

PRENAPONI PRI RADU VAKUUMSKIH PREKIDAČA 36 kV I 12 kV U ELEKTRODISTRIBUTIVNOJ MREŽI KRALJEVA

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, Vojin Kostić
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

Kratak sadržaj: U radu su prezentirani rezultati istraživanja prelaznih faznih napona pri uključanju i isključenju neopterećenih transformatora i kablovskih vodova sa neopterećenim transformatorima vakuumskim prekidačima. Istraživanja su izvršena u 35 kV i 10 kV elektrodistributivnoj mreži Kraljeva.

Ključne reči: prenapon, vakuumski prekidač, elektrodistributivna mreža

1. UVOD

Revitalizacijom postrojenja 35 kV i 10 kV u elektrodistributivnim mrežama umesto malouljnih prekidača uvode se vakuumski prekidači različitih proizvođača. Njihovim uključanjima i isključenjima javljaju se drugačiji prelazni naponski i strujni režimi u odnosu na one koji su postojali pri radu malouljnih prekidača [1,2,3].

Vakuumski sklopni aparati pri uključanju induktivnog opterećenja dovode do specifične pojave koja nije bila prisutna kod malouljnih prekidača. To je pojava prethodnih paljenja električnog luka između kontakta njihovih polova. Kod malouljnih prekidača pri uključanju, u toku približavanja kontakta polova, pojavljuje se na nekom rastojanju električni luk koji traje dok se kontakti ne spoje. Vakuumski prekidači prekidaju električni luk više puta sve dok se kontakti polova ne spoje. Pojavom električnog luka između kontakta polova sklopnog aparata uspostavlja se u induktivnom kolu visokofrekventna struja. Vakuumski 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 energetskih 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 sklopnim aparatima mogu da dovedu do znatnih prenapona. Njihova pojava je vezana sa fenomenom prekidanja male induktivne struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu. Ovo je svojstveno i vakuumskim i malouljnim prekidačima.

Saznanja o naponskim pojavama koje se dešavaju pri uključanju i isključenju vakuumskih prekidača različitih proizvođača u konkretnim mrežama mogu se dobiti jedino eksperimentalno. Zato su i izvršena eksperimentalna istraživanja prelaznih faznih napona sa vakuumskim prekidačima tri proizvođača. Naponske pojave su snimane digitalnim osciloskopima i tranzijent rikorderima koristeći kapacitivna delila napona koja verno prenose pojave od nekoliko Hz do 2 MHz. Delila napona su priključivana iza vakuumskog prekidača prema transformatorima koji su uključivani i isključivani.

Prenaponi su izraženi u relativnim jedinicama (r.j.) kao odnos maksimalne vrednosti prelaznog faznog napona i amplitude ustaljene vrednosti napona pre (za isključenja) ili posle (za uključenja) operacije prekidača.

2. ISTRAŽIVANJA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Ekperimentalna istraživanja prenapona pri radu vakuumskih prekidača 36 kV izvršena su pri uključenju i isključenju energetskih transformatora 35kV/10,5kV u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2" i u TS 35kV/10kV "Vitanovac". U TS 110kV/10kV "Kraljevo 5" izvršena su istraživanja prenapona pri uključenju i isključenju kablovskog voda sa dva neopterećena transformatora 10kV/0,4kV vakuumskim prekidačem 12 kV.

2.1. Ekperimentalna istraživanja prenapona u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2"

U TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2" izvršena su istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV, 8 MVA vakuumskim prekidačem 36 kV proizvodnje Siemens. Prelazni fazni naponi su snimani na ulazu u 35 kV namotaje transformatora 35kV/10,5kV [1].

