

Viktor Milardić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
viktor.milardic@fer.hr

Jakov Sunara
Eurus d.o.o.
jakov@eurus.hr

Tonči Tadin
Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.
tonci.tadin@hops.hr

Sklopne operacije u plinom izoliranim, metalom oklopljenim VN postrojenjima

SAŽETAK

Oklopljena plinom izolirana postrojenja u Hrvatskoj se upotrebljavaju i kao unutarnja (u zgradi) i kao vanjska (na otvorenom). U radu je obrađena problematika uzemljenja takvih postrojenja te izbora i načina uzemljenja ekrana sekundarnih kabela. Posebna pažnja usmjerena je na činjenicu da uzemljivač koji je i dobro projektiran i izveden, obzirom na pogonsku frekvenciju od 50 Hz, ne mora uvijek uspješno smanjivati vrlo brze prijelazne prenapone. Pri visokofrekvencijskim pojavama dominantnu ulogu preuzimaju induktiviteti i kapaciteti vodiča, umjesto njihovih radnih otpora. Također, pri visokofrekvencijskim pojavama, efikasnost uzemljivača je ograničena na dio uzemljivača u blizini točke ulaska struje, pa razina generiranih prenapona u mnogo čemu ovisi o načinu i izvedbi uzemljivačkog sustava. U radu su prikazani i rezultati mjerenja prenapona na oklopu i u sekundarnim krugovima na jednom konkretnom vanjskom GIS postrojenju 110 kV.

Ključne riječi: oklopljeno rasklopno postrojenje (GIS), sklopne operacije, vrlo brzi prenaponi (VFTO), tranzijentni porast potencijala oklopa (TVER), elektromagnetska kompatibilnost (EMC)

Switching operations in gas-insulated, metal enclosed HV switchgear

SUMMARY

Gas-insulated switchgears are used in Croatia both as an internal (indoor) and external (outdoor). This paper deals with the grounding issues of such facilities and the selection of appropriate methods for shield grounding of secondary cables. Special attention was directed to the fact that well designed and constructed grounding, given the operating frequency of 50 Hz, is not always successful at decreasing very fast transient overvoltages. At high frequencies, dominant role is taken over by inductances and capacities of the cable, instead of its working resistance. Also, at high frequency phenomena, grounding efficiency is limited to the grounding nearest to the entry point of failure, so that the levels of generated overvoltages mainly depend on the design method of the grounding system. This paper also presents measurements of the overvoltages on metal enclosing and secondary circuits of one particular external 110 kV GIS.

Key words: Gas-insulated Switchgear (GIS), switching operations, Very Fast Transient Overvoltages (VFTO), Transient Enclosure Voltage Rise (TVER), Electromagnetic Compatibility (EMC)

1. UVOD

Tehnologija oklopljenih, plinom SF_6 izoliranih rasklopnih postrojenja (*engl. Gas Insulated Switchgear – GIS* ili *engl. Highly Integrated Switchgear – HIS*) našla je vrlo veliku primjenu tako da danas u svijetu rade postrojenja svih naponskih nivoa do 1100 kV, [1]. U Republici Hrvatskoj je ova tehnologija u primjeni od 1982. godine, kada je u transformatorsku stanicu 110/10(20) kV Ksaver u Zagrebu prvi put ugrađeno visokonaponsko rasklopno postrojenje tipa GIS, [2].

Prednosti postrojenja izoliranih plinom SF_6 , zbog dobrih izolacionih svojstava istog, je činjenica što zauzimaju malo prostora te su prilagodljiva okolini i time umanjuju mogući negativni vizualni utjecaj elektroenergetskog postrojenja u urbaniziranim zonama. Također velika prednost ovih postrojenja je činjenica da ne zahtijevaju gotovo nikakvo eksploatacijsko održavanje. Pri tome se redovno održavanje praktički svodi na dopunu postrojenja plinom u slučaju njegovog istjecanja. Nedostaci su visoki troškovi proizvodnje te poteškoće pri proširenju i pregradnji.

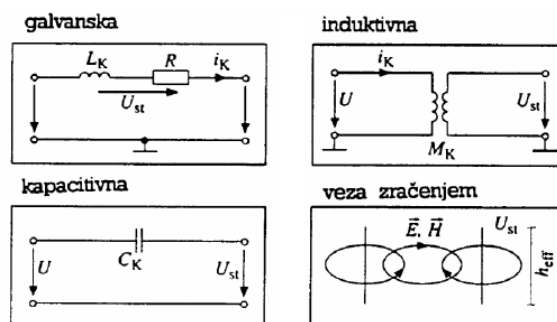
Tehnologija GIS postrojenja donijela je i neke nove probleme, poput pojave vrlo brzih i strmih prenapona (*engl. Very Fast Transient Overvoltages – VFTO*). Istraživanja su pokazala da su prenaponi uzrokovani različitim poremećajima koji nastaju unutar postrojenja, ili koji u postrojenje ulaze, a naročito sklopnim operacijama s rastavljačima, prekidačima ili zemljospojnicima. Iako su iznosi ovih prenapona relativno niski, tako da ih visokonaponska izolacija može izdržati, ipak oni stvaraju cijeli niz problema, budući se prenose na vanjsku stranu oklopa te preko mjernih transformatora u sekundarne krugove.

