

## **EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA NAPONSKIH POJAVA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA PRI OPERACIJAMA VAKUUMSKIH PREKIDAČA**

P. Vukelja, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija  
R.Naumov, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija  
J. Mrvić, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija  
D. Hrvić, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd Srbija

### **UVOD**

Osavremenjavanjem distributivnih postrojenja 35 kV, 20 kV i 10 kV umesto malouljnih uvode se vakuumske prekidači. Pri operacijama vakuumskih prekidača javljaju se drugačiji prelazni naponski i strujni režimi u odnosu na režime koji su postojali pri radu malouljnih prekidača.

Vakuumske prekidači pri uključanju induktivnog opterećenja dovode do specifične pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova, koja ne postoji kod malouljnih prekidača. U toku približavanja kontakta polova malouljnih prekidača na nekom rastojanju se javlja električni luk i traje sve dok se kontakti ne spoje. Vakuumske prekidači međutim, u toku spajanja kontakata polova više puta prekidaju električni luk. Električni luk između kontakta polova prekidača izaziva u induktivnom kolu visokofrekventnu struju. Vakuumske prekidači imaju tu osobinu da mogu da prekidaju visokofrekventnu struju pri njenom prolasku kroz nulu. To se dešava više puta između kontakta svakog pola prekidača. Pri tome dolazi do pojave prenapona sa velikim strminama koji prvenstveno naprežu međunavojnu izolaciju transformatora. Strmine ovih prenapona mogu da budu bliske strminama prenapona koji se javljaju pri atmosferskim pražnjenjima. Na ove prenapone posebno su osetljive određene konstrukcije suvih transformatora.

Isključenja induktivnog opterećenja vakuumskim prekidačima mogu da dovedu do znatnih prenapona čija je pojava vezana sa fenomenom prekidanja male induktivne struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu. Sa ovom pojavom povezana su i višestruka ponovna paljenja električnog luka između kontakta polova prekidača.

U ovom radu prezentirani su rezultati eksperimentalnih istraživanja naponskih pojava pri uključanju i isključenju različitih tipova vakuumskih prekidača u distributivnim mrežama 35 kV 20 kV i 10 kV [1].

### **EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA NAPONSKIH POJAVA PRI OPERACIJAMA VAKUUMSKIH PREKIDAČA**

Eksperimentalna istraživanja naponskih pojava pri operacijama vakuumskih prekidača u distributivnim mrežama 35 kV, 20 kV i 10 kV sprovedena su u 7 transformatorskih stanica. Snimane su naponske pojave pri uključanju i isključenju vakuumskih prekidača u različitim konfiguracijama. Ukupno je izvršeno 167 operacija uključanja i isto toliko operacija isključenja vakuumskih prekidača. Istraživanja su obavljena sa vakuumskim prekidačima sedam različitih proizvođača.

U 35 kV mreži izvršena su eksperimentalna istraživanja naponskih pojava pri sklopnim operacijama vakuumskih prekidača 36 kV u TS 35kV/10kV "Sopot", TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2" i TS 35kV/10kV "Vitanovac" u Kraljevu. Bilo je ukupno 39 ciklusa operacija uključanje-isključenje neopterećenih transformatora 35kV/10kV. Mreže 35 kV, koje napajaju navedene TS, su uzemljene preko otpornika.

Eksperimentalna istraživanja naponskih pojava pri sklopnim operacijama vakuumskog prekidača 24 kV u mreži 20 kV obavljena su u TS 110kV/20kV/10kV "Novi Sad 9". Izvršeno je ukupno 19 ciklusa operacija uključanje-isključenje nadzemno-kablovskog voda opterećenog neopterećenim transformatorom 20kV/0,4kV. Mreža 20 kV, koja se napaja iz TS 110kV/20kV/10kV "Novi Sad 9", je uzemljena preko metalnog otpornika.

