče je tudi obratovanje s petimi ali desetimi odstotki podkompenzacije, ki se v praksi uporablja zelo redko. V obeh primerih obratovanja teče skozi mesto okvare ob zemeljskem stiku preostali tok, ki pomeni razliko med kapacitivno komponento in induktivno komponento toka. Če se izolacija na mestu okvare ne regenerira in imamo opravka z nestabilno upornostjo, se na mestu okvare vzpostavlja oblok. V članku predstavljamo rezultate meritev v primeru zemeljskega stika ob simulaciji dotika lesenega predmeta s faznim vodnikom v resonančno ozemljenem omrežju. Eksperimentalne meritve so bile izvedene v RTP Krško. Uporabljena je bila daljinsko krmiljena naprava za simulacijo dotika lesenega predmeta na fazni vodnik. Rezultati meritev so podani grafično v obliki časovnih potekov. V sklepu so na kratko podane ugotovitve in sklepi posameznih meritev in analiz.

2 REZONANČNO OZEMLJENO OMREŽJE

V sredjenapetostnih omrežjih z resonančno ozemljeno nevtralno točko [6] je izvedena povezava nevtralne točke N transformatorja z ozemljitvenim sistemom E prek Petersenove dušilke. Dušilka je namenjena kompenzaciji kapacitivne komponente toka, ki teče čez mesto okvare ob zemeljskem stiku. Njena velikost je odvisna od velikosti kapacitivnega toka celotnega galvansko povezanega omrežja. Izvedena je tako, da se ji lahko zvezno ali stopenjsko spreminja njena induktivnost in posledično reaktanca. Nadomestno shemo distribucijskega voda z resonančno ozemljeno nevtralno točko ob zemeljskem stiku kaže slika 1. Fazne napetosti na sliki so označene z \underline{U}_{AN} , \underline{U}_{BN} in \underline{U}_{CN} . Upornosti posameznih faz transformatorja so označene z R_{as} , R_{bs} in R_{cs} , induktivnosti pa z L_{as} , L_{bs} in L_{cs} . Na SN zbiralke je priključen distribucijski vod 1, katerega vzdolžna upornost za fazo A je označena z R_{a1} , za fazo B z R_{b1} ter za fazo C z R_{c1} . Induktivnosti posameznih faz za vod 1 pa so označene z L_{a1} , L_{b1} in L_{c1} . Medsebojne induktivne sklopljenosti voda so predpostavljene kot simetrične in so označene z L_{m1} . Medsebojne kapacitivne sklopljenosti faz so označene s

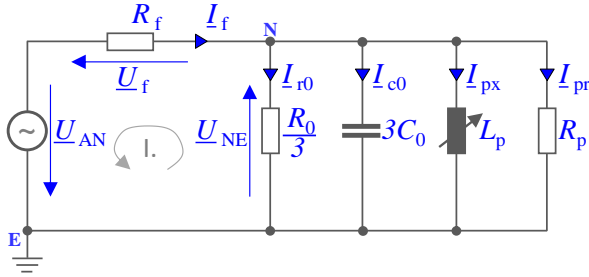
C_{am1} , C_{bm1} in C_{cm1} . Dozemne kapacitivnosti so na nadomestni shemi predstavljene s kondenzatorji s kapacitivnostmi C_{0a1} , C_{0b1} in C_{0c1} , izgube v izolaciji proti zemlji pa z upori z upornostmi R_{0a1} , R_{0b1} ter R_{0c1} . Breme B1 je ponazorjeno z upori R_{ab1B} , R_{bc1B} , R_{ca1B} in tuljavami L_{ab1B} , L_{bc1B} , L_{ca1B} , vezanimi v trikotno vezavo. Upornost na mestu okvare ZS je označena z R_f , upornost ozemljila pa z R_z . Med točkama N-E je priključena dušilka, katere induktivnost je označena z L_p . Izgube v dušilki so ponazorjene z upornostjo R_p . Točka E pomeni potencial zemlje, s številkami od 0 do 7 so označena vozlišča vezja. Na sistemu zbiralk večinoma obratuje vzporedno priključenih več SN vodov, ki zaradi preglednosti na sliki niso prikazani.



