

## ISTRAŽIVANJA PRELAZNIH NAPONA I STRUJA I ISPITIVANJA OPREME U ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI U.S. STEEL SERBIA

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

**Sadržaj:** *U radu su dati rezultati istraživanja prelaznih napona i struja i ispitivanja opreme u elektroenergetskoj mreži napona 110 kV, 35 kV i 6 kV U.S. Steel Serbia.. Izvršena su u okviru programa definisanog trogodišnjim projektom "Povećanje pouzdanosti i revitalizacija elektroenergetske mreže Sartid-a" koji je finansiran od strane Ministarstva za nauku i životnu sredinu i U.S. Steel Serbia. Na osnovu rezultata istraživanja i ispitivanja predložene su mere koje treba preduzeti za povećanje pouzdanosti rada elektroenergetske mreže U.S. Steel Serbia.*

**Ključne reči:** *prenapon, struja, mreža, ispitivanje*

### 1. UVOD

Elektroenergetske mreže velikih industrijskih postrojenja su specifične. Na relativno malom prostoru smešteno je više manjih, ali i većih transformatorskih stanica preko kojih se napajaju raznovrsni potrošači. Sve transformatorske stanice se uglavnom radialno napajaju iz jedne glavne transformatorske stanice koja je uključena direktno u elektroenergetski sistem.

Elektroenergetske mreže visokog napona Sartid-a, sada U.S. Steel Serbia su napona 110 kV, 35 kV i 6 kV. Četiri transformatorske stanice sa transformatorima 110kV/35kV, 110kV/35kV/6kV i 110kV/6,3kV, međusobno povezane kratkim 110 kV nadzemnim vodovima (nekoliko stotina metara), napajaju dve mreže 35 kV i četiri mreže 6 kV. Preko jedne od četiri transformatorske stanice mreža 110 kV U.S. Steel Serbia je povezana sa elektroenergetskim sistemom 110 kV Elektroprivrede Srbije. Mreže 35 kV su uzemljene preko metalnog otpornika koji ograničava struju zemljospoja na 300 A. Tri mreže 6 kV su uzemljene preko prigušnice 70 kVA, 20 A za kompenzaciju struje zemljospoja, a jedna mreža je sa izolovanom neutralnom tačkom. U svim mrežama 6 kV relejna zaštita samo signalise pojavu zemljospoja. Tehnološki procesi, koje obavljaju pojedini pogoni, zahtevaju neprekidnost napajanja u dužim periodima vremena. Prekidi napajanja mogu da izazovu velike štete. Zato je neophodno da mreža U.S. Steel Serbia radi pouzdano, odnosno da se preduzmu potrebne mere i sredstva da ne dođe do kvara. Oprema u mreži je izložena različitim dielektričkim, termičkim i dinamičkim naprezanjima koja su posledica rada različitih pogona i čestih manipulacija sklopnim aparatima. Operacije sklopnih aparata dovode do prenapona koji dielektrički naprežu izolaciju opreme. U određenim konfiguracijama mreže pri uključenju sklopnih aparata dolazi do pojave velikih struja koje termički i dinamički naprežu opremu. Rad pojedinih pogona je intermitentan. Za nekoliko sekundi snaga za njihov rad se od minimalne povećava do maksimalne i pada opet na minimalnu, što takođe izaziva naprezanje opreme. Rad tiristorskih uređaja dovodi do značajnih harmonika struje i napona koji takođe naprežu opremu i povećavaju gubitke u mreži.

Češći kvarovi i prekidi napajanja u mrežama 110 kV, 35 kV i 6 kV U.S. Steel Serbia, koji su počeli da se pojavljuju, doveli su do zastoja rada pojedinih pogona. Posledica toga su značajne materijalne štete. U cilju njihovog otklanjanja bilo je potrebno preduzeti potrebne mere i sredstva. Da bi se to uradilo prethodno je trebalo sagledati stanje opreme u mrežama i istražiti naprezanja kojima je ona izložena u toku rada. Zato su izvršena obimna istraživanja naponskih i strujnih pojava u mrežama, kao i brojna dijagnostička ispitivanja opreme u njoj.

## 2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA

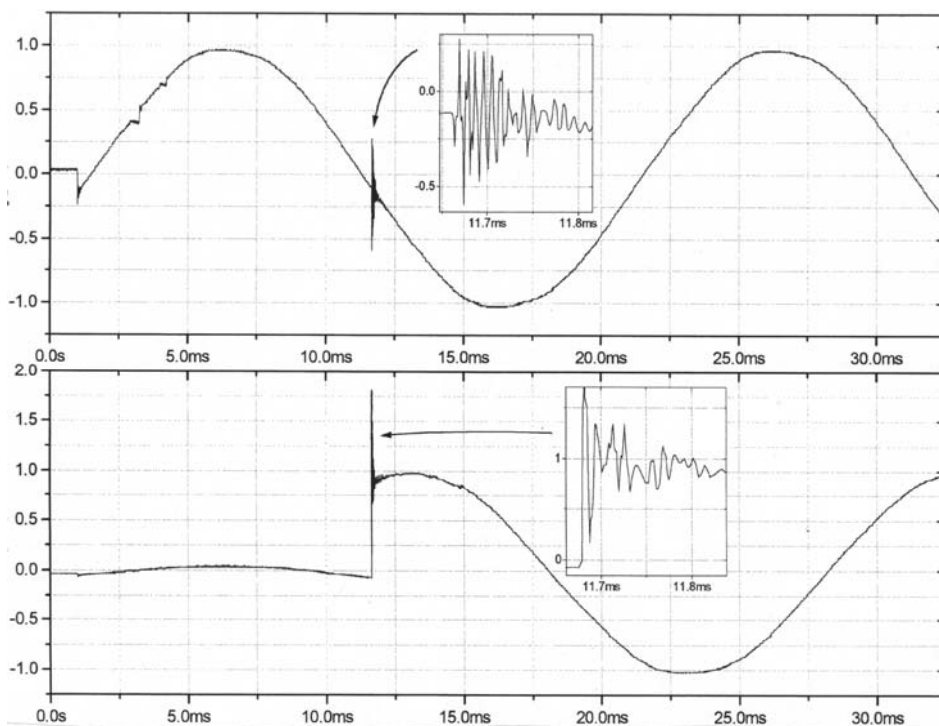
Eksperimentalna istraživanja prelaznih naponskih i strujnih pojava su vršena u onim konfiguracijama mreža 110 kV, 35 kV i 6 kV u kojima su se dešavali najčešći kvarovi. Takođe i dijagnostička ispitivanja su izvršena na onoj opremi koja je imala najčešće kvarove. Prelazne naponske pojave snimane su digitalnim osciloskopima koristeći kapacitivne naponske merne sisteme koji verno prenose pojave sa visokog na niski napon od nekoliko Hz do 1 MHz. Prelazne strujne pojave snimane su digitalnim osciloskopima i tranzijent rikorderima koristeći merne sisteme formirane na bazi postojećih strujnih transformatora u mrežama 110 kV, 35 kV i 6 kV. Vernost prenosa strujnih pojava preko strujnih transformatora je do 4-5 kHz.

