

## PRENAPONSKA ZAŠTITA TRANSFORMATORA U MREŽI 35 kV ELEKTRODISTRIBUCIJE TIVAT

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvic  
*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

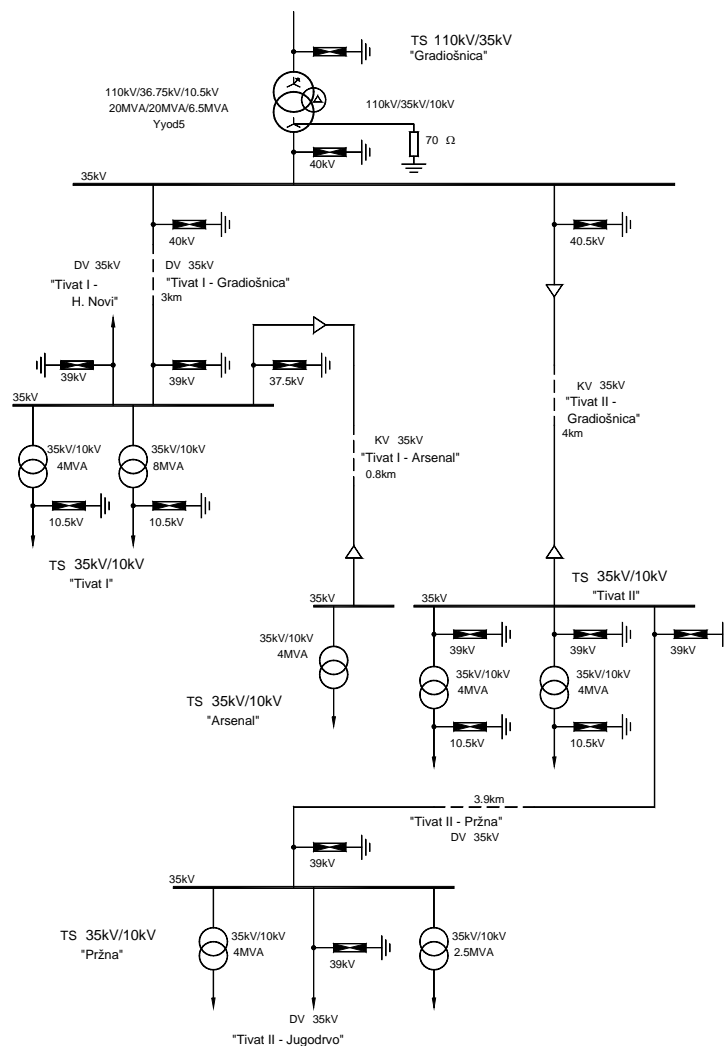
**Sadržaj:** Rad razmatra pouzdanost rada energetskih transformatora 36,75kV/10,5kV u mreži 35 kV Elektrodistribucije Tivat pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona. Razmatranja su izvršena kada su transformatori sa postojećom prenaponskom zaštitom i kada su zaštićeni odvodnicima prenapona savremenijih konstrukcija. Na osnovu analize rezultata istraživanja predložene su mere i sredstva za povećanje pouzdanosti rada energetskih transformatora u TS 35kV/10kV Elektrodistribucije Tivat pri delovanju prenapona.

**Ključne reči:** transformator/prenapon/odvodnik prenapona

### 1 UVOD

Intenzitet i čestina atmosferskih pražnjenja područja na kome se nalaze vodovi i TS 35kV/10kV Elektrodistribucije (ED) Tivat su znatni. Posledice pojave atmosferskih pražnjenja su prekidi napajanja potrošača električnom energijom, oštećenja elektroenergetske opreme, kao i povećan broj manipulacija prekidačima u TS koje dovode do pojave sklopnih prenapona. Sve ovo zahteva primenu određenih mera i sredstava da bi se štete svele na ekonomski prihvatljivu meru. Posebnu pažnju treba posvetiti zaštiti od prenapona energetskih transformatora ključnih elemenata TS. U ovom radu je razmatrana pouzdanost njihovog rada u četiri TS 35kV/10kV u mreži ED Tivat i to: TS "Tivat I", TS "Tivat II", TS "Pržna" i TS "Arsenal". Jednopolna šema mreže 35 kV ED Tivat je data na sl.1.

Mreža 35 kV ED Tivat je uzemljena preko metalnog otpornika 70  $\Omega$  postavljenog u zvezdište 36,75 kV namotaja transformatora 110kV/36,75kV/10kV u TS "Gradiošnica". Sabirnice i ostala oprema TS 35kV/10kV osim energetskih transformatora i odvodnika prenapona se nalazi u zgradi. Odvodnici prenapona sa iskrištem su postavljeni na konstrukciji zgrade na ulazu nadzemnih vodova 35 kV u zgradu. U TS "Tivat I" su odvodnici prenapona postavljeni i na ulazu u kablovski vod 35 kV "Tivat I-Arsenal", a u TS "Tivat II" na priključcima transformatora 36,75kV/10,5kV. Odvodnici prenapona su sa iskrištem naznačenog napona od 36 kV do 40 kV klase 10 kA. Nadzemni vodovi 35kV su sa gromobranskim užetom uglavnom duž cele trase osim na rasponu prvi stub-zgrada TS 35kV/10kV. Razmatranje pouzdanosti rada energetskih transformatora pri delovanju atmosferskih prenapona je izvršeno sa postojećom prenaponskom zaštitom odvodnicima prenapona i sa odvodnicima prenapona savremenijih konstrukcija.