Slika 1: Nadomestno vezje distribucijskega voda z resonančno ozemljeno nevtralno točko

Za izpeljavo osnovnih enačb, ki opisujejo dogajanja ob zemeljskih stikih v resonančno ozemljenih omrežjih, za vezje iz slike 1 uvedemo naslednje poenostavitve. Ker se ob zemeljskem stiku trikotnik medfaznih napetosti ne deformira, lahko zanemarimo kapacitivnosti med posameznimi fazami. Te namreč nimajo bistvenega vpliva na dogajanje med zemeljskim stikom, saj so priključene medfazno. Vzdolžne impedance energetskih transformatorjev, definirane za fazo ($x=a,b,c$) z $\underline{Z}_{xs}=R_{xs}+j\omega L_{xs}$, ki napajajo sistem, so majhne, zlasti v primerjavi s kapacitivno reaktanco $X_{co}=1/j\omega 3C_0$. Za primer kapacitivnega toka $I_c=100$ A bi bila po enačbi $I_c=j\omega 3C_0 \underline{U}_{AN}$ [7] ekvivalentna kapacitivna reaktanca za $\underline{U}_{AN}=11,56$ kV enaka $X_{co} \approx 115 \Omega$. Razvidno je, da lahko vzdolžne impedance transformatorjev, ki so proti zemlji vezane v serijo s kapacitivnimi reaktancami, zanemarimo ($1,5 \Omega \ll 115 \Omega$). Podobno lahko privzamemo za vzdolžne impedance vodov, ki so definirane za fazo x z $\underline{Z}_{x1}=R_{x1}+j\omega L_{x1}$, če upoštevamo povprečno vrednost okrog $\underline{Z}_{x1}=0,4 \Omega/\text{km}$. V tem primeru bi za vod, dolg 10 km, znašala impedanca okrog $\underline{Z}_{x1}=4 \Omega$. Ravno tako ne upoštevamo [8] medsebojnih sklopov med faznimi vodniki, ki jih pomenijo induktivnosti L_{m1} . V primerjavi z dozemno kapacitivno reaktanco lahko zanemarimo tudi vzdolžne impedance vodov. Hkrati predpostavimo še, da so dozemne kapacitivnosti simetrične, torej velja enakost $C_{0a1}=C_{0b1}=C_{0c1}=C_0$. Izgube v sistemu upoštevajmo kot izgube na vodih, modelirane z $R_{0a1}=R_{0b1}=R_{0c1}=R_0$. Toki čez upore R_0 , s katerimi modeliramo izgube v izolaciji, so med 2 in 8 % celotnega kapacitivnega toka sistema [7]. Z upoštevanjem vseh navedenih predpostavk in z

uporabo Theveninovega teorema [9] dobimo poenostavljeno nadomestno vezje, ki ga kaže slika 2.



Slika 2: Poenostavljeno nadomestno vezje z resonančno ozemljeno NT

Iz poenostavljenega nadomestnega vezja lahko zapišemo s pomočjo prvega Kirchoffovega 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 pomeni 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).

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

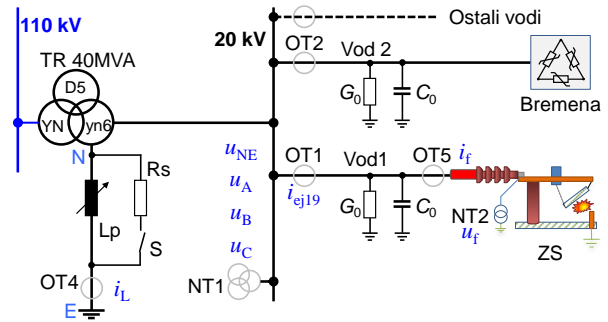
Iz (6) je razvidno, da tok zemeljskega stika sestavljata delovna in jalova komponenta. Delovna komponenta je odvisna od izgub dušilke, modeliranih z R_p , in izgub zaradi nepopolne izolacije v omrežju, modeliranih z R_0 . Jalova komponenta je enaka razliki med kapacitivno komponento, ki jo pogojuje velikost dozemne kapacitivnosti celotnega SN sistema $3C_0$. Induktivno komponento pa določa induktivnost dušilke L_p . Na zadnjo vplivamo z uglastitvijo dušilke, s spreminjanjem induktivnosti dušilke prek spreminjanja zračne reže v dušilki. Če dušilko uglastimo s kapacitivnostjo omrežja,