Dosadašnja iskustva pokazuju da veliku pažnju treba obratiti na uzemljivački sustav postrojenja kako pri projektiranju tako i pri njegovom izvođenju. Na taj način mogu se izbjeći problemi poput visokog porasta potencijala oklopa koji dovodi do preskoka te smetnji u sekundarnim krugovima.

2. SKLOPNE OPERACIJE

Sklopne operacije prekidačima, rastavljačima i zemljospojnicima uzrokuju poremećaje. Rastavljači u SF_6 postrojenjima služe za odvajanje otvorenog prekidača ili kratke neopterećene sabirnice, pri čemu se radi o prekidanju male kapacitivne struje. Budući da se pri otvaranju rastavljača njegovi kontakti relativno sporo odvajaju (1-2 s) u odnosu na brzinu kontakata prekidača (<100 ms) najuobičajeniji su povratni preskoci preko rastavljača. Prilikom udaljavanja ili približavanja kontakata rastavljača, zbog velike izolacione čvrstoće plina SF_6 proboj koji nastaje u plinu generira prenaponske valove vrlo velike strmine čela trajanja između 5-20 ns. Zbog navedenih sklopnih operacija, tijekom svakodnevnih aktivnosti oklopljenih postrojenja, širenjem unutarnji prenaponi kroz postrojenje nailaze na točke diskontinuiteta valne impedancije, prelamaju se i prelaze na vanjske dijelove postrojenja tzv. oklop, podižući privremeno potencijal oklopa i uzemljenih dijelova. U tom slučaju riječ je o prijelaznom porastu potencijala oklopa (*engl. Transient Enclosure Voltage Rise – TEVR*). Iznosi prijelaznog porasta potencijala u najvećoj mjeri ovise o induktivitetu dozemnih priključaka na sustav uzemljenja. U stvarnosti nisu rijetki slučajevi gdje razlike tranzijentnog potencijala dviju međusobno bliskih točaka poprimaju iznose od nekoliko desetaka pa i više kV, što dovodi do vidljivih i čujnih preskoka na vanjskim dijelovima oklopa postrojenja.

Druga nuspojava koja se javlja pri svakodnevnim sklopnim aktivnostima oklopljenih postrojenja, jest širenje, tj. propagacija spomenutih prenapona u sekundarne krugove, pri čemu su moguće lažne prorade relejne zaštita, smetnje u signalizaciji, lažne dojave protupožarnih zaštita, itd. Općenito može se reći da postoje četiri načina prijenosa visokofrekvencijskih smetnji u sekundarne krugove VN postrojenja: galvanski, induktivni, kapacitivni i pri najvišim frekvencijama dolazi do antenskog efekta, tj. poremećaji se šire elektromagnetskim poljem, koji su principjelno prikazani na slici 1, [3].



Slika 1. Način prijenosa smetnji iz primarnih u sekundarne krugove VN postrojenja

Koji od načina prijenosa je dominantan, ovisi prvenstveno o karakteristikama promatrane elektroenergetske opreme na dotičnom mjestu u postrojenju te o svojstvima prijelazne pojave promatrane kao izvor struje. S porastom naponske razine oklopljenih postrojenja, navedene nuspojave postaju sve izraženije, te je smanjenje iznosa prijelaznog potencijala oklopa i uzemljenih dijelova oklopa postrojenja na prihvatljivu razinu, jedna od mjera za postizanje traženog stupnja elektromagnetske kompatibilnosti postrojenja.

2.1. Tranzijentni porast potencijala oklopa

Tranzijentni porast potencijala oklopa (*engl. Transient Enclosure Voltage Rise – TEVR*) uzrokovan je prenaponima vrlo visoke frekvencije (više MHz), za koje i mali induktiviteti predstavljaju vrlo visoke impedancije, pa je stoga najviše zavisao o induktivitetima uzemljivačkih veza. Uzemljivačke trake dovoljno efikasno sprečavaju porast potencijala pri nižim frekvencijama, tako da niske frekvencije nemaju udjela u porastu potencijala oklopa. Međutim, pri višim frekvencijama i duljim uzemljivačkim trakama, one predstavljaju veliki induktivni otpor. U cilju smanjenja amplituda TEVR potrebno je čim više smanjiti induktivitete uzemljivačkih veza. Nivo TEVR jako zavisi o načinu i izvedbi uzemljivačkog sustava.