Eksperimentalna istraživanja naponskih pojava pri sklopnim operacijama vakuumskih prekidača 12 kV u mrežama 10 kV izvršena su u TS 35kV/10kV "Zeleni Venac" u Beogradu, TS 35kV/10kV »Sopot«, TS 110kV/10kV "Kraljevo 5" i TS 35kV/10kV "Centar 1" u Nišu. U TS 35kV/10kV "Zeleni Venac", TS 110kV/10kV "Kraljevo 5" i TS 35kV/10kV "Sopot" izvršeno je istraživanje naponskih pojava pri ukupno 77 ciklusa operacija uključanje-isključenje kablovskih vodova opterećenih neopterećenim transformatorima 10kV/0,4kV, a u TS 35kV/10kV "Zeleni Venac" i TS 35kV/10kV "Sopot" i pri 22 ciklusa uključanja-isključenja neopterećenih kablovskih vodova. U TS 35kV/10kV "Centar 1" u Nišu istraživanje naponskih pojava je izvršeno pri uključanju i isključenju kablovskog voda sa opterećenim transformatorom 10kV/0,4kV kada je na njemu prisutan zemljospoj. Mreže 10 kV napajane iz TS 35kV/10kV "Zeleni Venac" i TS 35kV/10kV "Sopot" su uzemljene preko otpornika, a mreže 10 kV napajane iz TS 110kV/10kV "Kraljevo 5" i TS 35kV/10kV "Centar 1" su sa izolovanom neutralnom tačkom.

Sa snimaka prelaznih faznih napona dobijeni su podaci o njihovim maksimalnim vrednostima, obliku, učestanostima, strminama, trajanju itd.. Prikaz maksimalnih vrednosti prelaznih faznih napona (prenapona) dat je u relativnim jedinicama (r.j.) kao odnos njihove maksimalne vrednosti i amplitude napona u ustaljenom režimu rada pre ili posle njihovog pojavljivanja.

Iz obimnog materijala na slikama 1, 2, 3, 4, i 5 dati su karakteristični prikazi naponskih pojava pri uključanju i isključenju vakuumskih prekidača.

U tabeli 1 dati su podaci o broju ciklusa operacija uključanje-isključenje vakuumskih prekidača izvršenih u mrežama 35 kV, 20 kV i 10 kV, tipovima vakuumskih prekidača i maksimalnim visinama faznih prenapona izmerenim u tim mrežama.

## **ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA**

### **Naponske pojave pri uključanju vakuumskih prekidača**

Pri uključanjima neopterećenih transformatora 35kV/10kV dolazi do višestrukih prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih prekidača svih proizvođača. Svako paljenje električnog luka između kontakta polova vakuumskog prekidača dovodi do pojave oscilatornog procesa koji traje veoma kratko, najčešće od nekoliko desetina do nekoliko stotina  $\mu$  s. Tako dolazi u svakoj fazi do stvaranja kolone oscilatornih prenapona, učestanosti i do nekoliko stotina kHz. Ukupan proces trajanja prethodnih paljenja električnog luka u sve tri faze retko prelazi 1 ms. Svako paljenje električnog luka između kontakta prekidača dovodi do naglog skoka napona, odnosno do pojave prenapona sa velikom strminom [1,2,4,5,6]. Najviši izmereni prenapon na 35 kV priključcima transformatora od ukupno 39 izvedenih uključanja (117 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 1.68 r.j. Najveće strmine ovih prenapona su prelazile 100 kV/  $\mu$  s.