potem postane imaginarni del (6) enak nič. V tem primeru obratujemo v resonančni točki in preostali tok okvare je le še delovna komponenta toka. Velikost te 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 3. Napajalni vir je 110 kV omrežje, ki napaja energetski transformator 110/20 kV moči 40 MVA in vezne skupine YNyn6d5. Zvezdišče transformatorja N je ozemljeno prek resonančne dušilke s tokom kompenzacije 200 A. Na sliki 3 je reaktanca dušilke označena z X_p . Upor R_s se lahko s stikalom S priklopi vzporedno k dušilki in zaradi lažje detekcije okvarjenega voda poveča delovno komponento toka.



Slika 3: 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 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 preostali 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. Nadzemni vod 1 do mesta ZS, kjer je simuliran zemeljski stik, je bil dolg okrog 26 km. Tok na začetku voda 1 je bil merjen s tokovnim instrumentnim transformatorjem OT1. Neposredno na mestu okvare je bil s tokovnim instrumentnim transformatorjem OT5 izmerjen tudi tok i_f skozi mesto okvare. 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 4.



Slika 4: Fotografija naprave za simulacijo zemeljskega stika

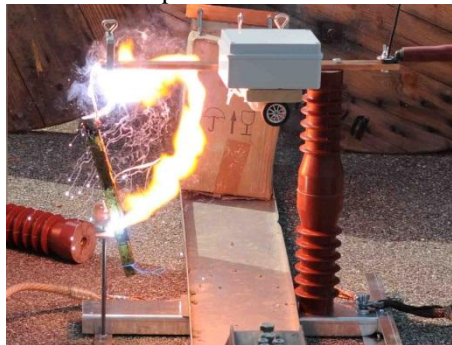
Naprava je sestavljena iz podnožja (2), na katerem je nameščen podporni izolator, ki nosi ogrodje za krmiljenje (3) in zbiralko, na katero je priključena napetost faze A. Spodnji bakreni del (ZS) je ozemljen, zgornji pa prek kabla (1) priključen na fazno napetost U_A . Z daljinsko krmiljeno napravo (3) se sprosti spodaj pripeti kos stebla 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 prikazimo izmerjene veličine pri simulaciji zemeljskega stika, ko je sistem obratoval z 10-odstotno nadkompencacijo. Okvaro je napajala faza A, slika 6 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, sočasno sta na medfazno vrednost narastli zdravi fazi B in C. V tem trenutku se je na mestu okvare na lesenem predmetu prižgal oblok. Slika 7 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-odstotna nadkompencacija povzroči, da na mestu okvare teče preostala induktivna komponenta toka. Napetost u_{NE} in tok skozi dušilko se po vžigu obloka začne zmanjševati, kar pomeni, da se na mestu okvare počasi začne vzpostavljati povratna napetost u_f . V trenutku t_2 amplituda napetosti na mestu okvare, ki jo kaže slika 8, naraste čez 13 kV, temu pa sledi ponovni vžig obloka. V trenutku t_1 je skozi mesto okvare prisoten tudi impulz toka i_f prikazan na sliki 8. 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 8, ponavlja tako rekoč vse dokler se na mestu okvare predmet okvare mehansko ne uniči ali odstrani oziroma se izklopi okvarjeni vod.

Slika 5 kaže fotografijo, posneto ob dotiku kosa lesenega predmeta z zbiralko na potencialu zemlje. Takoj po dotiku se je zaradi električnega obloka vzpostavil plamen, ki je ciklično prižgal in ugašal, dokler se vod ni izklopil.