Pri sklopnim manipulacijama u SF₆ postrojenjima šire se putni valovi, od polova rastavljača na sve strane unutar oklopa. Samo kroz otvore na oklopu mogu elektromagnetska polja povezana s putnim valovima napustiti oklop. Ti otvori su neizbježni za provodne izolatore rasklopnog postrojenja, ali često su to i kableske glave, kompenzacijske pločice u spojevima oklopa, strujni i naponski mjerni transformatori ili druga mjesta za mjerenje.

Do porasta potencijala oklopa dolazi zbog prelaska unutarnjih prenapona na vanjske dijelove oklopa, to se najčešće dešava na diskontinuitetima kao što su provodni izolator SF₆ - zrak i priključak energetskog kabela.

Mjerenja i proračuni pokazuju da povišenje potencijala oklopa, pri sklopnim operacijama prekidačem i naročito manipulacija rastavljačima, za oklopljena rasklopna postrojenja nazivnog napona 123 kV, može doseći nekoliko desetaka kV, ovisno o načinu izvedbe uzemljenja oklopa.

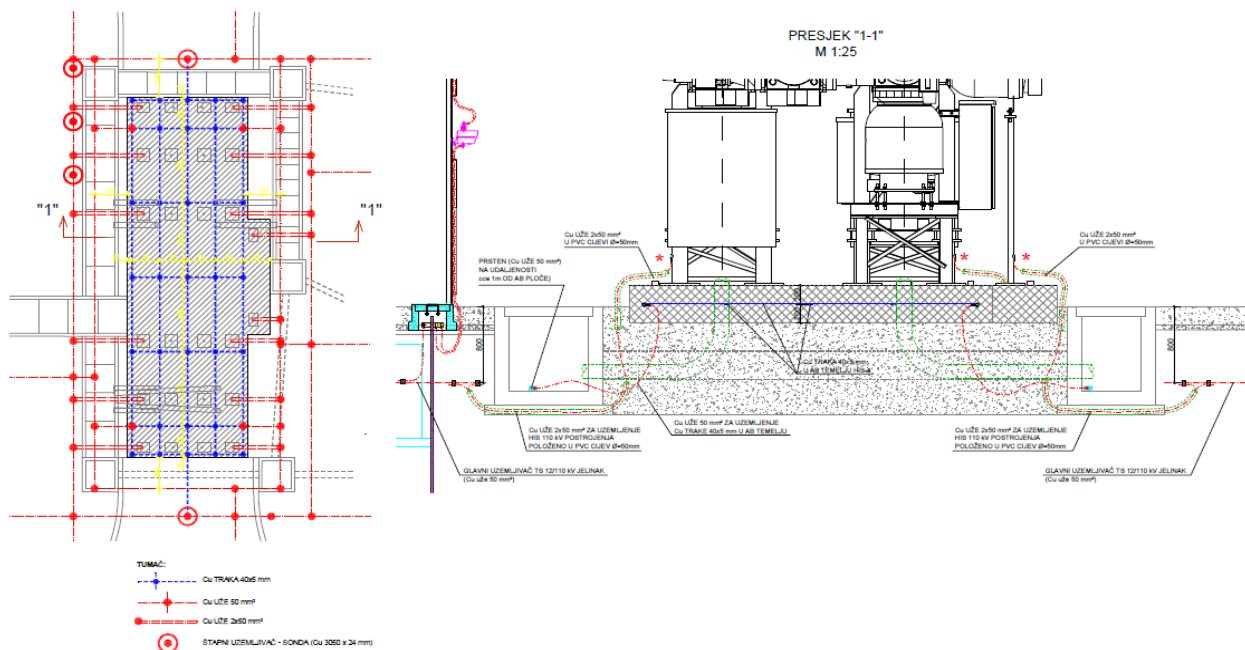
3. MJERE ZA SMANJENJE ELEKTROMAGNETSKIH UTJECAJA

Problemi elektromagnetske kompatibilnosti su izraženiji u oklopljenim VN postrojenjima nego u vanjskim VN postrojenjima istog nazivnog napona. Zbog tog razloga se istima u oklopljenim VN postrojenjima mora posvetiti osobita pažnja.