### 2.1. Istraživanja i ispitivanja u mreži 110 kV

U mreži 110 kV izvršena su istraživanja prelaznih faznih napona u četiri njene konfiguracije [1,2]. Istraživani su prenaponi pri uključenju i isključenju neopterećenih nadzemnih vodova 110 kV. To su kratki vodovi dužine nekoliko stotina metara između transformatorskih stanica 110kV/35kV i 110kV/6kV. Razlog ovih istraživanja su havarije nekoliko naponskih transformatora koji se nalaze na početku i kraju vodova. Havarije su se najčešće dešavale pri stavljanju ili neposredno po stavljanju pod napon naponskih transformatora.

Prelazni fazni naponi su snimani na kraju nadzemnih vodova. Pri uključenju se javljaju oscilatorni prenaponski procesi u sve tri faze koji se vrlo brzo prigušuju (slika 1). Trajanje procesa je reda nekoliko stotina  $\mu s$ . Najviši izmereni prenapon je 2,11 r.j. (r.j.-relativna jedinica). U procesu isključenja dolazilo je do pojave značajnih prenapona samo kada su se javljala ponovna nastajanja električnog luka između kontakta prekidača. To se dešavalo u 30% izvedenih isključenja. Maksimalni izmereni prenapon je 2,55 r.j.. Pojava ponovnih nastajanja električnog luka bila je prisutna kod svih 110 kV prekidača vodova. Rezultati eksperimentalnih istraživanja su pokazali da sklopni prenaponi nisu tako visoki da bi mogli da ugroze izolaciju opreme u mreži 110 kV, osim ako nije došlo do njene značajne degradacije [1,2,21]. Stanje izolacije naponskih transformatora nije kontrolisano od njihove ugradnje, jer nije bilo predviđeno planom održavanja. Poznato je da tipovi naponskih transformatora, koji su stradali, imaju slabu zaptivenost pa je velika mogućnost prodora vlage u njih [3]. Osim naponskih izvršena je kontrola izolacije i strujnih transformatora u mreži 110 kV.

Kontrolisana je otpornost izolacije, ugao gubitaka  $tg \delta$ , karakteristike ulja i gasova u ulju [7,15]. Sedam naponskih i strujnih transformatora od ispitanih trideset dva trebalo je odmah isključiti iz pogona, a za pojedine je predložena kontrola već sledeće godine.



*Sl. 1. Prelazni fazni naponi  $u_0$  i  $u_4$  na kraju 110 kV neopterećenog nadzemnog voda dužine 700 m pri njegovom uključanju malouljnim prekidačem*

Uključujući ponovljene kontrole izvršeno je više od 50 analiza stanja naponskih i strujnih transformatora. Konstatovano je da je uzrok lošeg stanja izolacije prodor vlage i to je verovatno i bio uzrok havarije naponskih transformatora. Detekcija parcijalnih pražnjenja strujnih i naponskih transformatora, izvršena posle kontrole njihove izolacije, pokazala je da intenzitet parcijalnih pražnjenja nije visok, ali da je za većinu njih potrebna kontrola već nakon godinu dana [23].

Izvršena je kontrola stanja šest energetskih transformatora 110kV/XkV. Ispitivani su izolacioni sistemi transformatora i njihovih provodnih izolatora, fizičke, hemijske i električne karakteristike uzoraka ulja, sadržaj rastvorenih gasova u ulju, sadržaj vode u ulju; merene su induktivnosti usled rasipanja, otpornosti namotaja, kapacitivnosti između namotaja i prema masi, kao i struje praznog hoda pri niskom naponu [4,8,12,14]. Konstatovano je da dva transformatora moraju u remont i da je posle toga potrebna ponovna kontrola stanja izolacije, kao i kontrola stanja regulacionih sklopki.

Analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja prelaznih naponskih procesa je pokazala da pojedini prekidači 110 kV imaju nedozvoljeno vreme rasipanja polova pri uključanju (veće od 10 ms). Pojedini su imali rasipanja toliko velika da je dolazilo do reagovanja relejne zaštite usled pojave nesimetrije. Analizom snimljenih napona i struja u mreži 110 kV, pri radu različitih pogona u U.S. Steel Serbia, ustanovljeno je da se pojavljuju značajni viši harmonici [16,20,24]. Ukupna harmonijska distorzija napona dostizala je do 2,8%, a najviši harmonici su jedanaesti oko 1,5% i peti sa oko 1,2% osnovnog harmonika. Ukupna harmonijska distorzija struja dostizala je do 25%; najviši harmonici su peti sa oko 15% i sedmi i jedanaesti oko 12% osnovnog harmonika.

Izvršena je provera sistema uzemljenja [13]. Konstatovano je da zemljovodi i uzemljivač u jednoj od transformatorskih stanica ne zadovoljavaju u pogledu termičkog

i mehaničkog naprezanja za sadašnje i perspektivno stanje mreže i da je potrebno izvršiti rekonstrukciju uzemljenja.

Termografskim kontrolama opreme u mreži 110 kV konstatovano je pregrevanje: priključaka strujnih transformatora, čeljusti rastavljača i priključaka prekidača [22].

