

Dodatak E

Prenaponi pri intermitentnom zemljospoju

Koautori: Mileta Žarković, Mladen Banjanin

E.1 Uvodna razmatranja

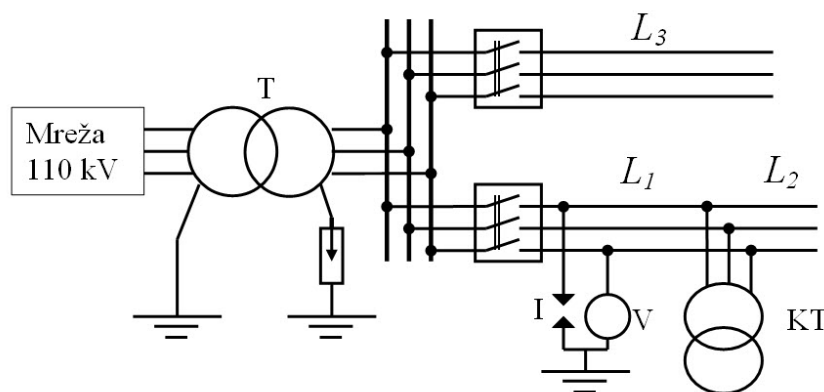
Sistem 35 kV u koji je uključena analizirana hidroelektrana je razgranat, sa mešovitim kablovskim i nadzemnim mrežama i radi sa izolovanom neutralnom tačkom transformatora. Zbog većeg broja kvarova izolacije izvršena je analiza da li je mogući uzrok proboja izolacije prouzrokovan prenaponima usled zemljospoja sa intermitentnim gorenjem luka. Planirano je istraživanje koje obuhvata eksperimentalni rad sa veštački izazvanim zemljospojem i računске simulacije.

E.2 Opis eksperimenata

Istraživanja prenapona usled kontrolisanih zemljospojeva u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom su urađena eksperimentalno u mreži 35 kV i numeričkim simulacijama programom EMTP-atp. Izvršeno je upoređivanje rezultata numeričkih simulacija i snimaka sa eksperimentalnog istraživanja i procenjene su najviše vrednosti prenapona koje se mogu pojaviti u mreži.

Na slici E.1 prikazana je trofazna šema napajanja postrojenja 35 kV i dva voda sa označenim iskrištem za simulaciju zemljospoja i mernim mestom na fazi koja nije u

zemljospoju. Na šemi je označen i transformator sa malim potrošačem, koji je isključen u toku eksperimenata, ali na kablovskom ogranku za transformator je došlo do proboja kablovske završnice pri izvođenju eksperimenata.



Slika E.1: Analizirani sistem sa označenim najvažnijim elementima

Oznake na slici E.1 imaju sledeće značenje:

T -energetski transformator 110/35 kV,

I -iskrište za simulaciju intermitentnog prenapona,

V -merenje napona pomoću kapacitivnog delila napona,

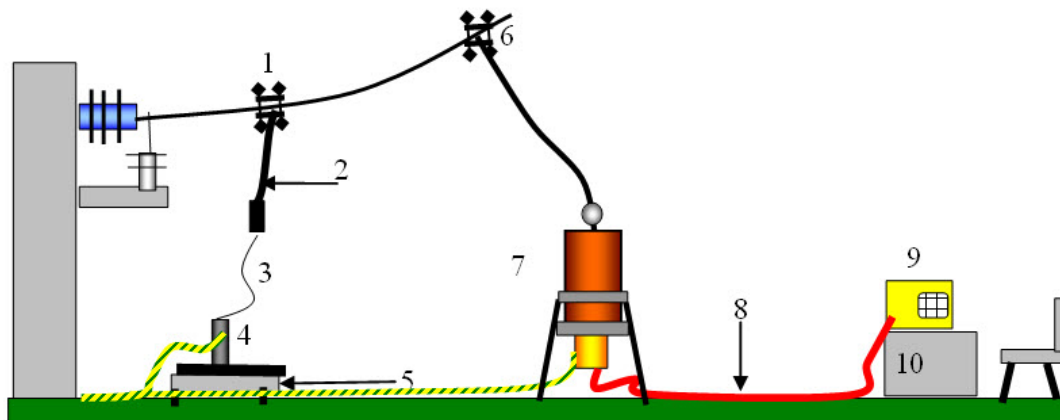
KT -transformator 35/0.4 kV za mali potrošač, koji je bio isključen za vreme eksperimenata,

L_1, L_2, L_3 -nadzemni vodovi dužina 0.9 km, 6 km i 12.4 km.

