

## **STRUJE ZEMLJOSPOJA I PRENAPONI U MREŽAMA 10 kV SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM**

P. Vukelja, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija  
J. Mrvić, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija  
D. Hrvić, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija  
V. Kostić, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija

### **UVOD**

Mreže 10 kV sa izolovanom neutralnom tačkom (izolovane mreže) su prisutne u nekim elektrodistributivnim društvima u Srbiji. Napajaju se iz TS 35kV/10kV ili TS 110kV/10kV. Imaju svoje prednosti, ali i nedostatke u odnosu na iste mreže uzemljene preko otpornika ili reaktanse. U cilju sagledavanja potrebe prelaska ovih mreža na uzemljenje preko otpornika ili reaktanse urađeno je više studija (jedna od poslednjih je [1]) i veći broj eksperimentalnih istraživanja strujnih i naponskih pojava u prelaznim režimima kao što su operacije prekidačima, pojave zemljospoja i slično. Osnovne prednosti ovih mreža je što potrošači mogu da rade i pri pojavi zemljospoja na jednoj od faza, nema prekida napajanja pri pojavi prolaznih zemljospojeva i poseduju sposobnost samogašenja električnog luka ako su im struje zemljospoja male. Nedostaci su moguća oštećenja izolacije na mestu zemljospoja kod kablovskih vodova, pronalaženje izvoda na kome se pojavio zemljospoj, pojave intermitentnih zemljospojeva, pojave ferorezonansnih oscilacija.

U radu su prezentirani rezultati istraživanja struja zemljospoja i prenapona pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja u izolovanim mrežama 10 kV i sagledane su naponske pojave koje se mogu očekivati pri operacijama prekidača.

### **ISTRAŽIVANJA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA**

Istraživanja struja zemljospoja i prenapona u distributivnim izolovanim mrežama 10 kV izvršena su u četiri TS 35kV/10kV. Dve mreže 10 kV (A i D) su sa više kablovskih vodova, a dve (B i C) sa više nadzemnih vodova. Struje zemljospoja su snimane koristeći strujni transformator 30A/5A, 12 kV. U svakoj od TS 35kV/10kV, u odabranoj ćeliji na ulazu u 10 kV kablovski ili nadzemni vod, izvedeno je spajanje jednog od faznih provodnika sa uzemljenjem preko primara strujnog transformatora 30A/5A. Zemljospoj u mreži 10 kV uspostavljan je uključanjem prekidača 12 kV te ćelije i prekidan isključenjem istog prekidača. Sa sekundara strujnog transformatora uzimana je informacija o struji zemljospoja, odnosno struja zemljospoja je snimana koristeći tranzijent rikorder.

Merenja prelaznih faznih napona pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja izvedena su koristeći kapacitivna delila napona koja verno prenose pojave sa visokog na niski napon u frekventnom opsegu od nekoliko Hz do 2 MHz. Informacije o prelaznim naponskim procesima snimane su tranzijent rikorderom i digitalnim osciloskopima.

Šeme istraživanja struja zemljospoja i prelaznih faznih napona u mrežama 10 kV napajanih iz TS 35kV/10kV su bile slične. Na slici 1 data je tipična šema istraživanja. Izvedeno je od 5 do 8 uspostavljanja i prekidanja zemljospoja na ulazu u vod 10 kV u TS 35kV/10kV A, B, C i D. U TS A se manipuliralo sa vakuumskim prekidačem, a u TS B, C i D sa malouljnim prekidačima.

U Tabeli 1 su dati rezultati istraživanja u TS 35kV/10kV. Prenaponi su dati u relativnim jedinicama kao odnos najvišeg izmerenog prelaznog faznog napona i amplitude istog napona u ustaljenom režimu neposredno pre uključenja na zemljospoj. Na osnovu dobijenih podataka o kapacitivnostima kablovskih i nadzemnih vodova i njihovim dužinama u mrežama 10 kV, koje se napajaju iz napred navedenih TS, izračunate su vrednosti struja zemljospoja i date u tabeli 1. Vrednosti struja zemljospoja utvrđenih proračunom i izmerenih neznatno se razlikuju za mreže 10 kV napajane iz TS 35kV/10kV A i B. Međutim, između vrednosti struja zemljospoja utvrđenih proračunom i izmerenih su značajne razlike za mreže 10 kV napajane iz TS 35kV/10kV C i D. Pretpostavlja se da nisu bili tačni podaci o dužinama kablovskih i nadzemnih vodova prisutnih na sabirnicama u vreme istraživanja.

Na sl. 2, 3, 4, 5, 6 i 7 prikazani su karakteristični snimci prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju zemljospoja i struja zemljospoja.

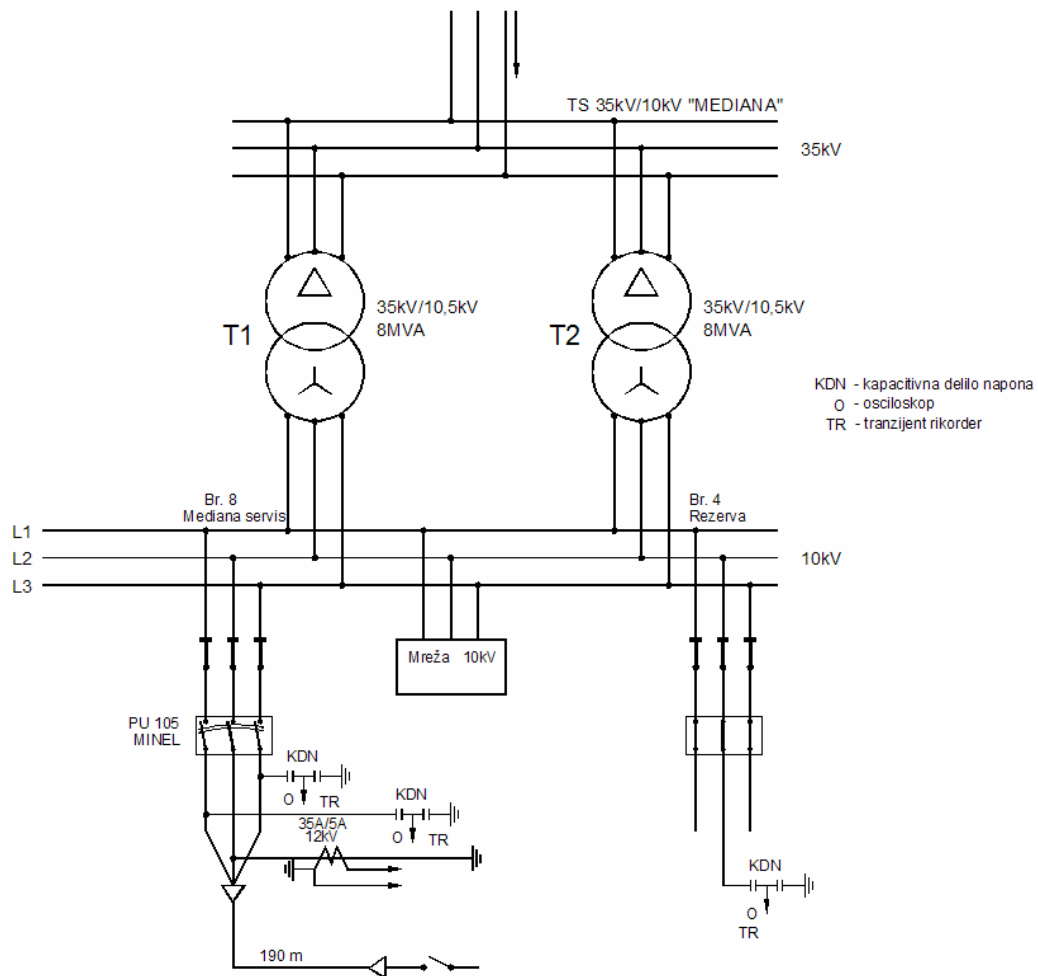
Uključenja na zemljospoj malouljnim prekidačima nisu dovodila do visokih prenapona. Najviši izmereni je 1.95 r.j. Pri uključenjima na zemljospoj vakuumskim prekidačem javljali su se znatno viši prenaponi. Najviši izmereni je 3.34 r.j. Razlog su višestruka prethodna paljenja električnog luka između kontakta njegovih polova. Ova pojava je svojstvena prekidačima koji mogu da prekidaju visokofrekventnu struju pri njenom prolasku kroz nulu. Posle uključenja na zemljospoj, naponi faza na kojima nije zemljospoj dobijaju međufazni napon i zadržavaju ga sve do isključenja zemljospoja. Prelazak sa faznih na međufazne napone prate prenaponi. Njihovo trajanje je najčešće ispod 2 ms.

TABELA 1 - Podaci istraživanja u TS 35kV/10kV A, B, C i D

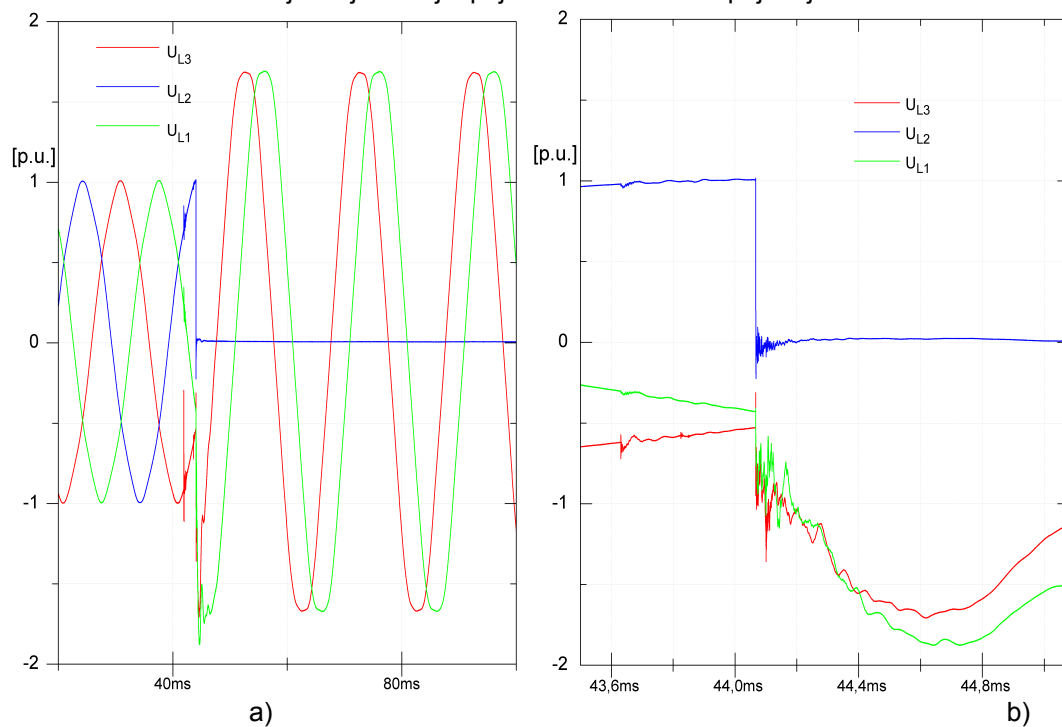
TS 35kV/10kV	Broj izvedenih zemljospojeva	Najviši izmereni prenapon (r.j.)		Efektivna vrednost struje zemljospoja (A)	
		Uključenje na zemljospoj	Isključenje zemljospoja	merenje	proračun
A	8	3,34	1,70	29,7	28,7
B	5	1,91	2,01	19,3	18,2
C	6	1,95	1,96	17,8-18,2	14,1
D	6	1,91	1,54	34,2-34,8	22,9

