

PRENAPONI I STRUJE PRI POJAVI ZEMLJOSPOJA U MREŽAMA 6 kV SARTID-a

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvic, Mladen Šupić, Momčilo Petrović
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Sadržaj: U radu su dati rezultati eksperimentalnih istraživanja struja zemljospoja i prenapona pri uspostavljanju zemljospoja u mrežama 6 kV željezare Sartid. Izvršena su u sklopu istraživanja prelaznih naponskih i strujnih režima u mrežama 6 kV koja su zajednički finansirali Ministarstvo za nauku, tehnologiju i razvoj i Sartid. Rezultati istraživanja su ukazali na mere koje treba preduzeti u cilju povećanja pouzdanosti rada mreža 6 kV Sartid-a.

Ključne reči: zemljospoj/struja/prenapon/mreža

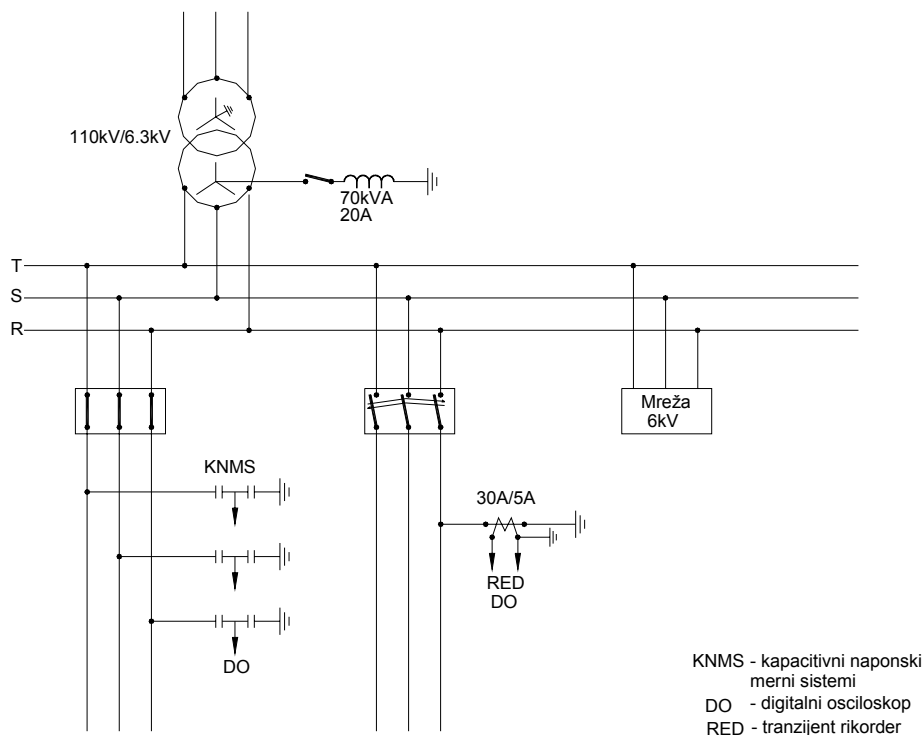
1. UVOD

Zemljospoj u razgranatim mrežama industrijskih postrojenja sa izolovanom neutralnom tačkom ili u mrežama uzemljenim preko prigušnice za kompenzaciju struje zemljospoja, posebno u onima koje su duži period u eksploataciji, nije retka pojava. Nastaje najčešće probijem izolatora, strujnih transformatora ili preskokom na izolacionim konstrukcijama usled zagađenosti. Ponekad se pretvara u kratak spoj, a to može da izazove značajna oštećenja opreme. Struje zemljospoja su često u takvim mrežama veće od onih koje preporučuju postojeći propisi [1]. Prenaponske pojave koje nastaju pri pojavi zemljospoja, u toku njegovog trajanja i isključenja mogu značajno da naprežu izolaciju mreža. Iako u toku eksploatacije u mrežama 6 kV Sartid-a nije bila česta pojava zemljospoja, u okviru projekta finansiranog od Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj i Sartid-a, pored istraživanja prelaznih naponskih i strujnih režima u mrežama 35 kV i 110 kV izvršena su istraživanja struja zemljospoja i prenapona pri pojavi zemljospoja u mrežama 6 kV Sartid-a [2].