Sl. 1. Jednopolna šema mreže 35 kV ED Tivat.

## 2 ATMOSFERSKI PRE NAPONI

### 2.1. Osnove za proračun atmosferskih prenapona

Modeli za proračun atmosferskih prenapona u TS 35kV/10kV zasnovani su na sledećem:

- Stubovi nadzemnih vodova, sabirnice u TS, gromobranska užad i fazni provodnici nadzemnih vodova i kablovski vodovi predstavljani su kao vodovi sa odgovarajućim talasnim impedansama i dužinama. Sopstvene impedanse provodnika u

vazduhu kao i impedanse stubova računate su kao u [3]. Brzina prostiranja talasa duž nadzemnih vodova je  $300\text{m}/\mu\text{s}$  i duž kablovskih vodova  $150\text{m}/\mu\text{s}$ .

- Uzemljenja stubova nadzemnih vodova predstavljena su koncentrisanom otpornošću. Temelji stubova se nalaze u tlu velike specifične otpornosti. Za otpornost njihovog uzemljenja usvojena je vrednost  $R=50\ \Omega$ .

- Energetski transformatori  $36,75\text{kV}/10,5\text{kV}$  su predstavljeni kapacitivnostima namotaja prema masi i međusobno.

- Grom je predstavljen strujnim generatorima čije su karakteristike korespondentne slučajno izabranoj struji groma. Metodom slučajnih brojeva izabrano je  $N=1000$  generatora groma iz Bergerovih krivih verovatnoća pojave amplituda i strmina struja groma [3]; za amplitude su uzete amplitude prvih komponenti, a za strmine, strmine svih komponenti jednog istog udara groma.

- Talasna impedansa kanala groma utvrđena je u zavisnosti od amplitude struje groma [2].

- Talas struje groma je predstavljen razlikom dve eksponencijalne funkcije. Maksimalna vrednost funkcije predstavlja amplitudu struje groma, a srednja vrednost strmine usponskog dela funkcije predstavlja strminu struje groma.

- Odvodnici prenapona sa iskrištem su predstavljeni  $U - I$  karakteristikom i naponom reagovanja na čelu talasa, a odvodnici prenapona bez iskrišta  $U - I$  karakteristikom.

- Preskočni naponi izolatorskih lanaca voda i izolacionih konstrukcija u TS pri atmosferskom pražnjenju su  $U_{pr}=170\ \text{kV}$ .

Kapacitivnosti opreme u TS (prekidači, rastavljači, strujni transformatori itd.) su zanemarene. Njihovo prisustvo u šemi malo bi smanjilo nivo prenapona u TS i na priključcima transformatora.

Za vrednosti podnosivih atmosferskih udarnih faznih napona ( $U_p$ ) izolacije namotaja transformatora  $36,75\text{kV}/10,5\text{kV}$  usvojene su:

-  $U_p=0,8 \cdot 170\ \text{kV}=136\ \text{kV}$  za namotaj  $36,75\ \text{kV}$ ,

-  $U_p=0,8 \cdot 75\ \text{kV}=60\ \text{kV}$  za namotaj  $10,5\ \text{kV}$ .

Standardizovani podnosivi atmosferski udarni naponi izolacije namotaja  $36,75\text{kV}$  i  $10,5\ \text{kV}$  umanjani su za 20% uvažavajući starenje izolacije transformatora.

## 2.2. Parametri pouzdanosti rada transformatora 36,75kV/10,5kV pri delovanju atmosferskih prenapona

Osnovni pokazatelji pouzdanosti rada transformatora pri delovanju atmosferskih prenapona su: rizik proboja, očekivani godišnji broj proboja i prosečni interval vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora. Rizik proboja je definisan sledećim izrazom:

$$R_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \left[ 1 - (1 - P_{v,k,i})(1 - P_{n,k,i}) \right]. \quad (1)$$

Ovde su:

$R_k$  - rizik proboja izolacije namotaja transformatora pri delovanju atmosferskih prenapona iz k-tog skupa,

$P_{v,k,i}$  - verovatnoća proboja izolacije visokonaponskog namotaja transformatora prema masi pri i-tom udaru groma koji dovodi do pojave prenapona iz k-tog skupa,

$P_{n,k,i}$  - verovatnoća proboja izolacije niženaponskog namotaja transformatora prema masi pri i-tom udaru groma koji dovodi do pojave prenapona iz k-tog skupa,

$N_k$  - broj udara groma koji dovodi do pojave prenapona iz k-tog skupa ( $N_k=1000$ ).

Verovatnoće proboja izolacije pri i-tom udaru groma, koji dovodi do pojave prenapona iz k-tog skupa, su utvrđene iz izraza:

$$P_{k,i} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{U_{k,i}} e^{-\frac{(U-U_{50})^2}{2\sigma^2}} dU. \quad (2)$$

Ovde su:

$U_{50}$  - 50% probojni napon fazne izolacije namotaja transformatora,

$\sigma$  - standardno odstupanje; za atmosferske prenapone  $\sigma=0,05 U_{50}$ ,

$U_{k,i}$  - maksimalna vrednost prenapona iz k-tog skupa na posmatranoj faznoj izolaciji pri i-tom udaru groma.

Vrednosti  $U_{50}$  su utvrđene iz sledećeg izraza:

$$U_{50} = \frac{U_p}{1-1.282\sigma'}. \quad (3)$$

Ovde su:

$U_p$  - podnosivi udarni napon izolacije,

$\sigma'$  - standardno odstupanje svedeno na  $U_{50}$  ( $\sigma'=0,05$ ).