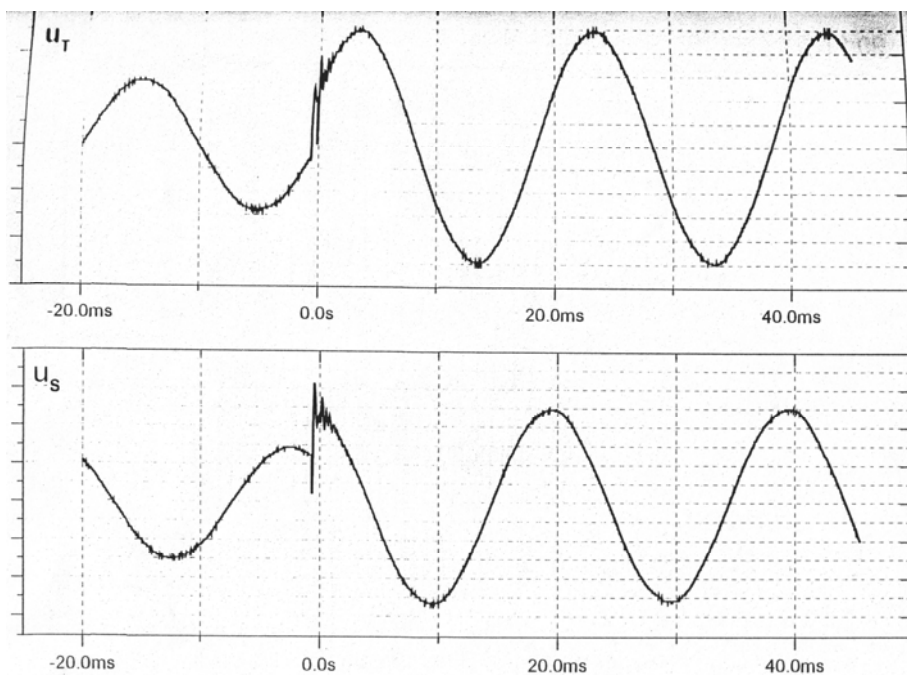
## 2.2. Istraživanja i ispitivanja u mrežama 35 kV

U mrežama 35 kV (postoje dve mreže 35 kV koje nisu međusobno povezane) izvršena su eksperimentalna istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju: zemljospoja, neopterećenih kablovskih vodova, transformatora, kablovskih vodova opterećenih transformatorima i filterskih postrojenja. Razlozi ovih istraživanja su prekidi napajanja glavnih pogona usled havarijskih događaja. Dolazilo je do havarija: prolaznih izolatora, strujnih transformatora, kablovskih završnica, kondenzatora u filterskim postrojenjima i metalnog otpornika za uzemljenje mreže 35 kV. Havarije su se dešavale u normalnom radu, pri pojavi zemljospoja i pri sklopnim operacijama prekidača.

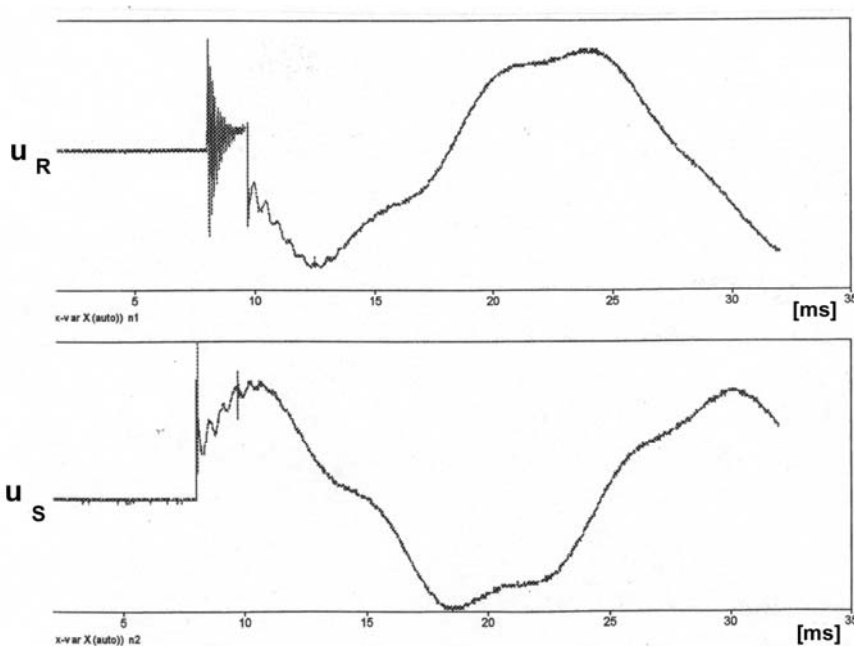
Istraživanja prelaznih faznih napona i struja pri uspostavljanju, trajanju i prekidanju zemljospoja izvršena su u obe mreže 35 kV koje su uzemljene preko metalnih otpornika 300 A priključenih u zvezdišta 35 kV namotaja transformatora 110kV/35kV i 110kV/35kV/6kV [17,21,25]. Zemljospoj je uspostavljan i prekidan u obe mreže na sledeći način. Na kraju jednog kablovskog voda izvršeno je spajanje provodnika jedne faze sa uzemljivačem. Uključenjem prekidača tog kablovskog voda uspostavljan je zemljospoj, a prekidan njegovim isključenjem. Prelazni fazni naponi su snimani digitalnim osciloskopima koristeći kapacitivne naponske merne sisteme priključene na sabirnice 35 kV. Izvršeno je ukupno devet uspostavljanja i prekidanja zemljospoja. Najviši izmereni prenapon pri uspostavljanju zemljospoja je 2,2 r.j.; pri prekidanju zemljospoja nije bilo prenapona. Na slici 2 dati su prelazni fazni naponi u mreži 35 kV pri uspostavljanju jednog od zemljospoja. Za vreme trajanja zemljospoja snimana je tranzijent rikorderom struja kroz metalni otpornik koristeći strujni transformator metalnog otpornika. Nalog za isključenje prekidačima pri uspostavljanju zemljospoja trebalo je da zaštita od zemljospoja. Međutim u većini slučajeva nalog je prosleđivala prekostrujna zaštita metalnog otpornika. U jednom slučaju nijedna zaštita nije reagovala i uklopničar u komandnoj sali posle 3,8 s je daljinski isključio prekidač i eliminisao zemljospoj.

Prelazni fazni naponi pri uključenju neopterećenih kablovskih vodova malouljnim prekidačima snimani su na njihovom kraju [5]. Izvršeno je dvadeset ciklusa uključenje-isključenje. Najviši izmereni prenapon pri uključenju je 2,48 r.j., a pri isključenju 1,57 r.j.. Izvršeno je ukupno deset ciklusa uključenje-isključenje kablovskih vodova opterećenih sa grupom transformatora 35kV/2x0, 43kV, 4,8 MVA i pet ciklusa uključenje-isključenje samo ove grupe transformatora. Najviši izmereni prenapon pri uključenju je 1,67 r.j., a pri isključenju nije bilo prenapona.