Za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u prvome redu važno je pravilno dimenzioniranje uzemljivačkog sustava postrojenja. U najvećem broju slučajeva, otpor rasprostiranja projektiranog uzemljivačkog sustava VN postrojenja ima niske vrijednosti, što onemogućava nedozvoljeni porast potencijala uzemljivača i svih metalnih dijelova prilikom jednopolnih kratkih spojeva, a time se smanjuju i struje koje se pri tome javljaju u metalnim plaštovima kabela. Za smanjenje utjecaja smetnji povoljno je sve metalne dijelove koji se uzemljuju spojiti na što više mjesta s uzemljivačem čim kraćim vezama. Time se postiže grananje struje kratkog spoja, pa se tako smanjuje elektromagnetsko polje i inducirani naponi u neposrednoj okolini.

Međutim, treba imati na umu činjenicu da uzemljivač koji je dobro projektiran i izveden s obzirom na pogonsku frekvenciju od 50 Hz ne mora uvijek uspješno smanjivati prijelazne prenapone u sekundarnom ožičenju, zato jer se tu radi o visokofrekvencijskim pojavama, kod kojih dominantnu ulogu preuzimaju induktiviteti i kapaciteti vodiča, umjesto njihovih radnih otpora. Pri visokofrekvencijskim pojavama je efikasnost uzemljivača ograničena na dio uzemljivača u blizini točke ulaska struje. Uslijed toga se u uzemljivačima, uzemljivačkim vodovima i između kućišta opreme koja su povezana uzemljivačkim vodovima pojavljuje potencijalna razlika.

Sa slike 2. vidljivo je da je centralnu točku uzemljenja svakog uklopnog polja (pod tim se podrazumijeva modul VN polja koji sadrži sklopne aparate) potrebno direktno spojiti na uzemljivački sustav zamkastih uzemljivača. Osim toga preporuča se na što više mjesta povezati vodove za uzemljenje sa metalnom konstrukcijom zgrade i armaturom.



Slika 2. Izvedba uzemljenja oklopljenog rasklopnog HIS postrojenja TS 12/110 kV Jelinak

Za oklopljeno postrojenje svakako je preporučljivo povezati oklop postrojenja na uzemljivački sustav na mjestima prelaska postrojenja na provodne izolatore, te na kabelske glave. Isto tako je dobro izvršiti dodatno galvansko povezivanje oklopa naponskih i strujnih mjernih transformatora s oklopom ostalih dijelova postrojenja.

Kada se radi o glavnom temeljnom uzemljivaču oklopljenog postrojenja, treba povesti računa o sljedećem:

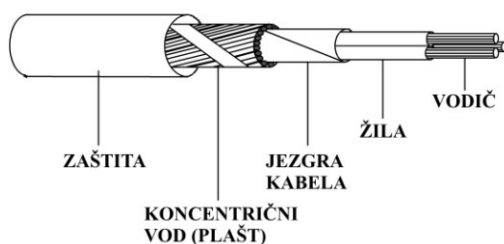
- Preporučljivo je izvesti mrežu uzemljivačkog sustava sa što manjom širinom zamke, posebice kod mjernih transformatora.
- Na rubovima uzemljivačkog sustava, kao i u blizini mjernih transformatora preporuča se izvesti smanjenu širinu zamke uzemljivačke mreže.
- Priključak vodova za uzemljenje uređaja kao što su mjerni transformatori, prekidači i ormari za smještaj opreme mora biti dio zamke. Ako te uzemljivače polažemo zrakasto ne smije im duljina biti veća od 1 m.
- Mjerodavna veličina za smanjenje prijelaznih prenapona je prijenosna impedancija, odnosno, mjerodavna veličina nije presjek nego gornja površina uzemljivača, materijal i način polaganja. Zato je umjesto bakrenih užeta preporučljiva upotreba širokih bakrenih traka za uzemljenje istog presjeka. Isto vrijedi i za spojne vodove.
- Poželjno je koristiti uzemljivačke trake što manjeg induktiviteta. Pri polaganju uzemljivačkih traka preporuča se upotreba dvije paralelne trake umjesto jedne istog presjeka.
- Građevinske ploče mogu poslužiti za smanjenje visokofrekvencijskih prenapona, budući da ploče predstavljaju vodljivu vezu s uzemljivačkim sustavom malog induktiviteta.
- Svi uzemljivači jednog zamkastog uzemljivača trebaju biti položeni na istoj dubini.
- Veza između vodova za uzemljenje uređaja i zamkastog uzemljivača treba biti što je moguće kraća i malog induktiviteta, te treba biti električki dobro vodljiva i otporna na koroziju.
- U točkama križanja mreže zamkastih uzemljivača treba uzemljivače međusobno spojiti vodljivom vezom.
- Ekran (plašt) VN kabela, ukoliko u pogonu ne mora biti izoliran, treba na najkraći način spojiti s postrojenjem. Veze kabelski ekran - rasklopno postrojenje s uzemljivačem trebaju biti simetrično raspoređene oko kabelskog priključka.
- Ako je ekran VN kabela jednostrano uzemljen, rasklopno postrojenje i ekran izoliranog kraja VN kabela moraju biti spojeni s odgovarajućim elementima (odvodnici prenapona, iskrišta) ne samo za zaštitu izolacije kabela nego i za zaštitu sekundarne opreme. Mjere za zaštitu treba usuglasiti s proizvođačem (projektantom) VN kabela. Kabelski ekrani sa zaštitnim mjerama od korozije zahtijevaju posebne uvjete (izvedbe). U tom slučaju mjere za zaštitu od prijelaznih prenapona treba uskladiti s mjerama antikorozivne zaštite.