Očekivani godišnji broj proboja ( $N_a$ ) izolacije namotaja transformatora u TS pri delovanju atmosferskih prenapona se definiše sledećim izrazom:

$$N_a = \sum_{m=1}^v N_{a,m}, \quad (4)$$

a prosečni interval vremena između dva uzastopna proboja ( $T_a$ ) sledećim izrazom:

$$T_a = \frac{1}{N_a} = \frac{1}{\sum_{m=1}^v N_{a,m}}. \quad (5)$$

Ovde su:

$N_{a,m}$  - očekivani godišnji broj proboja izolacije namotaja transformatora pri dolasku atmosferskih prenapona m-tim vodom u razmatranu TS,

$v$  - broj vodova kojim atmosferski talasi dolaze u TS.

Očekivani godišnji broj proboja izolacije namotaja transformatora 36,75kV/10,5kV pri dolasku atmosferskih prenapona m-tim vodom u TS 35kV/10kV definiše se sledećim izrazom:

$$N_{a,m} = N_g \sum_j (S_{s,m,j} R_{s,m,j} + S_{gu,m,j} R_{gu,m,j} + S_{f,m,j} R_{f,m,j} + S_{i,m,j} R_{i,m,j}). \quad (6)$$

Ovde su:

$N_g$  - godišnji broj udara groma na 1 km<sup>2</sup> (usvojeno  $N_g = 5,2$  1/km<sup>2</sup> - podatak iz izokerauničke karte SR Jugoslavije),

$S_{s,m,j}$  - ekvivalentna prihvatna površina j-tog stuba m-tog voda,

$S_{gu,m,j}$  - ekvivalentna prihvatna površina gromobranskog užeta j-tog raspona m-tog voda,

$S_{f,m,j}$  - ekvivalentna prihvatna površina faznih provodnika j-tog raspona m-tog voda,

$S_{i,m,j}$  - površina sa obe strane j-tog raspona m-tog voda na kojoj udari groma mogu da generišu indukovane prenapone na vodu visine iznad preskočnih napona izolatorskih lanaca,

$R_{i,m,j}$  - rizik proboja izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u okolinu j-tog raspona m-tog voda,

$R_{s,m,j}$  - rizik proboja izolacije namotaja transformatori pri udaru groma u j-ti stub m-tog voda,

$R_{gu,m,j}$  - rizik proboja izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u gromobransko uže j-tog raspona m-tog voda,

$R_{f,m,j}$  - rizik proboja izolacije namotaja transformatora pri udaru groma u fazni provodnik j-tog raspona m-tog voda.

Površina sa obe strane j-tog raspona m-tog voda na kojoj udari groma mogu da generišu indukovane prenapone na vodu visine iznad preskočnih napona izolatorskih lanaca nalazi se iz sledećeg izraza:

- na j-tom rasponu m-tog voda prisutno gromobransko uže:

$$S_{i,m,j} = 2(0,5 - 3h_{gu,m,j})l_{m,j} \quad [km^2], \quad (7)$$

- na j-tom rasponu m-tog voda nema gromobranskog užeta:

$$S_{i,m,j} = 2(0,5 - 3h_{f,m,j})l_{m,j} \quad [km^2], \quad (8)$$

a ekvivalentne prihvatne površine gromobranskog užeta j-tog raspona ( $S_{gu,m,j}$ ) i faznog provodnika j-tog raspona ( $S_{f,m,j}$ ) m-tog voda se nalaze iz izraza:

$$S_{gu,m,j} = 6(l_{m,j} - 2h_{s,m,j})h_{gu,m,j} \quad [km^2], \quad (9)$$

$$S_{f,m,j} = 6(l_{m,j} - 2h_{s,m,j})h_{f,m,j} \quad [km^2] . \quad (10)$$

Ovde su:

$h_{s,m,j}$  - visina stubova na j-tom rasponu m-tog voda u kilometrima,

$l_{m,j}$  - dužina j-tog raspona m-tog voda u kilometrima,

$h_{f,m,j}$  - prosečna visina faznog provodnika j-tog raspona m-tog voda u kilometrima,

$h_{gu,m,j}$  - prosečna visina gromobranskog užeta j-tog raspona m-tog voda u kilometrima.

Ekvivalentna prihvatna površina j-tog stuba m-tog voda se nalazi iz izraza:

$$S_{s,m,j} = 2h_{s,m,j} \cdot 6h_{s,m,j} = 12h_{s,m,j}^2 \quad [km^2] . \quad (11)$$

$h_{s,m,j}$  - visina j-tog stuba m-tog voda u kilometrima.

Pouzdanost rada energetskih transformatora u njihovom životnom veku mora da bude velika; smatra se da je za transformatore visokih napona i velikih snaga zadovoljavajuća pouzdanost od 95% [5,6]. Sa ovom pouzdanošću se očekuje da tokom određenog perioda, obično tokom celog životnog veka transformatora, neće doći do proboja njegove izolacije. Za vek transformatora od 30 god., pod pretpostavkom da je pouzdanost njegovog rada 95%, prosečni interval vremena između dva uzastopna proboja treba da je  $T \approx 600$  godina.