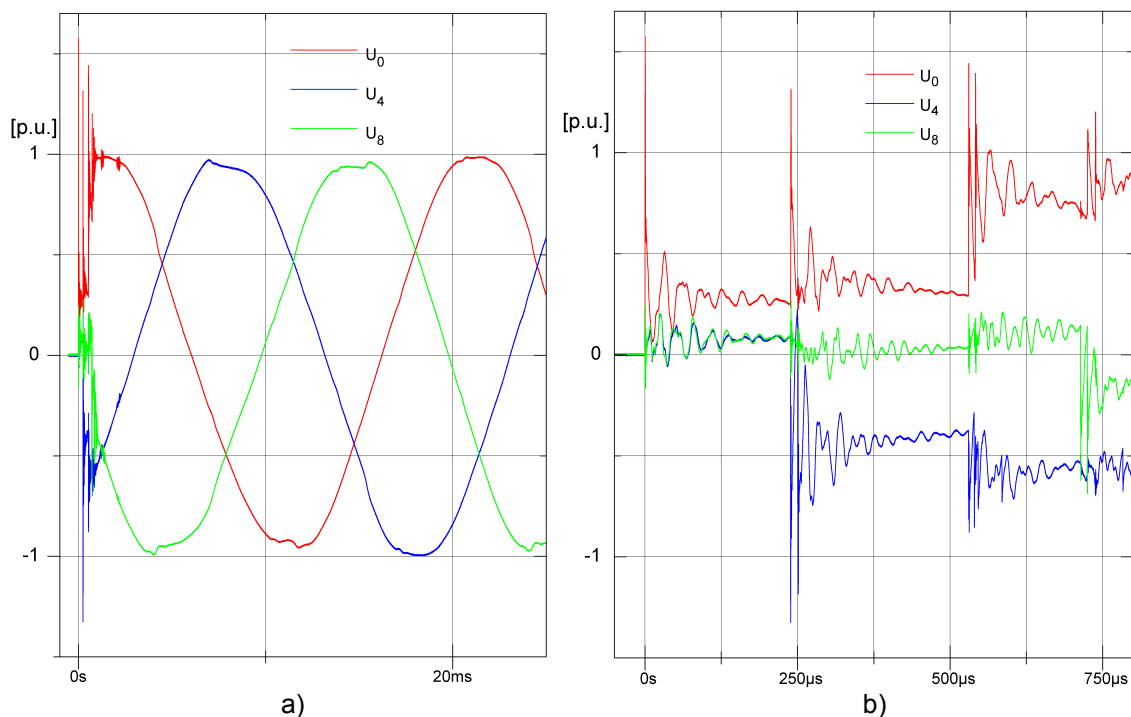
Uključenja kablovskih vodova 20 kV i 10 kV sa neopterećenim transformatorima 20kV/0,4kV i 10kV/0,4kV takođe dovode do prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih prekidača, ali je njihov broj smanjen. Najviši izmereni prenapon na 20 kV priključcima transformatora od ukupno 19 izvedenih uključanja (57 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 1,38 r.j. i na 10 kV priključcima transformatora od ukupno 101 izvedenih uključanja (303 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 1,76 r.j. Najveće strmine ovih prenapona nisu prelazile 100 kV/  $\mu$  s.

Uključenja neopterećenih kablovskih vodova 10 kV ne dovode do pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih prekidača. Trajanje prelaznog procesa u sve tri faze završava se za nekoliko ms [1]. Najviši izmereni prenapon pri 25 izvedenih uključanja (75 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 1,55 r.j. Viši prenaponi se javljaju u slučajevima kada se uključanja neopterećenih kablovskih vodova izvode relativno brzo posle njihovih isključenja. Na kablovskim vodovima je prisutan zaostali napon, jer se u kratkom periodu ne mogu potpuno rasteretiti.

U mreži 10 kV sa izolovanom neutralnom tačkom izvedeno je 8 uključenja vakuumskog prekidača kablovskog voda opterećenog transformatorom 10kV/0,4kV kada je na jednoj od njegovih faza postojao zemljospoj [1]. Najviši prenapon koji se pojavio pri ovim uključenjima (16 članova uzorka prenapona) je 3,34 r.j. Ovako visok prenapon je nastupio usled pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskog prekidača. Ovo ukazuje da namerna uključenja na zemljospoj vakuumskim prekidačima nisu poželjna.