- Metalne kabelaške kanale odnosno kabelaške police treba spojiti s uzemljenjem.
- U zgradi postrojenja treba predvidjeti, ako je to moguće, površinski velike zamkaste uzemljivače.

3.1. Mjere za smanjenje elektromagnetskih utjecaja u sekundarnim krugovima

Potencijalne razlike u uzemljivačkom sustavu izazvane visokofrekvencijskim smetnjama stvaraju uzdužni naponi. Za smanjenje uzdužnog napona potrebno je izvesti pravilno vođenje vodova, njihovo oklopanje i višestruko uzemljenje sekundarnih krugova.

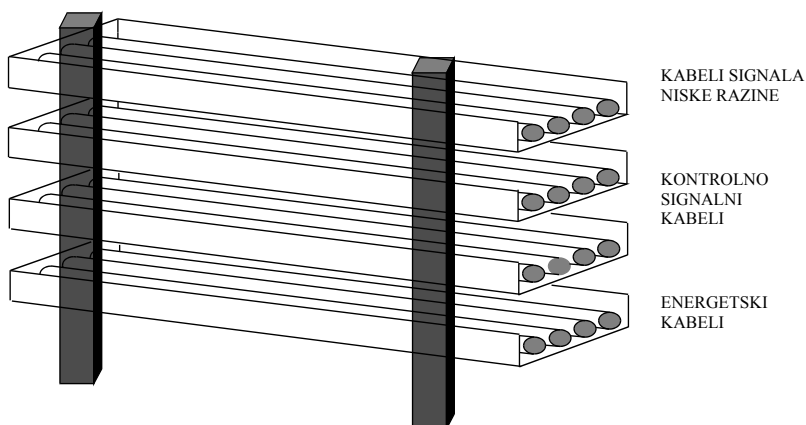
Vodovi mjernih naponskih i strujnih transformatora, kontrolnih i niskonaponskih krugova trebaju biti oklopljeni s metalnim plaštevima koji mogu voditi struje (slika 3.). Po VDE normama, takvi kabeli imaju oznaku NYCY, dok prema hrvatskim normama oni nose oznaku PP40 i PP71. Odstupanje od ovog pravila dozvoljeno je samo ako proizvođač opreme zahtjeva drugačije.



Slika 3. Kabel s koncentričnim vodom (metalnim plaštem)

Gdje je to moguće kabele treba položiti paralelno i što je moguće bliže uzemljivačima. Vod ili traka uzemljenja postavljena u kabelaški kanal ne mogu nadomjestiti uzemljivač, ali mogu doprinijeti smanjenju prenapona.