Za transformatore manjih snaga i nižih napona može se prihvatiti i pouzdanost od 85% do 90%. Sa pretpostavkom ovakve pouzdanosti njihovog rada u životnom veku od 30 god. prosečni interval vremena između dva uzastopna proboja treba da je:  $T_p = 185 - 285$  god.

### 2.3. Proračun parametara pouzdanosti rada transformatora 36,75kV/10,5kV pri delovanju atmosferskih prenapona

Transformatori 36,75kV/10,5kV u TS ED Tivat su izloženi delovanju sledećih skupova prenapona:

- skupu prenapona pri udaru groma u gromobrasku užad nadzemnih vodova 35 kV koji ulaze u TS 35kV/10kV,
- skupu prenapona pri udaru groma u fazne provodnike nadzemnih vodova 35 kV koji ulaze u TS 35kV/10kV,
- skupu prenapona pri udaru groma u stubove nadzemnih vodova 35 kV koji ulaze u TS 35kV/10kV,
- skupu prenapona pri udaru groma u neposrednu blizinu nadzemnih vodova 35 kV koji ulaze u TS 35kV/10kV (indukovani prenaponi).

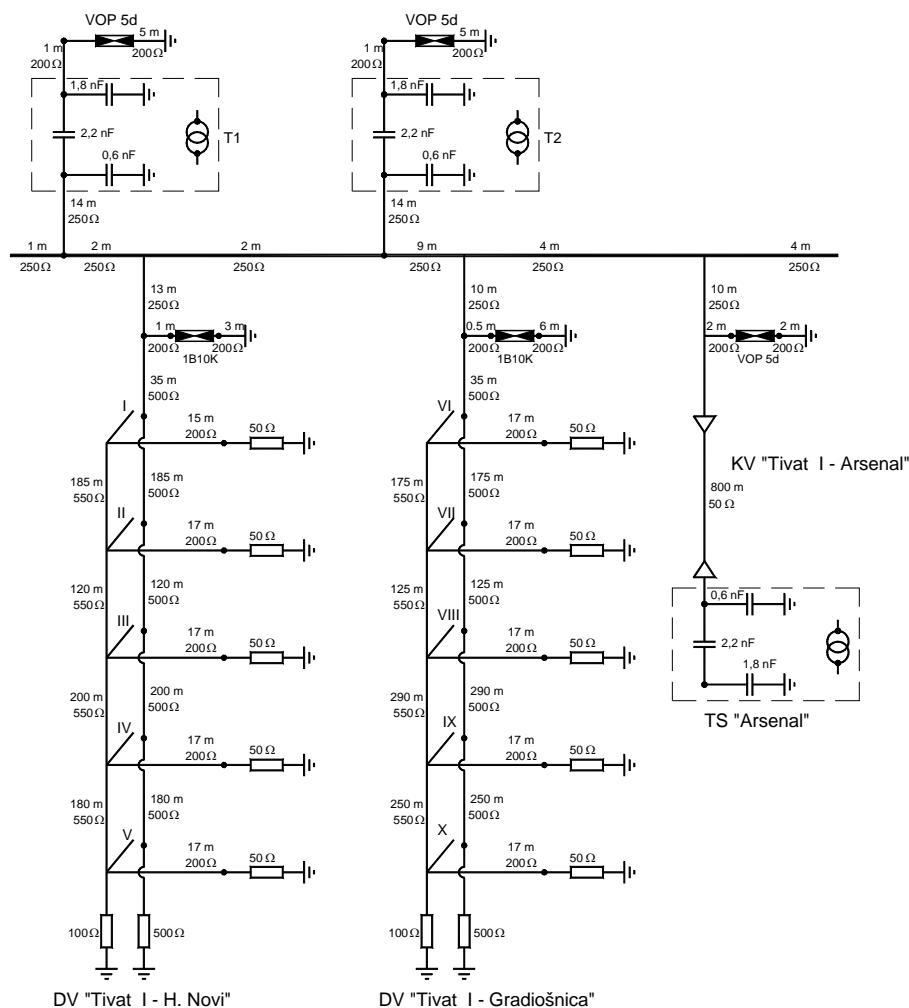
Svi navedeni skupovi prenapona su razmatrani na 35 kV i 10 kV izolaciji namotaja transformatora u svim TS 35kV/10kV ED Tivat.

Svaka TS je modelovana u skladu sa izloženim u delu 2.1 ovog rada. Na sl.2 pokazana je primera radi šema za proračun prenapona u TS 35kV/10kV "Tivat I" i "Arsenal" pri atmosferskom pražnjenju.

Za proračun prenapona korišćen je programski paket EMTP-ATP.

Proračuni prenapona u svim TS 35kV/10kV su izvršeni za tri varijante prenaponske zaštite i to:

- TS zaštićene postojećim odvodnicima prenapona sa iskrištem,
- TS zaštićene savremenim konstrukcijama odvodnika prenapona sa iskrištem sa boljim zaštitnim karakteristikama od postojećih,
- TS zaštićene odvodnicima prenapona bez iskrišta.



Sl. 2. Jednopolna šema za proračun atmosferskih pražnjena u TS 35kV/10kV "Tivat I" i "Arsenal".

