

PRENAPONI I KOORDINACIJA IZOLACIJA

Zlatoje Zdravković, dipl.ing.

Od početka svoga rada Institut "Nikola Tesla" se bavi razvojem metoda istraživanja, proračuna i analiza fenomena na objektima visokih napona koji su usmereni na tranzijentne procese napona i struja u mreži elektroprivrede, prvenstveno radi rešavanja problema iz oblasti prenapona i koordinacije izolacije. U okviru koordinacije izolacija proučavani su problemi izbora dielektričnih čvrstoća izolacije objekata visokih napona, odnosno njihovih odgovarajućih podnosivih napona s obzirom na naprezanja uslovljena naponima i prenaponima koji se javljaju u mrežama u toku eksploatacije i s obzirom na potrebnu pouzdanost njihovog rada i efekta primenjenih zaštitnih mera i sredstava. Ciljevi istraživanja su bili da se izbor izolacija opreme, postrojenja i vodova, kao i izbor zaštitnih mera i sredstava za ograničenje prenapona, u uslovima rada i očekivanih naponskih i prenaponskih naprezanja, izvrši tako, da se verovatnoće preskoka i oštećenja izolacije kao i prekida kontinuiteta rada, svedu na ekonomski i tehnički prihvatljive veličine. Razvijena je nova metoda za proračun rizika razornih pražnjenja pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona, kao i metoda proračuna rizika razornih pražnjenja pri delovanju trajnih radnih napona i privremenih prenapona. Izvršen je veliki broj proračuna i analiza u cilju sagledavanja koordinacije izolacije postojećih i novih objekata visokih napona. Izvršena su brojna razmatranja i analize gromobranske i prenaponske zaštite objekata i opreme. Posebna pažnja je posvećena izboru odvodnika prenapona kao najefikasnijem sredstvu ograničenja prenapona i redukcije rizika razornog pražnjenja na sistemu izolacija mreže.

U cilju sagledavanja realnog stanja naponskih i strujnih pojava u mrežama visokih napona izvršen je veliki broj eksperimentalnih istraživanja. Prethodno su u Institutu razvijeni i realizovani naponski i strujni merni sistemi za ova istraživanja. Razvijen je i realizovan veći broj kapacitivnih i mešovutih delila napona vrhunskog kvaliteta pomoću kojih su sa velikom tačnošću mereni udarni, tranzijentni i naizmernični naponi. Sa tako realizovanim delilima napona vršena su istraživanja naponskih i prenaponskih pojava u mrežama visokih napona 6 kV, 10 kV, 35 kV, 110 kV 220 kV i 400 kV. Za određena dugotrajna istraživanja razvijeni su specijalni naponski merni sistemi na bazi provodnih izolatora energetskih transformatora; isti su korišćeni za istraživanja sklopnih prenapona na priključcima transformatora.

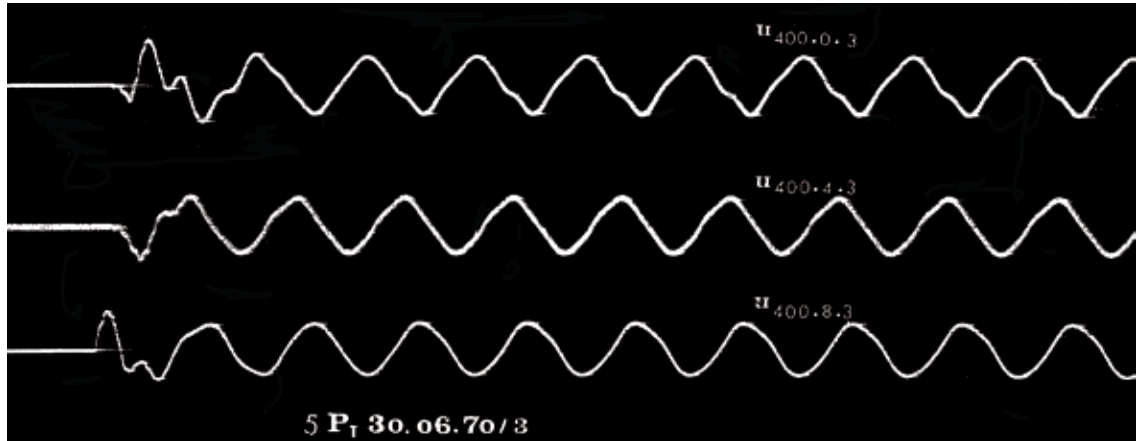
Strujni merni sistemi su formirani na bazi postojećih strujnih transformatora u mrežama u kojima su vršena istraživanja priključivanjem šantova u njihova niskonaponska kola, a kasnije umesto šantova direktnim priključenjem tranzijent rikordera.

Prva eksperimentalna istraživanja prenapona i struja pri sklopnim operacijama prekidača su izvršena 1966 godine. Istraživani su prenaponi pri uključenju i isključenju kondenzatorskih baterija 35 kV. Prva obimna istraživanja prenapona i struja u prelaznim režimima u mrežama visokih napona izvršena su 1970 i 1971 godine pre puštanja prvog dela

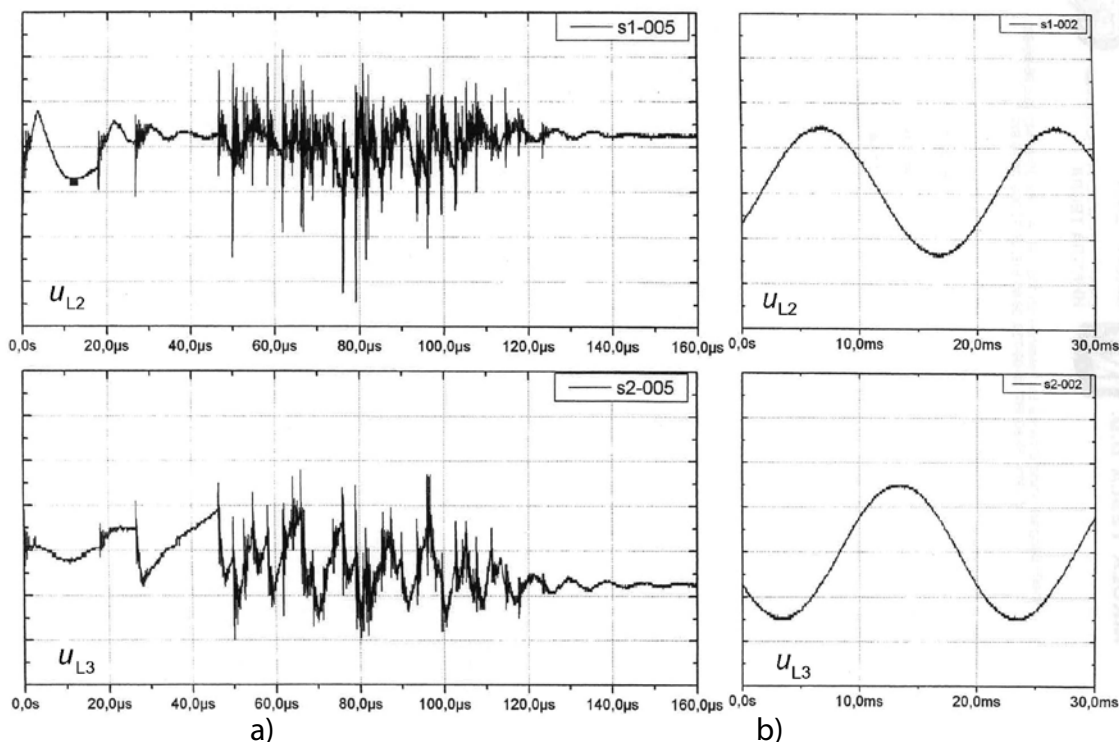
sadašnjemreže 400 kV u Srbiji, odnosno elektroprenosa „Đerdap - Beograd 8“. Istraživani su naponski i strujni procesi pri uključenju i isključenju neopterećenog nadzemnog voda 400 kV „Đerdap - Beograd 8“ prekidačima u HE „Đerdap“ i TS „Beograd 8“, pri uključenju i isključenju neopterećenih transformatora u HE „Đerdap“ i autotransformatora u TS „Beograd 8“ i pri uspostavljanju i isključenju zemljospoja na vodu. U jednom delu istraživanja učestvovao je Institut EGU iz Brna.