U mreži 35 kV je prisutno samo jedno filtersko postrojenje za peti harmonik. Ostala filterska postrojenja su u kvaru. Izvršeno je jedanaest ciklusa uključenje-isključenje filterskog postrojenja za peti harmonik malouljnim prekidačem [10]. Najviši izmereni prenapon pri uključenju je 1,8 r.j., a pri isključenju 1,67 r.j.. Na slici 3 dati su prelazni fazni naponi pri jednom od uključenja filterskog postrojenja za peti harmonik.



Sl. 2. Prelazni fazni naponi  $u_T$  i  $u_S$  pri uspostavljanju zemljospoja u fazi R u mreži 35 kV.



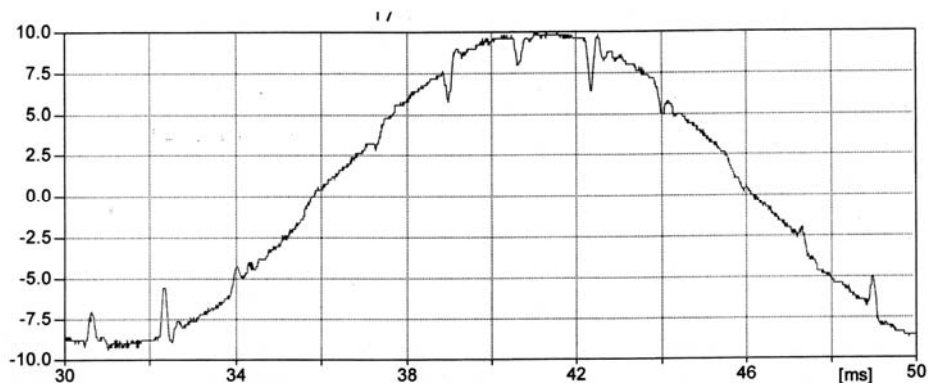
Sl. 3. Prelazni fazni naponi  $u_R$  i  $u_S$  na priključcima 35 kV filterskog postrojenja za peti harmonik pri njegovom uključanju maloulnim prekidačem

Ustanovljeni prenaponi u svim napred izvedenim istraživanjima su bili uobičajenih visina, učestanosti, oblika i trajanja kao i u drugim sličnim mrežama 35 kV uzemljenim

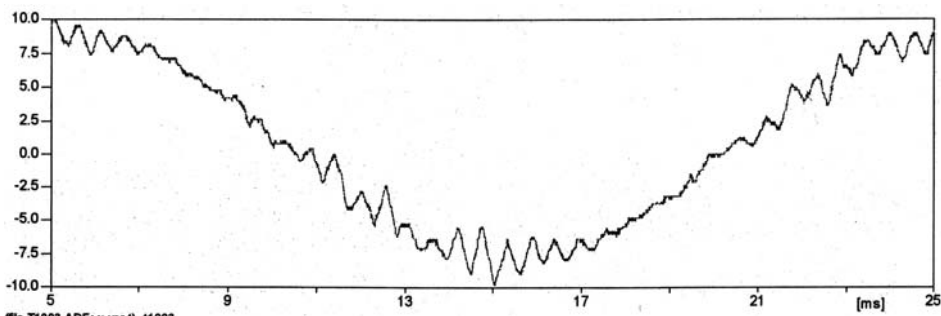
preko metalnog otpornika. Nisu tako visoki da bi mogli da ugroze izolaciju opreme u mrežama 35 kV, osim ako nije došlo do njene znatne degradacije. Neophodno je bilo ustanoviti stanje izolacije opreme na kojoj je dolazilo do kvarova. U tom cilju u mrežama 35 kV izvršena su ispitivanja izolatora i strujnih transformatora povišenim naponom industrijske frekvencije reda 50 kV. Došlo je do proboja nekoliko prolaznih izolatora i strujnih transformatora [5,6]. Kod nekih proboj je nastupao u toku podizanja napona već oko 40-45 kV. Na nekoliko prolaznih izolatora pri ispitivanju povišenim naponom dolazilo je do intenzivnih varničenja po njihovoj površini. Pregledom podataka o karakteristikama prolaznih izolatora i strujnih transformatora, koje je dostavio proizvođač, konstatovano je da pojedini tipovi nisu ispitani adekvatnim podnosivim naponima i da nisu izvršena ispitivanja na parcijalna pražnjenja. Na osnovu rezultata ispitivanja prolaznih izolatora i strujnih transformatora, pregleda njihovih karakteristika i rezultata istraživanja prenapona koji se pojavljuju na njihovoj izolaciji, konstatovano je da je kod njih došlo do velikog pada dielektrične čvrstoće izolacije. Pretpostavlja se da proizvođači nisu kvalitetno uradili njihovu izolaciju. Tokom eksploatacije došlo je u njoj do značajnog povećanja parcijalnih pražnjenja koja su je toliko oštetila i dovela do proboja. Osim toga došlo je do degradacije površine izolatora, što je uslovalo izrazita parcijalna pražnjenja na njoj.

Analiza kvarova kablovskih završnica i kondenzatora filterskih postrojenja je pokazala da je verovatno uzrok loša izolacija. Do proboja kablovskih završnica je dolazilo i posle njihove popravke. Konstatovano je da nisu posle popravke ispitane potrebnim ispitnim naponima. Istraživanja su pokazala da pri uključenju i isključenju filterskih postrojenja nema visokih prenapona [10]. Međutim kondenzatori u filterskim postrojenjima su izloženi znatnim naprezanjima usled viših harmonika u strujama i naponima. Analizom snimaka napona i struja konstatovano je prisustvo velikog broja viših harmonika [16,20,24]. Visina pojedinih harmonika u naponu je prelazila 6% osnovnog harmonika, a u struji i preko 21% osnovnog harmonika. Ukupna harmonijska distorzija napona je dostizala u pojedinim režimima rada i više od 10%, a ukupna harmonijska distorzija struja do 35%. Na slikama 4 i 5 dat je izgled jedne periode napona u normalnom režimu rada u dve mreže 35 kV.