Slika 5: Fotografija obloka ob dotikanju stebla z zemljo

Prikažimo še primer simulacije zemeljskega stika z napravo s slike 3, kadar sistem obratuje v točki popolne kompenzacije. Slika 9 kaže časovne poteke linijskih napetosti u_A , u_B in u_C na 20 kV v zbiralkah sistema. Pred trenutkom $t=0$ s je bila z daljinsko krmiljeno napravo sprožena okvara. Napetost v okvarjeni fazi A je začela upadati, ob tem se je na mestu okvare prižgal oblok. Po času okrog ene sekunde se je oblok tako rekoč popolnoma stabiliziral. Potencial zdravih faz B in C se je povečal, vendar ne na polno medfazno vrednost, saj je bila okvarjena faza še vedno na potencialu okrog 4,1 kV. Po nastanku okvare je na dušilki nastala napetost u_{NE} , ki povzroči tok i_L skozi dušilko in na mestu okvare popolnoma kompenzira kapacitivno komponento. Časovne poteke veličin kaže slika 10.

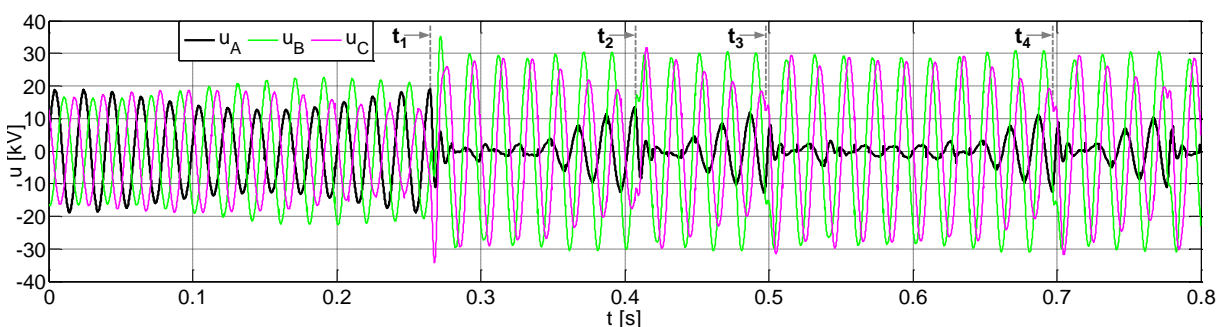
Pred nastankom okvare je napetost u_f na mestu okvare enaka fazni napetosti. Takoj ko nastane oblok, začne napetost u_f na mestu okvare upadati, kot kaže slika 11. Po približno eni sekundi se oblok popolnoma stabilizira. Skozi mesto okvare teče le delovna komponenta toka zaradi izgub v sistemu in višje harmonske komponente. Efektivna vrednost tega toka znaša $I_f \approx 1,3$ A, vendar je tudi ta tok dovolj velik, da se na mestu okvare vzdržuje oblok. Slika 12 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 .

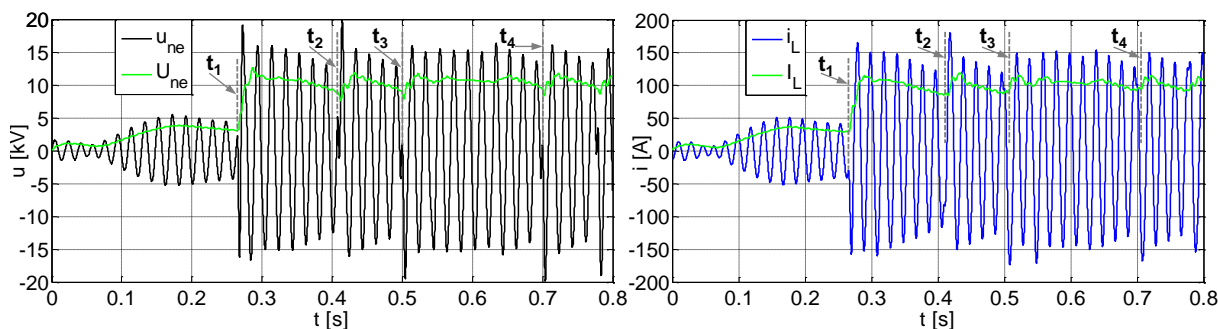
5 SKLEP

V članku so s pomočjo meritev prikazane razmere ob obločnih zemeljskih stikih v resonančno ozemljenih omrežjih. Namensko izdelana naprava je omogočila zelo dober približek simulacije realnih razmer, ki dejansko nastopajo ob obločnih zemeljskih stikih. Bistven prispevek predstavljenega eksperimentalnega preizkušanja so 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 pokažejo, da ob dotiku veje

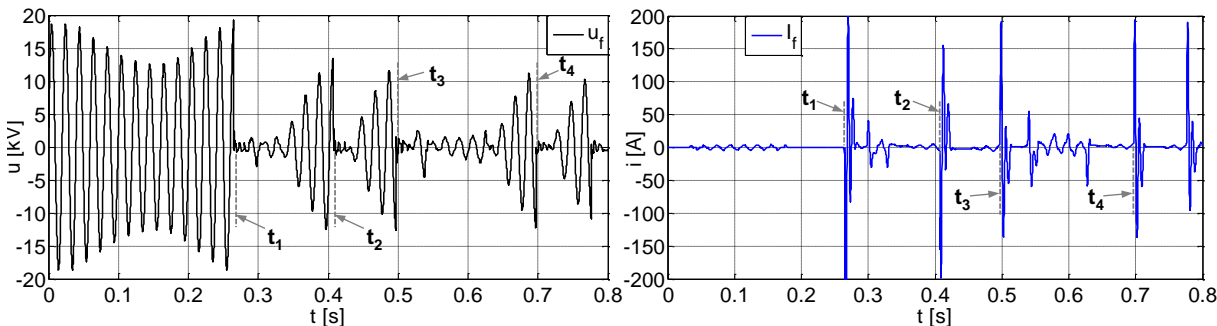
zaradi počasnega vzpostavljanja povratne napetosti na mestu okvare ponovni preboj nastane vedno, kadar je amplituda napetosti na maksimumu. Prav tako je pomembna potrditev, da tudi pri popolni kompenzaciji skozi mesto okvare teče delovna komponenta toka. Ta je posledica izgub v sistemu in v resonančni dušilki. Izkaže se tudi, da je lahko velikost nekompenziranega toka komaj nekaj amperov, vendar je energije na mestu okvare dovolj za nenehno vzdrževanje obloka. Razmere se dodatno poslabšajo zaradi prisotnosti višjih harmonskih komponent v toku zemeljskega stika, ki jih dušilka ne kompenzira.



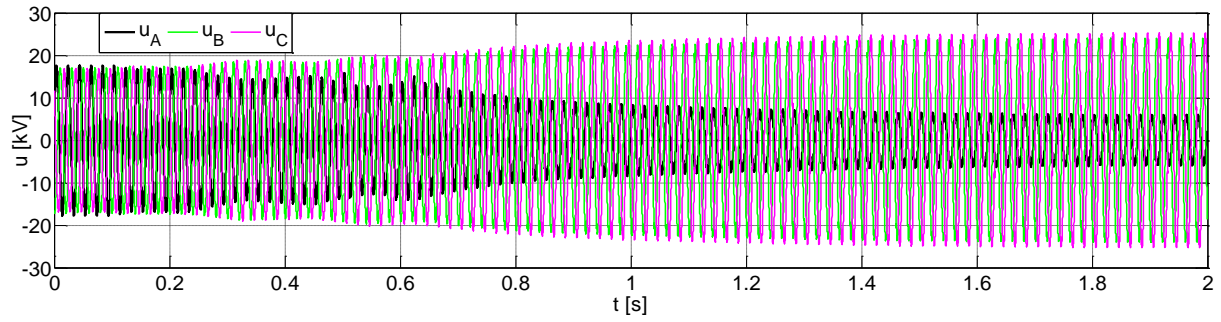
Slika 6: Časovni potek trenutnih vrednosti napetosti u_A , u_B in u_C na zbiralkah 20 kV sistema za obločni ZS z 10-odstotno nadkompenzacijo