Za odvodnike prenapona sa iskrištem savremenih konstrukcija izabrani su odvodnici sa elektromagnetnim gašenjem luka domaće proizvodnje naznačenog napona 40 kV. Kao odvodnici prenapona bez iskrišta izabrani su takođe odvodnici domaće proizvodnje. U mreži ED Tivat zemljospoj se isključuje za 2s, te su izabrani odvodnici bez iskrišta naznačenog napona 34 kV; izuzetak su odvodnici na ulasku 35 kV voda "Tivat I-H.Novi" u zgradu TS "Tivat I" i na ulasku 35 kV voda "Pržna-Jugodravo" u zgradu TS "Pržna"; to su odvodnici bez iskrišta naznačenog napona 46 kV. Preko ovih

vodova se u određenim slučajevima kvara u 35 kV mreži ED Tivat napajaju TS “Tivat I” i TS “Pržna” i to TS”Tivat I” iz mreže 35 kV ED Herceg Novi i TS”Pržna” iz mreže ED Budva. Mreže ED H.Novi i ED Budva su sa izolovanom neutralnom tačkom u kojima rukovalac u TS isključuje vod na kome je signalisana pojava zemljospoja.

Primenjeno je po 1000 slučajno izabranih struja groma u stubove nadzemnih vodova, ravnomerno duž gromobranskog užeta na rasponu između dva stuba, ravnomerno u fazne provodnike na rasponu gde nema gromobranskog užeta i ravnomerno u neposrednu blizinu nadzemnih vodova. Za svaki udar groma izračunati su naponi na izolaciji razmatranih TS, kao i na izolaciji namotaja transformatora. Na osnovu izračunatih prenapona utvrđene su verovatnoće proboja izolacije namotaja transformatora iz izraza (2) i na osnovu njih rizici proboja iz izraza (1).

Tako su za svaki transformator u TS 35kV/10kV određeni sledeći rizici proboja njegove izolacije:

- rizici pri udaru groma u stubove nadzemnog voda: rizik pri udaru groma u prvi stub, rizik pri udaru groma u drugi stub itd.
- rizici pri udaru groma u gromobransku užad ravnomerno na rasponu: prvi stub-drugi stub, drugi stub-treći stub itd.
- rizici pri udaru groma u fazne provodnike ravnomerno na rasponu: zgrada TS - prvi stub, prvi stub - drugi stub, itd.
- rizici pri udaru groma ravnomerno u neposrednu blizinu voda na deonicama: zgrada TS - prvi stub, prvi stub - drugi stub, itd.

Prenaponi na nadzemnim vodovima pri udaru groma u neposrednu njihovu blizinu (indukovani prenaponi) su računati na pojednostavljen način iz izraza:

$$U_{in} = 30 \frac{h}{b} I \quad [kV]. \quad (12)$$

Ovde su:

- $h(m)$  - srednja visina faznih provodnika iznad zemlje,
- $b(m)$  - najmanje rastojanje od tačke udara groma do voda,
- $I(kA)$  - amplituda struje groma.

Indukovani prenaponi su relativno velikih strmina i kratkog trajanja tako da pri preskoku na izolatorskom lancu voda praktično u velikom broju slučajeva postaju bezopasni za izolaciju ostalih elemenata pri svom daljem kretanju. Proračun je izvršen primenom naponskih talasa amplitude definisane izrazom (12), vremena čela 1  $\mu s$  i začelja 5  $\mu s$  u fazne provodnike voda na posmatranim deonicama.

Na osnovu utvrđenih rizika preskoka izračunati su iz izraza (4) očekivani godišnji brojevi proboja i iz izraza (5) prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 36,75kV/10,5kV u razmatranim TS. Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora 36,75kV/10,5kV su se kretali od nekoliko godina do preko 500 godina. Pouzdanost rada transformatora 36,75kV/10,5kV sa postojećom prenaponskom zaštitom je zadovoljavajuća samo u TS “Tivat II”, jer su u njoj, pored odvodnika prenapona na ulazu nadzemnih vodova u zgradu, postavljeni odvodnici prenapona za zaštitu izolacije namotaja transformatora. Montirani su na konstrukciji zgrade između zemlje i faznih provodnika koji povezuju transformator sa sabirnicama 35 kV u zgradi. Korišćenjem odvodnika prenapona bez iskrišta ili odvodnika prenapona sa iskrištem boljih zaštitnih karakteristika od postojećih još bi se povećala pouzdanost rada transformatora u TS



“Tivat II”. Pouzdanost rada transformatora sa postojećom prenaponskom zaštitom u ostalim TS 35kV/10kV je nezadovoljavajuća. U slučaju napajanja TS “Tivat I” 35 kV kablovskim vodom “Gradiošnica - Tivat I”, umesto nadzemnog voda, pouzdanost rada transformatora u 36,75kV/10,5kV je zadovoljavajuća; kablovski vod je postavljen i može se koristiti. Zamenom postojećih odvodnika prenapona sa odvodnicima prenapona sa iskrištem boljih zaštitnih karakteristika ili sa odvodnicima prenapona bez iskrišta, pouzdanost rada transformatora u TS 35 kV/10kV: “Tivat I”, “Arsenal” i “Pržna” se povećava, ali je i dalje nezadovoljavajuća.

U toku istraživanja uočeno je da se pouzdanost rada transformatora povećava kada se primene sledeće mere i sredstva:

- smanjenje otpornosti uzemljenja prva 3 ili 4 stuba od ulaza nadzemnih vodova u zgradu TS,
- postavljanje gromobranskog užeta na nadzemnim vodovima na rasponu prvi stub-zgrada TS, naročito kada je taj raspon veliki,
- skraćenje dužina provodnih veza odvodnik prenapona - fazni provodnik i odvodnik prenapona-uzemljenje TS,
- postavljanje odvodnika prenapona sa boljim zaštitnim karakteristikama.

### 3 SKLOPNI PRENAPONI

Transformatori 36,75kV/10,5kV ED Tivat izloženi su delovanju većeg broja skupova sklopnih prenapona. Razmatranja su izvršena za uticajne skupove sklopnih prenapona (prenaponi u tim skupovima imaju veću čestinu pojavljivanja i veće amplitude). To su skupovi prenapona pri uključenju transformatora i vodova i pri pojavi zemljospoja. Skupovi prenapona pri isključenju smatrani su kao neuticajni. Time je pretpostavljeno da prekidači 35 kV pri isključenju ne prekidaju struje pre prolaska kroz prirodnu nulu i da nema pojave ponovnih nastajanja električnog luka.

Podloge na osnovu kojih je formirana šema za proračun i izvršen proračun sklopnih prenapona u 35 kV mreži ED Tivat su sledeće:

- Nadzemni i kablovski vodovi 35 kV su predstavljeni preko dužina, talasnih impedansi i brzina prostiranja talasa za direktni i nulti redosled.

- Mreža 110 kV u TS 110kV/35kV “Gradiošnica” je ekvivalentirana Tevenenovim generatorom naizmeničnog napona i odgovarajućim impedansama. Oni su određeni na osnovu podataka o impedansama i strujama kratkog spoja u TS “Gradiošnica”.

- Izvedeno je po 50 operacija uključenja prekidača 35 kV neopterećenih transformatora 36,75kV/10,5kV u TS: “Tivat I”, “Tivat II”, “Arsenal” i “Pržna” za utvrđivanje skupova prenapona na izolaciji namotaja transformatora. Takođe je izvedeno po 50 operacija uključenja: neopterećenog kablovskog voda 35 kV “Tivat I-Arsenal” prekidačem 35 kV u TS “Tivat I”, neopterećenog kablovskog voda 35 kV “Gradiošnica-Tivat II” prekidačem 35 kV u TS “Gradiošnica”, neopterećenog nadzemnog voda 35 kV “Tivat II - Pržna” prekidačem 35 kV u TS “Tivat II”. Metodom slučajnih brojeva iz pretpostavljene normalne raspodele vremena uključenja polova prekidača 35 kV birana su vremena uključenja. Srednje vreme uključenja je bio trenutak maksimuma jednog od faznih napona mreže 35 kV. Kao standardno odstupanje vremena uključenja polova prekidača usvojeno je  $\sigma=1,8$  ms.

- Izvedeno je po 50 operacija uspostavljanja zemljospoja na jednoj od faza kablovskih vodova 35 kV “Tivat I-Arsenal” i “Gradiošnica-Tivat II” i na jednoj od faza nadzemnih vodova 35 kV “Gradiošnica-Tivat I” i “Tivat II - Pržna”. Zemljospoj je uspostavljan na početku, sredini i kraju voda. Metodom slučajnih brojeva koristeći ravnomernu raspodelu biran je trenutak pojave zemljospoja na odabranoj fazi.

- Energetski transformatori 110kV/36,75kV/10kV u TS "Gradiošnica" i 36,75kV/10,5kV u TS: "Tivat I", "Tivat II", "Pržna" i "Arsenal" su predstavljeni matricom impedansi dobijenom na osnovu podataka o transformatorima (snaga, odnos transformacije, struja praznog hoda, napon kratkog spoja, kriva magnećenja) i kapacitivnostima namotaja prema masi.

- Odvodnici prenapona sa iskrištem predstavljeni su kao i u proračunu atmosferskih prenapona.

- Odvodnici prenapona bez iskrišta predstavljeni su U - I karakteristikom za sklopne talase.

Usvojene su sledeće vrednosti 50% probojnih sklopnih udarnih faznih napona izolacije namotaja transformatora 36,75kV/10,5kV:

- 50% probojni sklopni udarni napon fazne izolacije namotaja 36,75 kV:

$$U_{50} = 0,8 \times 0,9 \times U_{p,n} \sqrt{2} (1 + 3\sigma'),$$

$$U_{p,n} = 70kV - \text{nazivni kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije};$$

$$\sigma' = 0,08 - \text{standardno odstupanje svedeno na napon } U_{p,n};$$

- 50% probojni sklopni udarni napon fazne izolacije namotaja 10,5 kV:

$$U_{50} = 0,8 \times 0,9 \times U_{p,n} \sqrt{2} (1 + 3\sigma'),$$

$U_{p,n} = 28kV$  - nazivni kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije namotaja 10 kV;

$$\sigma' = 0,08 - \text{standardno odstupanje svedeno na napon } U_{p,n}.$$

Podnosivi sklopni udarni naponi, koje propisi za koordinaciju izolacije ne definišu, su utvrđeni iz standardizovanih nazivnih kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije uzimajući njihovu temenu vrednost umanjenu za 10% kao podnosivi napon sa verovatnoćom proboja 0,00135. To je napon niži od 50% probojnog napona za približno trostruko standardno odstupanje. Kao i podnosivi atmosferski udarni naponi, podnosivi sklopni udarni naponi su umanjeni za 20% uvažavajući starenje izolacije.

Za proračun prenapona korišćen je programski paket EMTP-ATP.