Analiza havarija metalnog otpornika za uzemljenje mreže 35 kV je pokazala da je njihov uzrok otkaz zaštite od zemljospoja. Tokom eksperimentalnih istraživanja ustanovljeno je da relejne zaštite od zemljospoja i relejna zaštita metalnog otpornika od preopterećenja nisu usklađene; prva nije dobro usmerena, a druga je loše rešena [17]. Pri jednom zemljospoju došlo je do otkaza obe zaštite. Da uklopničar u komandnoj sali nije blagovremeno daljinski isključio prekidač, čijim uključenjem je uspostavljan zemljospoj, moglo je da dođe do havarije metalnog otpornika. Metalni otpornik je predviđen da trajno izdrži struju 5 A, 10 minuta struju 20 A i 5 sekundi struju 300 A. Izvršena je kontrola stanja izolacije 32 energetska transformatora 35kV/XkV. Izvršena su ista ispitivanja i merenja kao za transformatore 110 kV/XkV [4,8,12,14]. U toku tri godine istraživanja na više od polovine transformatora izvršena su ponovna merenja. Prva ispitivanja su pokazala da nije zadovoljavajuće stanje kod većeg broja transformatora. Ustanovljeno je: postojanje vode u ulju, povišen sadržaj gasova u ulju, loše stanje izolacije i nizak nivo dielektrične čvrstoće ulja. Pojedine je trebalo odmah isključiti iz pogona.



Sl. 4. Jedna perioda faznog napona 35 kV u prvoj mreži 35kV (radi hladna valjaonica)



Sl. 5. Jedna perioda faznog napona 35 kV u drugoj mreži 35kV (radi topla valjaonica)

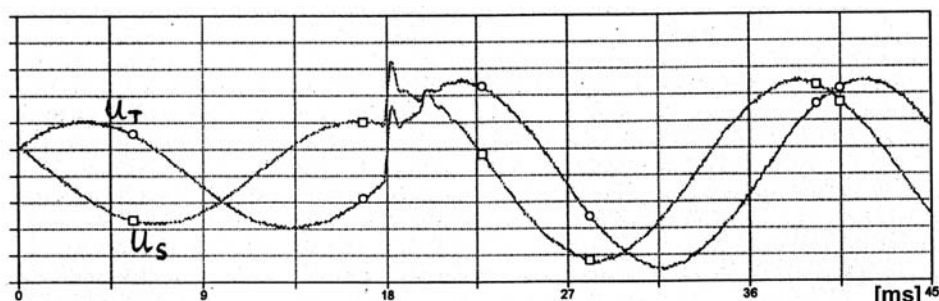
Termografskim kontrolama opreme u mreži 35 kV konstatovano je pregrevanje: priključaka strujnih transformatora, priključaka prekidača i tela potpornih izolatora [22]. Pri eksperimentalnim istraživanjima prenapona je uočeno da jedan od prekidača ima neregularan rad pri procesu isključenja. Isključi, pa nakon 125 ms uključi i posle 70 ms ponovo isključi [5].

### 2.3. Istraživanja i ispitivanja u mrežama 6 kV

U mrežama 6 kV (postoje četiri mreže 6 kV koje nisu međusobno povezane) izvršena su eksperimentalna istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju: zemljospoja, visokonaponskih motora i filterskih postrojenja. Razlozi ovi istraživanja su havarije koje su nastupale najčešće pojavom zemljospoja. Dolazilo je do havarija: naponskih transformatora, kondenzatora u filterskim postrojenjima i visokonaponskih motora.

Izvršen je dvadesetjedan zemljospoj u tri mreže 6 kV [11,18,21,25]. Dve mreže su uzemljene preko prigušnica 70 kVA, 20 A za kompenzaciju struja zemljospoja priključenih u zvezdišta 6 kV namotaja transformatora 110kV/6,3kV. Treća mreža može prema potrebi da radi uzemljena preko prigušnice ili sa izolovanom neutralnom tačkom. Zemljospoj se u mrežama 6 kV samo signalise i isključuje kada to pogonski omogućuju. Uspostavljanje i prekidanje zemljospoja je izvođeno na sličan način kao u mrežama 35 kV, samo što jedan fazni provodnik nije direktno uzemljen već preko strujnog transformatora 30A/5A preko koga je digitalnim osciloskopom snimana struja zemljospoja. Prelazni fazni naponi su snimani digitalnim osciloskopima koristeći kapacitivne naponske merne sisteme priključene na sabirnice 6 kV. Prenaponi pri pojavi zemljospoja nisu prelazili 2,2 r.j.. Nije bilo bitne razlike u prenaponima kada je

zemljospoj izvođen u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom ili u mreži uzemljenoj preko prigušnice. Nije bilo prenapona pri prekidanju zemljospoja. Na slici 6 dati su prelazni fazni naponi pri uspostavljanju jednog od zemljospoja. Struje zemljospoja u mrežama uzemljenim preko prigušnice i u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom su izobličene. Pored osnovnog harmonika (50 Hz) sadrže veliki broj viših harmonika čije se amplitude menjaju u zavisnosti od rada potrošača. Uzemljavanjem mreže 6 kV sa izolovanom neutralnom tačkom preko prigušnica značajno se smanjuje struja zemljospoja, sa 24 A na 7,5 A. U dve mreže 6 kV, stalno uzemljene preko prigušnice, struje zemljospoja su različite. Jedna ima struju zemljospoja 7 A, dok je u drugoj struja zemljospoja 46 A. U mreži u kojoj je struja zemljospoja 46 A kompenzacija struje zemljospoja prigušnicom 70 kVA, 20 A je nedovoljna. Razdvajanjem ove mreže na dva dela dolazi se do zadovoljavajućeg rešenja. To je moguće jer mrežu napajaju dva transformatora 110kV/6,3kV. Efektivne vrednosti struja zemljospoja u ova dva dela mreže su oko 16 A i oko 10 A.