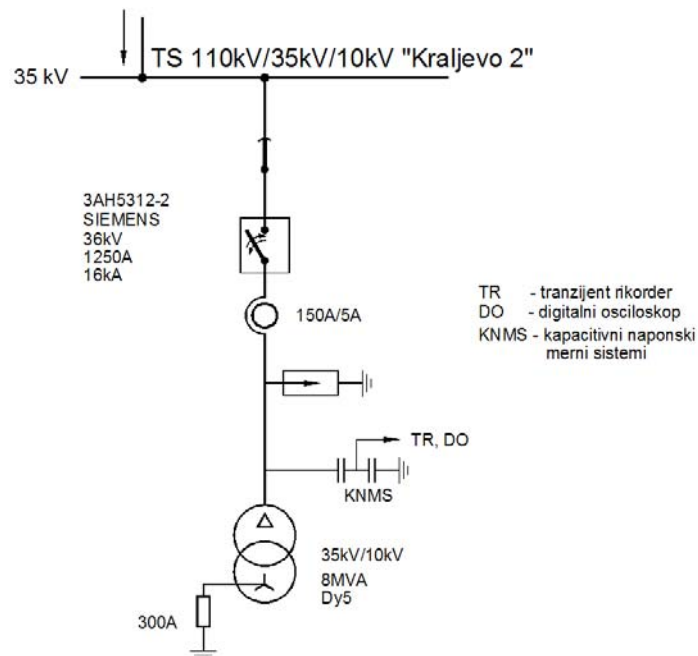
Jednopolna šema istraživanja prelaznih napona pri uključenju i isključenju neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV vakuumskim prekidačem 36 kV u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2" data je na slici 1.

Izvršeno je 11 uključenja i 11 isključenja neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV vakuumskim prekidačem 36 kV. Od 11 isključenja 4 su izvršena neposredno posle uključenja.

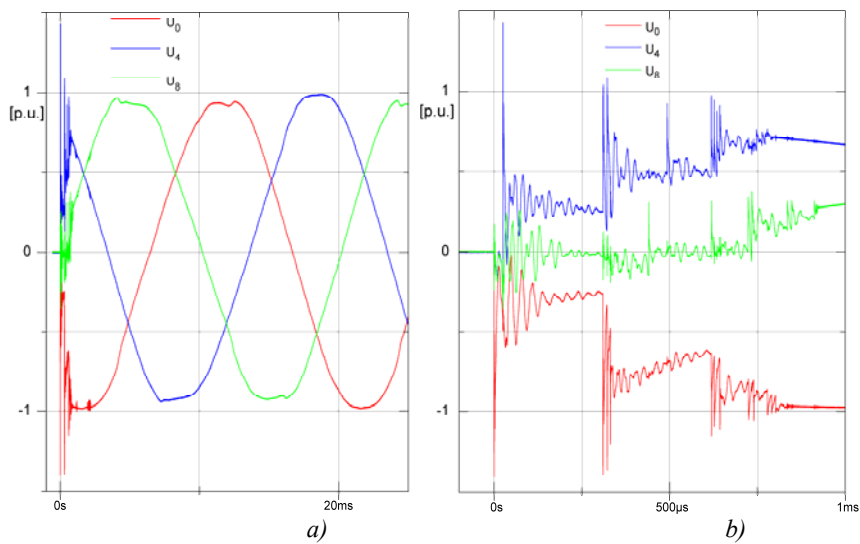
Na slikama od 2 i 3 dati su karakteristični snimci prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju neopterećenog transformatora.

Pri uključenju neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV vakuumskim prekidačem 36 kV dolazi do višestrukih prethodnih paljenja električnog luka između kontakta sva tri njegova pola (slika 2). Proces prethodnih paljenja električnog luka u svakoj fazi traje nekoliko stotina μ s. Prenaponi pri uključenju nisu visoki. Najviši izmereni u toku 11 izvedenih uključenja je 1,68 r.j. Trajanje prelaznog naponskog procesa do uspostavljanja ustaljenih vrednosti napona je kratko i ne prelazi 2,5 ms. Strmine prenapona koje se javljaju pri prethodnim paljenjima električnog luka ne prelaze 60 kV/ μ s. Vreme od trenutka uključenja prvog pola do trenutka uključenja poslednjeg pola prekidača ne prelazi 1 ms.