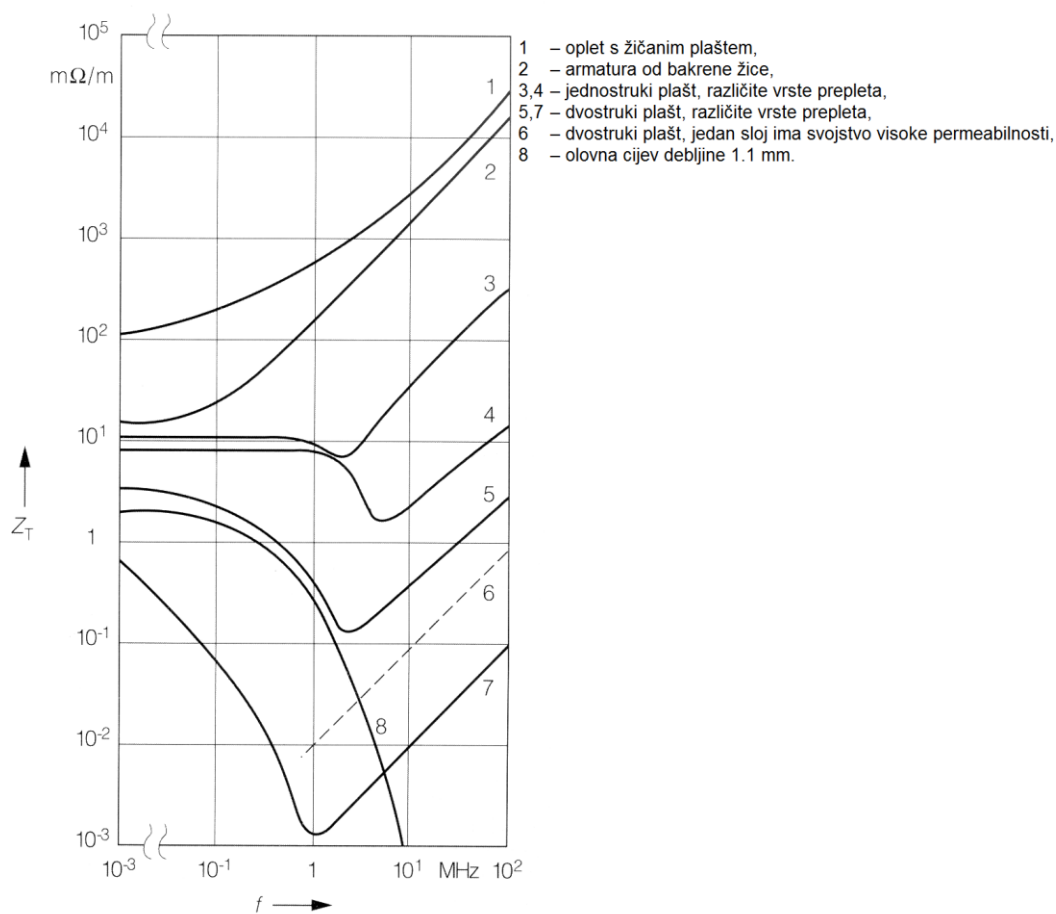
Polaganje kabela izvodi se unutar kabelaških kanala. U kabelaškom kanalu idealan raspored bio bi onaj u kojem su kabeli sekundarnih krugova položeni između uzemljenih i međusobno spojenih policica kabelaških nosača. Jedna mogućnost izvedbe prikazana je na slici 4. Razmak između različitih tipova kabela trebao bi biti veći od 15 cm, u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Pojedine police električki su povezane na vertikalne potpore. U kabelaški kanal također je smješten uzemljivački vod koji je na odgovarajućim mjestima spojen na kabelaške nosače i mrežni uzemljivač postrojenja. Zahvaljujući ovakvom rasporedu, padovi napona koji nastaju duž induktiviteta ekrana kabela slijede profil uzemljivačkog sustava.



Slika 4. Prikaz polaganja kabela u police

Za eliminiranje elektromagnetskog utjecaja potrebno je ekran (plašt) kabela uzemljiti na oba kraja. Obostranim uzemljenjem plašta moguće je tranzijentne razlike potencijala u uzemljenju neutralizirati relativno prema kabelaškim žilama.

Na slici 5. prikazani su iznosi prijenosnog otpora (impedancije) različitih kabelaških plaštevima u ovisnosti o frekvenciji. Prijenosna impedancija sprječava pojavu uzdužne komponente napona, a time ujedno osigurava zaštitu od visokofrekvencijskih smetnji.



Slika 5. Iznos prijenosnog otpora (impedancije) različitih kabljskih plašteva

Plaštevi kabela se izabiru prema prijenosnoj impedanciji, stoga se mora paziti na način spajanja plašta na uzemljenje. Struja koja teče plaštem mora se odvoditi koaksijalno na vanjski zid zgrade ili na kućište uređaja, a ako to nije moguće onda može i na jednu široku sabirnicu uzemljenja (slika 6.). Kućište odnosno sabirnica mora biti povezana vezom malog induktiviteta s referentnom točkom uzemljenja sekundarnih uređaja ili biti ta referentna točka.

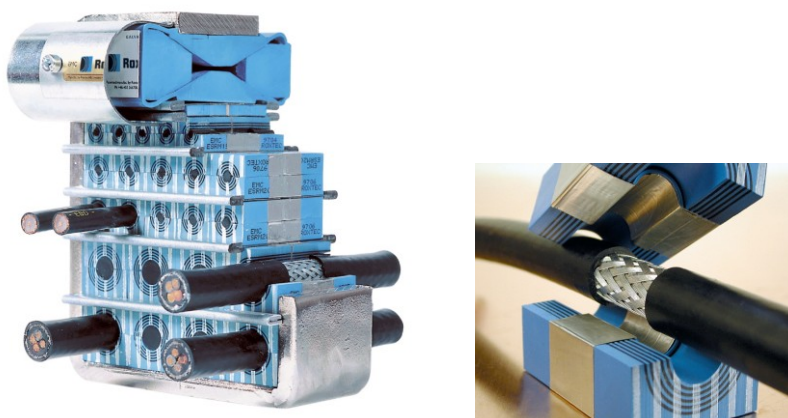


Slika 6. Priključak kabljskog plašta na kućište: koaksijalni priključak i priključak vodičem