Isključenja zemljospoja dovode do uspostavljanja normalnih faznih napona u mreži 10 kV. Napon faze na kojoj je bio zemljospoj vraća se od nule na fazni napon, a naponi druge dve faze sa međufaznih se vraćaju na fazne napone. Ovaj proces prate oscilacije na sva tri fazna napona sa učestanošću nekoliko Hz, ali se priguše najčešće posle nekoliko stotina ms. Oscilacije su istofazne, odnosno pojavljuju se istovremeno u sva tri fazna napona. Usled ovih oscilacija dolazi do pojave prenapona koji posle njihovog prigušenja nestaju. Prenaponi u toku ovih procesa retko prelaze 1.7 r.j. U trenutku isključenja zemljospoja, na fazama na kojima nije bio zemljospoj, u nekim slučajevima dolazi do prenapona. Najviši izmereni prenapon je 2.01 r.j. Pri isključenjima zemljospoja malouljnim prekidačima dolazilo je do ponovnih paljenja električnog luka između kontakata njihovih polova. Pri tom nije bilo viših prenapona u mreži 10 kV, kako je već napred konstatovano, ali se ne isključuje mogućnost pojave visokih prenapona na vodu koji se isključuje, odnosno na vodu na kome je zemljospoj.

Struje zemljospoja u mrežama 10 kV koje se napajaju iz TS A i TS D su visoke, a u mrežama 10 kV koje se napajaju iz TS B i TS C su u granicama dozvoljenih u skladu sa [2]. U strujama zemljospoja u svim napred navedenim mrežama su prisutni viši harmonici. Istaknutiji su peti i sedmi harmonik. Vrednost petog harmonika je od 11.2% do 13.8% osnovnog harmonika, a vrednost sedmog od 6.3% do 7.5% osnovnog harmonika. Harmonijska distorzija struja zemljospoja u posmatranim mrežama je u intervalu od 12% do 17%.