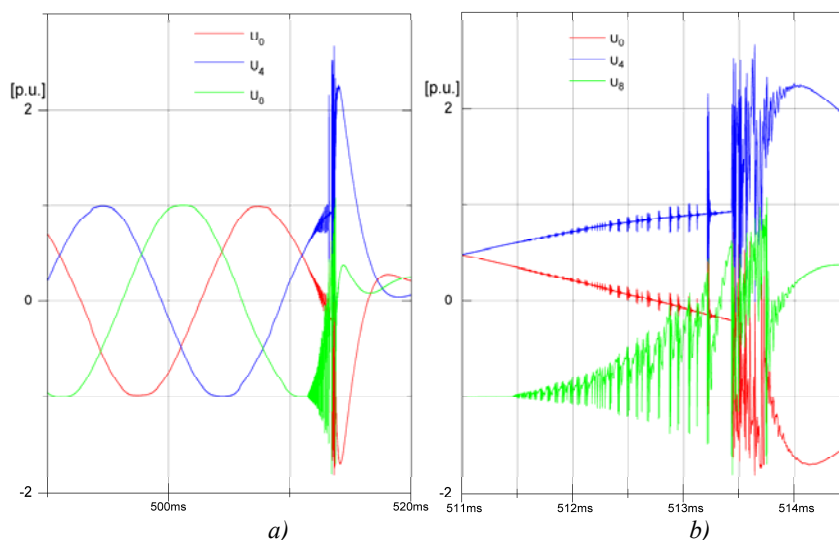
Isključenja neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV dovode do prenapona i do pojave višestrukih ponovnih paljenja električnog luka između kontakta sva tri pola vakuumskog prekidača (slike 3). Proces višestrukih ponovnih paljenja električnog luka u svakoj od faza traje i više od 2 ms. Isključenja transformatora neposredno posle uključenja u pojedinim slučajevima mogu da budu bez prenapona, a mogu da dovedu i do znatnih prenapona. U jednom od tih slučajeva izmeren je najviši prenapon 2,67 r.j.. Isključenja u normalnom režimu praznog hoda transformatora ne dovode do pojave znatnih prenapona. Najviši izmereni prenapon u takvim slučajevima isključenja iznosi 1,60 r.j. Naponski proces pri isključenju traje relativno kratko. Završava se u toku 10 ms.



Slika 1. Jednopolna šema istraživanja prelaznih napona pri uključanju i isključenju neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV, 8 MVA vakuumskim prekidačem 36 kV u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2"



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

2.2. Eksperimentalna istraživanja prenapona u TS 35kV/10kV "Vitanovac"

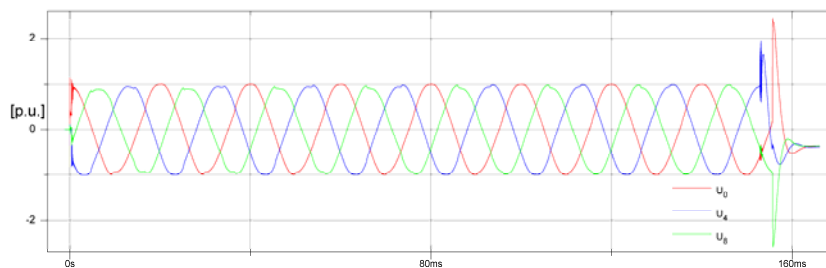
U TS 35kV/10kV "Vitanovac" izvršena su istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV, 4 MVA vakuumskim prekidačem 36 kV proizvodnje TSN Maribor-Slovenija [2].

Jednopolna šema istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV, 4 MVA vakuumskim prekidačem 36 kV u TS 35kV/10kV "Vitanovac" je slična šemi za istraživanja za transformator u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2" datoj na slici 1.

Izvršeno je 11 uključenja i 11 isključenja neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV vakuumskim prekidačem 36 kV. Od 11 isključenja 4 su izvršena neposredno posle uključenja.

Na slici 4 dat je karakteristični snimak prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju neposredno posle uključenja neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV vakuumskim prekidačem 36 kV proizvodnje TSN Maribor-Slovenija u TS 35kV/10kV "Vitanovac".

Pri uključenju i isključenju neopterećenog transformatora 35kV/10,5kV, 4 MVA vakuumskim prekidačem dešavaju se slične pojave kao pri uključenju i isključenju transformatora u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2". Najviši izmereni prenapon u toku 11 izvedenih uključenja je 1,27 r.j. Najviši prenapon pri isključenju u normalnom režimu rada neopterećenog transformatora iznosi 1,37 r.j. Najviši prenapon pri isključenju transformatora izvedenom neposredno posle uključenja iznosi 2,57 r.j.



Slika 4.