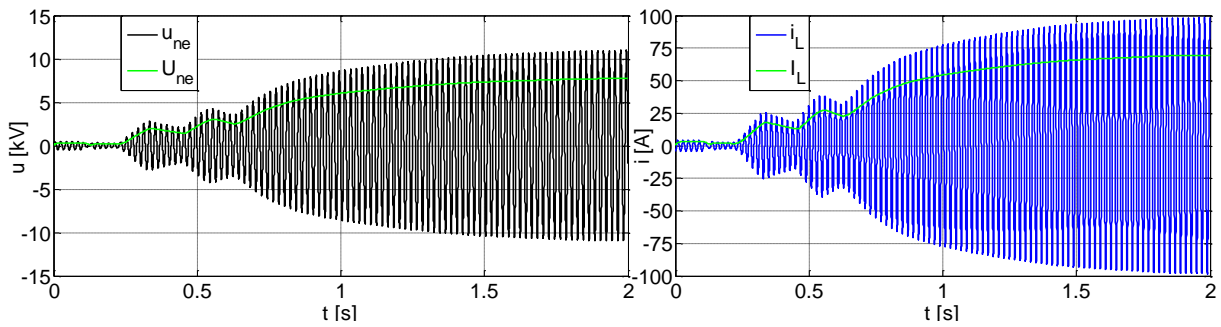
Slika 7: Časovni potek trenutne vrednosti residualne napetosti u_{NE} in njena efektivna vrednost U_{NE} ter trenutne vrednosti toka skozi dušilko i_L in njegova efektivna vrednost I_L za obločni ZS z 10-odstotno nadkompenzacijo



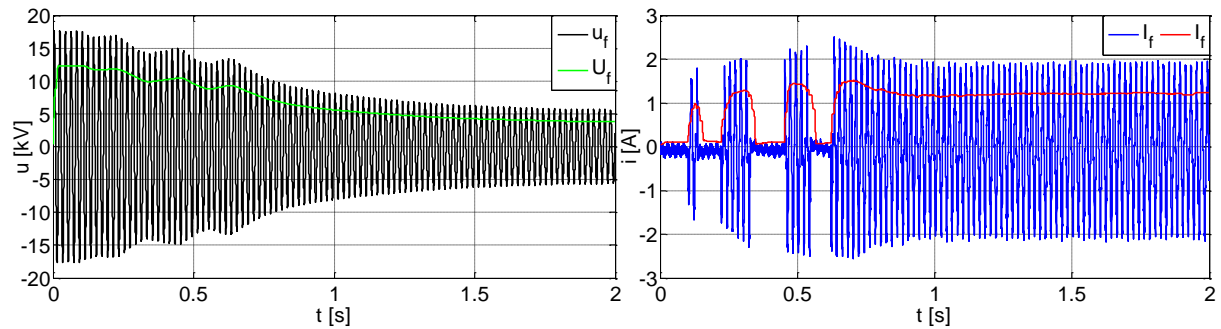
Slika 8: Časovni potek trenutne vrednosti napetosti na mestu okvare u_f ter trenutne vrednosti toka skozi mesto okvare i_f za obločni ZS z 10-odstotno nadkompenzacijo