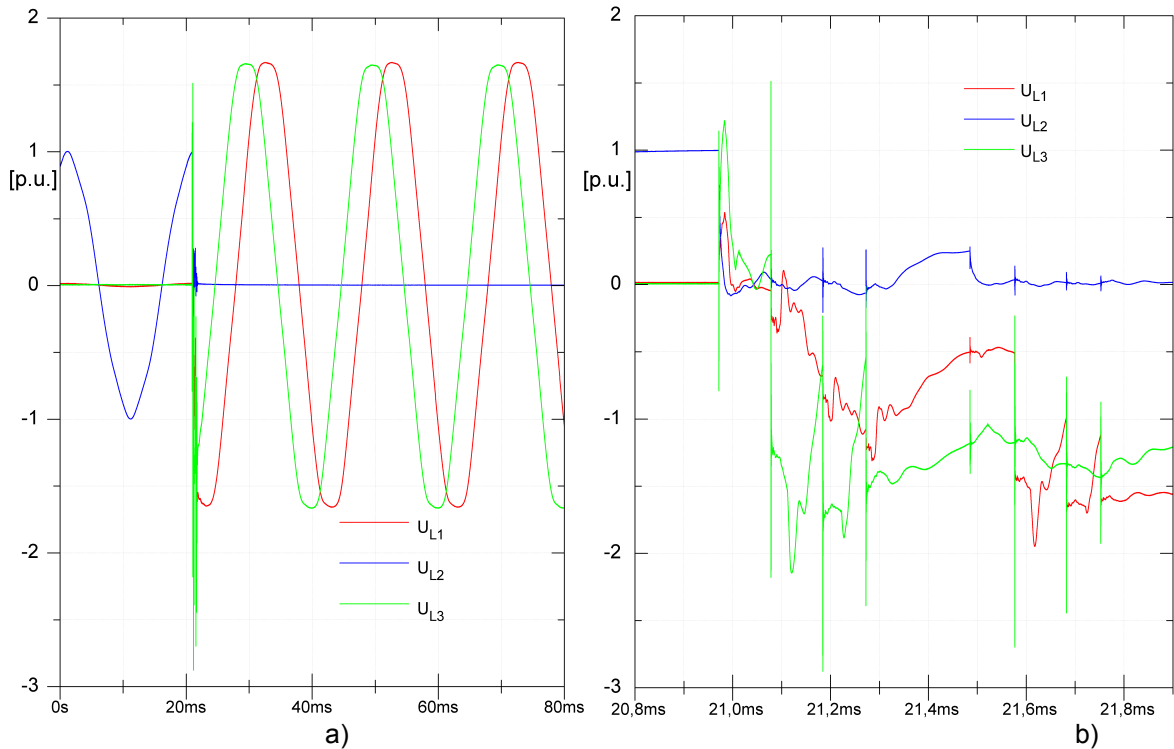


SI.1. Šema istraživanja struja zemljospoja i prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju zemljospoja u mreži 10 kV napajanoj iz TS 35kV/10kV D



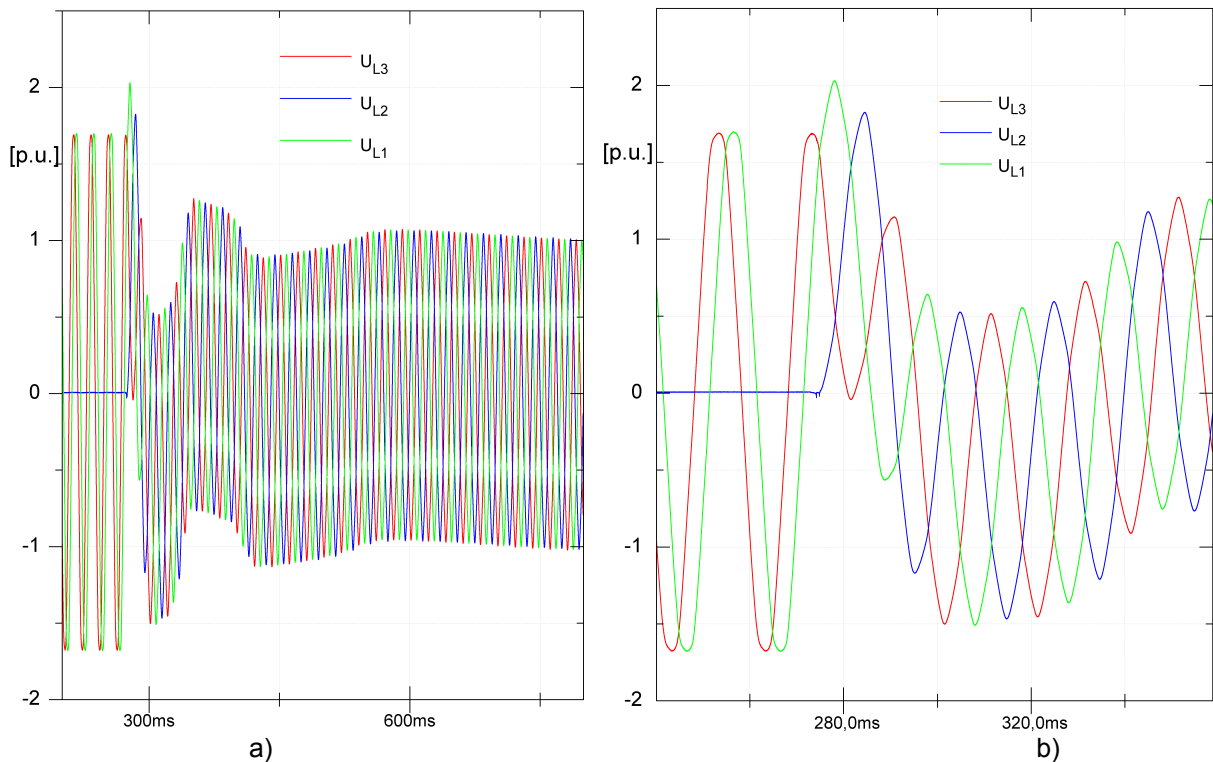
SI. 2

- a) Prelazni fazni naponi  $u_{L1}, u_{L2}$  i  $u_{L3}$  na sabirnicama 10 kV u TS 35kV/10kV C pri uključenju malouljnim prekidačem 12 kV kablovskog voda na kome je izveden zemljospoj na fazi L2
- b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_{L1}, u_{L2}$  i  $u_{L3}$



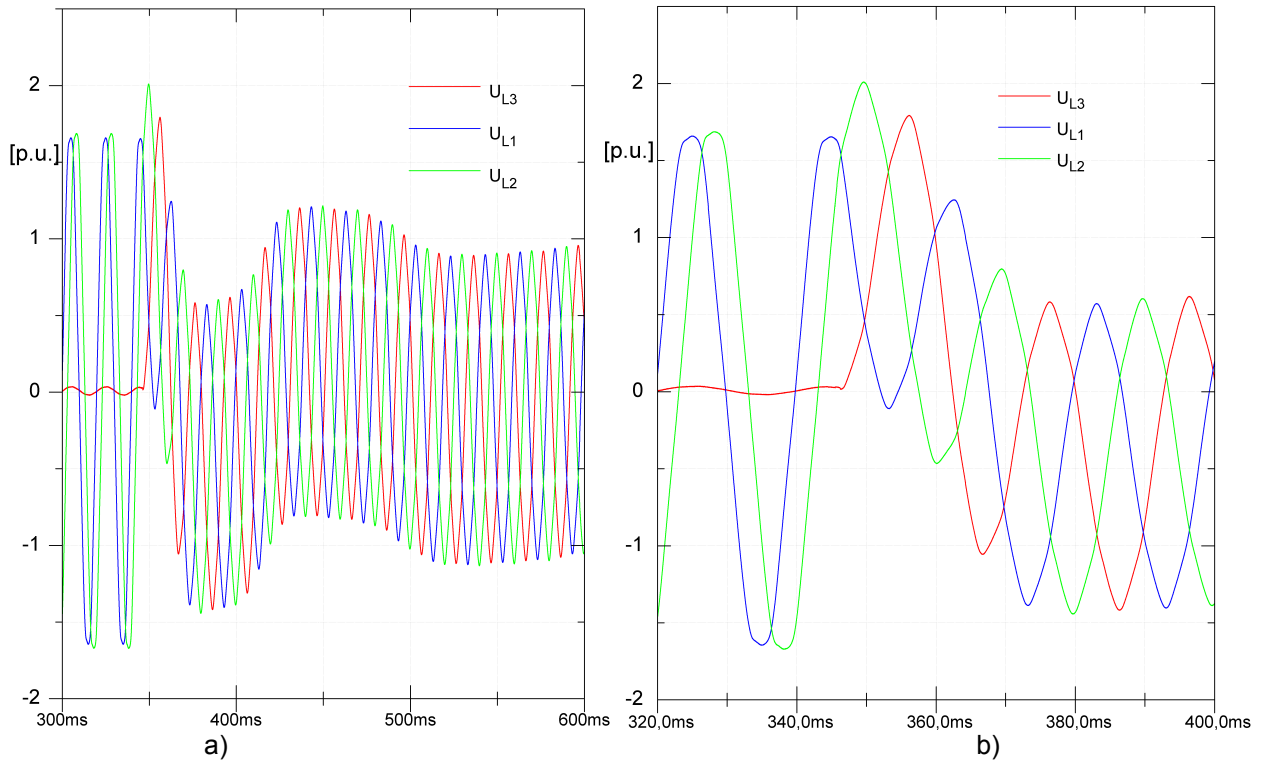
Sl. 3

- a) Prelazni fazni naponi  $u_{L1}$  i  $u_{L3}$  u TS 35kV/10kV A na ulazu u 10 kV kablovski vod (faza L2 je uzemljena) na čijem kraju je transformator 10kV/0.4kV opterećen potrošačima 0.4 kV i napon  $u_{L2}$  na sabirnicama 10 kV pri uključenju vakuumskeg prekidača 12 kV na zemljospoj uspostavljen na ulazu u kablovski vod
- b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_{L1}$  , $u_{L2}$  i  $u_{L3}$



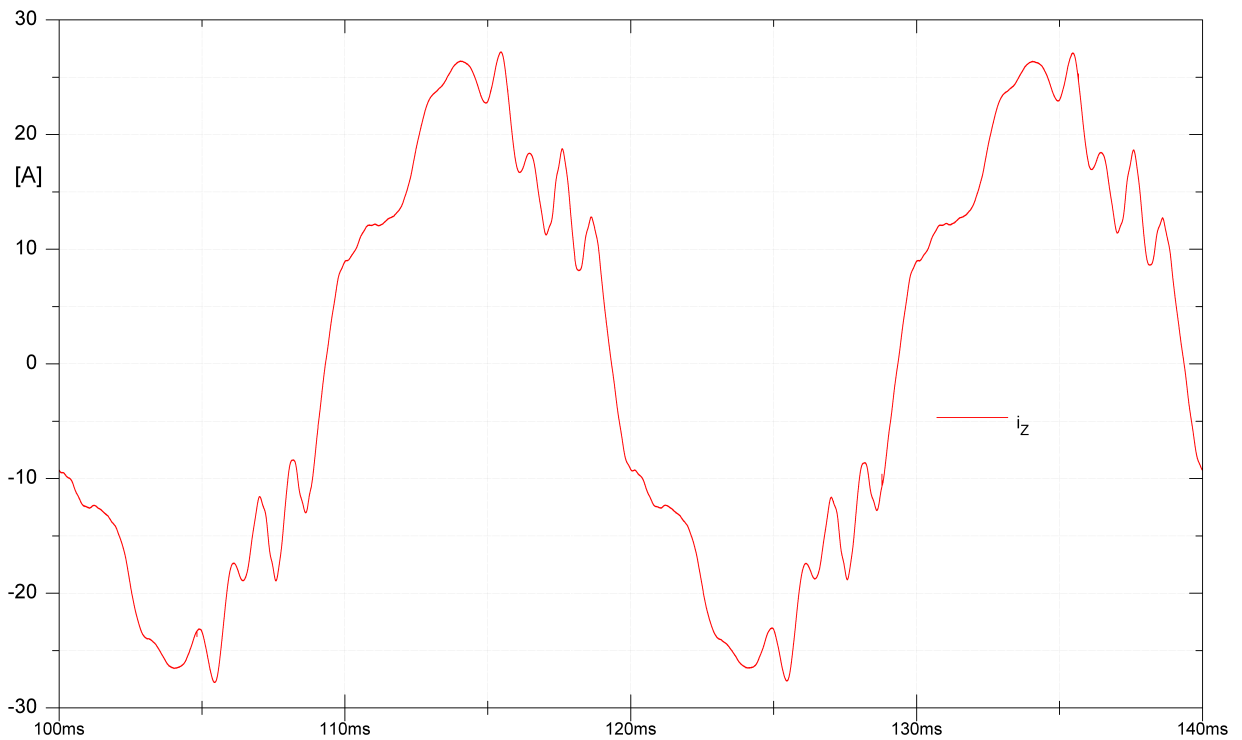
Slika 4.

- a) Prelazni fazni naponi  $u_{L1}$ , $u_{L2}$  i  $u_{L3}$  na sabirnicama 10 kV u TS 35kV/10kV C pri isključenju malouljnimn prekidačem 12 kV kablovskog voda na kome je izveden zemljospoj na fazi L2
- b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_{L1}$  , $u_{L2}$  i  $u_{L3}$

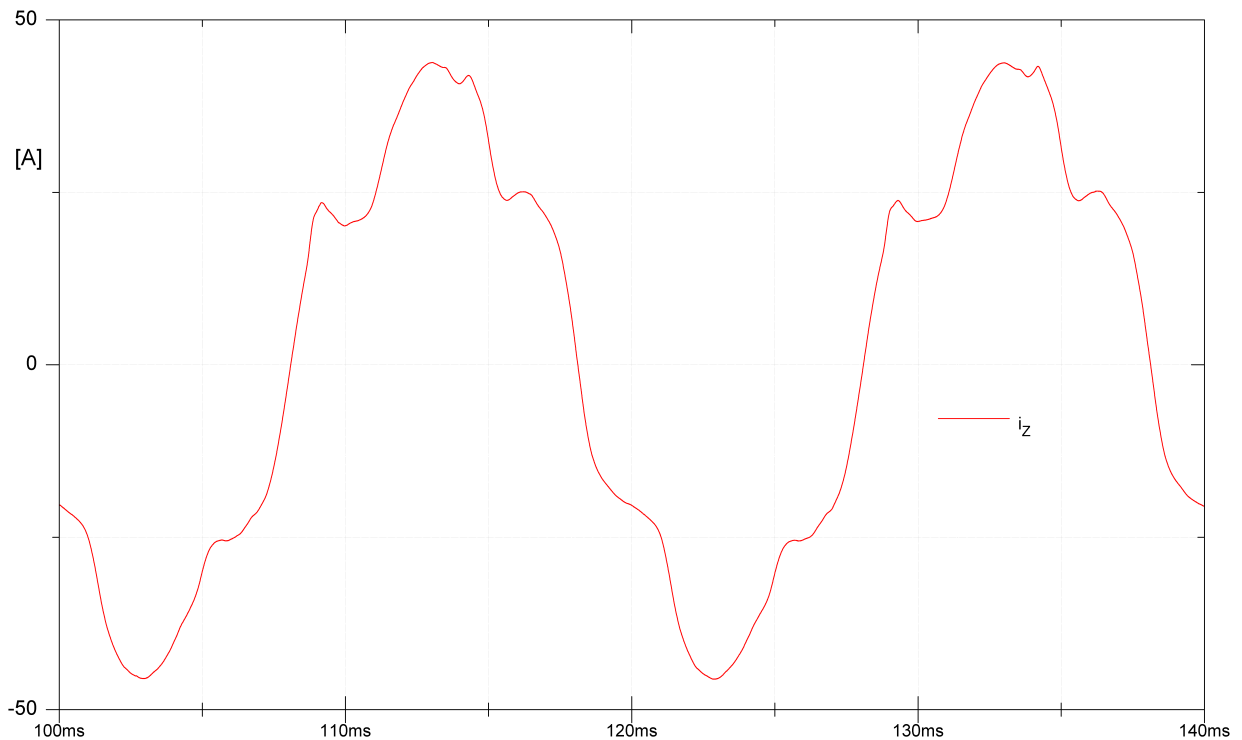


Sl. 5

- a) Prelazni fazni naponi  $u_{L1}$ ,  $u_{L2}$  i  $u_{L3}$  na sabirnicama 10 kV u TS 35kV/10kV B pri isključenju malouljnim prekidačem 12 kV kablovskog voda na kome je izveden zemljospoj  
 b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_{L1}$ ,  $u_{L2}$  i  $u_{L3}$



Sl. 6. Struja zemljospoja u mreži 10 kV napajanoj iz TS 35kV/10kV C



Sl. 7 Struja zemljospoja u mreži 10 kV napajanoj iz TS 35kV/10kV A

### ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA U IZOLOVANIM MREŽAMA 10 kV

Izvršena istraživanja u distributivnim izolovanim mrežama 10 kV odnosila su se samo na pojave koje se dešavaju pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja. Interesantno je da je u ovim mrežama izvršen manji broj eksperimentalnih istraživanja naponskih i strujnih pojava pri operacijama prekidača u normalnom radu nego u drugim mrežama. U izolovanim mrežama 6 kV izvršena su brojna eksperimentalna istraživanja ovih pojava, kao i u distributivnim mrežama 10 kV uzemljenim preko otpornika [3-7]. Sva ova istraživanja su doprinela da se mogu sagledati naponske i strujne pojave u izolovanim distributivnim mrežama 10 kV pri normalnim operacijama prekidača, a to su uglavnom uključena i isključenja kratkih ili dugačkih vodova sa transformatorima 10kV/0,4kV.

Uključenja vodova 10 kV sa transformatorima 10kV/0,4kV dovode do prenapona koji zavise od vrste prekidača sa kojim se to izvodi. Kada su u pitanju malouljni prekidači nema pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta njihovih polova i prenaponi retko prelaze 2 r.j. To su pokazala ispitivanja u izolovanim mrežama 6 kV i mrežama 10 kV uzemljenim preko otpornika. Kada se uključena izvode vakuumskim prekidačima dolazi do pojave višestrukih prethodnih paljenja električnog luka između kontakta njihovih polova i do prenapona ne izuzetno visokih, ali veoma strmih koji naprežu međunavojnu izolaciju namotaja transformatora. Ovi prenaponi su opasni za izolaciju suvih transformatora 10kV/0,4kV, posebno onih koji se duži period nalaze u eksploataciji. Strmine tih prenapona su blaže ako su vodovi duži. Visine prenapona ne bi trebalo da prelaze 2,5 r.j.. Najviši izmereni prenapon u izolovanim mrežama 6 kV pri ovoj operaciji prekidača je 1,9 r.j., a u mrežama 10 kV uzemljenim preko otpornika je 1,76 r.j..

Isključenja malouljnim i vakuumskim prekidačima kratkih vodova 10 kV sa transformatorima 10kV/0,4kV najčešće dovode do pojave ponovnih nastajanja električnog luka između kontakta njihovih polova i do znatnih prenapona, posebno kada su u pitanju prekidači starijih konstrukcija. Najviši izmereni prenapon pri isključenju u normalnom radu u izolovanoj mreži 6 kV je 2,74 r.j., a u distributivnoj mreži 10 kV uzemljenoj preko otpornika je 2,20 r.j. Pri isključenju neposredno posle uključena kratkih vodova sa transformatorima 10kV/0,4kV najviši izmereni prenapon je 4,35r.j. Kada su u pitanju duži vodovi, iznad 1 km, isključenja vakuumskim prekidačima ne dovode do visokih prenapona.

Uključenjem malouljnih prekidača na zemljospoj na vodu u izolovanoj mreži 10 kV mogu dovesti do viših prenapona nego što su konstatovani istraživanjima u ove četiri mreže. Ovi prenaponi mogu da dostignu vrednost i do 2,6 r.j. kao što je to konstatovano u izolovanim mrežama 6 kV. Međutim, uključenja na zemljospoj na vodu vakuumskim prekidačima mogu dovesti do znatno viših prenapona od 2,6 r.j. zbog pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta njihovih polova, kao što je to konstatovano u jednoj od četiri istraživane mreže. Izmeren je najviši prenapona 3,34 r.j. Intermitirajući zemljospoj, koji je moguć u izolovanoj mreži 10 kV kada su struje zemljospoja male (mreža sa nadzemnim vodovima ili sa malom dužinom kablovskih vodova), može dovesti i do prenapona iznad 2,6 r.j.

Isključenja zemljospoja u četiri mreže su dovodila do oscilacija faznih napona učestanosti od nekoliko Hz koje su se relativno brzo prigušile. Ove oscilacije su posledica procesa vraćanja međufaznih napona na dve faze koje nisu u zemljospoju na fazne napone i procesa dostizanja faznog napona na fazi na kojoj je bio zemljospoj. U izolovanoj mreži 6 kV ovaj proces posle isključenja zemljospoja dovodio je ne tako retko do pojave ferorezonanse drugog subharmonika koja se trajno zadržavala sa prenaponima i do 2,3 r.j. Pojava ferorezonanse moguća je i u izolovanoj mreži 10 kV, ako nisu preduzete mere i sredstva za njeno sprečavanje. U četiri istraživane mreže to je bilo urađeno ugradnjom otpornika u otvoreni trougao sekundarnih namotaja garniture naponskih mernih transformatora u mernoj ćeliji.

Prenaponi koji su ustanovljeni istraživanjima u četiri izolovane mreže 10 kV napajane iz TS 35kV/10kV znatno su ispod podnosivih napona izolacije pod pretpostavkom da nije došlo do njene značajne degradacije tokom eksploatacije (oprema u mrežama 10 kV je pre ugradnje ispitana naponom industrijske učestanosti 28 kV izuzimajući jednopolno izolovane induktivne naponske transformatore, a pojedina i atmosferskim udarnim naponom 75 kV). Takođe, i prenaponi koji se mogu očekivati pri normalnim operacijama uključenja i isključenja prekidača novijih konstrukcija u izolovanoj mreži 10 kV ne bi trebalo da budu visoki i da ugroze izolaciju opreme u njoj. Oni dielektrički naprežu, ali ne ugrožavaju izolaciju opreme. U istraživanim mrežama mogu se pojaviti i viši prenaponi od ustanovljenih merenjima, ako dođe do pojave intermitirajućeg zemljospoja. Međutim i u tim slučajevima, upoređujući sa pojavama u mreži 6 kV, retko mogu da pređu 3.0 r.j. Prenaponi ustanovljeni pri uključenju vakuumskog prekidača u mreži 10 kV napajanoj iz TS 35kV/10kV A se mogu pojaviti samo kada prekidač uključuje vod opterećen transformatorom na kome je već zemljospoj. Tada se pojavljuju prethodna paljenja električnog luka između kontakta njegovih polova i moguća je pojava prenapona viših od 3.0 r.j. U izolovanim mrežama 10 kV prenaponi pri uspostavljanju stvarnog zemljospoja ne zavise od pojava koje se javljaju između kontakta prekidača pri njegovom uključenju. Međutim, prenaponi u istim mrežama mogu bitno da zavise od pojava koje se javljaju između kontakta prekidača pri njegovom isključenju. U istraživanim mrežama to nije bio slučaj jer ponovna paljenja električnog luka između kontakta malouljnih prekidača nisu dovodila do viših prenapona u mrežama pri isključenju voda sa zemljospojem.

U izolovanim mrežama 10 kV, posebno ako su većinom kablovske, u kojima su struje zemljospoja iznad 20 A, potrebno je uzemljiti preko otpornika ili reaktanse. Velike struje zemljospoja mogu da dovedu na mestu zemljospoja do oštećenja izolacije kablovskih vodova na fazama koje nisu u zemljospoju, ako zemljospoj duže traje. Neophodno je da izolovane mreže 10 kV sa većinom kablovskih vodova imaju efikasnu zaštitu od zemljospoja koja će pri njegovom uspostavljanju isključiti vod na kome se pojavio.

## **ZAKLJUČCI**

Analiza rezultata istraživanja struja zemljospoja i prelaznih faznih napona pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja u četiri izolovane mreže 10 kV napajane TS 35kV/10kV i sagledavanja naponskih pojava koje se mogu očekivati u izolovanim mrežama pri operacijama prekidača, ukazuju na sledeće:

- Prenaponi koji se javljaju pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja i prenaponi pri uključenju i isključenju vodova sa transformatorima 10kV/0,4kV ne ugrožavaju izolaciju opreme u mrežama 10 kV pod uslovom da nije došlo do njene značajne degradacije tokom eksploatacije. Izuzimaju se mreže u kojima su prisutni stari tipovi malouljnih i vakuumskih prekidača. Prenaponi pri uključenju suvih transformatora vakuumskim prekidačima, posebno onih transformatora koji su dugo godina u eksploataciji, mogu biti opasni za njihovu međuzavojnu izolaciju. Za takve transformatore poželjno je da se iza prekidača ili na priključke transformatora prema zemlji ugrade R-C kola koja bi ublažila strminu i visinu prenapona.

- U izolovanim mrežama potrebno je sprečiti pojavu ferorezonanse ugradnjom otpornika u otvoreni trougao sekundarnih namotaja naponskih transformatora. Naponski transformatori moraju da budu sa faktorom napona 1,9.
- U mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom treba obezbediti zaštitu od zemljospoja koja će pri njegovom uspostavljanju isključiti vod na kome se pojavio. U pojedinim TS postoji samo signalizacija zemljospoja pa se isključuje jedan po jedan vod dok ne se ustanovi na kome je nastupio zemljospoj. Ovakve manipulacije prekidačima u izolovanoj mreži 10 kV nisu poželjne jer mogu dovesti do znatno viših prenapona od onih koji su konstatovani istraživanjima. Mogu izazvati proboj izolacije na fazi koja nije u zemljospoju, a time i do havarijskih događaja.
- Izolovane mreže 10 kV, u kojima struje zemljospoja prelaze vrednost 20 A, potrebno je uzemljiti preko otpornika ili reaktanse.

## LITERATURA

- [1] \*\*\*\*, 2009, „Istraživanja struja zemljospoja u 10 kV mreži grada Niša, Studija“ 310901, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla“, Beograd, str.82
- [2] \*\*\*\*, 1995, “Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V“, Službeni list SRJ, br. 61/95
- [3] \*\*\*\*, 2009. “Eksperimentalna istraživanja prelaznih faznih napona i struja u mrežama 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV“, Studija br.310909, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla” Beograd, str. 341.
- [4] P. Vukelja, R. Naumov, J. Mrvić, D. Hrvic, 2006, ”Prelazni naponski i strujni režimi i kvarovi u mrežama napona 6 kV, 10 kV i 35 kV“, Poglavlje u monografiji "Elektroenergetski sistemi - Eksploatacija, upravljanje, ispitivanje, merenje", Beograd, str. 89-104.
- [5] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, 1997, “Eksperimentalna istraživanja prenapona u kablovskim mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom”, “Elektrodistribucija” br.1. Beograd, str.65-72.
- [6] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, P. Budišin, 1993, Experimental investigation of overvoltages in neutral isolated networks, IEE Proceedings-C, Vol.140, No.5, September, pp.343-350.
- [7] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, P. Budišin, 1993, “Uporedna eksperimentalna istraživanja prenapona pri operacijama maloljnih i vakuumskih sklopnih aparata”, 21. Savetovanje JUKO CIGRE, R13-06, Vrnjačka Banja, str.11-14.