Skica razmeštaja merne opreme za eksperimente sa veštački iniciranim zemljospojem prikazana je na slici E.2 u bočnom prikazu.

Oznake na slici E.2 imaju sledeće značenje:

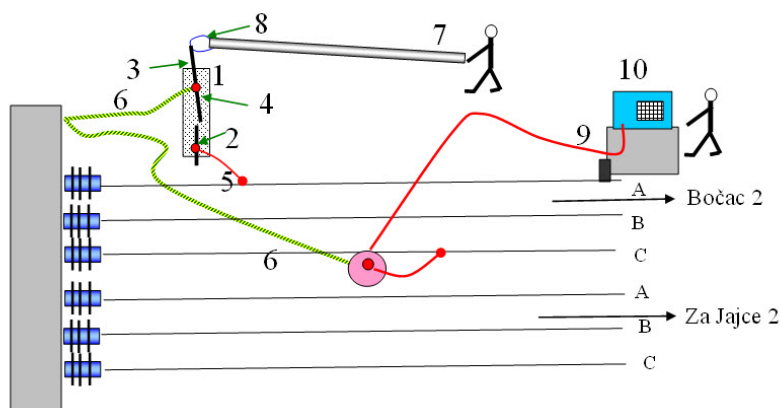
1. Stezaljke za priključak veze faznog provodnika za iskrište,
2. Veza od faznog provodnika velikog preseka,
3. Veza tankog provodnika od kraja provodnika velikog preseka do iskrišta. U slučaju uspostavljanja dvopolnog kratkog spoja uloga tankog provodnika je da izgori i na taj način deluje kao osigurač,
4. Iskrište,



Slika E.2: Skica razmeštaja merne opreme na terenu - bočni pogled

5. Postolje za iskrište,
6. Stezaljke za priključak veze od faznog provodnika do delila napona,
7. Delilo napona odnosa deljenja 107100:1,
8. Koaksijalni kabl do osciloskopa,
9. Osciloskop,
10. Izolacioni sto.

Razmeštaj merne opreme za eksperimente sa veštački iniciranim zemljospojem prikazana je na slici E.3 iz ptičje perspektive.



Slika E.3: Skica razmeštaja merne opreme na terenu - pogled odozgo

Oznake na slici E.3 imaju sledeće značenje:

- 1 -Drveno postolje,
- 2 -dva obrtna izolatora,
- 3 -bakarne šipke koje čine elektrode iskrište,
- 4 -zavrtnji za pritezanje šipki iskrišta,
- 5 -provodnik za dovođenje visokog napona,
- 6- provodnik za uzemljenje,
- 7 -teleskopska izolaciona šipka dužine 5 m koja se sastoji od 4 segmenta za upravljanje obrtnim iskrištem,
- 8- omča od najlona za spajanje izolacione šipke i šipke iskrišta, koja omogućava slobodnu rotaciju iskrišta pri povlačenju izolacione šipke,
- 9 -sto za smeštaj opreme,
- 10- osciloskop.

Na slici E.4 prikazana je fotografija eksperimentalne opreme sa iskrištem za upravljanje električnim lukom preko izolacione šipke za pomeranje iskrišta.



Slika E.4: Fotografija eksperimentalne opreme sa iskrištem za upravljanje električnim lukom

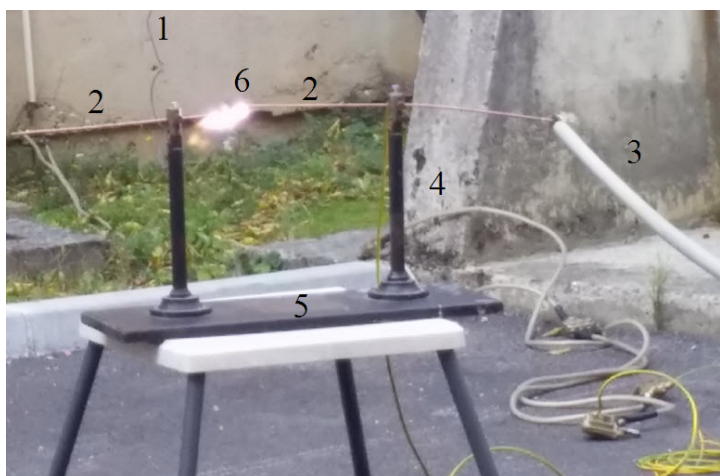
Oznake na slici E.4 imaju sledeće značenje:

DP -debeli provodnik koji se završava namotanim klupkom,

K - namotano klupko debelog provodnika,

- TP** - tanak provodnik koji se slabo uočava na fotografiji,
M - provodnik za dovođenje napona za merenje napona do delila,
D - kapacitivno delila napona,
IS -iskrište za uspostavljanje intermitentnog luka.

Na slici E.5 prikazan je detalj uspospostavljenog električnog luka na iskrištu.

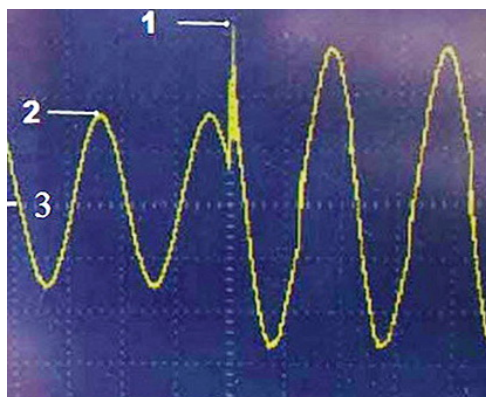


Slika E.5: Eelektrični luk na iskrištu

Na slici E.5 oznake imaju sledeće značenje:

1. -Visokonaponski provodnik,
2. -elektrode iskrišta,
3. -izolaciona šipka za razmicanje iskrišta,
4. -obrtne izolatori,
5. -drveno postolje,
6. -električni luk između elektroda iskrišta.

Izvršeno je nekoliko eksperimenata pri kojima je zemljospoj uspostavljan preko električnog luka čija je dužina kontrolisana pomoću dugačke izolacione motke kojom je vršena promena razmaka između elektroda iskrišta. Eksperimenti su rađeni za slučaj kada je vod 35 kV dužine $L_1 + L_2 = 6.9$ km uključen, kada je drugi vod dužine $L_3 = 12.4$ km uključen i kada su oba voda uključena. Snimci su registrovani samo na jednoj fazi na



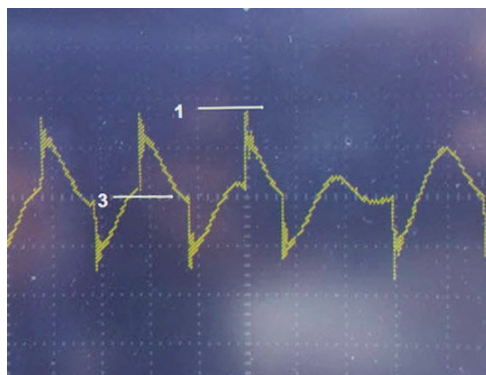
Slika E.6: Napon pri uspostavljanju zemljospoja

osciloskopu jer se nije raspolagalo sa 3 delila napona. Na slici E.6 prikazan je napon pri uspostavljanju zemljospoja kada je uključen vod od 7 km.

Na slici E.6 Oznake imaju sledeće značenje:

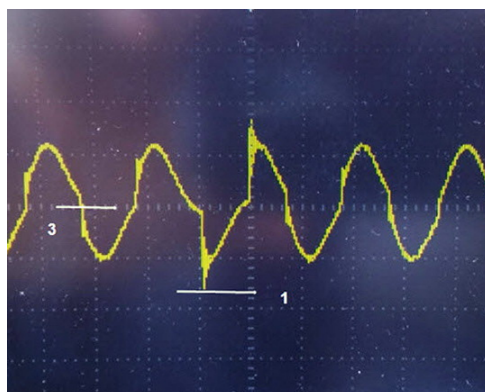
1. - temena vrednost prenapona,
2. - temena vrednost radnog napona pre kvara,
3. - nulti nivo napona (sa kranje leve strane ekrana strelica označava referentni nivo napona za kanal 1.

Na slici E.7 prikazan je napon pri zemljospoju sa lukom kada je uključen samo vod dugačak $L_3 = 12.4$ km.



Slika E.7: Napon pri zemljospoju sa lukom sa više paljenja i gašenja luka kada je uključen samo vod dugačak 12.4 km

Na slici E.8 prikazan je napon pri zemljospoju sa lukom kada su uključeni svi vodovi ukupne dužine $L_1 + L_2 + L_3 = 19.3$ km.



Slika E.8: Napon pri zemljospoju sa lukom kada su uključeni svi vodovi ukupne dužine 19.3 km

Izmerene temene vrednosti prenapona u kV i u relativnim jedinicama u odnosu na trajnu vrednost radnog napona u toku merenja date su u tabeli E.1. Uočeno je da je trajni radni napon u toku odvijanja eksperimenta viši od deklarisanog trajnog radnog napona i iznosio je 39 kV efektivnog složenog napona, što je 2.63 % više od trajnog radnog napona za 35 kV mrežu koji iznosi 38 kV. Temena fazna vrednost stacionarnog napona koja odgovara naponu od 39 kV je 31.8 kV.

Tabela E.1: Brojčani rezultati registracije koji odgovaraju karakterističnim snimcima

| Br. | U_{max} (kV̂) | U_f (kV̂) | Koef. prenapona rj | Slika |
|-----|--------------------|----------------|-----------------------|-------|
| 1 | 72.8 | 31.8 | 2.3 | E.6 |
| 3 | 96.4 | 31.8 | 3.0 | E.7 |
| 4 | 91.0 | 31.8 | 2.9 | E.8 |

U tabeli E.1 oznaka kV̂ predstavlja temena vrednost izmerenog napona izraženog u kV. Samo sa slike E.6 je izmerena temena vrednost radnog napona pre kvara U_f , dok u ostalim slučajevima nije bilo moguće izmeriti stacionarni radni napon. U tim slučajevima tranzijentni napon je postojao u toku celog perioda registracije. Zato je usvojen izmereni radni napon iz slučaja 1.

Izvršen je relativno mali broj eksperimenata zbog opasnih prenapona koji se pri eksperimentima pojavljuju, a u radu su prikazani najizraženiji slučajevi prenapona. Međutim, može se očekivati da se u praksi pojave još viši prenaponi u određenim okolnostima. Visina prenapona zavisi od razmaka između faznog provodnika i uzemljenog dela prema kome se pojavljuje električni luk, tako da se može pojaviti intermitentno gorenje luka, kao i od struja zemljospoja koja zavisi od kapacitivnosti svih uključenih vodova u sistemu. Posebno značajan efekat ima trenutak paljenja luka u odnosu na vrednost napona izvora u tom trenutku. Eksperimenti su rađeni sa razmacima elektroda iskrišta neposredno ispod graničnog rastojanja pri kome se luk ne može uspostaviti, da bi se dobili što viši prena-

poni. Pošto su svi ovi faktori slučajni, ne može se unapred predvideti koliki se maksimalni prenaponi mogu pojaviti u realnoj mreži.

Nakon završetka eksperimenata je utvrđeno da je došlo do oštećenja kablovske završnice kod malog potrošča KT sa slike E.1. Kablovska završnica je bila oštećena ponovljenim naprezanjima usled intermitentnih prenapona kod višestrukog paljenja i gašenja luka, pa je kasnije pri radnom naponu probila.

Na slici E.9 prikazan je deo probijene kablovske završnice nakon skidanja sa kabla.

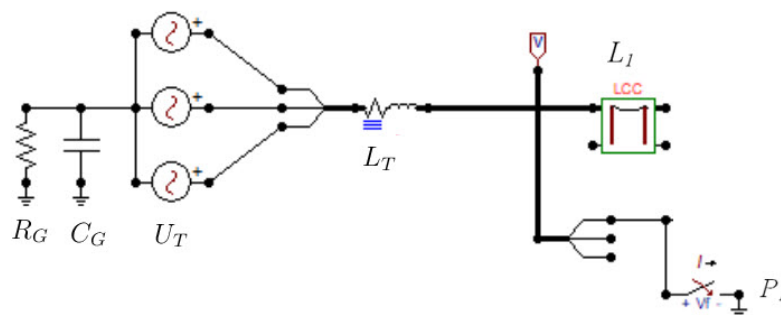


Slika E.9: Probijena kablovska završnica

E.3 Numeričke simulacije prenapona pri zemljospoju sa lukom

Numerički proračuni prelaznih prenapona u 35 kV mreži sa izolovanim neutralnim vodom izvršeni su pomoću EMTP-atp softvera.

Napravljen je u programskom jeziku MODELS model prekidača koji omogućava paljenje električnog luka između elektroda kada napon prevaziđe određeni nivo, a gasi prilikom prolaska struje luka kroz nulu pri uslovima da brzina opadanja struje pre prirodnog prolaska kroz nulu ne prelazi određeni nivo, u suprotnom se čeka sledeća nula struje. Ovo je važno pri pojavi visokofrekventnih struja pri ponovnim paljenjima luka. Na slici E.10 prikazana je zamenska šema 35 kV sistema u kome je modelovan zemljospoj u programu ATPdraw koji je redprocesor EMTP-atp.



Slika E.10: Ekranski prikaz zamenska šema sistema 35 kV u kojoj će se vršiti proračuni prenapona usled zemljospoja u programu ATPdraw

Oznake na slici E.10 oznake imaju sledeće značenje:

C_G -parazitna kapacitivnost izolovane neutralne tacke transformatora u odnosu na zemlju, 100 pF,

R_G -parazitna otpornost izolovane neutralne tačke transformatora u odnosu na zemlju, uključujući impedanse drugih elemenata povezanih između faznih provodnika i zemlje, usvojeno 300 k Ω ,

U_T - ekvivalentne elektromotorna sila svedena na 35 kV stranu po fazama, koja predstavlja Tevenenov model mreže,

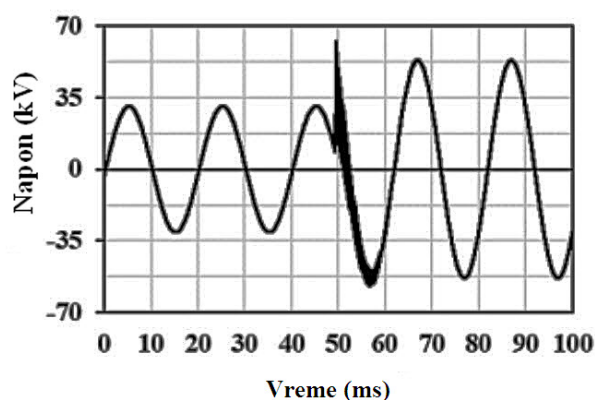
L_T - ekvivalentna induktivnost i otpornost napojnog sistema koja je dobijena iz snage kratkog spoja na strani 35 kV sistema.

L_1 - analizirani nadzemni vod sa uključenim modelom frekvencijski zavisnog izobličenja prema modela JMarti u programu EMTP-atp.

E - idealni prekidač sa kontrolisanim trenutcima otvaranja i zatvaranja kontakata, koji služi za simulaciju uspostavljanja i prekidanje luka na mestu zemljospoja, na bazi usvojenih kriterijuma,

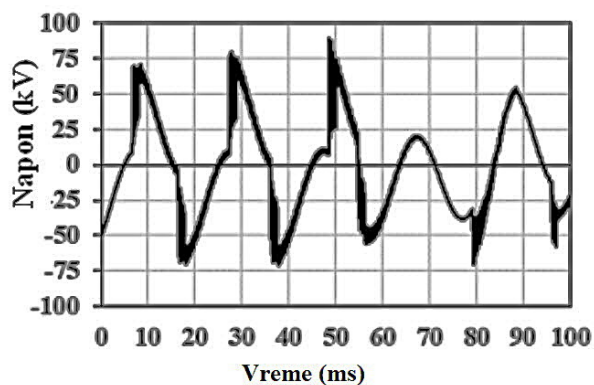
V - voltmetar za registraciju napona.

Na slici E.11 prikazani su prenaponi pri jednom paljenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici E.6 za uključenje voda dužine 6.9 km.



Slika E.11: Izračunati prenaponi pri jednom paljenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici E.6 za vod dužine 6.9 km

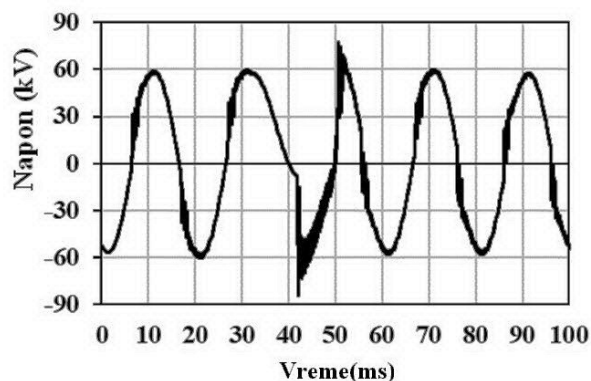
Na slici E.12 prikazani su prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici E.7, za vod dužine 12.4 km.



Slika E.12: Prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici E.7

Na slici E.13 prikazani su prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka, što

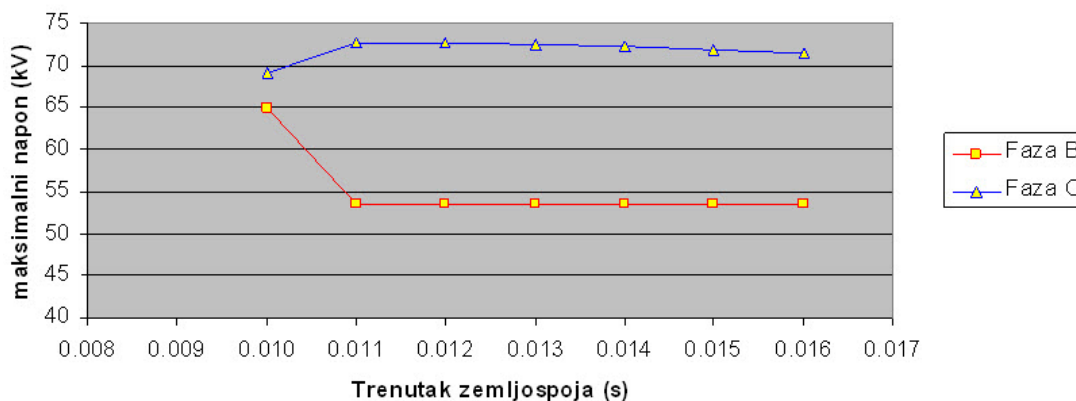
odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici E.8, za ukupnu dužinu svih uključenih vodova od 19.3 km.



Slika E.13: Izračunati prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici E.8

E.4 Maksimalni prenapon pri uspostavljanju prenapona

Analiziran je slučaj uspostavljanja prenapona u mreži sa vodom dužine 6.9 km, prema uslovima u kojima je rađen eksperiment sa dobijenim rezultatima prema slici E.6, odnosno rezultati proračuna na slici E.11. Za taj slučaj variran je nastanak zemljospoja u fazi A i izračunati prenaponi na fazama B i C dati su na slici E.14.



Slika E.14: Promena visine prenapona u funkciji trenutka uspostavljanja luka

Na osnovu izvršenih proračuna se vidi da postoji trenutak kada se pojavljuju maksimalni prenaponi od 72.7 kV na fazi C, a pri tome na fazi B se uspostavljaју niži prenaponi za isti trenutak paljenja luka.

E.5 Zaključci

Na osnovu merenja i proračuna prenapona pri zemljospoju se mogu izvesti sledeći zaključci:

- Na osnovu intenziteta električnog luka se može zaključiti da struja zemljospoja nije velika i da se električni luk lako gasi ukoliko je samo vod od 6.9 km uključen. U slučaju kada su oba dalekovoda 35 kV uključena, električni luk usled zemljospoja se teže gasi.
- Ustanovljeno je da se pojavljuju značajni tranzijentni prenaponi prilikom uspostavljanja zemljospoja. U slučaju kada je manja struja zemljospoja, pri određenim okolnostima (malo rastojanje između faznog provodnika i uzemljenog objekta na koji se događa preskok), moguća je pojava intermitentnog gorenja luka pri kome se uzastopce događaju paljenja i gašenja električnog luka.
- Primenom programa za proračun prenapona je dokazano da su talasni oblici izmerenih prenapona posledica intermitentnog gorenja luka, što može biti izuzetno opasno za izolaciju u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom transformatora.

Na kraju se može zaključiti da postoje sledeći načini za ublažavanje problema rada mreže sa izolovanom neutralnom tačkom:

- Najskuplje i teško za realizaciju je rešenje sa ograničenjem struje zemljospoja preko male impedanse na relativno malu vrednost. Najčešće se u našoj zemlji bira da struja zemljospoja bude ograničena na 300 A. Ova struja se isključuje posle najviše 3 s.
- Smanjenje broja kvarova se može postići isključivanje voda u kvaru posle nekog vremenskog intervala, na primer 2 sata.
- Potrebno je povećati izolacioni nivo komponenti koje se najčešće kvare (na primer kablovske glave).
- Odvodnike prenapona treba izabrati sa velikom energetsom apsorpcionom moći, na primer klase 4 rasterećenja vodova. Odvodnici prenapona ne mogu da ograničavaju tranzijentne prenapone pri zemljospoju, jer im je preostali napon ponekad viši od prenapona koji se pojavljuju, ali ukoliko su tranzijentni prenaponi prisutni u mreži u dužem vremenskom periodu, oni mogu da izazovu termičko preopterećenje odvodnika slabije energetske klase.

Zahvalnica

Zahvaljujemo kompaniju Elnos Banja Luka na angažovanju za rešavanja problema prenapona u HE Bočac. Istraživanje je rađeno 2015 god.