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Sartid ima četiri mreže 6 kV koje se napajaju nezavisno preko transformatora 110kV/6,3kV. Istraživanja struja zemljospoja i prenapona pri uspostavljanju, trajanju i isključenju zemljospoja izvršena su u tri mreže: mreža 6 kV u GTS 1, mreža 6 kV u GTS 2 i mreža 6 kV u GTS 3. Mreža 6 kV u GTS 3 može da radi kao izolovana ili uzemljena preko prigušnice 70 kVA, 20 A, dok su mreže 6 kV u GTS 2 i GTS 1 stalno uzemljene preko prigušnice 70 kVA, 20 A. Pojava zemljospoja se samo signalise.

Zemljospoj jedne od faza je izvođen na ulazu u kablovski vod u nekoj od slobodnih ćelija mreže 6 kV preko strujnog transformatora 30A/5A. Uključenjem prekidača te ćelije uspostavljan je i prekidan zemljospoj u mreži 6 kV. Struja zemljospoja je snimana digitalnim osciloskopom i tranzijent rikorderom koristeći strujne merne sisteme priključene na sekundar strujnog transformatora 30A/5A. Koristeći kapacitivne naponske merne sisteme, priključene na ulazu u kablovski vod neke od ćelija, snimani su prelazni fazni naponi pri uspostavljanju zemljospoja. Šema istraživanja prenapona i struja zemljospoja, koja je u većini slučajeva korišćena, data je na sl.1.



Slika 1. Šema istraživanja prenapona pri uspostavljanju zemljospoja i struje zemljospoja

Fazni prenaponi pri uspostavljanju zemljospoja su definisani u relativnim jedinicama (r.j.) kao odnos maksimalne vrednosti prenapona i amplitude faznog napona pre uspostavljanja zemljospoja.

2.1. Istraživanja u mreži 6 kV u GTS 3

Izvršeno je 6 uključenja na zemljospoj jedne faze u mreži 6 kV u GTS 3. Tri zemljospoja su izvedena kada je mreža 6 kV sa izolovanom neutralnom tačkom, i tri kada je uzemljena preko prigušnice 70 kVA, 20 A. Fazni prenaponi u oba slučaja nisu bili visoki; najviši izmereni je 2,16 r.j. Pri isključenju zemljospoja nije bilo prenapona. Struje zemljospoja su izobličene. Pored osnovnog harmonika sadrže veći broj viših harmonika. Viši harmonici u strujama zemljospoja nisu stalno isti. Menjaju se u skladu sa promenama rada potrošača koji se napajaju preko mreže 6 kV. Procenjena efektivna vrednost struje zemljospoja u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom je $I_{\text{eff}}=24$ A, a u mreži uzemljenoj preko prigušnice $I_{\text{eff}}=7,5$ A. U snimljenim strujama zemljospoja u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom dominiraju sledeći harmonici: peti, trinaesti, dvadesettreći i dvadesetpeti. Najviši je dvadesettreći harmonik koji dostiže i do 14% osnovnog harmonika.

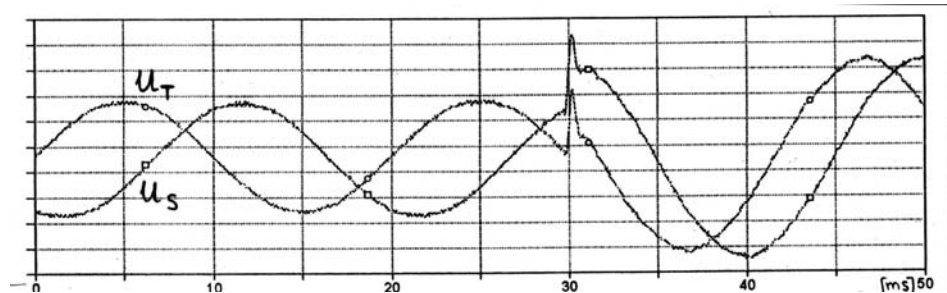
U mreži uzemljenoj preko prigušnice dominiraju isti harmonici i najviši je takođe dvadesettreći koji dostiže i do 56% osnovnog harmonika.