Izvođenjem po 50 operacija uključenja neopterećenih transformatora 36,75kV/10,5kV u TS: "Tivat I", "Tivat II", "Pržna" i "Arsenal" prekidačima 35 kV utvrđeni su prenaponi na izolaciji 36,75 kV i 10,5 kV namotaja transformatora. Na osnovu utvrđenih prenapona ustanovljeni su rizici proboja izolacije namotaja transformatora iz sledećeg izraza:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ 1 - [1 - P_{o,i}(u_{o,i})] [1 - P_{4,i}(u_{4,i})] [1 - P_{8,i}(u_{8,i})] \times (13) \\ \times [1 - P_{a,i}(u_{a,i})] [1 - P_{b,i}(u_{b,i})] [1 - P_{c,i}(u_{c,i})] \}$$

Ovde su:

$P_{o,i}(u_{o,i}), P_{4,i}(u_{4,i}), P_{8,i}(u_{8,i})$  - verovatnoće proboja izolacije faza 0,4 i 8 36,75 kV namotaja transformatora pri i-toj operaciji uključenju utvrđene iz izraza (2) za prenapone  $u_{o,i}, u_{4,i}$  i  $u_{8,i}$  (u izrazu (2)  $\sigma = 0.08 U_{50}$ ),

$P_{a,i}(u_{a,i}), P_{b,i}(u_{b,i}), P_{c,i}(u_{c,i})$  - verovatnoće proboja izolacije faza a,b i c 10,5kV namotaja transformatora pri i-toj operaciji uključenja utvrđene iz izraza (2) za prenapone  $u_{a,i}, u_{b,i}$  i  $u_{c,i}$ , (u izrazu (2)  $\sigma = 0.08 U_{50}$ ),

N- broj operacija uključenja neopterećenog transformatora u razmatranoj TS (N=50).

Parametri pouzdanosti se određuju na sličan način kao za atmosferske prenapone iz izraza (4) i (5).

Za sve razmatrane transformatore rizici proboja izolacije su  $R < 10^{-5}$ . Pod pretpostavkom da se očekuje godišnje po 10 operacija uključenja neopterećenog transformatora vremenski intervali između dva uzastopna proboja pri ovim manipulacijama su  $T_s > 10^4$  godina. Najviši utvrđeni prenaponi na izolaciji namotaja transformatora ne prolaze vrednost  $2,3 U_{f,n}$  ( $U_{f,n}$ -temena vrednost faznog napona u normalnom režimu rada).

Na sličan način kao za uključenja neopterećenih transformatora utvrđeni su rizici proboja izolacije transformatora pri uključenju neopterećenih vodova u mreži 35 kV ED Tivat. Najviši utvrđeni prenaponi na izolaciji namotaja transformatora nisu prelazili  $1,5 U_{f,n}$  i rizici proboja su bili  $R < 10^{-6}$ . Pod pretpostavkom 10 uključenja po vodu godišnje vremenski interval između dva uzastopna proboja pri ovim manipulacijama je  $T_s > 10^4$  godina.

Izvođenjem po 50 operacija uspostavljanja zemljsopoja na jednoj od faza 35 kV kablovskih nadzemnih vodova ED Tivat na početku, sredini i kraju vodova ustanovljeni su prenaponi na izolacijama namotaja transformatora i iz izraza (13) rizik proboja njihove izolacije. U ovom izrazu N predstavlja broj izvedenih zemljsopojeva (N=50). Za sve razmatrane transformatore rizici proboja njihove izolacije su  $R < 10^{-6}$ . Neznatne razlike u visini prenapona se javljaju u zavisnosti od mesta zemljsopoja na vodu. Najviši utvrđeni prenaponi na izolaciji namotaja transformatora nisu prelazili vrednost  $2 U_{f,n}$ . Pod pretpostavkom da se u mreži ED Tivat pojavi 10 zemljsopojeva godišnje intervali između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora su  $T_s > 10^5$  godina.

Postojeći odvodnici prenapona sa iskrištem kao i odvodnici sa iskrištem savremenih konstrukcija u TS 35kV/10kV ED Tivat ne reaguju na prenapone pri razmatranim operacijama uključenja neopterećenih transformatora i neopterećenih kablovskih i nadzemnih vodova, kao i na prenapone pri pojavi zemljsopoja, jer su niži od napona reagovanja odvodnika prenapona. Postavljanjem, umesto postojećih odvodnika prenapona, odvodnika prenapona bez iskrišta naznačenih napona 34 kV i 46 kV stanje se praktično ne menja. Dejstvo ovih odvodnika se ne oseća, jer prema zaštitnim karakteristikama oni počinju da deluju tek za prenapone iznad dvostruke temene vrednosti faznih napona.

#### 4 POUZDANOST RADA TRANSFORMATORA PRI DELOVANJU ATMOSFERSKIH I SKLOPNIH PRENAPONA

Prosečni vremenski intervali između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora pri delovanju sklopnih ( $T_s$ ) i atmosferskih ( $T_a$ ) prenapona se dobijaju iz sledećeg izraza:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_a}} = \frac{T_a T_s}{T_a + T_s} \quad (14)$$

Prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora u mreži 35kV ED Tivat pri delovanju atmosferskih prenapona su znatno manji nego pri delovanju sklopnih prenapona  $T_a \ll T_s$  (više od hiljadu puta manji i sa najkvalitetnijom zaštitom odvodnicima prenapona). Tako prosečni intervali vremena između dva uzastopna proboja izolacije namotaja transformatora pri delovanju sklopnih i atmosferskih prenapona prema izrazu (14) se svode na prosečne intervale vremena između dva uzastopna proboja pri delovanju samo atmosferskih prenapona ( $T \approx T_a$ )

#### 5 ZAKLJUČCI

Na osnovu analize rezultata istraživanja atmosferskih i sklopnih prenapona i analize prenaponske zaštite u mreži 35 kV ED Tivat može se zaključiti sledeće:

Postojeća prenaponska zaštita u TS 35kV/10kV "Tivat I" u sadašnjoj konfiguraciji mreže 35 kV (sabirnice 35 kV sa transformatorima 36,75kV/10,5kV T1 i T2, nadzemnim vodom "Gradiošnica-Tivat I" i kablovskim vodom "Tivat I-Arsenal", sa ili bez nadzemnog voda "Tivat I-H.Novi") nedovoljno štiti izolaciju 36,75 kV namotaja transformatora T1 i T2 od atmosferskih prenapona. Potrebno je postaviti odvodnike prenapona između faznih provodnika i uzemljenja TS što bliže 36,75 kV priključcima transformatora T1 i T2 i poželjno je postaviti odvodnike prenapona između faznih provodnika i uzemljenja na kraju 35 kV kablovskog voda u TS "Arsenal". Odvodnici prenapona mogu da budu sa ili bez iskrišta. Naznačeni napon odvodnika prenapona sa iskrištem ne treba da bude niži od 38 kV, a naznačeni napon odvodnika bez iskrišta ne niži od 46 kV. Uvođenjem kablovskog voda "Gradiošnica-Tivat I" umesto nadzemnog, nema potrebe za zaštitom odvodnicima prenapona transformatora T1 i T2 u TS "Tivat I", niti potrebe za zaštitom odvodnicima prenapona na kraju 35 kV kablovskog voda u TS "Arsenal".

Zaštita postojećim odvodnicima prenapona TS "Tivat II" je zadovoljavajuća. Energetski transformatori 36,75kV/10,5kV su adekvatno zaštićeni. Naravno, pouzdanost rada bi se povećala kada bi se umesto postojećih odvodnika prenapona postavili odvodnici prenapona sa boljim zaštitnim karakteristikama (npr. metaloksidni odvodnici prenapona naznačenog napona 34 kV).

Postojeća prenaponska zaštita odvodnicima prenapona u TS 35kV/10kV "Pržna" nije zadovoljavajuća za izolaciju transformatora 36,75kV/10,5kV. Zamenom postojećih odvodnicima boljih zaštitnih karakteristika povećala bi se pouzdanost rada transformatora, ali ne bi bila zadovoljavajuća. Potrebno je postaviti odvodnike prenapona između faznih provodnika i uzemljenja TS što bliže 35 kV priključcima transformatora. Odvodnici prenapona mogu da budu sa ili bez iskrišta. Naznačeni napon

odvodnika prenapona sa iskrištem ne treba da bude niži od 38 kV, a naznačeni napon odvodnika bez iskrišta ne niži od 46 kV.

Za pouzdaniji rad mreže 35 kV ED Tivat potrebno je izvršiti kontrolu odvodnika prenapona u TS: "Tivat I", "Tivat II" i "Pržna" zbog moguće degradacije njihovih zaštitnih karakteristika tokom eksploatacije. Potrebno je utvrditi njihove minimalne naizmenične napone reagovanja (treba da budu viši od  $1,5 U_r$ ;  $U_r$  - naznačeni napon odvodnika) i minimalne 100% udarne napone reagovanja za talas 1,2/50.

## LITERATURA

- [1] P. Vukelja, J. Mrvić i dr. "Prenaponska zaštita u mreži 35 kV Distribucije Tivat", *Studija br. 319712, Elektrotehnički Institut "N.Tesla"*, Beograd 1997, str.47
- [2] Z. Zdravković, P. Vukelja, M. Savić i dr. "Tehnički i ekonomski aspekti izgradnje i eksploatacije dalekovoda sa redukovanom gromobranskom zaštitom", *Studija br. 328801, Elektrotehnički institut "N.Tesla"*, Beograd 1988, str.201
- [3] K. Berger, "Actual knowledge on lightning research and lightning protection", *15th European Conference on Lightning Protection*. Uppsala, June 23-29, 1979
- [4] P. Vukelja, J. Mrvić, P. Vukotić, "Pouzdanost rada transformatora 36,75kV/10,5kV u TS 35kV/10kV "Tivat I" pri atmosferskom pražnjenju", *Prvo jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama JUKO-CIRED*, R-210, Zlatibor, 5-8 oktobar 1998, str.7
- [5] Z. Zdravković, P. Vukelja i dr: "Koordinacija izolacije postrojenja i sistema visokonaponskih objekata", *Studija br. 319703, Elektrotehnički institut "N.Tesla"*, Beograd 1997, str.273
- [6] J. Panek, P.F. Albrecht, H. Elahi: "Design criteria for lightning protection of HV substations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.7, No 2, April 1992, pp 489-498

**Abstract:** In this paper consideration is given to the reliability of 36,75kV/10,5kV power transformers performance in the 35 kV network of Tivat, when subjected to lightning and switching impulse overvoltages. Considerations are carried out for the cases when transformers are with their overvoltage protection and when protected by lightning arresters of more contemporary construction. On the basis of investigation results analysis, recommended are the measures and means to increase performance reliability of power transformers in the 35kV/10kV substation of Tivat.

## OVERVOLTAGE PROTECTION OF POWER TRANSFORMERS IN 35 KV DISTRIBUTION NETWORK OF TIVAT.

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvic