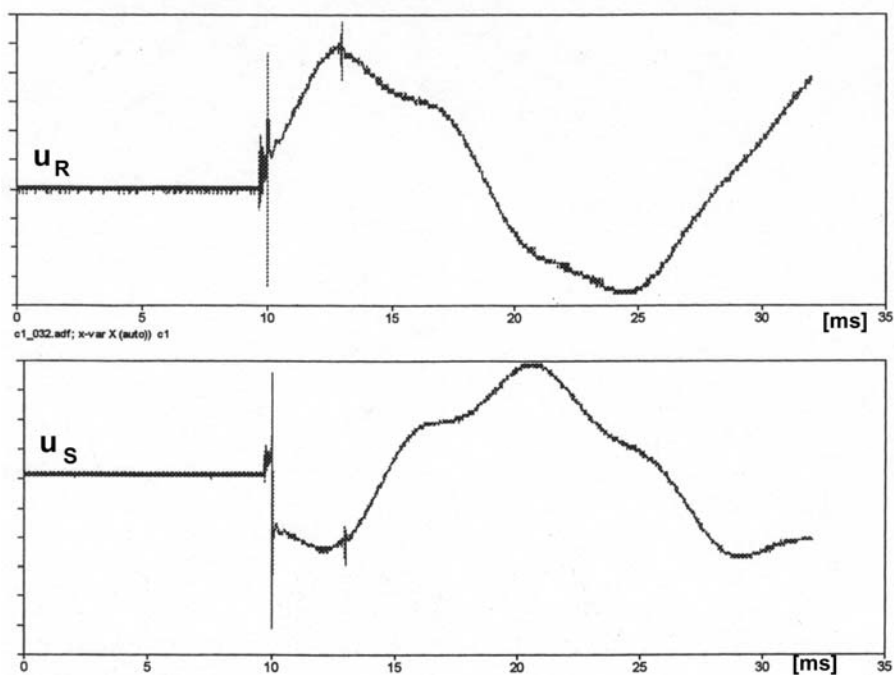


Sl. 6. Prelazni fazni naponi  $u_S$  i  $u_T$  pri uspostavljanju zemljospoja u fazi R u jednoj od mreža 6 kV uzemljenoj preko prigušnice 70 kVA, 20 A

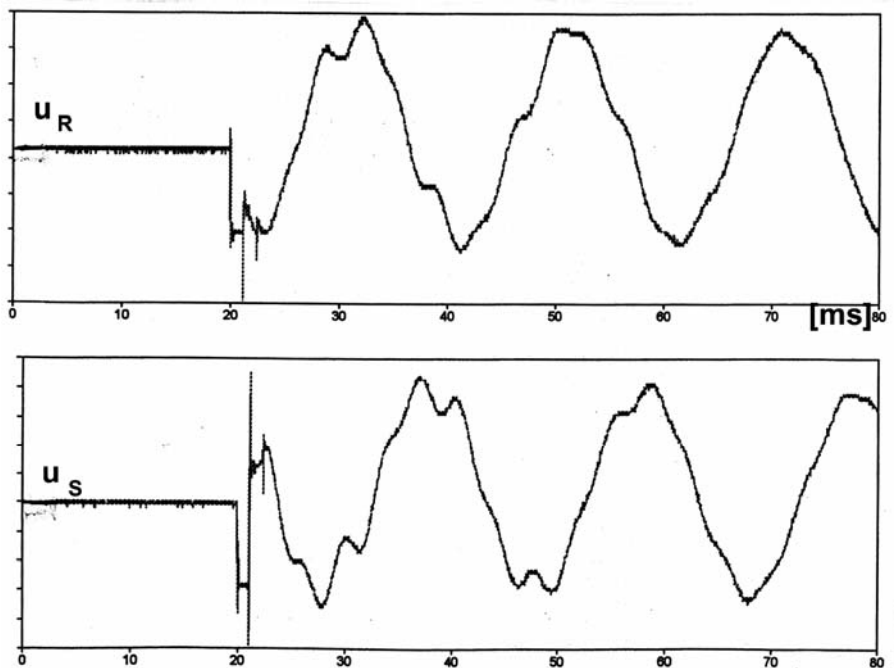
Izvršena su snimanja prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju dva filterska postrojenja za peti harmonik i jednog filterskog postrojenja za sedmi harmonik u dve mreže 6 kV [10,24]. U jednoj mreži se nalazi jedno filtersko postrojenje za peti harmonik, a u drugoj mreži postrojenje za peti i postrojenje za sedmi harmonik. Izvršeno je trideset ciklusa uključenje-isključenje filterskih postrojenja. Najviši prenapon pri uključenju je 2,25 r.j., a pri isključenju 2,05 r.j.. Na slikama 7 i 8 dati su prelazni fazni naponi pri uključenju filterskih postrojenja za peti i sedmi harmonik. Pri uključenju filterskog postrojenja za sedmi harmonik, kada u mreži nije prisutno filtersko postrojenje za peti harmonik, dolazi do njegovog termičkog preopterećenja i mogućnosti havarije. Struja filterskog postrojenja za sedmi harmonik pored osnovnog sadrži peti harmonik koji je veći od osnovnog harmonika.

Izvršena su snimanja napona i struja u mrežama 6 kV u toku njihovog normalnog rada [16,20,24]. Konstatovano je da naponi i struje imaju velika izobličenja. Harmonijskom analizom konstatovano je prisustvo velikog broja harmonika u njima. Ukupna harmonijska distorzija napona u pojedinim mrežama 6 kV je dostizala do 9%, a ukupna harmonijska distorzija struja i preko 10%. Pojedini harmonici napona su dostizali i do 6% osnovnog harmonika, a harmonici struje i do 7%.



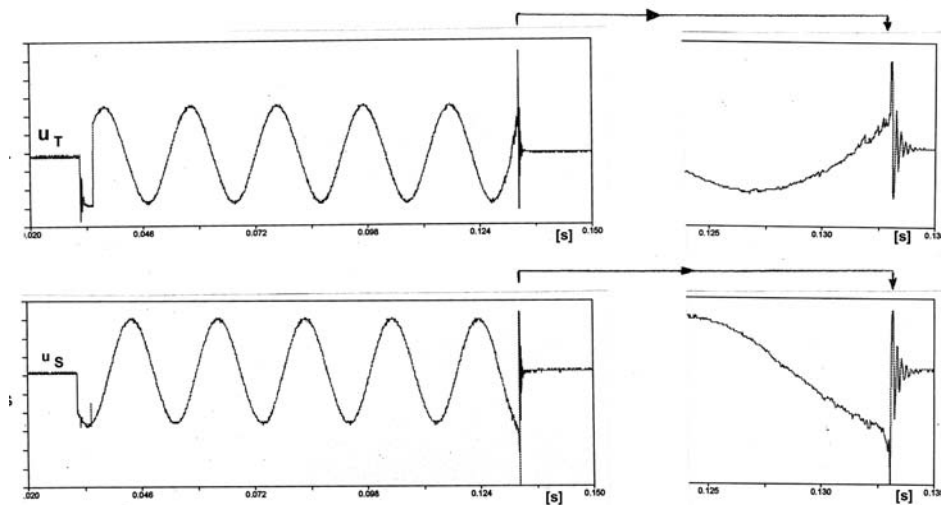


Sl. 7. Prelazni fazni naponi  $u_R$  i  $u_S$  na priključcima 6 kV filterskog postrojenja za peti harmonik pri njegovom uključenju malouljnim prekidačem



Sl. 8. Prelazni fazni naponi  $u_R$  i  $u_S$  na priključcima 6 kV filterskog postrojenja za sedmi harmonik pri njegovom uključenju malouljnim prekidačem

Snimanja prenapona i struja izvršena su pri uključenju i isključenju šest visokonaponskih motora 6 kV sa kratkospojenim rotorom snage od 450 kW do 850 kW [9,19]. Izvršeno je oko 50 ciklusa uključenje-isključenje motora moloulnim prekidačima. Dvadeset isključenja je izvršeno u toku zaleta motora. Uključenja motora i isključenja motora u toku normalnog rada ne dovode do visokih prenapona; najviši izmereni su nešto iznad 2 r.j.. Međutim isključenja u toku zaleta motora dovode do visokih prenapona; najviši izmereni je 4,3 r.j. (slika 9). Udarne struje pri uključenju motora su velike. Kod nekih su i do petnaest puta veće od temene vrednosti struje u ustaljenom režimu rada. U toku istraživanja se događalo da po uključenju motora isti ispadne iz pogona delovanjem prekostrujne zaštite. Na slici 9 dati su prelazni fazni naponi pri jednom od uključenja i isključenja u zaletu motora 6 kV, 630 kW.



*Sl. 9. Prelazni fazni naponi  $u_T$  i  $u_S$  na ulazu u kablovski vod motora 6 kV, 630 kW pri njegovom uključenju i isključenju u toku zaleta*

Ustanovljeni prenaponi u svim napred izvedenim istraživanjima su bili uobičajenih visina, učestanosti, oblika i trajanja kao i u drugim sličnim mrežama 6 kV uzemljenim preko prigušnice ili sa izolovanom neutralnom tačkom. Nisu tako visoki da bi mogli da ugroze izolaciju opreme u mrežama 6 kV, osim ako nije došlo do njene znatne degradacije. Izuzetak su prenaponi koji se pojavljuju na izolaciji namotaja statora visokonaponskih motora pri njihovom isključenju u zaletu. Oni mogu da ugroze izolaciju namotaja statora motora. Zato je potrebno da se obezbedi da ne dolazi do isključenja motora u zaletu. Stradanja visokonaponskih motora su mogla da budu od prenapona koji se javljaju pri isključenju u zaletu (ovakva isključenja nisu retka) i velikih struja koje se javljaju pri uključenju.

Analizom havarija naponskih transformatora ustanovljeno je da su nastupale za vreme dužih trajanja zemljospoja. Izvršena je kontrola karakteristika naponskih transformatora i konstatovano je da je njihov faktor napona 1,2, a ne kao što je potrebno 1,9. Sa takvim faktorom napona naponski transformatori se za vreme trajanja zemljospoja veoma mnogo termički naprežu. Dolazi do degradacije njihove izolacije pa potom do proboja.

Uzrok stradanja kondenzatora u filterskim postrojenjima 6 kV je isti kao i u filterskim postrojenjima u mreži 35 kV-loš kvalitet izrade i naprežanja kojima su izloženi usled prisustva viših harmonika napona i struja.

Termografskim kontrolama opreme u mreži 6 kV uočen je veliki broj mesta na kojima dolazi do pregrevanja. Konstatovano je pregrevanje: priključaka i tela prekidača, priključaka transformatora, mernih transformatora, prigušnica i kablova [22].

### **3. MERE I SREDSTVA ZA POUZDANIJI RAD ELEKTROENERGETSKIH MREŽA U.S. STEEL SERBIA**

Eksperimentalnim istraživanjima u mrežama 110 kV, 35 kV i 6 kV sagledane su naponske i strujne pojave kao i naprezanja opreme usled njih. Dijagnostičkim ispitivanjima utvrđeno je stanje izolacije opreme. U cilju sprečavanja kvarova, prekida napajanja i smanjenja naprezanja opreme predložene su sledeće osnovne mere i sredstva:

- redovne periodične kontrole stanja izolacije opreme posebno energetskih i mernih transformatora (ispitivanje otpornosti izolacije, ispitivanje ulja i gasova u ulju, ispitivanje parcijalnih pražnjenja itd.);
- ispitivanja kablovskih završnica posle popravke odgovarajućim ispitnim naponima;
- zamena postojećih naponskih transformatora sa faktorom napona 1,2 naponskim transformatorima sa faktorom napona 1,9;
- zamena prolaznih izolatora sa oštećenom površinom;
- usklađivanje rada zemljospojnih zaštita i prekostrujnih zaštita metalnih otpornika;
- podešavanje prekostrujnih zaštita visokonaponskih motora da ne bi njihovim reagovanjem dolazilo do isključenja visokonaponskih motora u zaletu;
- ugrađivanje potrebnih blokada da se onemoguće uključenja visokonaponskih motora ako nisu ispunjeni svi uslovi za rad pogona koji on pokreće kako ne bi dolazilo do njegovog isključenja u zaletu;
- rekonstrukcija prekostrujne zaštite metalnog otpornika radi sprečavanja mogućnosti njegovog termičkog preopterećenja; jedno od rešenja je signalizacija struje metalnog otpornika između 5 A i 20 A i isključenje transformatora u čijem zvezdištu je priključen;
- popravke postojećih filterskih postrojenja za eliminaciju viših harmonika;
- ugrađivanje blokade za uključenja filterskog postrojenja za sedmi harmonik, ako nije na istim sabirnicama priključeno filtersko postrojenje za peti harmonik;
- ugrađivanje automatike za isključenje filterskog postrojenja za sedmi harmonik po isključenju filterskog postrojenja za peti harmonik;
- kontrole jednovremenosti uključenja polova prekidača 110 kV;
- otklanjanje greške u komandnim kolima prekidača 35 kV koji po nalogu za isključenje isključi, zatim ponovo uključi i isključi;
- obavezno učešće predstavnika U.S. Steel Serbia pri prijemnim ispitivanjima nove elektroenergetske opreme (prijemna ispitivanja opreme treba da obuhvate komadna ispitivanja definisana standardima JUS ili IEC) ;
- razdvajanje mreža 6 kV tako da struje zemljospoja u svakoj ne prelaze 20 A;
- rekonstrukcija uzemljivačkog sistema transformatorske stanice u kojoj je pronađen loš uzemljivački sistem;
- termovizijske kontrole opreme u mrežama 110 kV, 35 kV i 6 kV dva puta godišnje.