Na slici 1. dat jedan od karakterističnih snimaka prelaznih faznih napona na kraju neopterećenog nadzemnog voda 400 kV „Beograd 8-Đerdap“ pri njegovom uključenju prekidačem 400 kV u TS „Beograd 8“.

Slika 1.
Prelazni fazni naponi $u_{400.8.3}$, $u_{400.4.3}$ i $u_{400.0.3}$ na kraju neopterećenog nadzemnog voda 400 kV „Beograd 8-Đerdap“ u HE „Đerdap“ pri njegovom uključenju prekidačem 400 kV u TS „Beograd 8“.

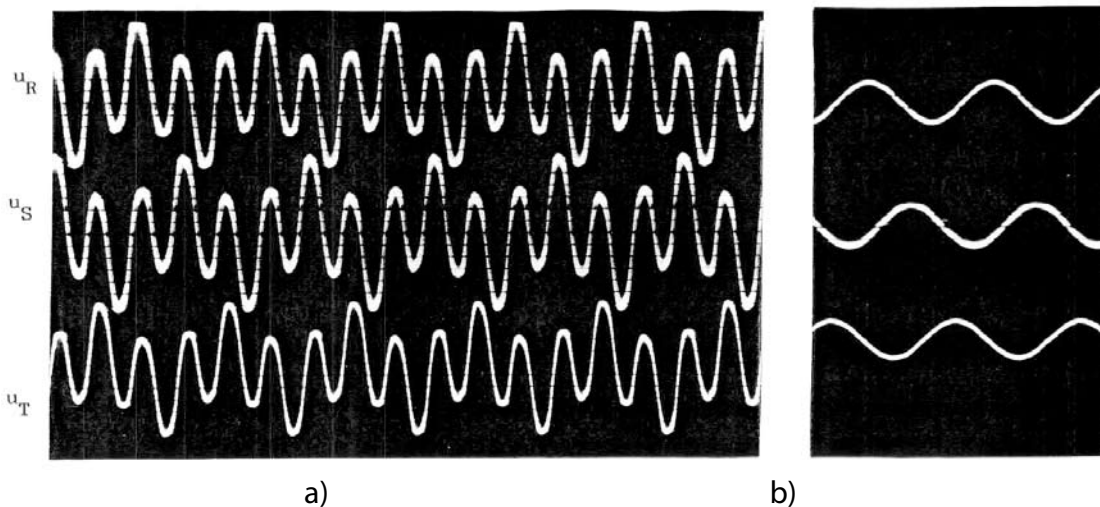


Posle ovih sledila su obimna istraživanja prenapona i struja pri sklopnim operacijama prekidača 400 kV i pri uspostavljanju i isključenju zemljospoja na elektroprenosima 400 kV: „Niš – Kragujevac“, „TENT B – Mladost – Ernestinovo“ i „Konjsko – Obrovac – Melina“. Osim ovih izvršen je veliki broj eksperimentalnih istraživanja naponskih i strujnih procesa pri sklopnim operacijama prekidača i pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja u različitim konfiguracijama u mrežama elektroprenosa 220 kV i 110 kV, u mrežama distribucije 110 kV, 35 kV i 10 kV, u mrežama industrijskih postrojenja 110 kV, 35 kV, 10 kV i 6 kV i u mrežama 6 kV sopstvene potrošnje hidroelektrana i termoelektrana. Snimljene i istraživane su različite naponske i strujne pojave. Posebno su interesantne pojave prethodnih paljenja luka u prekidaču pri njegovom uključenju (pojava od nekoliko do nekoliko desetina paljenja i gašenja električnog luka između kontakta polova prekidača dok ne dođe do njihovog spajanja sa veoma velikim strminama prenapona sličnim atmosferskim snimljena pri uključenju vakuumskih