Dobro je kabljske plašteve koji npr. dolaze iz vanjskog rasklopnog postrojenja uzemljiti odmah pri ulasku u objekt (relejni kućicu), a ne tek na ormaru. Za takvo uzemljenje kabljskog plašta postoji više mogućnosti, ali u svakom slučaju mora se skinuti vanjska izolacija kabela:

- kabljski plašt se s metalnom kabljskom obujmicom pričvršćuje na bakrenu sabirnicu koja je spojena s armaturom zgrade na najkraći mogući način;
- kabljski plaštevi su jedan do drugog položeni u metalnu posudu koja je povezana s armaturom i pritisnuti kao u preši;

- kabelski plaštevni su postavljeni u metalne dosjede koji točno odgovaraju promjeru plašta. Više takvih dosjeda postavljeno je u na tlak otporne i uzemljene metalne okvire (slika 7.).



Slika 7. Veza kabelskih plašteva preko obujmice

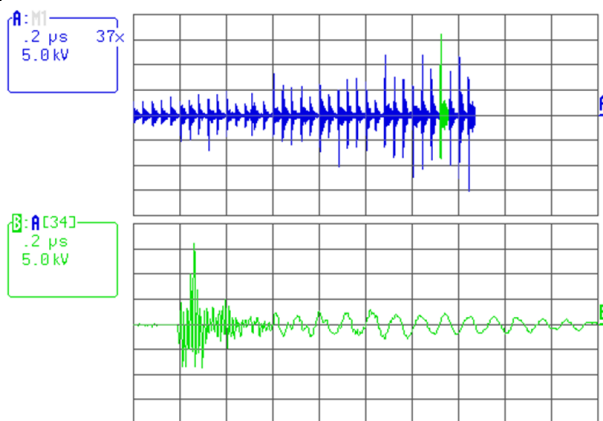
4. REZULTATI MJERENJA EMC U HIS POSTROJENJU TS JELINAK

Spomenute pojave mjerene su u jednom HIS postrojenju TS 12/110 kV Jelinak (metalom oklopljeno i SF₆ plinom izolirano rasklopno postrojenje za vanjsku montažu) [4], proizvođača SIEMENS [5]. Priključak postrojenja na elektroenergetsku mrežu ostvaren je s dva dalekovodna polja 110 kV, kao ulaz i izlaz na postojeći dalekovod. Postrojenje je koncipirano s jednim sustavom sabirnica s mogućnošću uzdužnog sekcioniranja rastavljačima.

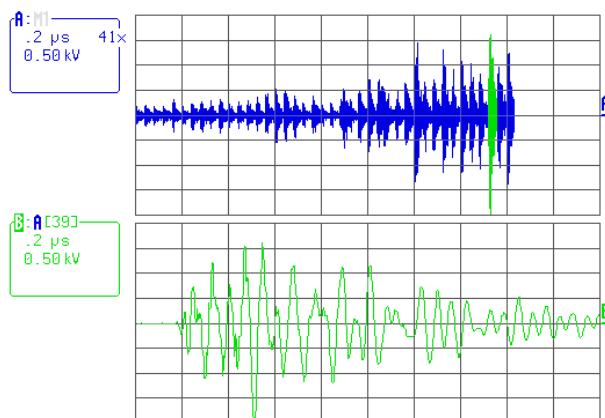
Glavni dio ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti je bio usmjeren na mjerenja visokofrekvencijskih prenapona u sekundarnim krugovima mjernih transformatora, na ulaznim priključcima upravljačkih i zaštitnih uređaja, na karakterističnim točkama uzemljenja oklopa, a sve to prvenstveno pri sklopnim operacijama rastavljača. Pokusi su ponavljani veći broj puta u istoj ispitnoj konfiguraciji jer su povratni preskoci, a time i prenaponska prijelazna pojava izrazito stohastičkog karaktera. U pravilu se postrojenje može ocijeniti elektromagnetski kompatibilnim ako razine prenesenih vrlo brzih prenapona u sekundarnim krugovima u ormarima u postrojenju ne prelaze 3 kV, a relejnim ormarima ne prelaze 1 kV, [6]-[9].

Prema slici 8., vidljivo je da prenaponi nastali zbog sklopnih manipulacija rastavljača, mjereni na oklopu HIS postrojenja iznose do 16,3 kV. Navedeni iznos vršne vrijednosti prenapona na oklopu postrojenja nisu takve da bi mogle izazvati preskoke između pojedinih dijelova oklopa.