Maksimalne vrednosti struja u toku trajanja zemljospoja, zbog prisustva viših harmonika, su znatno veće od njihove procenjene efektivne vrednosti pomnožene sa

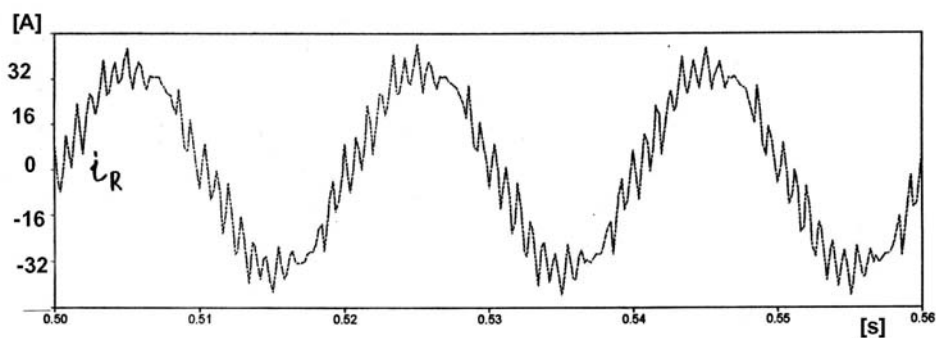
$\sqrt{2}$. U mreži sa izolovanom neutralnom tačkom dostižu do $I_{\max}=40$ A, a u istoj mreži uzemljenoj preko prigušnice $I_{\max}=20$ A.

Na slici 2 dati su prelazni fazni naponi u_s i u_T pri uspostavljanju zemljospoja u fazi R mreže 6 kV sa izolovanom neutralnom tačkom u GTS 3.

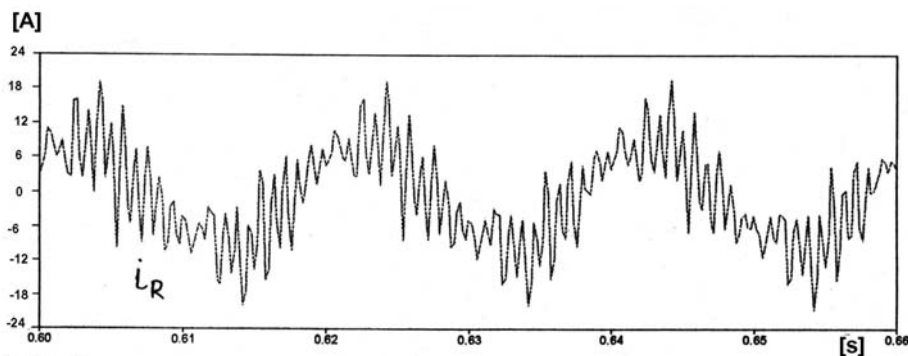
Na slici 3 data je struja zemljospoja kada je mreža sa izolovanom neutralnom tačkom, a na slici 4 kada je mreža uzemljena preko prigušnice.



Slika 2. Prelazni fazni naponi u_s i u_T pri uspostavljanju zemljospoja u fazi R, kada je mreža 6 kV sa izolovanom neutralnom tačkom u GTS-3.



Slika 3. Struja zemljospoja izvedenog u fazi R- i_R u toku njegovog trajanja u mreži 6 kV sa izolovanom neutralnom tačkom u GTS-3.



Slika 4 Struja zemljospoja izvedenog u fazi R- i_R u toku njegovog trajanja u mreži 6 kV uzemljenoj preko prigušnice 70 kVA, 20 A u GTS-3.

2.2. Istraživanja u mreži 6 kV u GTS 1

Celokupna mreža 6 kV u GTS 1 se napaja preko jednog transformatora T1 110kV/6,3kV (konfiguracija A). Međutim, može se podeliti na dva dela, tako da se prvi deo napaja preko transformatora T1 (konfiguracija A1), a drugi deo preko transformatora T2 110kV/6,3kV (konfiguracija A2). Istraživanja struje zemljospoja i faznih prenapona pri uspostavljanju zemljospoja izvršena su u ove tri konfiguracije.

U svim konfiguracijama su izvršena po tri uključanja na zemljospoj. Mreža 6 kV u svim konfiguracijama je uzemljena preko prigušnice 70 kVA, 20 A.

Fazni prenaponi, koji su se pojavili pri uspostavljanju zemljospoja, nisu visoki; najviši izmereni je 2,10 r.j. Struje zemljospoja su izobličene, kao i u 6 kV mreži u GTS 3. Procenjene efektivne vrednosti struja zemljospoja su: $I_{\text{eff}}=46$ A u konfiguraciji A, $I_{\text{eff}}=16$ A u konfiguraciji A1 i $I_{\text{eff}}=10$ A u konfiguraciji A2.

U snimljenim strujama zemljospoja dominiraju sledeći harmonici:

- | | |
|------------------|--|
| konfiguracija A | - drugi, treći, tridesetprvi; najviši je drugi harmonik koji dostiže i do 24% osnovnog harmonika; |
| konfiguracija A1 | - treći, tridesetprvi, tridesetpeti i tridesetsedmi; najviši je tridesetprvi harmonik koji dostiže i do 19% osnovnog harmonika; |
| konfiguracija A2 | - drugi, treći, peti, dvadesettreći, dvadesetpeti, tridesetprvi i tridesetsedmi; najviši je tridesetprvi harmonik koji dostiže i do 16% osnovnog harmonika |

Maksimalne vrednosti struja zemljospoja, zbog prisustva viših harmonika, u toku njihovog trajanja su znatno veće od njihove procenjene efektivne vrednosti pomnožene sa $\sqrt{2}$. U toku izvedenih zemljospojeva maksimalne vrednosti struja u trajnom režimu su: $I_{\text{max}}=70$ A u konfiguraciji A, $I_{\text{max}}=38$ A u konfiguraciji A1 i $I_{\text{max}}=27$ A u konfiguraciji A2.

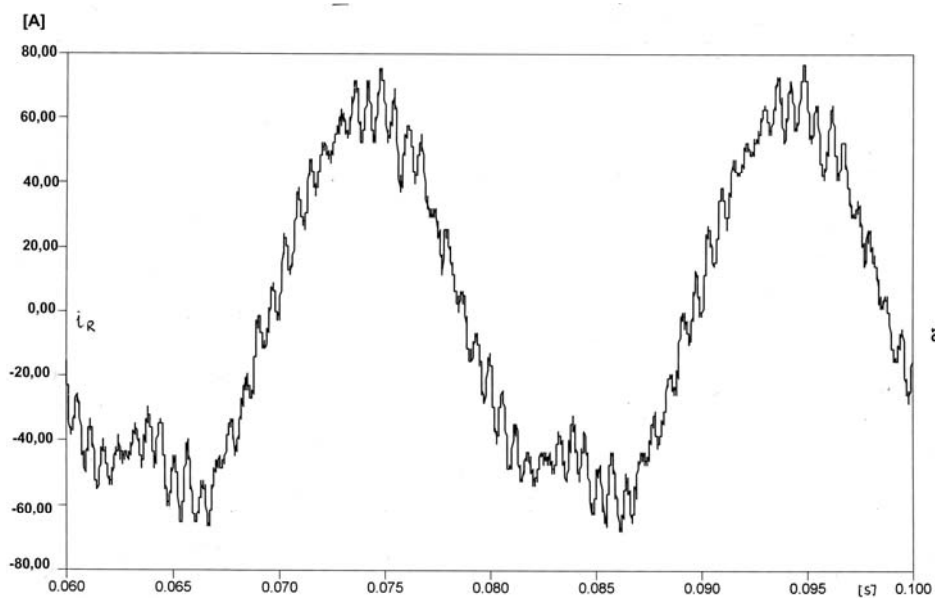
Na slikama 5, 6 i 7 data je struja zemljospoja u konfiguracijama A, A1 i A2.

2.3. Istraživanja u mreži 6 kV u GTS 2

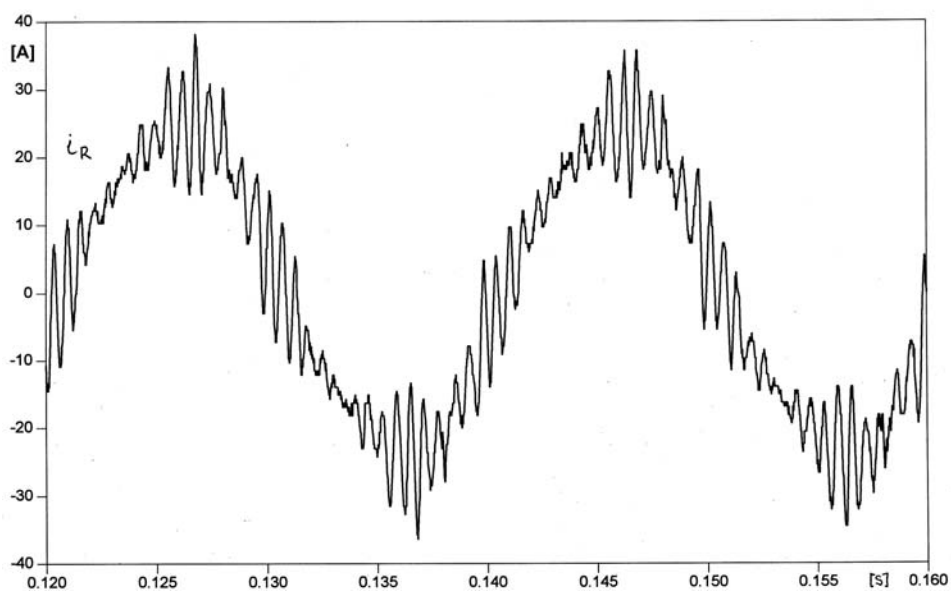
Izvršeno je 6 uključanja na zemljospoj u mreži 6 kV u GTS 2. Mreža 6 kV je uzemljena preko prigušnice 70 kVA, 20 A. Fazni prenaponi, koji su se pojavili pri uspostavljanju zemljospoja, nisu visoki; najviši izmereni prenapon je 1,97 r.j.. Struje zemljospoja su izobličene kao i u mrežama 6 kV u GTS 3 i GTS 1. Procenjena efektivna vrednost struje zemljospoja je $I_{\text{max}}=7$ A. U snimljenim strujama zemljospoja dominiraju sledeći harmonici: drugi, treći, peti, jedanaesti, sedamnaesti, dvadesettreći, dvadesetdeveti i tridesetpeti. Najizraženiji je dvadesetdeveti harmonik koji dostiže i do 55% osnovnog harmonika.

Maksimalne vrednosti struja zemljospoja, zbog prisustva viših harmonika, u toku njihovog trajanja su znatno veće od njihove procenjene efektivne vrednosti pomnožene sa $\sqrt{2}$. U toku šest izvedenih zemljospojeva maksimalna vrednost struje u trajnom režimu je $I_{\text{max}}=50$ A.

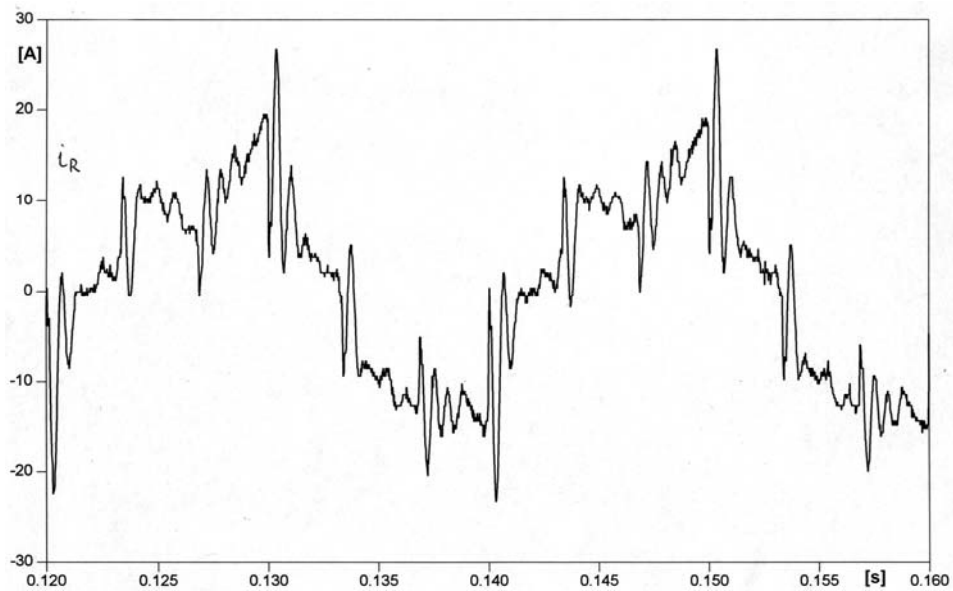
Na slici 8 data je struja zemljospoja u mreži 6 kV u GTS 2.