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

2.3. Eksperimentalna istraživanja prenapona u TS 110kV/10kV "Kraljevo 5"

U TS 110kV/10kV "Kraljevo 5" izvršena su istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju kablovskog voda dužine oko 1700 m sa dva neopterećena transformatora 10kV/0,4kV vakuumskim prekidačem 12 kV proizvodnje Tavrida Electric [3].

Jednopolna šema istraživanja prelaznih napona pri uključenju i isključenju kablovskog voda sa dva neopterećena transformatora 10kV/0,4kV, 630 kVA data je na slici 5.

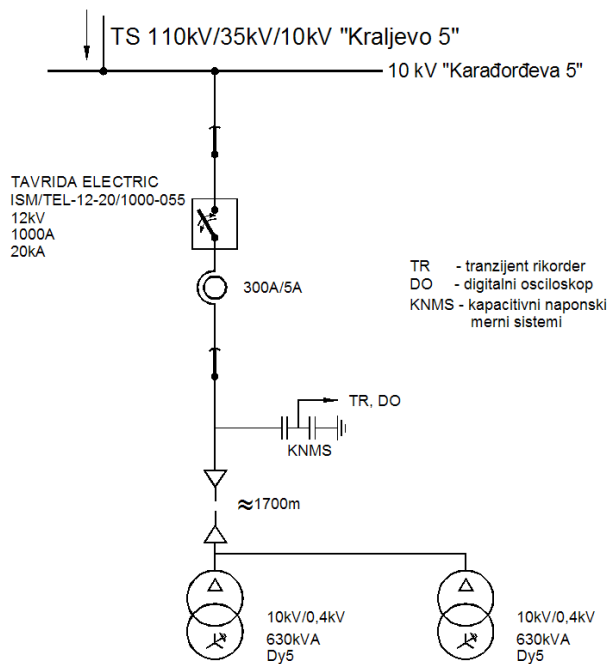
Izvršeno je 15 uključenja i 15 isključenja kablovskog voda sa dva neopterećena transformatora. Od 15 isključenja 5 je izvršeno neposredno posle uključenja.

Na slikama 6 i 7 dati su karakteristični snimci prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju kablovskog voda sa dva neopterećena transformatora.

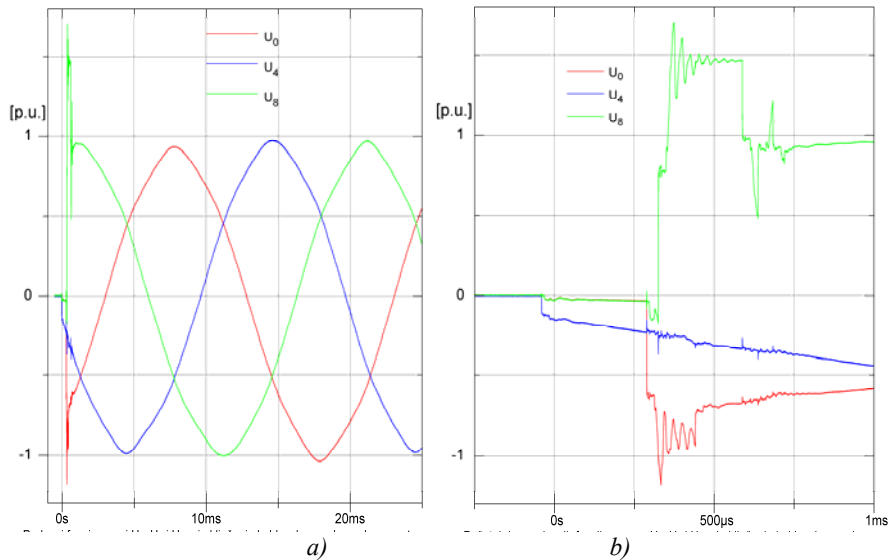
Pri uključenjima je i ovde dolazilo do pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta sva tri pola vakuumskog prekidača (slika 6.), ali je njihov broj mali.

Prenaponi pri uključenju nisu visoki. Najviši izmereni u toku 15 izvedenih uključenja je 1,76 r.j. Trajanje prelaznog naponskog procesa do uspostavljanja ustaljenih vrednosti napona je kratko. Ne prelazi 1,5 ms. Strmine prenapona koje se javljaju pri prethodnim paljenjima električnog luka ne prelaze 10 kV/ μ s. Vreme od trenutka uključenja prvog pola do trenutka uključenja poslednjeg pola vakuumskog prekidača ne prelazi 1,3 ms.

Isključenja kablovskog voda sa dva neopterećena transformatora 10kV/0,4kV se odvija bez prenapona, osim kada su isključenja izvođena neposredno posle uključenja. U nekim od ovih slučajeva je dolazilo do pojave prenapona, ali su oni bili niski. Najviši izmereni iznosi 1,27 r.j. Pri isključenjima nije dolazilo do pojave ponovnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskog prekidača 12 kV. Naponski proces posle isključenja je oscilatorno prigušen što se vidi na slici 7.

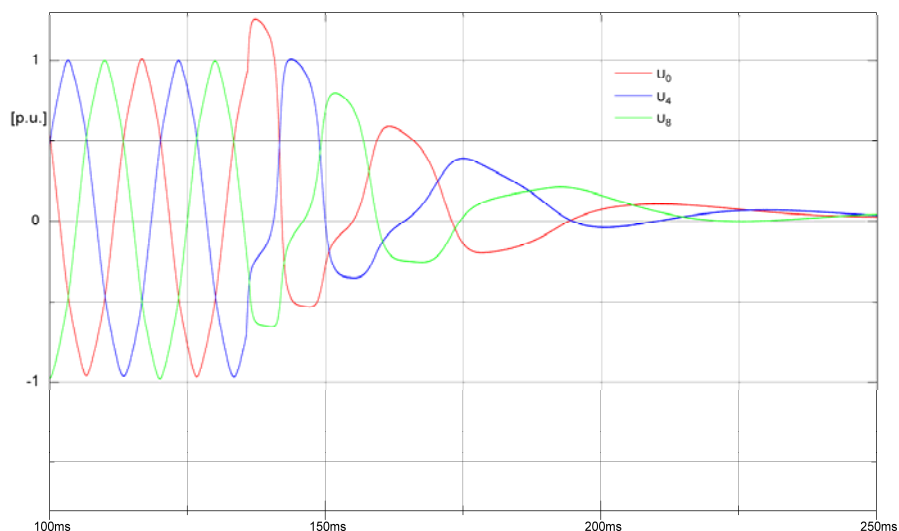


Slika 5. Jednopolna šema istraživanja prelaznih napona pri uključenju i isključenju kablovskog voda sa dva neopterećena transformatora 10kV/0,4kV, 630 kVA



Slika 6.

- 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 proizvodnje Tavrida Electric u TS 110kV/10kV "Kraljevo 5" b) Početni deo prelaznih faznih napona u_0 , u_4 i u_8



Slika 7.

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 isključenju neposredno posle uključenja vakuumskim prekidačem 12 kV proizvodnje Tavrida Electric u TS 110kV/10kV "Kraljevo 5"

3. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Istraživanja su pokazala da pri uključenjima neopterećenih transformatora ili kablovskih vodova sa neopterećenim transformatorima vakuumskim prekidačima različitih proizvođača dolazi do višestrukih prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova. Broj višestrukih prethodnih paljenja električnog luka je manji kada se uključuju kablovski vodovi sa transformatorima. 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 μ 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 pojave velike strmine na prenaponima, koje nisu prelazile 60 kV/ μ s. Manje su kada se uključuju kablovski vodovi sa transformatorima. Najviši izmereni prenapon pri uključenjima iznosi 1,76 r.j.

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/ μ s. Njihova izolacija je, takođe, predviđena da izdrži kratkotrajni napon industrijske učestanosti 70 kV. Podnosivi sklopni udarni napon za izolaciju opreme u mreži 35 kV nije definisan, ali se može smatrati da njegova temena vrednost nije niža od $70\sqrt{2}$ kV. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima su znatno niži od podnosivih napona izolacije 35 kV namotaja transformatora. Iako su im strmine bliske strminama atmosferskih prenapona, niže su od 170 kV/ μ s, i ne bi trebalo da predstavljaju opasnost za međunavojnu izolaciju

35 kV namotaja transformatora 35kV/10kV, pod uslovom da nije došlo do njene degradacije 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/ μ s. Izolacija 10 kV namotaja transformatora i ostale opreme u mreži 10 kV, osim kablova, je predviđena da izdrži i kratkotrajni napon industrijske učestanosti 28 kV. Podnosivi sklopni udarni napon za izolaciju opreme u mreži 10 kV nije definisan, ali se može smatrati da njegova temena vrednost nije niža od $28\sqrt{2}$ kV izuzimajući kablove. Za kablove je, u skladu sa podnosivim kratkotrajnim naponom industrijske učestanosti, trebalo bi da temena vrednost podnosivog sklopnog udarnog napona bude veća od $24\sqrt{2}$ kV. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima vakuumskog prekidača 12 kV su znatno niži od podnosivih napona izolacije 10 kV namotaja transformatora i izolacije ostale opreme u mreži 10 kV. Takođe i strmine prenapona su niže od 75 kV/ μ s, pa ne predstavljaju opasnost za međuzavojnu izolaciju 10 kV namotaja transformatora 10kV/0,4kV, pod uslovom da nije došlo do degradacije njihove izolacije tokom eksploatacije.

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. Najviši izmereni prenapon na 35 kV priključcima transformatora pri isključenjima u toku normalnog rada iznosi 1,60 r.j., a pri isključenjima neposredno posle uključenja 2,67 r.j., što je niže od podnosivih napona njihove izolacije. Pri isključenjima kablovskog vodova 10 kV sa neopterećenim transformatorima nema ponovnih paljenja električnog luka.

4. ZAKLJUČCI

Ekperimentalna istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju vakuumskih prekidača 36 kV i 12 kV različitih proizvođača u elektrodistributivnoj mreži Kraljeva su pokazala sledeće:

- Pri uključenju i isključenju vakuumskih prekidača u ispitivanim konfiguracijama mreža dolazi do prenapona. Dolazi do pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova prekidača pri uključenju i pojave sečenja struje pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu koju prate ponovna paljenja luka takođe između kontakta njihovih polova. Najviši prenapon pri uključenju iznosi 1,76 r.j., a pri isključenju 2,67 r.j. Maksimalne strmine prenapona ne prelazile 60 kV/ μ s.
- Pojava višestrukih prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih prekidača pri uključenju postoji kod sva tri proizvođača. Broj višestrukih prethodnih paljenja električnog luka zavisi i od konfiguracije mreže koja se uključuje. Manji je kada se uključuje duži kablovski vod sa neopterećenim transformatorima.
- Pojava sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu, koju prate višestruka ponovna paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih prekidača 36 kV, je prisutna pri isključenju neopterećenih transformatora. Pri isključenju

dužeg kablovskog voda sa transformatorima vakuumskim prekidačem 12 kV nema pojave ponovnih paljenja električnog luka.

Izolacija energetske transformatora i ostale opreme u ispitanim konfiguracijama mreža 35 kV i 10 kV nije ugrožena od prenapona koji se javljaju pri uključanju i isključenju vakuumskih prekidača, pod uslovom da tokom dugogodišnje eksploatacije nije došlo do njene degradacije.

LITERATURA

- [1] "Prenaponi pri manipulacija vakuumskim prekidačem 36 kV proizvodnje Siemens u TS 110kV/35kV/10kV "Kraljevo 2"", Izveštaj br. 310815, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd, 2008, str.20.
- [2] "Prenaponi pri manipulacija vakuumskim prekidačem 36 kV proizvodnje TSN Maribor-Slovenija u TS 35kV/10kV "Vitanovac"", Izveštaj br. 310816, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd, 2008, str.20.
- [3] "Prenaponi pri manipulacija vakuumskim prekidačem 36 kV proizvodnje Tavrida Electric u TS 110kV/10kV "Kraljevo 5"", Izveštaj br. 310817, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd, 2008, str.18.

Abstract: This paper presents research data of transient overvoltages produced by vacuum circuit breakers switching of unloaded transformers and cable lines with unloaded transformers. The research was performed in 35 kV and 10 kV electrical distribution network of Kraljevo.

Key words: *overvoltages, vacuum circuit breakers, electrical distribution network*

OVERVOLTAGES PRODUCED BY 36 kV AND 12 kV VACUUM CIRCUIT BREAKERS SWITCHING IN ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK OF KRALJEVO

Petar Vukelja, Jovan Mrvic, Dejan Hrvic, Vojin Kostic
Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Belgrade