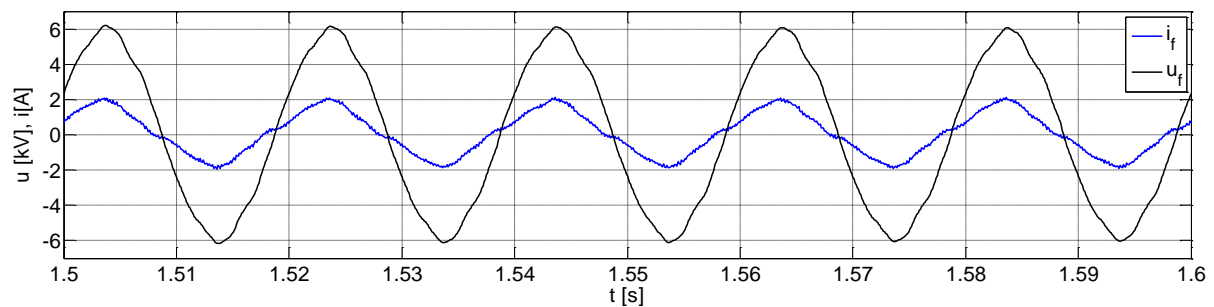
Slika 9: Časovni potek trenutnih vrednosti napetosti u_A , u_B in u_C na zbiralkah 20 kV sistema za oblačni ZS s popolno kompenzacijo



Slika 10: 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 njena efektivna vrednost I_L za oblačni ZS s popolno kompenzacijo



Slika 11: Časovni potek trenutne vrednosti residualne napetosti u_{NE} in njena efektivna vrednost U_f ter trenutne vrednosti toka skozi mesto okvare i_f in njena efektivna vrednost I_f za oblačni ZS s popolno kompenzacijo



Slika 12: Časovni potek trenutne vrednosti residualne napetosti u_{NE} in trenutne vrednosti toka skozi mesto okvare i_f za oblačni ZS s popolno kompenzacijo

LITERATURA

- [1] J. Bergeal, L. Berthet, O. Grob, P. Bertrand in B. Lacroix, „Single-phase faults on compensated neutral medium voltage networks,“ v *CIREC 12th International Conference on Electricity Distribution*, Birmingham, 1993.
- [2] S. Hanninen in M. Lehtonen, „Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing,“ *Electric Power System Research*, zv. 44, št. 3, p. 155–161, 1998.
- [3] G. Dimnik, S. Gašperič in F. Gubina, „Statistika delovanja avtomatskih ponovnih vklopov v SN in VN omrežju,“ Šesta konferenca slovenskih elektroenergetikov, CIREC ŠK 3–24, Portorož, 2003.
- [4] J. H. Sumner, „The theory and operation of Petersen coils,“ *Journal of the Institution of Part II: Electrical Engineers Power Engineering*, zv. 94, št. 40, pp. 283–298, 1947.
- [5] R. N. Conwell in R. D. Evans, „The Petersen Earth Coil,“ v *10th Midwinter Convention of the A. I. E. E.*, New York, 1922.
- [6] G. Druml, A. Kugi in B. Parr, „Control of Petersen coils,“ v *XI. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, Linz, Austria, 2001.
- [7] J. M. Nahman, *Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža*, Beograd: Naučna knjiga, 1980.
- [8] R. Kaczmarek, W. Y. Huang in P. Bastard, „Equivalent circuit application to a phase to ground fault detection in distribution networks without MV voltage measurements,“ Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, IET, 2004.
- [9] N. D. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis*, Amsterdam: Elsevier, 2008.

Miran Rošer je diplomiral leta 2004 na oddelku FERI Tehniške fakultete Univerze v Mariboru. V letu 2014 je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je v družbi Elektro Celje, d. d., kjer se ukvarja z meritvami in relejnimi zaščitnimi sistemi ter sistemi za vodenje in analize pri obratovanju in razvoju distribucijskega omrežja.

Robert Škof je diplomiral leta 2000 na oddelku FERI Tehniške fakultete Univerze v Mariboru. Zaposlen je v družbi Elektro Celje, d. d., kjer se ukvarja z uvajanjem sodobnih tehnologij na področju vzdrževanja in gradnje distribucijskih sistemov.

Gorazd Štumberger je diplomiral leta 1989 in magistriral leta 1992 na oddelku FERI Tehniške fakultete Univerze v Mariboru. V letu 1996 je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, kjer je tudi zaposlen kot redni profesor. Ukvarja se z modeliranjem in vodenjem elektromehanskih sistemov in elementov elektroenergetskega sistema. Dr. Gorazd Štumberger je član slovenskega komiteja CIGRE ter mednarodnih združenj Compumag in IEEE.