prekidača), ponovna nastajanja električnog luka i sečenja struje pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu pri isključenju prekidača (pojava koja može da dovede do veoma visokih prenapona snimljena pri isključenju malouljnih i vakuumskih prekidača) i pojava ferorezonanse u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom (fazni naponi mogu da budu veoma visoki i da traju satima, dok se međufazni naponi ne menjaju). Na slici 2 dat je karakterističan snimak faznih napona pri uključenju jednog visokonaponskog motora vakuumskim prekidačem i na slikama 3 i 4 snimak faznih napona za vreme trajanja ferorezonanse u jednoj 6 kV i jednoj 10 kV mreži sa izolovanom neutralnom tačkom. Ovako veliki broj eksperimentalnih istraživanja, redak i u razvijenim zemljama Evrope, doneo je veliki broj veoma korisnih podataka o visinama, oblicima, strminama, učestanostima, trajanju i td. prenapona i struja koji se javljaju u različitim prelaznim režimima rada mreža visokih napona.

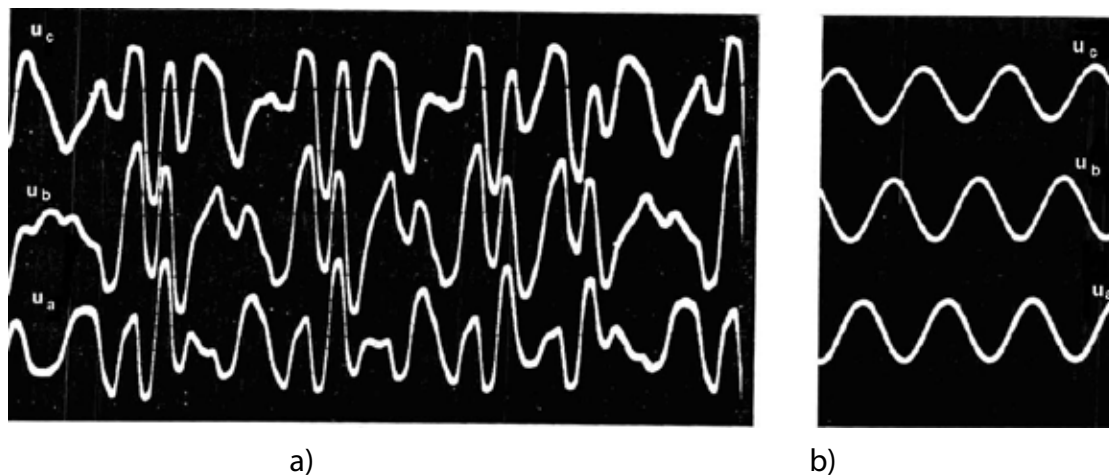


Slika 2.
a) Prelazni fazni naponi u_{L2} i u_{L3} na ulazu u kablovski vod motora 6kV, 6,5 MW pri njegovom uključanju vakuumskim prekidačem; javljaju se višestruka prethodna paljenja električnog luka između kontakata prekidača

b) Fazni naponi u_{L2} i u_{L3} u toku normalnog rada mreže 6 kV



Slika 3.
a) Fazni naponi u_0 , u_4 i u_8 na neopterećenim sabirnicama 6 kV u TS 110kV/6kV za vreme trajanja ferorezonanse trećeg harmonika
b) Fazni naponi u_0 , u_4 i u_8 u normalnom režimu rada kada nema ferorezonanse



Slika 4
a) Prelazni fazni naponi u_a , u_b i u_c na neopterećenim sabirnicama 10 kV u TS110kV/10kV za vreme trajanja ferorezonanse drugog harmonika
b) Fazni naponi u_a , u_b i u_c u normalnom radu mreže kada nema ferorezonanse

U dužem periodu vremena korišćena su brojila prenapona za registrovanje maksimalnih vrednosti prenapona koji se pojavljuju na priključcima energetskih transformatora u toku njihove eksploatacije. Brojila prenapona su bila priključena na naponske merne sisteme na bazi provodnih izolatora transformatora. Bila su postavljena na skoro svim energetskim transformatorima u mreži 400 kV, a delimično i u mreži 220 kV i 110 kV. Dobijen je značajan broj podataka o amplitudama prenapona koji naprežu izolaciju namotaja energetskih transformatora.

U periodu od 1955 do 1965 godine vršena su merenja struja atmosferskih pražnjenja koristeći magnetne štapiće koji su postavljani na stubove, zaštitnu užad nadzemnih vodova i zemljovode odvodnika prenapona. Merenja su vršena u Srbiji i u drugim republikama bivše Jugoslavije. Dobijen je veliki broj podataka o amplitudama struja atmosferskih pražnjenja na tim područjima.

Posebna tema proučavanja u okviru koordinacije izolacija je bila i aerozagađenost spoljašnje izolacije, kao i izbor izolacionih konstrukcija u zagađenoj atmosferi. Vršena su opsežna eksperimentalna istraživanja i proračuni. Izlagane su u dužem vremenskom periodu različite izolacione konstrukcije zagađenju u sredinama u kojima je ono bilo veoma izraženo (Bor, Smederevo, Prahovo, Popovac, Obrenovac). Izvršena su odgovarajuća meteorološka i fizičko hemijska istraživanja, kao i električna istraživanja u laboratoriji visokih napona posle izlaganja zagađenju u prirodnim uslovima sa ekspozicijom 6, 12 i 24 meseca. Takođe su bile izlagane zagađenju izolacione konstrukcije različitih oblika i konstrukcija na za to formiranim poligonima (Bor, Pančevo, Srbobran, Kosovo) u periodu 1996-2002 godine u cilju sagledavanja najadekvatnijih za takve uslove zagađenja. Pored korisnih rezultata istraživanja, proučavane su mere za ograničenje zagađenja na izolaciji, dati su kriterijumi oštine zagađenosti i moguće detekcije kritičnih stepena zagađenosti. Takođe su istaživani problemi zagađivanja i zaleđivanja izolacionih konstrukcija i njihov izbor u takvim uslovima rada u pogonu. Na osnovu rezultata istraživanja su date smernica za izbor i eksploataciju izolacije objekata visokih napona za rad u uslovima zagađenja

U cilju sagledavanja vrednosti parametara koji bitno utiču na tačnost proračuna rizika razornih pražnjenja na nadzemnih vodovima pri atmosferskim pražnjenjima, vršena su eksperimentalna istraživanja i proračuni impulsne otpornosti stubova nadzemnih vodova. Istraživanja su vršena injektiranjem impulsnih struja u vrhove i temelje uzemljivača stubova koristeći za to posebno formirane strujne generatore koji su mogli da proizvedu struje različitog oblika amplitude i do nekoliko kA.

Ova eksperimentalna istraživanja i izvršeni proračuni, na osnovu razvijenih računskih metoda, omogućili su da se donesu smernice i preporuke za koordinaciju izolacija objekata visokih napona.

U toku rada na problematici prenapona i koordinacije izolacije objavljeno je više od 100 radova u domaćim i inostranim časopisima i na domaćim i inostranim skupovima i urađeno je više od 50 studija. Rukovodioci većine studija su Zlatoje Zdravković i Petar Vukelja. Važnije studije su sledeće:

- *Merenje struja atmosferskih pražnjenja na elektroenergetskim objektima u NR BiH u 1958 godini,*
- *Merenje unutrašnjih prenapona pri komutacijama, zemnim spojevima i sličnim pojavama u visokonaponskim mrežama, urađeno za ZEP 1970 godine,*
- *Merenje komutacionih prenapona na elektroprenosu 400 kV "Đerdap-Beograd", urađeno za ZEP 1972 godine,*
- *Pouzdanost aparata visokog napona, urađeno za ZEP, 1976.god.*
- *Esperimentalno utvrđivanje odziva na talas 1,2/50 i 250/2500 u pojedinim tačkama TS 380/110kV "Kragujevac 2" u cilju provere prenaponske zaštite u višenaponskim i niženaponskim kolima, urađeno za ZEP, 1977.god.*
- *Uticaj reaktora priključenih na tercijer autotransformatora i direktno priključenih na visokonaponsku mrežu 380 kV na nastajanje, oblik i visinu komutacionih prenapona, urađeno za ZEP 1977. god.*
- *Problematika zaštite tercijera energetskih transformatora ZEP-a sa stanovišta pojave prenapona, urađeno za ZEP 1983.god.*
- *Koordinacija izolacije 400 kV-ne mreže SR Srbije, urađeno za ZEP 1983.*
- *Zaštita postrojenja u SF₆ tehnici od prenapona, urađeno za EPS 1984. god.*
- *Duboko ograničenje prenapona u mrežama visokog napona, urađeno za ZEP 1986. god.*
- *Ispitivanje aerozagađenja električne izolacije, urađeno za ZEP 1986. god.*
- *Tehničko ekonomski aspekti izgradnje i eksploatacije dalekovoda sa redukovanom gromobranskom zaštitom, urađeno za ZEP 1988.god.*
- *Problem kombinovanog dejstva zaleđivanja i zagađenja na izolaciji visokonaponskih vodova, urađeno za ZEP 1989. god.*
- *Konkretna rešenja sniženja stupnja izolacije u mrežama 400 kV i 110 kV i utvrđivanje tehničke i ekonomske opravdanosti, urađeno za ZEP 1989. god.*
- *Aerorozagađenost na lokaciji TE"N.Tesla" (TS 400kV-220 kV), urađeno za TE 1990. god.*
- *Primena savremenih odvodnika prenapona, urađeno za EPS, 1991. god.*
- *Prenaponi na razvodima srednjeg napona za sopstvene potrebe termoelektrana, posebno na visokonaponskim motorima pri radu prekidača, urađeno za EPS 1992. god.*
- *Analiza tehničkih mogućnosti ugradnje kondenzatorskih baterija na strani nižeg napona u postojećim i budućim TS 110kV/xkV prenosne mreže EPS-a, urađeno za EPS 1992. god.*
- *Sprovođenje istraživanja prenaponskih pojava u postrojenju TS 220/110/35kV Požega, urađeno za EPS 1992. god.*
- *Kvazistacionarni (privremeni) prenaponi u mrežama visokog napona, urađeno za EPS 1994. god.*

- *Prenaponi u mrežama srednjeg napona površinskih kopova*, urađeno za EPS 1994. god.
- *Koordinacija izolacije postrojenja i sistema visokonaponskih objekata*, urađeno za EPS. 1997. god.
- *Prenaponska zaštita elektrodistributivnih mreža*, urađeno za EPS 2000. god.
- *Projektovanje, izgradnja i održavanje uzemljenja nadzemnih vodova 110-400kV*, urađeno za EPS 2001. god.
- *Energetska naprezanja metaloksidnih odvodnika prenapona*, urađeno za EPS 2003. god.