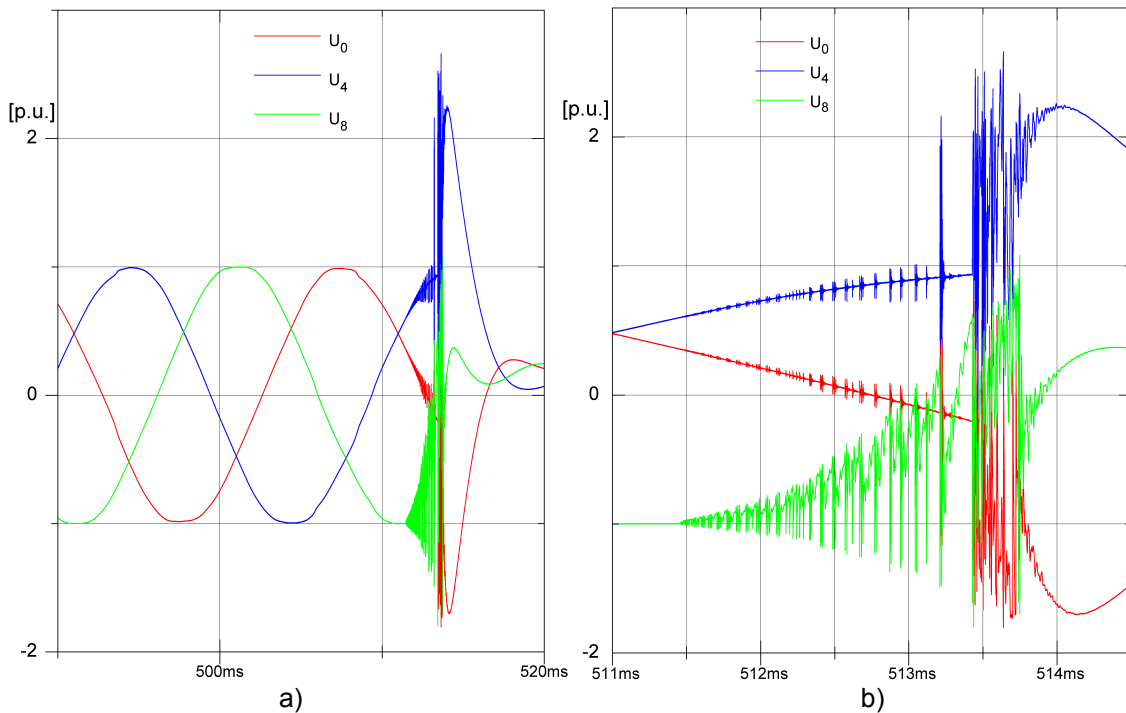
TABELA 1 - Rezultati istraživanja prenapona pri uključenjima i isključenjima vakuumskih prekidača 36 kV, 24 kV i 12 kV

Transformatorska stanica	Vakuumski prekidač	Broj ciklusa operacija uključenje-isključenje	Maksimalne vrednosti faznih prenapona		
			Uključenje (r.j.)	Isključenje u normalnom radu (r.j.)	Isključenje neposredno posle uključenja (r.j.)
35kV/10kV „Sopot“	36 kV-tip A	17	1,21	1,47	2,15
110kV/35kV/10kV „Kraljevo 2“	36 kV-tip B	11	1,68	1,60	2,67
35kV/10kV „Vitanovac“ u Kraljevu	36 kV-tip C	11	1,27	1,37	2,57
110kV/20kV/10kV „Novi Sad 9“	24 kV-tip D	19	1,38	1,00	1,12
35kV/10kV „Sopot“	12 kV-tip E	26	2,38	1,00	
35kV/10kV „Zeleni Venac“	12 kV- tip F	60	1,55	2,15	4,35
110kV/10kV „Kraljevo 5“	12 kV-tip G	15	1,76	1,00	1,27
35kV/10kV „Centar 1“ u Nišu	12 kV-tip H	8	3,34	1,70	



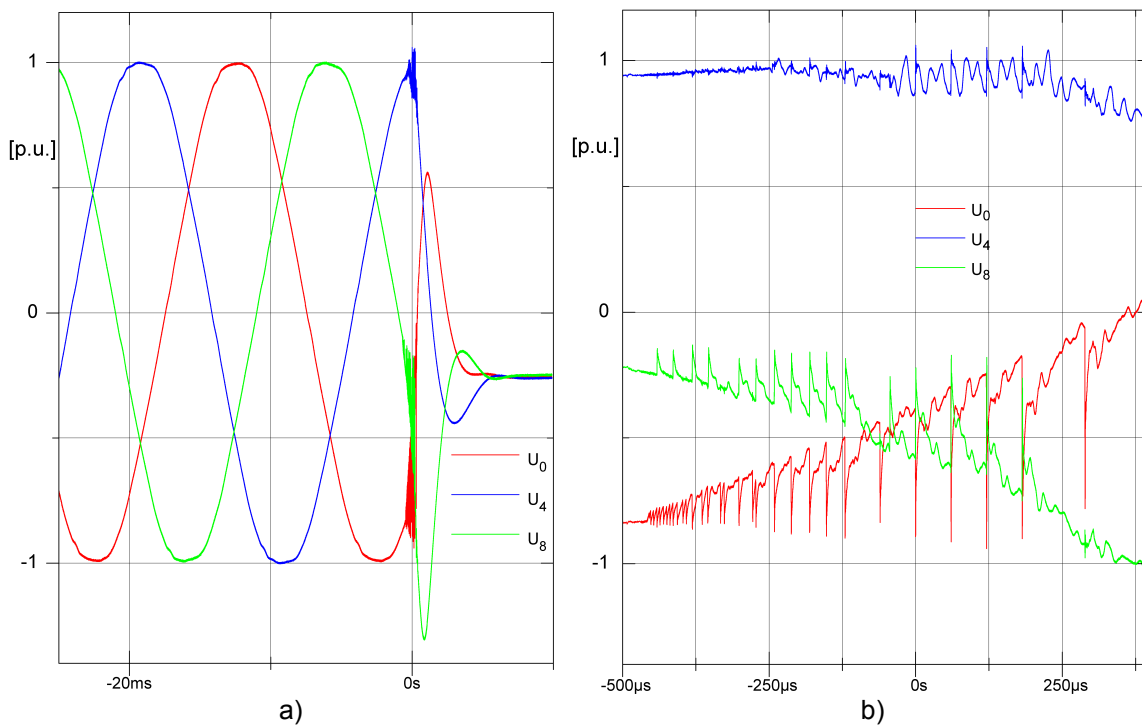
Slika 1.

- a) Prelazni fazni naponi  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$  na 35 kV priključcima neopterećenog transformatora 35kV/10kV, 8MVA pri njegovom uključenju vakuumskim prekidačem 36 kV u TS 110kV/35kV/10kV “Kraljevo 2”  
b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$



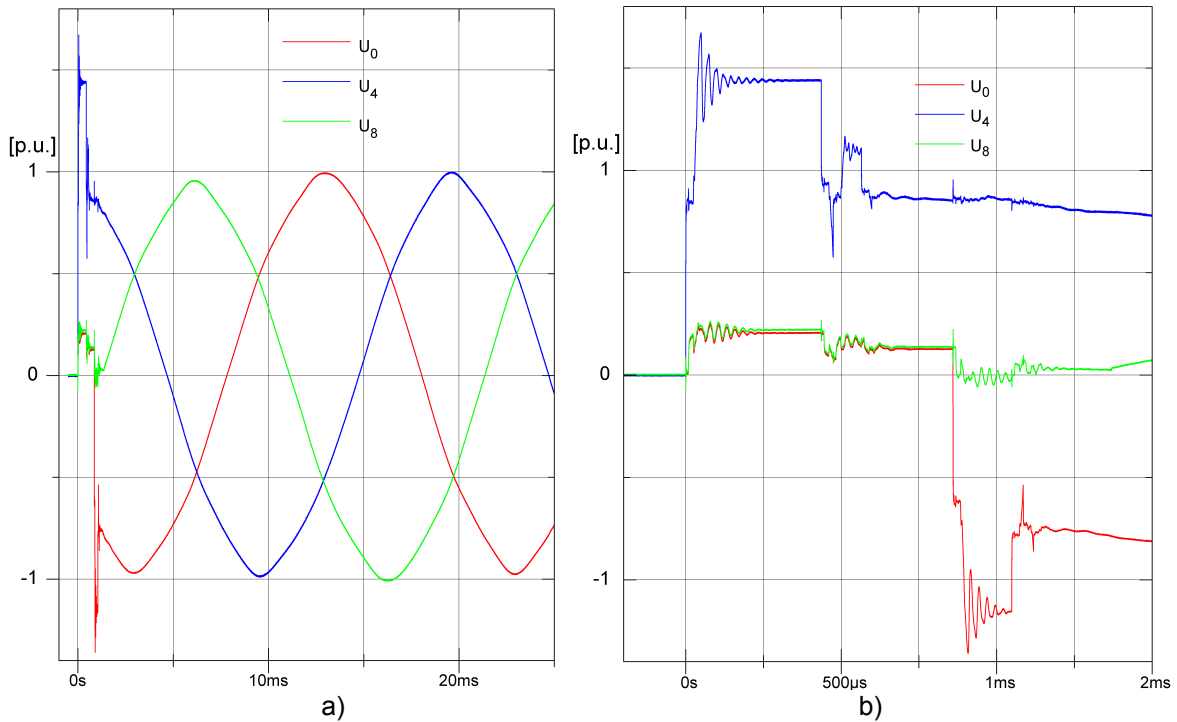
Slika 2.

a) Prelazni fazni naponi  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$  na 35 kV priključcima neopterećenog transformatora 35kV/10kV, 8MVA pri njegovom isključenju neposredno posle uključenja vakuumskim prekidačem 36 kV u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2"  
 b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$



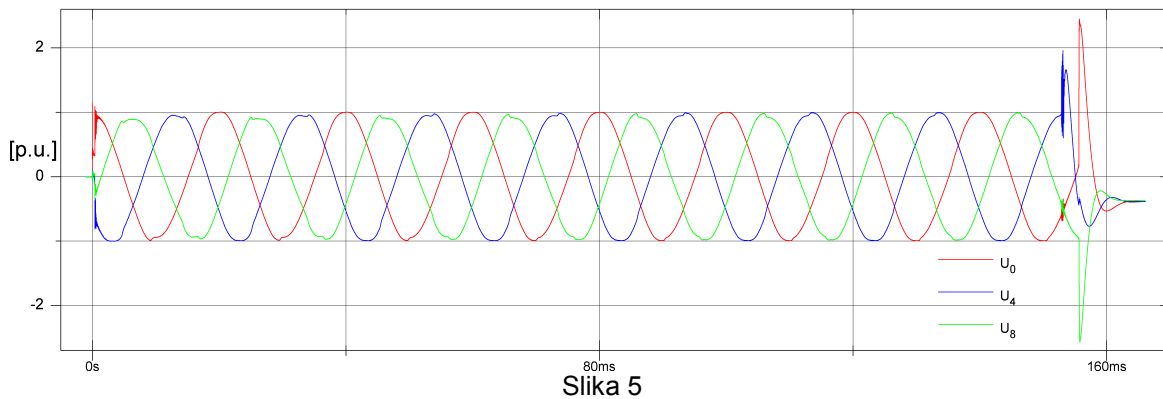
Slika 3

a) Prelazni fazni naponi  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$  na 35 kV priključcima transformatora 35kV/10kV, 4MVA pri njegovom isključenju u neopterećenom stanju vakuumskim prekidačem 36 kV "Vitanovac"  
 b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$



Slika 4..

- a) Prelazni fazni naponi  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$  na ulazu u 10 kV kablovski vod opterećen na kraju sa dva neopterećena transformatora 10kV/0,4kV, 630 kVA pri njegovom uključenju vakuumskim prekidačem 12 kV u TS 110kV/10kV "Kraljevo 5"
- b) Početni deo prelaznih faznih napona  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$



Slika 5

Prelazni fazni naponi  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$  na 35 kV priključcima transformatora 35kV/10kV, 4MVA pri njegovom uključenju u neopterećenom stanju i isključenju neposredno posle uključenja vakuumskim prekidačem 36 kV u TS 35kV/10kV "Vitanovac"

### Naponske pojave pri isključenju vakuumskih prekidača

Isključenja neopterećenih transformatora 35kV/10kV vakuumskim prekidačima dovode do sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu i do višestrukih ponovnih paljenja električnog luka. Nema bitne razlike između prenapona koji se pojavljuju pri isključenju različitih tipova prekidača [1,3,4,5,6,7]. Od ukupno 25 izvedenih isključenja u toku normalnog rada (75 članova uzorka prenapona sve tri faze) najviši izmereni prenapon na 35 kV priključcima transformatora je 1,69 r.j. Određen broj isključenja je izvođen neposredno posle uključenja. U pojedinim slučajevima isključenja dolazilo je do pojave značajnih prenapona. Najviši izmereni prenapon od ukupno 14 tako izvedenih isključenja (42 člana uzorka prenapona sve tri faze) je 2,67 r.j. Nisu uočene bitne razlike u obliku prenapona pri

isključenjima u normalnom režimu rada i pri isključenjima koja su usledila neposredno posle uključenja.

Isključenja kablovskih vodova sa neopterećenim ili opterećenim transformatorima 10kV/0,4kV i 20kV/0,4kV u normalnom radu novijim konstrukcijama vakuumskih prekidača ne dovode do prenapona ili su prenaponi neznatni. U istim konfiguracijama starije konstrukcije vakuumskih prekidača dovode pri njihovim isključenjima do prenapona; najviši izmereni je 2,15 r.j. Prenaponi su visoki kada se isključenja izvode neposredno posle uključenja istih vakuumskih prekidača; najviši izmereni je 4,35 r.j.[7]. U istim konfiguracijama pri istim operacijama malouljnih prekidača prenaponi su niži; najviši izmereni je 2,95 r.j.

Pri isključenjima neopterećenih kablovskih vodova ne dolazi do pojave ponovnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih prekidača, pa nema prenapona.

## Dielektrična naprezanja izolacije opreme pri uključenjima i isključenjima vakuumskih prekidača

U standardima o koordinaciji izolacije date su vrednosti podnosivih napona izolacije opreme u mrežama 35 kV, 20 kV i 10 kV za standardni podnosivi napon industrijske učestanosti i standardni podnosivi atmosferski udarni napon. Za izolaciju kablovskog pribora (kablovske završnice, kablovske spojnice) postoje određene razlike. One se odnose na visinu standardnih podnosivih napona industrijske učestanosti. Vrednosti tih napona su date u zagradama u tabeli 2.

TABELA 2 - Standardni stupanj izolacije za mreže nazivnog napona 35 kV, 20 kV i 10 kV

Nazivni napon mreže U (kV)	Najviši napon mreže U <sub>m</sub> (kV)	Standardni podnosivi napon industrijske učestanosti U <sub>AC</sub> (kV)	Standardni podnosivi atmosferski udarni napon U <sub>1,2/50</sub> (kV)	Pretpostavljene vrednosti podnosivih sklopnih udarnih napona (kV)
10	12	28(24)	95	40(34)
20	24	50(48)	125	71(68)
35	36 (38)	70(72)	170	99(102)

Podnosivi sklopni udarni naponi nisu definisani za izolaciju opreme u mrežama 35 kV, 20 kV i 10 kV. Međutim, može se smatrati da su oni jednaki ili viši od temene vrednosti podnosivih napona industrijske učestanosti. Ove vrednosti su takođe date u Tabeli 2. Pretpostavljene vrednosti podnosivih sklopnih udarnih napona, izražene u relativnim jedinicama u odnosu na amplitudu najviših faznih napona mreža, su sledeće: 4,04(3,46) za mrežu 10 kV, 3,61(3,46) za mrežu 20 kV i 3,37(3,46) za mrežu 35 kV.

Transformatori 35kV/10kV su predviđeni da izdrže bez proboja izolacije atmosferski udarni napon temene vrednosti 170 kV oblika 1,2/50. To znači da njihova međunavojna izolacija podnosi prenapone sa strminama najmanje 170 kV/μs. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima i isključenjima su niži od podnosivih sklopnih napona (3,37 r.j.) izolacije 35 kV namotaja transformatora. Iako su im pri uključenjima strmine bliske strminama atmosferskih prenapona, niže su od 170 kV/μs, i ne bi trebalo da predstavljaju opasnost za međunavojnu izolaciju 35 kV namotaja transformatora 35kV/10kV pod uslovom da nije došlo do degradacije izolacije tokom eksploatacije.

Izolacija 20 kV namotaja transformatora 20kV/0,4kV i izolacija ostale opreme u mreži 20 kV su predviđene da izdrže bez proboja atmosferski udarni napon temene vrednosti 125 kV oblika 1,2/50. To znači da međunavojna izolacija 20 kV namotaja transformatora podnosi prenapone sa strminama najmanje 125 kV/μs. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima su znatno niži od podnosivih sklopnih napona izolacije u mreži 20 kV. Iako su im strmine bliske strminama atmosferskih prenapona, niže su od 120 kV/μs, i ne bi trebalo da predstavljaju opasnost za međunavojnu izolaciju 20 kV namotaja transformatora 20kV/0,4kV, pod uslovom da nije došlo do degradacije izolacije tokom eksploatacije.

Izolacija 10 kV namotaja transformatora 10kV/0,4kV i izolacija ostale opreme u mreži 10 kV su predviđene da izdrže bez proboja atmosferski udarni napon temene vrednosti 75 kV oblika 1,2/50. To znači da međunavojna izolacija 10 kV namotaja transformatora podnosi prenapone sa strminama najmanje 75 kV/μs. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima i isključenjima savremenih konstrukcija vakuumskih prekidača su znatno niži od podnosivih sklopnih napona izolacije opreme u mreži 10 kV. Iako su im strmine bliske strminama atmosferskih prenapona, pretpostavlja se da na ulasku u namotaje transformatora ne bi trebalo da budu više od nekoliko desetina kV/μs, pa ne predstavljaju

opasnost za međunavojnu izolaciju 10 kV namotaja transformatora 10kV/0,4kV, pod uslovom da nije došlo do degradacije izolacije tokom eksploatacije.

## ZAKLJUČCI

Analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja naponskih pojava pri uključenju i isključenju vakuumskih prekidača u mrežama 35 kV, 20 kV i 10 kV ukazuje na sledeće:

- Izolacija energetskih transformatora i ostale opreme u distributivnim mrežama 35 kV, 20 kV i 10 kV nije ugrožena od prenapona koji nastaju pri uključenju i isključenju vakuumskih prekidača novijih konstrukcija, pod uslovom da tokom dugogodišnje eksploatacije nije došlo do degradacije njenih izolacija. Suvi transformatori, koji su najosetljiviji na prenapone koji se javljaju pri uključenju vakuumskih prekidača nisu bili obuhvaćeni istraživanjima, pa se ovaj zaključak ne odnosi na njih.
- Nema bitne razlike u visini, obliku, trajanju i učestanostima prenapona koji se javljaju u sličnim konfiguracijama pri uključenjima i isključenjima novijih konstrukcija vakuumskih prekidača različitih proizvođača.
- Uključenja vakuumskim prekidačima u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom u kojima je prisutan zemljospoj dovode do viših prenapona nego kada se izvode bez prisustva zemljospoja i potrebno ih je izbegavati.

## LITERATURA

- [1] 2009, "Eksperimentalna istraživanja prenapona pri operacijama vakuumskih i SF<sub>6</sub> sklopnih aparata različitih proizvođača", Studija br.310909, Elektrotehnički institut "N.Tesla" Beograd, str. 182.
- [2] P. Vukelja, R.Naumov, J. Mrvić, D. Hrvić, 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, 89-104.
- [3] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, 2002, "Prenaponi pri prekidanju malih induktivnih struja", Elektroprivreda br.2., str.3-11.
- [4] P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvić, 2007, "Prenaponi i struje pri uključenju i isključenju transformatora 35kV/10kV vakuumskim prekidačem", Zbornik radova Instituta "N.Tesla", Knjiga 18, 153-160.
- [5] Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, 2007, "Overvoltages at vacuum switching devices operation", CIGRE, "Transient Phenomena in Large Electric Power Systems", Symposium 18-21, Zagreb, Croatia.
- [6] P.Vukelja, J.Mrvić, D.Hrvić, D.Ristivojević, N.Stevanović, 2009, "Prenaponi pri operacijama vakuumskih sklopnih aparata u TS 35kV/20kV/6kV "Kalenić"", 29. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 31. maj-06.jun.
- [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, 11-14.