### **4. ZAKLJUČAK**

Eksperimentalnim istraživanjima naponskih i strujnih pojava u elektroenergetskim mrežama 110 kV, 35 kV i 6 kV U.S. Steel Serbia i analizama havarijskih događaja u istim mrežama u velikoj meri su sagledani uzroci kvarova elektroenergetske opreme,

kao i uzroci prekida napajanja. Osnovni uzroci su uglavnom sledeći: neadekvatno održavanje, oprema sa nezadovoljavajućim karakteristikama, neusklađen rad relejnih zaštita i veoma visoki harmonici u naponima i strujama. Predložene su mere i sredstva koje treba preduzeti za povećanje pouzdanosti rada mreža. Većina predloženih mera i sredstava, navedena u delu 3, je primenjena.

## LITERATURA

- [1] "Istraživanje prenapona u mreži 110 kV Sartid-a", Elaborat broj 310010, Institut "N.Tesla", 2002. god.
- [2] P. Vukelja, M. Gavrić, J. Mrvić, R. Jurošević, T. Isailović: "Eksperimentalna istraživanja sklopnih prenapona na kratkim 110 kV nadzemnim vodovima", 25. savetovanje JUKO CIGRE, R33-04, Herceg Novi 16-20 septembar 2001. god.
- [3] P. Vukelja, J. Mrvić, R. Jurošević: "Uzroci havarija induktivnih naponskih transformatora u 110 kV mreži Sartid-a", *Tehnika – Elektrotehnika* 51, br.4-5, 2002. god.
- [4] "Ispitivanje karakteristika ulja energetskih transformatora i gasnrohromatska ispitivanja uzoraka ulja energetskih i mernih transformatora", Elaborat br. 310256, Institut "N.Tesla", 2002. god.
- [5] "Naponska ispitivanja opreme u mreži 35 kV Sartid-a i prenaponske pojave u njoj", Elaborat br. 310114, Institut "N.Tesla", 2002. god.
- [6] "Ispitivanje sabirnica i ćelija u mreži 35 kV Sartid Smederevo", Elaborat broj 310220, Institut "N.Tesla", 2002. god.
- [7] "Preventivna kontrola mernih transformatora u Sartid-u", Elaborat br.403046, Institut "N.Tesla", 2003. god.
- [8] "Gasnrohromatska ispitivanja uzoraka ulja iz energetskih transformatora", Elaborat br.403240, Institut "N.Tesla", 2003. god.
- [9] "Istraživanje prenapona i struja pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora u mreži 6 kV Sartid-a", Elaborat br.310309, Institut "N.Tesla", 2003. god.
- [10] "Istraživanja prenapona pri uključenju i isključenju filtera u mrežama 35 kV i 6 kV Sartid-a", Elaborat br.3103207, Institut "N.Tesla", 2003. god.
- [11] "Istraživanje prenapona i struja pri pojavi zemljospoja u mrežama 6 kV Sartid-a", Elaborat br. 310312, Institut "N.Tesla", 2003.god.
- [12] "Ispitivanja energetskih transformatora u Sartid-u", Izveštaji broj: .403304, 403328, 404359, 404265, 404386, 404186, 404123, 404103, 404222, 404111 i 404132, Institut "N.Tesla", 2004. god..
- [13] "Periodična ispitivanja na sistemu uzemljenja a.d. Sartid Smederevo", Elaborat br.310301, Institut "N.Tesla", 2003.god.
- [14] "Kontrola transformatora ispitivanjem ulja", Izveštaji broj: 404270, 404187 i 404361, Institut "N.Tesla" 2004. god..
- [15] "Preventivna kontrola mernih transformatora u Sartid-u", Izveštaji broj .404233 i 404146, Institut "N.Tesla", 2004.god.

- [16] "Harmonici napona u mrežama 6 kV, 35 kV i 110 kV Sartid-a", Elaborat br.310317, Institut "N.Tesla", 2003. god.
- [17] P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvić:"Prelazni naponski i strujni procesi u mreži 35 kV Sartid-a pri pojavi zemljospoja", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "N.Tesla"*, Beograd 2003.god., 53-61.
- [18] P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvić:"Prenaponi i struje pri pojavi zemljospoja u mrežama 6 kV Sartid-a", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "N.Tesla"*, Beograd 2004.god.
- [19] P. Vukelja, J. Mrvić, D.Hrvić:"Prenaponi i struje pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora u mreži 6 kV Sartid-a", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "N.Tesla"*, Beograd 2004.god.
- [20] "Harmonici napona u mrežama 6 kV, 35 kV i 110 kV U.S.Steel Serbia", Elaborat br.310407, Institut "N.Tesla", 2004.god.
- [21] Petar Vukelja, Radomir Naumov, Mitko Vučinić:"Uzroci kvarova u elektroenergetskim mrežama industrijskih postrojenja", *26. savetovanje JUKO CIGRE*, Banja Vrućica – Teslić, 25.30 maj 2003.god.
- [22] "Termovizijska ispitivanja elektroenergetskih postrojenja U.S.Steel Serbia", Elaborat br.3304073, Institut "N.Tesla", 2004. god
- [23] "Detekcija parcijalnih pražnjenja u mernim transformatorima u mreži 110 kV U.S. Steel Serbia", Izveštaj br.310418, Institut "N.Tesla", 2004.god.
- [24] P. Vukelja, J. Mrvić, D.Hrvić:"Harmonici napona i struja u mrežama 6 kV, 35 kV i 110 kV industrijskog kombinata" *27. savetovanje JUKO CIGRE*, Zlatibor, 29.05-3.06.2005. god.
- [25] P. Vukelja, J. Mrvić, D.Hrvić:"Problemi u redu elektroenergetskih mreža visokog napona velikog industrijskog kombinata" *27. savetovanje JUKO CIGRE*, Zlatibor, 29.05-3.06.2005. god.

**Abstract:** In the paper the transient current and voltage phenomena in power network 110 kV, 35 kV and 6 kV of U.S. Steel Serbia are presented and analysed. Also the appropriate power network equipment is tested. The mentioned research is part of the project under the title "Reliability increase and revitalisation of power supply network in Sartid" funded by the Ministry of science and environmental protection of Serbia. Based on the research results, the new measures are suggested in order to increase the reliability of the power network under scope.

**Key words:** *overvoltage, current, network, testing*

#### **TRANSIENT CURRENT AND VOLTAGE PHENOMENA RESEARCH IN POWER NETWORK OF U.S. STEEL SERBIA**

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić  
*Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla" - Belgrade*