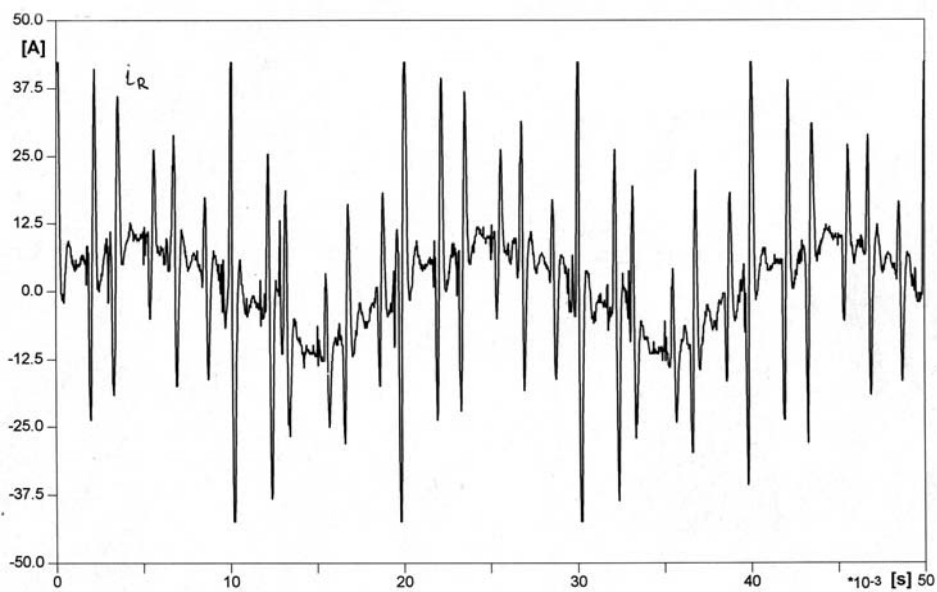
Slika 5. Struja zemljospoja u fazi R- i_R u toku njegovog trajanja u konfiguraciji A u mreži 6 kV u GTS-1.



Slika 6. Struja zemljospoja u fazi R- i_R u toku njegovog trajanja u konfiguraciji A1 u mreži 6 kV u GTS-1.



Slika 7. Struja zemljospoja u fazi R- i_R u toku njegovog trajanja u konfiguraciji A2 u mreži 6 kV u GTS-1.



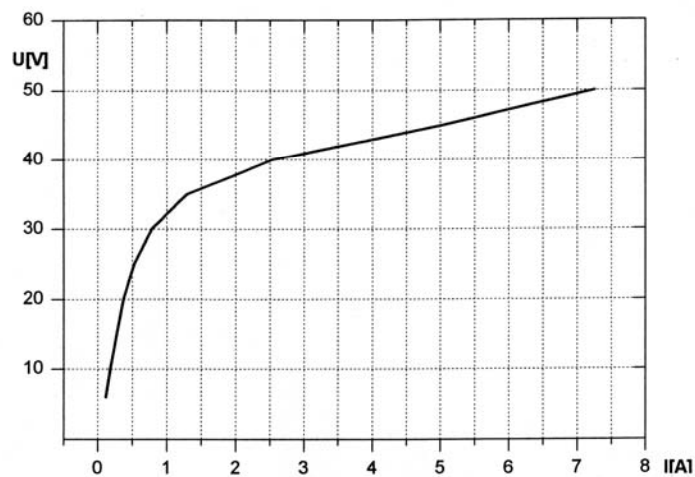
Slika 8. Struja zemljospoja u fazi R- i_R u toku njegovog trajanja u mreži 6 kV u GTS-2.

3. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Pojavom zemljospoja u mrežama 6 kV Sartid-a dolazi do poremećaja faznih napona. Fazni naponi faza koje nisu u zemljospoju uz kratak oscilatorni proces prelaze na međufazne napone. Trajanje oscilatornog procesa je reda nekoliko ms. Prenaponi koji nastaju pri tom nisu visoki. Uobičajenih su visina kao i u drugim sličnim mrežama 6 kV. Najviši izmereni je 2,16 r.j. Napon faze na kojoj nastaje zemljospoj, u trenutku njegovog uspostavljanja, pada na nulu. Pri isključenju zemljospoja nema prenapona.

Prenaponi koji se javljaju pri pojavi zemljospoja naprežu izolaciju mreže 6 kV. Međutim, njihova visina, učestanost i trajanje nisu takvi da bi trebalo primeniti sredstva za njihovo sniženje. Podnosivi napon izolacije opreme u mrežama 6 kV za ovakve prenapone nije poznat. Smatra se da ne bi trebalo da budu niži od $U_s = 0,9 U_{kpn}$, gde U_{kpn} predstavlja temenu vrednost kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije. Za opremu u mreži 6 kV iznosi $U_{kpn} = 20 \sqrt{2} kV \approx 28 kV$. Prema tome prenaponi do nivoa $U_s = 0,9 \cdot 28 = 25,2 kV$, odnosno izraženi u relativnim jedinicama u odnosu na temenu vrednost faznog napona $U_s \approx 4,3$ r.j. (najviši napon opreme u mreži 6 kV je 7,2 kV, a u skladu sa tim temena vrednost najvišeg faznog napona je $U_{f,6} = 7,2 \sqrt{2} / \sqrt{3} \approx 5,9 kV$), ne bi trebalo da predstavljaju opasnost za izolaciju mreže. Poznato je da prenaponi pri pojavi zemljospoja u mrežama 6 kV, uzemljenim preko prigušnice ili sa izolovanom neutralnom tačkom, retko prelaze 2,5 r.j.

Pojava međufaznih napona prema zemlji na fazama koje nisu u zemljospoju u mreži 6 kV nije opasna za opremu ukoliko je dobro izabrana i ispitana prema važećim standardima. To se prvenstveno odnosi na naponske transformatore. U 6 kV mreži Sartida se koriste dva tipa naponskih transformatora $(6000 / \sqrt{3})V / (100 / \sqrt{3})V / (100 / 3)V$. Izvršena je provera njihovih U – I karakteristika. Na sl.9 je data U – I karakteristika jednog od dva tipa naponskih transformatora, snimljena na sekundarnom namotaju 100/3 V. Jasno se uočava da ovaj naponski transformator nema faktor napona 1,9. U-I karakteristika, kada je u pitanju faktor napona 1,9, trebalo bi da bude linearna do napona $U = 1,9 \cdot (100 / 3)V \approx 63V$.



Slika 9. U-I karakteristika naponskog transformatora $\frac{6000}{\sqrt{3}}V / \frac{100}{\sqrt{3}}V / \frac{100}{3}V$ snimljena na sekundarnom namotaju $\frac{100}{3}V$.

U-I karakteristika naponskog transformatora drugog tipa je slična. Obe gube linearnost već posle 30 V. Pojavom zemljospoja u mreži 6 kV naponski transformatori u fazama koje nisu u zemljospoju dobijaju međufazne napone. Kroz njihove namotaje počinje da teče struja koja je više od deset puta veća od struje koja teče kroz njih kada nema zemljospoja. Dok traje zemljospoj naponski transformatori se veoma termički naprežu što dovodi do ubrzanog starenja njihove izolacije. Kao takvi oni su nepodesni za korišćenje u mrežama 6 kV u kojima zemljospoj može da traje duži vremenski period.

Struje zemljospoja pored osnovnog harmonika (50 Hz) sadrže veliki broj viših harmonika čije amplitude se menjaju u zavisnosti od rada potrošača koji su priključeni na mrežu 6 kV. Uzemljavanjem mreža 6 kV preko prigušnice 70 kVA, 20 A značajno se smanjuju struje zemljospoja. Ovo rešenje je zadovoljavajuće za mreže 6 kV koje se napajaju iz GTS 2 i GTS 3, jer je procenjena efektivna vrednost struje zemljospoja u njima $I_{\text{eff}}=7 \text{ A}_{\text{eff}}$, odnosno $I_{\text{eff}}=7,5 \text{ A}_{\text{eff}}$. Međutim, za mrežu 6 kV u GTS 1, kada se napaja preko jednog transformatora 110 kV/6,3kV, ovo rešenje se ne može smatrati kao zadovoljavajuće. Kompenzacija struje zemljospoja sa prigušnicom 70 kVA, 20 A je nedovoljna, jer je struja zemljospoja iznad $I_{\text{eff}}=30 \text{ A}$. Nije poželjno da struje zemljospoja budu veće od $I_{\text{eff}}=30 \text{ A}$ naročito ako pored osnovnog harmonika sadrže više harmonika, kao što je to ovde slučaj [1]. Jedno od prihvatljivih rešenja je, kao što su pokazala istraživanja, razdvajanje mreže 6 kV u GTS 1 na dva dela koja se nezavisno napajaju. Kompenzacija struje zemljospoja sa prigušnicama 70 kVA, 20 A u svakom od tih delova mreže 6 kV predstavlja zadovoljavajuće rešenje.

4. ZAKLJUČCI

Na osnovu analiza rezultata istraživanja prenapona i struja pri pojavi zemljospoja u mrežama 6 kV Sartid-a može se zaključiti sledeće:

- Prenaponi koji nastaju pri pojavi zemljospoja u mrežama 6 kV ne predstavljaju opasnost po izolaciju opreme.
- Struje zemljospoja u mrežama 6 kV u GTS 2 i GTS 3 nisu visoke kada su mreže uzemljene preko prigušnice 70 kVA, 20 A. Ovakvo rešenje je zadovoljavajuće. Ako nije neophodno, ne bi trebalo koristiti ove mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, odnosno ne bi ih trebalo koristiti kada su prigušnice isključene.
- Struja zemljospoja u mreži 6 kV u GTS 1, kada se ista napaja preko jednog transformatora 110 kV/6,3 kV je velika. Poželjno je podeliti mrežu 6 kV na dva dela i svaki deo napajati preko posebnog transformatora 110kV/6,3kV. Oba dela mreže potrebno je da budu uzemljena preko prigušnice 70 kVA, 20 A. Ne preporučuje se korišćenje mreža 6 kV kada su prigušnice isključene.
- Potrebno je zameniti naponske transformatore u mreži 6 kV, jer nemaju faktor napona 1,9. Dugo godina su u eksploataciji i došlo je do značajne degradacije njihove izolacije usled termičkih naprezanja, pošto je u mreži 6 kV bilo više zemljospojeva koji su trajali i po nekoliko sati.

LITERATURA

- [1] *Pravilnik o tehničkim normativima za pogon i održavanje energetskih postrojenja i vodova*, Sl. list SRJ broj 41/93, Beograd, 1993.

- [2] P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvić i drugi, "Istraživanja prenapona i struja pri pojavi zemljospoja u mrežama 6 kV Sartid-a", Elaborat broj 310312, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd 2003.

Abstract: This paper presents results of experimental research on currents and overvoltages while establishing and interrupting line-to-ground faults in 6 kV networks of "Sartid". They were part of larger project of research on transient voltage and currents phenomena in 6 kV networks, financed by "Sartid" and Ministry of science, technology and development. The results of research have pointed out to the measures that have to be taken to increase reliability of high voltage motors in 6 kV industrial plants networks.

OVERVOLTAGES AND CURRENTS DURING LINE-TO-GROUND FAULTS IN 6 kV NETWORKS OF "SARTID"

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, Mladen Šupić, Momčilo Petrović