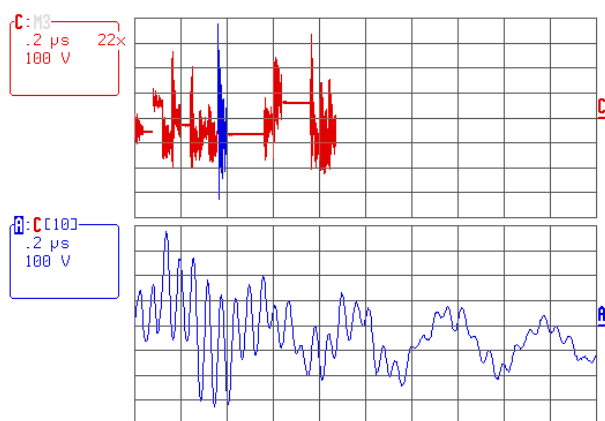
U sekundarnim krugovima prenaponi se smanjuju što se više udaljavamo od mjesta izvora istih (slika 9. i slika 10.). Najveće izmjerene vršne vrijednosti u ormarima u vanjskom postrojenju su manje od 3 kV, slika 9. Maksimalni prenaponi u ormarima zaštite i upravljanja ne prelaze 381 V (slika 10.), što je ispod spomenute granične vrijednosti od 1 kV, iznad koje bi moglo doći do ozbiljnijih problema u funkcionalnosti postrojenja.



Slika 8. Prenaponi na oklopu; Najveća vršna vrijednost 16,3 kV



Slika 9. Prenaponi na izvodima SMT u ormaru polja; Najveća vršna vrijednost 1,92 kV



Slika 10. Prenaponi na izvodima NMT u ormaru zaštite; Najveća vršna vrijednost 381 V

Analizom rezultata mjerenja vrlo brzih prenapona na oklopu i sekundarnim krugovima GIS (HIS) postrojenja, moguće je utvrditi je li postrojenje elektromagnetski kompatibilno, te pouzdano za siguran rad. U koliko su korektno provedene ranije navedene mjere, za očekivati je da će i prenaponi na oklopu i u sekundarnim krugovima biti unutar prihvatljivih vrijednosti.

5. ZAKLJUČAK

U radu je opisana specifična problematika visokonaponskih plinom SF₆ izoliranih rasklopnih postrojenja koja je uglavnom uzrokovana sklopnim manipulacijama s rastavljačima, pri čemu se javljaju visokofrekvencijski prenaponi i njima pridružene struje.

Nastanak neprihvatljivo visokih vrlo brzih prenapona i njihovo širenje izvan oklopa je moguće izbjeći jedino pravilnim projektiranjem i izvođenjem uzemljivačkog sustava. Pri projektiranju i izvođenju uzemljivača postrojenja posebnu pažnju treba posvetiti visokofrekvencijskim karakteristikama uzemljivačkih veza. Uporabom odgovarajućih oklopljenih sekundarnih kabela te pravilnim polaganjem i obostranim uzemljenjem ekrana kabela smanjuju se prenaponi u sekundarnim krugovima.

Mjerenjem vrlo brzih prenapona na oklopu i u sekundarnim krugovima, u probnom radu postrojenja, može se utvrditi ja li postignuta očekivana elektromagnetska kompatibilnost.

6. LITERATURA

- [1] Riechert U, Holaus W, Krüsi U, Sologuren D. "Gas-Insulated Switchgear for 1100kV – Challenges in Development and Testing", CIGRÉ 6th Southern Africa Regional Conference, Colloquium of CIGRÉ SC A2/A3/B3, 2009, Somerset West, 17–21 August 2009, South Africa.

- [2] D. Megla, M. Mrdak, S. Megla "Sigurnosni aspekti uporabe sumporovog heksafluorida u elektrodistribucijskim postrojenjima", CIRED, 8. savjetovanje, svibanj. 2010.
- [3] I. Uglešić, V. Milardić, M. Mandić, A. Tokić: Elektromagnetska kompatibilnost u visokonaponskim postrojenjima, studija FER Zagreb, 2008.
- [4] V. Milardić, T. Tadin, J. Čović: Izvješće o mjeranju vrlo brzih prenapona u 110 kV postrojenju TS 12/110 kV TS Jelinak, elaborat, FER Zagreb, 2012.
- [5] D. Helbig, M. Meinherz, HIS – An Innovative Substation Concept, SIEMENS PTD
- [6] V. Milardić: Prenaponi strmog čela u sekundarnim krugovima visokonaponskih rasklopnih postrojenja, Magistarski rad, FER Zagreb, 2001.
- [7] IEC 61869-1 (2007-10): Instrument transformers – Part 1: General requirements.
- [8] IEC 61869-2 (2012-09): Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers.
- [9] IEC 61869-3 (2011-07): Instrument transformers – Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers.