

Katarina Musulin
Ravel d.o.o.
katarina.musulin@ravel.hr

Zdravko Šojat
HOPS – Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.
zdravko.sojat@hops.hr

Velimir Ravlić
Ravel d.o.o.
velimir.ravlic@ravel.d.o.o.

Nena Alar-Pavić
Ravel d.o.o.
nena.alar-pavic@ravel.d.o.o.

SPECIFIČNOSTI IZVEDBE SUSTAVA UZEMLJENJA KOD METALOM OKLOPLJENIH I PLINOM SF₆ IZOLIRANIH POSTROJENJA (GIS)

SAŽETAK

Sustav uzemljenja u metalom oklopljenim i plinom SF₆ izoliranim postrojenjima (zgrada postrojenja) treba omogućiti na maloj površini (cca 25% površine standardnog AIS postrojenja naponske razine 123 kV) prihvat struja jednopolnih kratkih spojeva kao i struja na visokim frekvencijama (VFTO i atmosferski prenaponi). Kod visokofrekvencijskih pojava efikasnost uzemljivača je ograničena na dio uzemljivača u blizini točke ulaska struje. U radu su prikazana iskustva pri projektiranju sustava uzemljivača za 110 kV postrojenja u GIS izvedbi s posebnim naglaskom na tehnička rješenja sustava uzemljenja za 110 kV postrojenje u GIS izvedbi u TS 220/110/35 kV PEHLIN te preporuke za uzemljenje GIS-a kao i zgrade u kojoj je smješten. Druga problematika koja se javlja pri projektiranju i izvođenju sustava uzemljenja su različiti uzemljivački materijali te njihovi spojevi. Osnovni uzrok oštećenja i razaranja metalnih masa je korozija. Zbog toga je uzemljenje transformatorskih stanica u kojima je smješten GIS kompleksno.

ključne riječi: Uzemljenje, VFTO, GIS, zgrada GIS-a, korozija

SPECIFIC DESIGN OF EARTHING SYSTEM FOR GIS INDOOR SUBSTATION

SUMMARY

The design of earthing system for GIS indoor substation is different from conventional AIS. GIS indoor substation normally occupies only 25 % of land required for conventional AIS for 123 kV. Typically, the earthing system of GIS indoor substation has to be capable to carry power frequency short circuit currents as well as high frequency currents from switching (VFTO) and lightnings. Connection of GIS enclosures to the equipotential earthing grid should be as short and straight as possible to reduce the impedance at higher frequencies. This paper presents the experience in designing earthing systems for 110 kV GIS with emphasis on technical solutions to the grounding system of 110 kV GIS in TS 220/110/35 kV PEHLIN and recommendations for earthing GIS and building in which it is located.

Another issue that arises in the design and implementation of earthing system are different materials and their connections. Also discussed are corrosion resulting from electrochemical reactions and methods for dealing with. Therefore, the design of earthing system in substation building with GIS should be carefully taken into account.

Key words: earthing system, VFTO, GIS, corrosion

1. UVOD

1.1. Uzrok smetnji u metalom oklopljenim i plinom SF₆ izoliranih postrojenja (GIS)

Primjena metalom oklopljenih i plinom SF₆ izoliranih visokonaponskih rasklopnih postrojenja (engl. *Gas Insulated Switchgear* - GIS) susreće se u svjetskoj praksi već nekoliko desetljeća. U urbanim zonama preferira se izgradnja transformatorskih stanica sa smještajem postrojenja u zgradi zbog uklapanja postrojenja u životnu sredinu s prihvatljivim estetskim rješenjima, zadovoljavanja ekoloških zahtjeva te zbog manjeg raspoloživog prostora. Takva izvedba postrojenja dobiva sve veći značaj jer smještajem postrojenja u zgradi smanjujemo utjecaj na okolinu i sigurnost ljudi koji borave u blizini. Uz brojne prednosti, tehnologija plinom SF₆ izoliranih oklopljenih postrojenja donijela je nove probleme, koji su bili nepoznati u visokonaponskim postrojenjima konvencionalne izvedbe. Problematika uzemljenja transformatorskih stanica sa ugrađenim GIS-om, osim kao kod konvencionalnog uzemljenja, odnosi se i na uzemljenje GIS-a kod tranzijentnog porast potencijala oklopa (engl. TEVR - Transient Enclosure Voltage Rise) uzrokovanog prenaponima vrlo visoke frekvencije (više MHz). Prenaponi mogu biti uzrokovani različitim poremećajima koji nastaju unutar postrojenja, ili koji u postrojenje ulaze, poput:

1. udara groma u nadzemni spojni vodič između vanjskog i unutarnjeg postrojenja, udar groma u fazni ili zaštitni vodič kod spoja GIS-a sa DV kratkim kabelskim dionicama ,
2. kratki spoj na vodu ili kabelu ispred postrojenja,
3. proboj u samom postrojenju, između vodiča i oklopa ili između susjednih faza,
4. sklopne operacije s rastavljačima, prekidačima ili zemljospojnicima.

Za većinu gradskih transformatorskih stanica koje su kabelski interpolirane u prienosnu mrežu od primarnog su značaja poremećaji navedeni pod rednim brojem 3. i 4. i koji izazivaju visokofrekvencijske prijelazne pojave (VFTO) (npr. TS 110/10(20) kV TURNIĆ; TS FERENŠČICA). Međutim, u slučaju TS 220/110/35 kV PEHLIN osim kabelskog povezivanja sa susjednim transformatorskim stanicama, 110 kV postrojenje je povezano kratkim kabelskim dionicama (do 100 m duljine) do izlaznih portala za spoj na zračne vodove te za uzemljenje GIS-a osim prenapona uzrokovanih VFTO, utječu i prenaponi uzrokovani atmosferskim izbijanjima .

Dosadašnja iskustva s oklopljenim SF₆ postrojenjima pokazala su kako sklopne operacije, naročito s rastavljačima, izazivaju neželjene poremećaje i uzrokuju razne smetnje. Preskoci u postrojenjima izazivaju prenapone, koji se šire po postrojenju i naprežu njegovu izolaciju, te se nazivaju unutarnji VFTO. Kad ovi prenaponi izađu izvan postrojenja, oni podižu potencijal oklopa i uzemljenih dijelova pa se govori o vanjskim VFTO. Sklopne manipulacije rastavljačima u ovakvim postrojenjima stvaraju prenapone koji nemaju visoku amplitudu, ali su vrlo strmog čela. Oni prelaze na vanjsku stranu oklopa, što dovodi do njegovog tranzijentnog porasta potencijala. Poremećaji su praćeni impulsnim strujama i naponima te se prenose u mjerne, signalne i upravljačke krugove konduktivnim, induktivnim, kapacitivnim putem, a kod najviših frekvencija dolazi i do antenskog efekta, tj. poremećaji se šire zračenjem. Današnja sekundarna oprema visokonaponskih rasklopnih postrojenja je procesorski orijentirana, u potpunosti elektronička, te samim time osjetljiva na smetnje

Za ublažavanje posljedica ovih fenomena važna je izvedba uzemljivačkog sustava, odnosno mora se voditi računa o visokofrekvencijskim karakteristikama uzemljivačkih veza. Kod visokofrekvencijskih pojava 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.

Kod klasičnih postrojenja otpor rasprostiranja projektiranog uzemljivačkog sustava 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 metalnom ekranu kabela. Za transformatorske stanice GIS izvedbe je karakteristično da su smještene na malom prostoru te je time smanjena i površina uzemljivača za prenapone uzrokovane kratkim spojevima. Također treba uzeti u obzir činjenicu da uzemljivač koji je dobro projektiran i izveden s obzirom na pogonsku frekvenciju od 50 Hz ne mora 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.

1.2. Uvod u specifičnost uzemljenja zgrade transformatorske stanice za smještaj GIS-a

Za uzemljenje zgrade transformatorske stanice u kojoj je smješten GIS te sredjenaponska i niskonaponska postrojenja kao i energetski transformatori te transformatori vlastite potrošnje u zasebnim komorama, osim specifičnosti uzemljenja opreme, prvenstveno GIS-a te sekundarnih krugova i spoja na glavni uzemljivač, specifičnost uzemljenja se odnosi i na uzemljenje zgrade postrojenja. Zgrade

predviđene za ugradnju GIS-a su obično na malim parcelama sa specifičnim zahtjevima glede izvedbe gabarita zgrade, estetskog uklapanja u okolinu, te specifičnih zahtjeva kao što je npr. ugradnja geomembrane za zaštitu od prodora ulja u tlo tj. zaštitu podzemnih voda ili hidroizolacija između sloja podbetona i temelja zgrade koja izolira temelj zgrade do visine od oko 0,5 m iznad kote tla. Sve to smanjuje djelotvornost uzemljivača što zbog smanjene veličine mreže uzemljivača, dubine polaganja uzemljivača, udaljenosti ukopanih sondi od geomembrane, hidroizolacije zgrade koja izolira temelje zgrade, a time i temeljni uzemljivač od okolnog tla te naposljetku raznovrsnost uzemljivačkih materijala. Problematika koja se javlja pri projektiranju i izvođenju sustava uzemljenja su različiti uzemljivački materijali te njihovi spojevi. Raznolikost metala, prirodnih i umjetnih uzemljivača, izloženih utjecaju vlažne ili kemijski agresivne atmosfere, betonu, normalnoj ili agresivnoj zemlji, zahtijeva poseban pristup rješavanju problema trajnosti ugrađenih metala. Osnovni uzrok oštećenja i razaranja metalnih masa je korozija. Zbog toga je osnovni pristup rješavanju zaštite od previsokog napona dodira vrlo kompleksan. Pravilan izbor ugrađenih uzemljivača zasniva se na poznavanju potencijala tih metala.

2. IZVEDBA UZEMLJENJA ZGRADE TRANSFORMATORSKE STANICE ZA SMJEŠTAJ GIS-a

Kako je navedeno u uvodnom djelu, zgrade u kojima se smješta GIS su obično na malim površinama na više etaža, gdje je GIS smješten u prizemlju ili prvoj etaži zgrade kako bi se lakše izveo spoj s energetskim transformatorom (bus duct) ukoliko su isti smješteni u zgradi postrojenja (transformatorskim komorama). Najbolji način uzemljenja zgrade s metalom oklopljenim 110 kV postrojenjem je izvođenje tri odvojena sustava uzemljenja: zaštitnog uzemljenja za izjednačavanje potencijala, pogonskog uzemljenja te sustava za zaštitu od munje. Zaštitno uzemljenje se izvodi spajanjem svih metalnih masa na najbliži sabirni vod za izjednačavanje potencijala, uzemljenja metalom oklopljenog 110 kV postrojenja, povezivanje svih sabirnih vodova na glavni uzemljivač, povezivanje temeljnog i glavnog uzemljivača (u uzemnim zdencima), povezivanje temeljnog i glavnog uzemljivača s pogonskim uzemljenjem, odvoda za zaštitu od munje s temeljnim uzemljivačem (mjerni spoj), te povezivanjem armaturnog željeza sa temeljnim i glavnim uzemljivačem.

Temeljni uzemljivač ugrađuje se u betonski dio temelja iznad hidroizolacijskog sloja, u betonsku posteljicu te je sa svih strana zaštićen od neposrednog kontakta sa zemljom. Najveća prednost pred ostalim uzemljivačima je ta, da kada uzemljivač izvedemo po propisima, tada se isti u potpunosti prekrije betonom debljine do 50 mm. Standardno se temelj izvodi betonom razreda C25/30 i spada u razred izloženosti okoliša XC (korozija uzrokovana karbonizacijom) tj. najmanji zaštitni sloj za armaturu je 20 mm. Na taj način temeljni uzemljivač kao i armaturno željezo je konzerviran i relativno dobro zaštićen od korozije. U odnosu na uzemljivače u zemlji uzemljivači u temeljima imaju tu prednost, da imaju konstantnu otpornost uzemljenja, a kod ostalih uzemljivača ta vrijednost varira u zavisnosti od godišnjih doba.

Za zgrade koje se grade u području visokih podzemnih voda ili na položajima s podzemnom vodom pod tlakom, za podrumске etaže potrebno je predvidjeti posebne mjere protiv prodora vlage te temeljnu ploču treba izolirati od prodora vode, tako da se na unutarnjoj strani ne može pojaviti nikakva vlaga. U vezi s tim posebno se postavlja pitanje je li pritom održana funkcionalnost temeljnog uzemljivača, što se tiče mjera sigurnosti za ljude prema HRN HD 637 S1, te kao uzemljivača sustava zaštite od munje prema HRN EN 62305:2011.

Hidroizolacija se nanosi postupkom crna kada nanošenjem višeslojne bitumenske trake na vanjske dijelove zgrade koji dolaze u zemlju. Vanjski se zidovi premazuju bitumenom ili katranom na koji se obično lijepi do 3 sloja bitumenske trake. U tom slučaju prstenasti vodič položen u temeljnu ploču iznad hidroizolacije može poslužiti jedino kao uzemljivač za upravljanje potencijalom u zgradi. Zbog visokoomske izolacije prema van, uzemljivač nije u dodiru sa zemljom. Stoga je potrebno dodatno položiti drugi uzemljivač koji će biti ujedno i glavni uzemljivač transformatorske stanice ispod svih hidroizolacija u podložnom (mršavom) betonu, obično razreda C16/20. Okolišna zemlja osigurava betonu konstantno određenu vlažnost i popravlja vodljivost. Navedena mreža izvan podbetona polaže se na dubini cca.0,8 m i izvodi se bakrenim užetom 95 mm². Okno navedene mreže ovisi o veličini prostora predviđenog za transformatorsku stanicu te za gradske stanice se kreće cca 4x4m. Dubinu polaganja i vrstu uzemljivača treba odabrati tako da se razni utjecaji na uzemljivač kao što su korozija, suhoća tla i smrzavanje što više smanje i time omogućiti zadovoljavajući i što stalniji otpor uzemljenja. Istraživanja su pokazala da kod uzemljivača koji nisu položeni na dubinu veću od približno 1,5 m, razlika između najveće i najmanje vrijednosti električnog otpornosti tla bez utjecaja oborina iznosi 60 %. Dodatno otežavajuća okolnost za uzemljenje je potreba za postavljanjem geomembrane ispod sloja mršavog betona (podbeton) gdje se smanjuje učinkovitost glavnog uzemljivača i ugrađenih sondi. Geomembranu je potrebno postaviti što je moguće dublje naravno u ovisnosti o podzemnim vodama, a da se ostvari funkcionalnost iste kao i

ugrađenog uzemljenja. Stoga je potrebno glavni uzemljivač izvesti sa što manjom petljom i što više ugrađenih sonde te osigurati dovoljnu dodirnu površinu zemlje i sonde kako duljina sonde iznad djelotvorne duljine l_{ef} ne bi doprinijela smanjenju udarnog otpora uzemljenja sonde zbog jako reducirane brzine prodiranja vala v (npr. struja munje) .

Armaturne mreže promjera betonskog željeza $\varnothing 12$ mm i većeg potrebno je povezati na temeljni i glavni uzemljivač zgrade tako da se trake mekog željeza zavare na određenim mjestima na armaturnu mrežu i povežu na temeljni odnosno glavni uzemljivač zgrade (po etažama). Zavarivanje šipki AB konstrukcije manjih dimenzija općenito nije dozvoljeno, jer toplina vara mijenja strukturu i jako smanjuje čvrstoću čelika na mjestu vara, pa se preporuča izvođenje spojeva omatanjem tanjom i mekšom čeličnom žicom. Prema HRN EN 62305:2011 betonsko željezo unutar AB konstrukcije smatra se električni neprekinuto spojen ako ispunjava sljedeće zahtjeve:

- da je 50% spojeva okomitih i vodoravnih šipki zavareno ili sigurno spojeno;
- da su okomite šipke zavarene ili sigurno spojene na dužini najmanje 20 njihovih promjera;
- ako je ostvarena neprekidnost armature u pojedinim dijelovima betona i armature u susjednim blokovima betona.

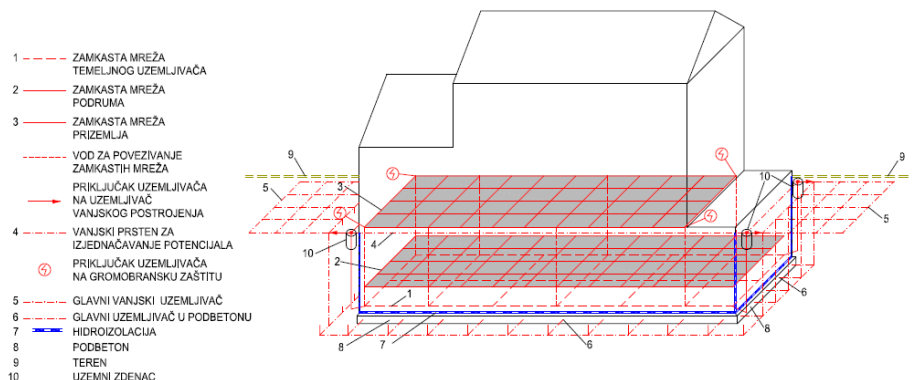
Galvanski povezana AB konstrukcija spojena na glavni uzemljivač zgrade također se može koristiti kao učinkoviti elektromagnetski oklop. Ipak korištenje betonskog željeza kao glavnog uzemljivača nije poželjno kako u slučaju jednopolnog kratkog spoja uslijed visokih temperatura može doći do njegovog oštećenja. Otpor rasprostiranja armature u betonskom temelju, u kojem je armatura višestruko međusobno spojena, može se izračunati približno uz pomoć izraza za polukuglasti uzemljivač:

$$R_A \approx \frac{\rho_E}{\pi \cdot d} \Omega \quad (1)$$

gdje je: ρ_E - električni otpor tla (Ωm); d - promjer polukuglastog uzemljivača, odnosno nadomjesne polukugle armiranog betonskog temelja (m); $d = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V}$ (m); V - obujam armiranog temelja-uzemljivača (m^3).

Širina petlje glavnog uzemljivača u zgradi određuje se prema specifičnostima uređaja i konstrukciji. Ona ne bi trebala biti veća od 3 metra, a preporuča se 1 m. Mreža glavnog uzemljivača može se:

- postaviti na armaturu i zaliti betonom,
- kod dvostrukog poda postaviti na dno,
- postaviti između betona i poda (izrađenog nanošenjem neke mase),
- postaviti u podrum na ploču (pokrovnu, objesiti).



Slika 1. Zamkaste mreže uzemljivača zgrade 110 kV GIS-a u TS 220/110/35 kV PEHLIN

Poželjno je ispod ploče GIS-a postaviti mrežu trakastog uzemljivača, bakra 40x5 mm, što manje širine petlje, dok se u prostoriji GIS-a preporuča istu ugraditi u završni pod. Uzemljenje SF₆ postrojenja potrebno je izvesti u obliku mreže širine petlje (okca) ne veće od $\lambda/10(m)$ pri čemu je λ valna duljina očekivanih visokofrekvencijskih pojava uzrokovanih sklopnim operacijama. Općenito potrebno je osigurati kvalitetan spoj uzemljenja SF₆ postrojenja s glavnim uzemljivačem na više mjesta u cilju smanjenja ukupnog (ekvivalentnog) induktiviteta dozemnih spojeva. Preporuka je ugrađivati GIS na etažama što bliže tlu. Tako npr. bakreni vodič dug 1m ima otpor 60 Ω pri 10 MHz dok za pogonsku frekvenciju opor

iznosi 0,003 Ω. Za smanjenje valne impedancije pojedinih elemenata uzemljivačkog sustava glede VF struja dat će se naputak u nastavku rada kao i preporuke uzemljenja samog GIS-a. Sabirnice uzemljenja potrebno je dozemnim spojevima na što više mjesta spojiti sa glavnim uzemljivačem. Također betonsko željezo je potrebno na više mjesta spojiti na glavni uzemljivač kako bi se izbjegli preskoci između glavnog uzemljivača i armirano betonske ploče. Kako se armatura polaže u dvije zone po etaži, donju armaturnu zonu je potrebno spojiti na uzemljivači prsten iznad ploče, dok se gornja armaturna zona spaja na uzemljivački prsten ispod ploče u koju je armatura ugrađena. Preporuča se također da presjek uzemljivačkih sabirnica, vodova za izjednačenje potencijala i dozemnih spojeva bude istog presjeka kao i glavni uzemljivač.

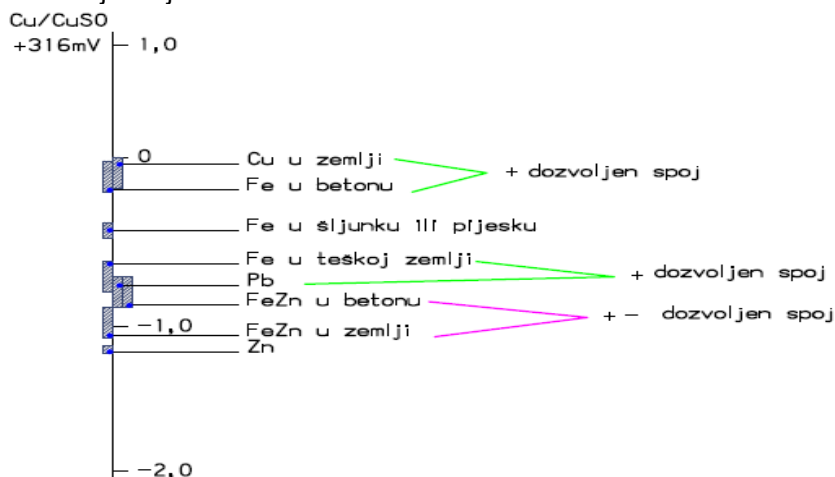
3. KOROZIJA

Raznovrsnost ugrađenog materijala za uzemljenje zgrade GIS-a ukazuje na potrebu za razumijevanjem njihovog ponašanja u betonu kao elektrolitu, te njihovog spoja kako međusobno mogu biti na različitim potencijalima. Kod nepravilnog odabira materijala za uzemljivače i odvođe, može se s vremenom pojaviti korozija armature i uzemljivača u betonu, a sa time uzemljivač gubi svoju prvobitnu funkciju. Opasnost od korozije ovisi o vrsti materijala te o vrsti i sastavu tla. Korozija (hrđanje) je reakcija metala s njegovom okolinom, što utječe na svojstva metala i/ili njegovu okolinu. Reakcija metala i okoline je većinom elektrokemijska. S izgradnjom većih armiranobetonskih konstrukcija i polaganjem u tlo manjih metalnih dijelova, omjer površina anoda/katoda postaje vrlo nepovoljan i time neizbježno raste opasnost korozije neplemenitih metala u tlu. Za praksu je svakako zanimljivo predviđanje, da li će i u kojem vremenu na uzemljivačima nastati oštećenja uslijed korozije. Također je od značenja očekuje li se djelovanje struje na cijeloj površini ili samo u nekoj točki. Za djelovanje korozije nije mjerodavna samo jakost korozijske struje nego posebno njena gustoća I" (A/m²), dakle struja po jedinici površine izlazne plohe. Pri elektrokemijskoj koroziji odigravaju se elektrokemijski procesi isključivo u prisustvu elektrolita. Za elektrokemijsku koroziju je značajna ovisnost procesa korozije o potencijalu elektroda. Elektrolit je korozijsko sredstvo za vođenje iona (npr. beton, voda). Elektroda je vodljivi materijal za elektrone uronjen u elektrolit. Sustav elektroda-elektrolit tvori pola galvanskog članka. Anoda je elektroda iz koje izlazi istosmjerna struja u elektrolit. Katoda je elektroda u koju ulazi istosmjerna struja iz elektrolita. Korozijski članak je galvanski članak s lokalno različitim gustoćama struje za otapanje metala. Anode i katode korozijskog članka mogu nastati:

1. glede materijala: od različitih metala (kontaktna korozija) ili od strukturno različitih sastavnih dijelova: selektivna i interkristalinična korozija,
2. glede elektrolita: određene tvari u različitoj koncentraciji, čija svojstva su da potiču ili sprječavaju otapanje metala.

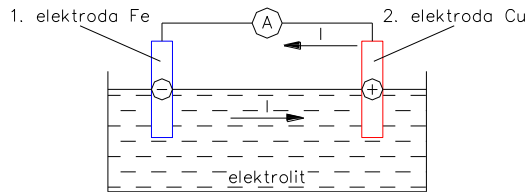
Referentna (usporedbena) elektroda je mjerna elektroda za mjerenje potencijala metala u elektrolitu (elektroda od bakrenog sulfata). Potencijali metala za uzemljivače i druge podzemne instalacije s kojima se spajaju, izmjereni su pomoću referentne elektrode konstantnog potencijala (bakreni štap uronjen u kiselu otopinu bakrenog sulfata). Prema Slici 3 je vidljivo:

1. Podaci za bakar, olovo i cink su potencijali ovih metala ukopanih u zemlju, te su svrstani po visini potencijala.
2. Između bakra u zemlji i željeza u betonu uočava se tek neznatna razlika.



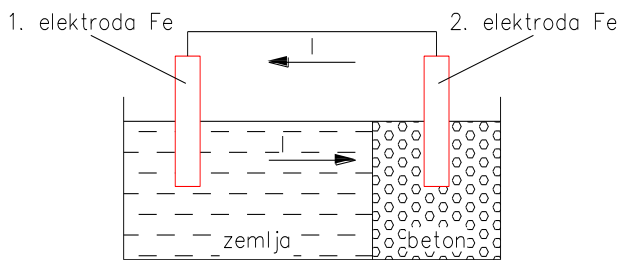
Slika 3. Vrijednosti potencijala materijala prema referentnom potencijalu

Kad su u istom elektrolitu uronjena dva štapa od različitih metala, onda se između svakog štapa i elektrolita javlja napon kao razlika napona pojedinih elektroda prema elektrolitu. Spoje li se, npr. kako je prikazano na Slici 4, u elektrolitu teče struja I od negativnije željezne elektrode prema bakrenoj elektrodi. To znači da negativniji pol daje pozitivne ione elektrolitu i to je anoda galvanskog članka; a s vremenom anoda se otapa. Otapanje metala događa se na mjestima na kojima struja prelazi u elektrolit. Općenito za elektrokemijsku koroziju vrijedi da je s većom strujom I povezano to veće odnošenje metala što su ioni veći i što je njihov naboj manji

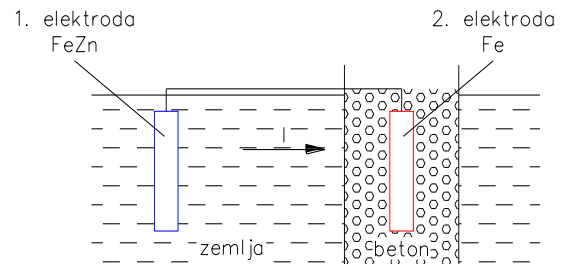


Slika 4. Galvanski članak sa željeznom i bakrenom elektrodom

Korozijska struja može se javiti i u koncentracijskom članku kako je prikazano na Slici 5a), pritom se dvije elektrode željeza nalaze u različitim elektrolitima od kojih je jedna zalivena betonom (elektrolit s većom koncentracijom metalnih iona), a druga položena u zemlji. Potencijalna razlika je relativno velika i iznosi 0,58 V prema Slici 3. Spajanjem tih elektroda, željezo u betonu postaje katoda koncentracijskog članka (električki pozitivnija), a željezo u zemlji anoda (ova posljednja se razara zbog gubitka iona).



Slika 5a) Članak sa željeznim elektrodama u zemlji i betonu



Slika 5b) Korozijski članak s pocinčanim čelikom u zemlji i crnim čelikom u betonu

Kod izbora uzemljivača uz uvažavanje međusobnog utjecaja različitih metala ili raznovrsnih elektrolita, važno je znati da i odnos površina te topivost produkata korozije imaju značajan utjecaj na trajnost uzemljivača i drugih metalnih instalacija. Utjecaj odnosa površina izražen je kod spajanja velikih armiranobetonskih temelja s uzemljivačem iz FeZn trake, Slika 5b). Utjecaj veličine površine je uzrok propadanju armature temelja. Ova pojava se tumači promjenom potencijala tj. polarizacijom oba metala, odnosno promjenom gustoće struje pod utjecajem elektrolita (zemlje).

Veza između veličine površina i anodne struje dana je relacijom:

$$I'_A = \frac{U_K - U_A}{\rho_K} \cdot \frac{A_K}{A_A} \quad \text{A/m} \quad (2)$$

gdje je: U_K, U_A -potencijal metala anode ili katode prema elektrolitu (V); ρ_K - polarizacijska električna otpornost katode (Ωm^2); A_K, A_A - površina anode odnosno katode (m^2).

Ako je površina armiranog betona vrlo velika u odnosu na prema površini pocinčane trake, tada se na ovoj posljednjoj javlja velika anodna gustoća struje, tako da se ona polarizira na približan potencijal armiranog željeza i u relativno kratkom vremenu će se razoriti. Visoka polariziranost ukazuje dakle uvijek na povećanu opasnost od korozije. Kako struktura tla, odnosno betona ima utjecaj na granice za koje se može reći da pomak potencijala prema pozitivnoj strani znači opasnost od korozije općenito za praksu važno područje polarizacije :ispod +20 mV (polarizacija neopasna), 20 do 100 mV (polarizacija izaziva jasne pojave korozije), iznad +100 mV (opasni pomaci potencijala). Vrijedno je znati što se može očekivati kod FeZn trakom uzemljenih armiranobetonskih i čeličnih stupova, treba li ostati kod uvjerenja da će se korozijom biti uništen samo uzemljivač, a da će čelična armatura betonskog stupa i konstrukcija čeličnog stupa u donjem ukopanom betonskom temelju biti neoštećena. Dozvoljeno povezivanja različitih materijala u različitim medijima prikazano je u Tablici 1.

Tablica I. Povezivanje različitih materijala za uzemljenje glede utjecaja korozije, odnos površina je $\geq 100:1$

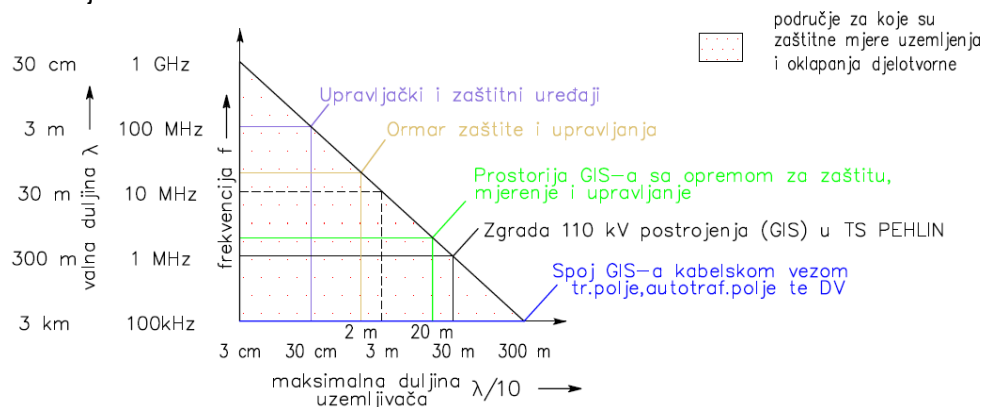
Materijal sa manjom površinom	Materijal sa velikom površinom							
	Pocinčani čelik	Čelik	Čelik u betonu	Pocinčano željezo u betonu	Bakar	Bakar, pokositren	Bakar, pocinčan	Bakar s Pb omotom
Pocinčani čelik	+	+ gubitak Zn	-	+ gubitak Zn	-	-	+	+ gubitak Zn
Čelik	+	+	-	+	-	-	+	+
Čelik u betonu	+	+	+	+	+	+	+	+
Čelik s Pb omotom	+	+	O gubitak Pb	+	-	+	+	+
Čelik sa Cu omotom	+	+	+	+	+	+	+	+
Bakar	+	+	+	+	+	+	+	+
Bakar, pokositran	+	+	+	+	+	+	+	+
Bakar, pocinčan	+	+	+ gubitak Zn	+ gubitak Zn	+ gubitak Zn	+ gubitak Zn	+	+ gubitak Zn
Bakar s Pb omotom	+	+	+ gubitak Pb	+	+ gubitak Pb	+	+	+
Legenda	- materijali ne mogu biti povezani		O – ograničena upotreba spoja			Gubitak Zn – moguća erozija Zn Gubitak Pb – moguća erozija Pb		
	+ materijali mogu biti povezani							

Iz priložene tablice razvidno je, da je moguće povezivanje čelične armature (betonskog željeza) sa FeZn trakom kao najčešće upotrebljavanom materijalom za temeljni uzemljivač. Teorijska istraživanja to ne potvrđuju u cijelosti. U vremenu od početka salijevanja betona pa do tada, kada će se isti stvrdnuti, elektrokemijski potencijal pocinčane trake i željeza u betonu se mijenja. U vrijeme sušenja betona potencijalna razlika između oba materijala iznosi i do 1 V. Radi toga može zbog velike vlažnosti betona doći do galvanске korozije oba materijala i to na kontaktnim mjestima. S tog stanovišta nije preporučljivo povezivanje pocinčane trake na čeličnu armaturu temelja. Također treba u obzir uzeti odnos površina pri spoju istih. Ako upotrebimo samo čeličnu traku ili nehrđajući čelik za izvedbu uzemljivača, tada ćemo izbjeći mogućnost galvanске korozije. Upravo zbog izbjegavanje korozije spojeva armaturnim željezo i temeljenog uzemljivača preporuča se ne spajati temeljni uzemljivač s armaturnim željezom, već se armatura međusobno povezana spaja na glavni uzemljivač zgrade, tj. bakrenu traku 40x5 mm. Međutim kako je čelična traka potrebnih dimenzija za uzemljenje 40x4 mm ili 40 x5 mm teška za izvedbu spojeva i savijanje preporuča se spoj armature s glavnim uzemljivačem izvesti mekim željezom na više mjesta. Spoj glavnog uzemljivača bakrene trake 40x 5 mm sa FeZn trakom 40x4 mm moguće je izvesti sa olovnom uloškom ili inox spojnicom kao i spoj mekog željeza 40x5 mm i bakrene trake moguće je izvesti inox spojnica.

4. OPĆE PREPORUKE ZA IZVEDBU UZEMLJENJA U METALOM OKLOPLJENIM I PLINOM SF₆ IZOLIRANIM POSTROJENJIMA - ISKUSTVA SA UGRADNJE 110 kV POSTROJENJA U TS 220/110/35 kV PEHLIN

U svezi zaštite od pojave vrlo brzih prenapona, tj. prenapona vrlo strmog čela (engl. "Very Fast Transients Overvoltage - VFTO") u SF₆ postrojenju, posebnu važnost treba posvetiti izvedbi uzemljivačkog sustava te načinu i mjestima povezivanja pojedinih dijelova postrojenja sa sustavom uzemljenja. Karakteristične točke postrojenja na koje treba obratiti posebnu pažnju su točke diskontinuiteta oklopa (provodni izolatori SF₆-zrak, „plug in“ kabelaške glave, izolacijske prirubnice itd.), gdje se kod sklopnih operacija s rastavljačima javljaju najveći iznosi unutarnjih i vanjskih vrlo brzih prenapona. Da bi se smanjio njihov utjecaj na ostale dijelove postrojenja, potrebno je posvetiti pažnju načinu povezivanja karakterističnih točaka oklopljenog postrojenja s uzemljivačem cijelog postrojenja. Prilikom projektiranja sustava uzemljenja pri visokofrekvencijskim strujama djelotvornost će ovisiti o frekvenciji i duljini. Povezivanje je potrebno izvesti na način da je ukupni nadomjesni induktivitet, odnosno nadomjesna valna impedancija tog spoja, što manja. Gornja granična frekvencija za djelotvornost neke zaštitne mjere određena je dimenzijama rasporeda za koje se primjenjuje takozvano $\lambda/10$ pravilo. Ovo razmatranje se primjenjuje na duljinu vodova uzemljenja, kabelaških plaštava i njihovih priključaka, na duljinu bridova i otvora oklopljenih kućišta i na širinu petlji zamkastog uzemljivača. Pravilo $\lambda/10$ prikazano

je grafički na Slici 6. Ono znači da se od visokofrekvencijskih poremećaja može štiti samo mala prostorna dimenzija.

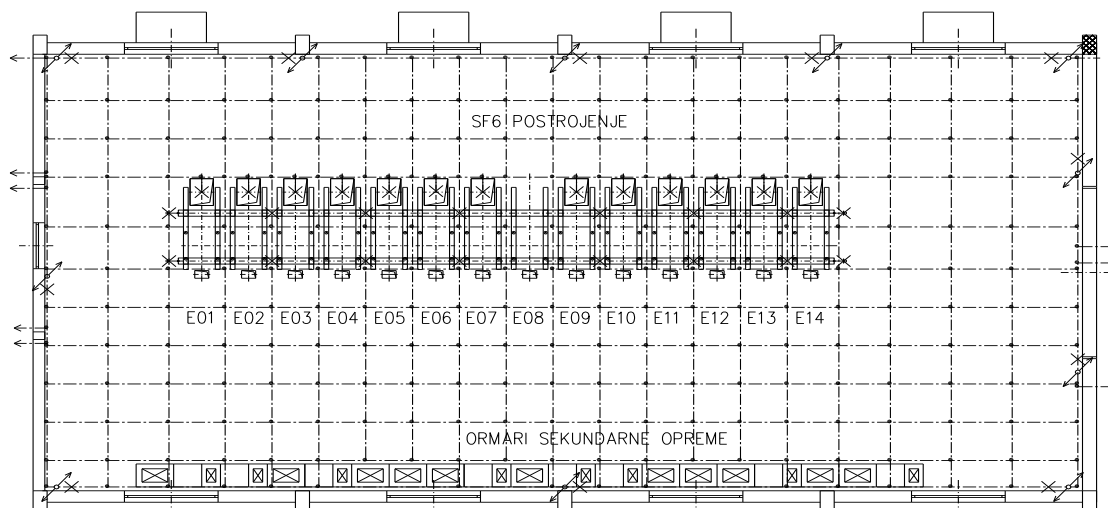


Slika. 6. Ovisnost duljine o frekvenciji ($\lambda/10$ pravilo) za djelotvornost zaštitnih mjera uzemljivanja i oklapanja u TS PEHLIN

Za smanjenje valne impedancije pojedinih elemenata uzemljivačkog sustava za VF struje poduzete su sljedeće mjere :

1. Uzemljenje SF₆ postrojenja izvedeno je u obliku mreže širine petlje (okca) ne veće od $\lambda/10$ (m) pri čemu je λ valna duljina očekivanih visokofrekvencijskih pojava uzrokovanih sklopnim operacijama. U prostoriji 110 kV postrojenja je to mreža širine petlje cca 1x1 m ispod samog SF₆ postrojenja odnosno 1,4x1,4 m u ostalom dijelu prostorije 110 kV postrojenja.
2. Na što više mjesta je osiguran kvalitetan spoj uzemljenja SF₆ postrojenja s glavnim uzemljivačem u cilju smanjenja ukupnog (ekvivalentnog) induktiviteta dozemnih spojeva (spoj glavni uzemljivač- raster SF₆ postrojenja, spoj glavni uzemljivač- armaturno željezo u deci poda).
3. Uzemljenja oklopa GIS-a su izvedena u čvorište mreže najkraćim putem.
4. Na rubovima uzemljivačkog sustava, spoja oklopa postrojenja na uzemljivač, mjestima spoja točkaka diskontinuiteta na uzemljivač izvedena je smanjena širina petlje uzemljivačke mreže.
5. 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 vodljivih užeta, korištena bakrena traka istog presjeka. Isto vrijedi i za spojne vodove. U slučaju TS PEHLIN, TS TURNIĆ i TS FERENŠČICA koristili smo bakrene trake 40x5 mm (minimalni omjer 6:1).
6. Na kritičnim mjestima (točke izraženog diskontinuiteta oklopa) koristile su se uzemljivačke pletenice (trake) što manjeg induktiviteta. Kod polaganja uzemljivačkih pletenica izvedene su dvije paralelne trake umjesto jedne istog presjeka (uzemljenje oklopa prekidačkog odjeljka).
7. Ispod prostorije GIS-a položen je površinski raster širine petlje 1x1 m (Slika 7.).Svi uzemljivači jednog zamkastog uzemljivača su položeni na istoj dubini. Dubina od 0,8 m koliko je prema projektu predviđeno za uzemljivače postrojenja, isto kao i relativno povoljna svojstva tla imaju zadovoljavajuće vrijednosti. Ako se na nekom dijelu zamkasti uzemljivač ne ukopa dovoljno duboko (najmanje 0,5 m) potrebno je smanjiti širinu petlji.
8. Veza između vodova za uzemljenje uređaja i zamkastog uzemljivača je što moguće kraća i malog induktiviteta te električki dobro vodljiva i otporna na koroziju.
9. U točkama križanja uzemljivači su međusobno spojeni vodljivom vezom .
10. Veza odvodnika prenapona s transformatorom je malog induktiviteta.
11. Ekran visokonaponskog kabela spojen sa glavnim uzemljivačem (Slika 8.). Ekran kabela je uzemljen na obje strane.Kabelske police su spojene sa uzemljenjem.
12. U zgradi postrojenja su predviđeni prema mogućnosti izvedbe površinski veliki zamkasti uzemljivači.

Izvedba pravilnog načina uzemljenja 110 kV GIS-a prikazana je na Slici 7.(raster ispod ploče GIS-a). Sa Slike 7. vidljivo je da je centralna točka uzemljenja svakog polja (pod tim se podrazumijeva modul 110 kV polja) spojena direktno na uzemljivački raster. Uzemljenje oklopa GIS-a se vodi najkraćim putem na profilnu konstrukciju ispod GIS-a koja se zatim spaja što kraćim putem na površinski raster i uzemljivački prsten GIS-a. Vodovi za uzemljenje su na što više mjesta povezani s metalnom konstrukcijom zgrade i armaturom. Na mjestima prelaska postrojenja na kableske glave izvedeno je uzemljenje prema preporukama proizvođača i spojeno na što više mjesta s površinskim i donjim rasterom te armaturom. Isto tako je izvedeno dodatno galvansko povezivanje oklopa naponskih i strujnih mjernih transformatora s oklopom ostalih dijelova postrojenja.



Slika 7. Izvedba uzemljenja prostorije GIS-a (raster ispod ploče GIS-a)

Dodatno za izvedbu zgrade GIS-a treba povesti računa da ukoliko se ne može postići zadovoljavajuća razina elektromagnetskih smetnji konvencionalnim mjerama, dodatno oklapanje prostorija može se postići korištenjem metalne folije (širine 120 cm, debljine 60 μm) u zidovima zgrade. Ovo oklapanje mora biti pravilno uzemljeno. Pri izvedbi oklapanja prostorija također je potrebno voditi računa i o otvorima (vrata, ventilacijski otvori). Vrata na zgradi trebaju biti čelična sa šupljom jezgrom. Pozornost je potrebno obratiti i na elektromagnetsku propustljivost između dosjednih rubova vrata i dovratka. Posebnu pozornost treba obratiti prozorima. Ukoliko će prozori biti postavljeni bočno u odnosu na sklopno postrojenje 110 kV, potrebno je postaviti odgovarajuću metalnu mrežu s vanjske strane. U svakom slučaju, preporučljivo je prozore postaviti tako da direktno ne gledaju GIS. Za prostorije GIS-a u većini postrojenja nisu izvedeni prozori ili su postavljeni tako da ne gledaju direktno na GIS, npr. u visini kрана).

Pri tranzijentnom porastu potencijala jedne točke uzemljivača, koji se zbiva zbog injektirane struje u toj točki, struja se širi na sve strane od te točke po uzemljivaču postupno prelazeći u zemlju. Naravno najveći tranzijentni porast potencijala je u točki injektiranja struje. Injektirana struja može biti struja groma koji je pogodio zgradu i koja se odvodi u zemlju preko uzemljivača. Injektirana struja se također širi i ekranom obostrano uzemljenih sekundarnih kabela koji vode od mjesta injektiranja. Ako tranzijentna struja teče po ekranu ona uzrokuje tranzijentnu razliku potencijala (uzdužni napon) između žila kabela i ekrana. Uzdužni napon je direktno proporcionalan prijenosnoj impedanciji ekrana kabela na toj frekvenciji. U svakom slučaju nije povoljno da završeci sekundarnih kabela dolaze na visoke tranzijentne potencijale. Tranzijentne razlike potencijala između priključnica sekundarne opreme ili pojedine priključnice i kućišta mogu dovesti do pogrešnog rada sekundarnog uređaja ili u najgorem slučaju do njegovog oštećenja ili uništenja. Polaganje kabela nazivnog napona do 1 kV izvodi se unutar posebnih kablskih trasa. Za osiguranje provedbe elektromagnetske kompatibilnosti preporučuje se polaganje kabela izvesti na sljedeći način.

1. U kablskom kanalu optimalan je onaj raspored u kojem su kabele sekundarnih krugova položeni između uzemljenih i međusobno spojenih polica kablskih nosača. Razmak između različitih tipova kabela trebao bi biti veći od 15 cm, u horizontalnom i vertikalnom smjeru. U kablski kanal također je smješten uzemljivački vod koji je na odgovarajućim mjestima spojen na kablске nosače i mrežni uzemljivač postrojenja.
2. Sekundarni vodovi jednog sloga strujnih i naponskih transformatora trebaju biti uzemljeni samo jednom. Pogonske vodove mjernih transformatora uzemljiti samo jednom.
3. Vodovi mjernih naponskih i strujnih transformatora, upravljačkih i niskonaponskih krugova trebaju biti oklopljeni sa metalnim plaštovima koji imaju sposobnost vođenja struje (preporuča se koristiti NYCY).
4. Gdje je to moguće kabele treba položiti paralelno i što je moguće bliže uzemljivačima
5. Pri izboru presjeka strujno opteretivog ekran treba obratiti pažnju na opterećenja pogonske frekvencije koje se javljaju u slučaju kratkog spoja. Strujno opteretivi ekrani su s najmanjim presjekom od 4 mm^2 . Presjeci ekrana od 2,5 mm^2 smiju se upotrebljavati u slučaju kada više kabela postavljamo u istoj trasi, te ukupni iznosi najmanje 4 mm^2 .
6. Sekundarne kabele treba postaviti uz metalni oklop GIS-a bez petlji i na najkraći mogući način.
7. Plašt kabela se izabire prema prijenosnoj impedanciji, pa stoga moramo paziti na način spajanja plašta na uzemljenje. Nekvalitetan priključak plašta može poništiti dobra svojstva tog plašta.

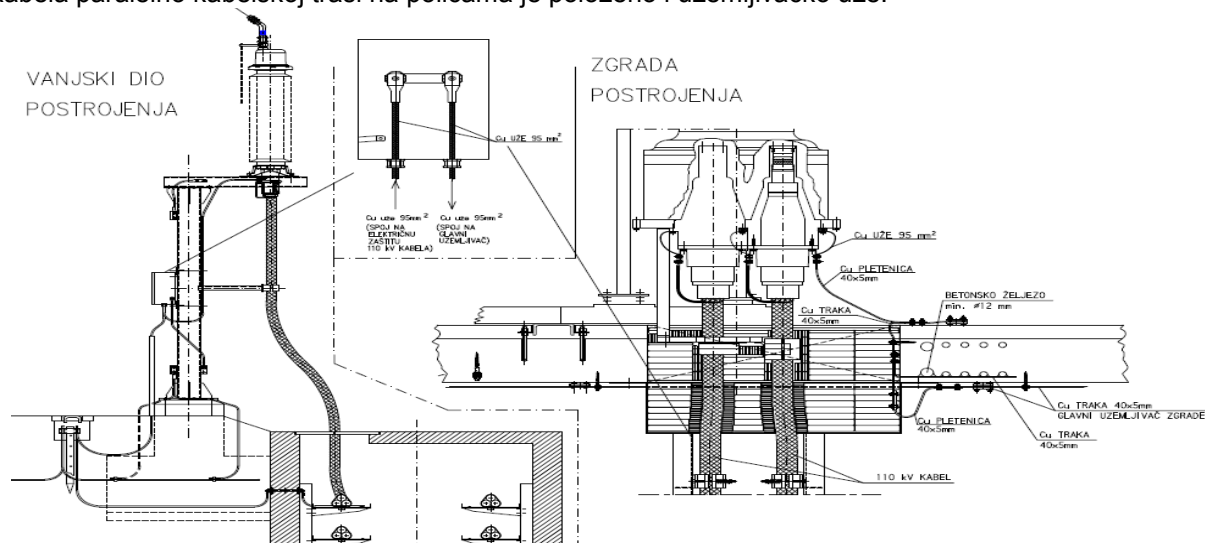
8. Dobro je kableske plašteve koji npr. dolaze iz prostora izvan zgrade TS PEHLIN uzemljiti odmah pri ulasku u zgradu, a ne tek u pripadajućim ormarima. Kabelski plašt se s metalnom kablskom obujmicom pričvršćuje na bakrenu sabirnicu koja je spojena s armaturom zgrade na najkraći mogući način. Kabelski plaštevi su postavljeni u metalne dosjede koji točno odgovaraju promjeru plašta. Više takvih dosjeda postavljeno je u na tlak otporne i uzemljene metalne okvire (posuda).
9. U oklopljenim sklopnim postrojenjima ormari za smještaj upravljačke i zaštitne opreme moraju biti metalni ili bar dio za spoj signalno upravljačkih kabela. Vodljivi metalni dijelovi konstrukcije preuzimaju na sebe funkciju plašta pa je u ormaru moguće polagati kabele bez plašta. Električki vodljive dijelove konstrukcije ormara treba na najmanje dva mjesta, koja su jedno nasuprot drugom, i na najkraći način spojiti s dva mjesta u mreži zamkastih uzemljivača. U ormaru za smještaj opreme treba, na stjenkama na koje se postavljaju uređaji, postaviti sabirne vodove uzemljenja. Svaki sabirni vod uzemljenja treba bar na jednom mjestu na najkraći način spojiti s jednim uzemljivačem iz zamkastog uzemljivača.
10. Vrlo često se pri ožičenju koriste višezilni kabeli. Potrebno je zato signale grupirati prema razini i karakteru signala ukoliko ih namjeravamo voditi kroz višezilni kabel. Mogući načini zaštite su fizičko razdvajanje vodova različitih energetske potencijala i oklapanje.
11. Izbor kabela treba biti takav da se u principu koriste kabeli s većim brojem upletenih parica i metalnim plaštom. Vrlo efikasan način zaštite signalnih vodova je uplitanje odlaznog i povratnog voda. Što je broj prepleta po jedinici vodiča veći to je zaštita efikasnija.
12. Digitalne ulazne signale, analogne ulazne signale i digitalne izlazne signale koji su otporno zaključeni možemo voditi u zajedničkom signalnom kablom.
13. Neadekvatan raspored signalnih vodova može rezultirati preslušavanjem, impedantnim neprilagođenjima i zračenjem. Svaki signalni vod treba imati povučen i svoj povratni vod.
14. Upravljačke signale npr. za elektromagnete, podizanje magneta, uključivanje releja i slično, a nemaju zaštitne brze diode ili su većih snaga ne smijemo voditi signalnim kablom.
15. Prostorno razmicanje signalnih vodova kojima teku signali različitih naponskih ili strujnih nivoa treba osigurati gdje je to moguće.
16. Polagati signalne vodove sa plaštom za redukciju kapacitivnih utjecaja. Dovoljna zaštita će biti i oklopljeni višezilni signalni kabel. Vodovi moraju biti položeni neposredno uz metalnu površinu kućišta.
17. Spojno mjesto na sabirnici mora biti rastavljivo i kvalitetno izvedeno. Sabirnica se u jednoj točki spaja na glavno uzemljenje. Oklop (ormar) se uzemljuje samo u jednoj točki, po mogućnosti u centralnoj.
18. Energetske vodove treba voditi odvojeno od signalno-upravljačkih i komunikacijskih vodova. Potrebno ostvariti minimalne razmake koje treba između energetske i ostalih vodova.
19. Treba obratiti pozornost da signalne vodove ne vodimo u blizini visokonaponskih komponenti i opreme, te u blizini energetske komponente i opreme.

4.1. Prijelaz nadzemnog voda u kabelski vod

Prenaponi mogu biti uzrokovani različitim poremećajima koji nastaju unutar postrojenja, ili koji u postrojenje ulaze, poput udara groma u nadzemni spojni vodič između vanjskog i unutarnjeg postrojenja, udar groma u fazni ili zaštitni vodič kod spoja GIS-a kratkim kablskim dionicama sa izlaznim dalekovodom. U TS PEHLIN osim kablskih vodova prisutne su i kratke kableske dionice koje se spajaju na izlazne portale na južnoj strani postrojenja prema Slici 8. Problematika ponašanja uzemljivača pri impulsnim udarnim opterećenjima (područje atmosferskih pražnjenja) karakteristična je za postrojenja s nadzemnim vodovima. Posebno mogu biti neugodni bliski udari groma u vrhove stupova koji se odnose na nekoliko prvih stupova od izlaznog portala, dok se kod udaljenijih kvarova do izražaja dolazi prigušenje vala i smanjenje strmine uslijed korone i skin efekta. Najnepovoljniji pogonski slučaj je otvoren rastavljač u vodnom polju (izlazni) gdje se zbog valnih refleksija na kablom i kablskom priključnom djelu javljaju veći iznosi napona nego na odvodniku prenapona uz izlazni portal. Provedena ispitivanja i proračuni su pokazali da su najviše vrijednosti prijelaznog porasta potencijala zabilježene u slučaju kada su ekran kabela i oklop postrojenja uzemljeni odvojeno, pri čemu se drastično povećava priključni induktivitet prema uzemljivaču, a time i padovi napona na takvim spojevima uslijed vrlo strmih impulsnih struja. Kratkim spajanjem oklopa i kablskih ekrana na kablskoj uvodnici širokim trakama i direktnim spajanjem traka s površinskim djelom uzemljivača postrojenja, višestruko se smanjuje vrijednost prijelaznog porasta potencijala na ekranu. Na taj se način postiže zadovoljavajuće tehničko rješenje. Nedostatak ove konfiguracije je u smanjenju prijenosne moći kabela zbog gubitka u ekranima.

Zbog povoljnije elektomagnetske veze povoljnije je polaganje kabela u trokut. Međutim glede toplinske disipacije i hlađenja kabela u kablskom kanalu su kabeli položeni na dozvoljenoj udaljenosti kao i

razmaku d između polica kako se ne bi smanjila prijenosna moć kabela. Kako bi se rasteretili ekran kabela paralelno kabelskoj trasi na policama je položeno i uzemljivačko uže.



Slika 8. Spoj vodnog polja (GIS) na zračni vod XLPE kabelom

5. ZAKLJUČAK

Kako su zgrade u kojima se smješta GIS postrojenje glede statike zgrade uobičajeno izvedene sa većom količinom armature nego standardne zgrade transformatorskih postrojenja, preporuka je međusobno povezivanje armaturnog željeza i uzemljivača, te je potrebno glede kontaktne galvanske korozije tom problemu posvetiti nužnu pažnju. Kod nepravilnog odabira materijala za uzemljivače, može se s vremenom pojaviti korozija armature i uzemljivača u betonu, a time uzemljivač gubi svoju prvobitnu funkciju. Sigurno je da koroziju ne možemo u potpunosti izbjeći, ali možemo značajno smanjiti njeno djelovanje. Neka od tih pravila mogli bi kratko sažeti u sljedećem:

1. Izbor odgovarajućih materijala koji se mogu spajati prema preporukama [4].
2. U istom elektrolitu (betonu) izbjegavati spajanje različitih metala, a ukoliko je potrebno njihovo spajanje nastojati da razlike korozijskih potencijala među njima bude što manji.
3. Uravnotežiti odnos katodnih i anodnih površina, odnos površine katode u odnosu na površinu katode je kritični faktor i posebno se odnosi na veličinu armiranog željeza i FeZn trake.

Uzemljivač SF6 postrojenja treba zadovoljiti sljedeće opće kriterije:

1. Osigurati dovoljno nisku impedanciju rasprostiranja (otpor rasprostiranja) prema referentnoj zemlji za struje pogonske frekvencije, nastale kod jednopolnih kvarova.
2. Osigurati dovoljnu površinsku razvedenost za smanjenje napona dodira unutar propisanih dozvoljenih granica.
3. Osigurati dovoljno niski induktivitet dozemnih spojeva opreme postrojenja s uzemljivačem za "nesmetanu propagaciju" visokofrekvencijskih struja uslijed pojave vrlo brzih prenapona u oklopljenom dijelu postrojenja.

6. LITERATURA

- [1] Ravel d.o.o.: Ugradnja metalom oklopljenog i plinom SF₆ izoliranog postrojenja u TS 220/110/35 kV PEHLIN, Izvedbeni projekt, Zagreb 2010.
- [2] Ravel d.o.o.: Rekonstrukcija TS 35/10 kV TURNIĆ u TS 110/10(20) kV TURNIĆ, Izvedbeni projekt, Zagreb 2009.
- [3] Ravel d.o.o.: Izgradnja 4TS31 110/10(20) kV FERENŠČICA, Izvedbeni projekt, Zagreb 2012.
- [4] DIN VDE 0151 Material and minimum dimensions of earth electrodes with respect to corrosion, 1986 [5] ABB Switchgear Manual, 11th edition, 2008.
- [5] Hesse, Wieseinger, Zischank: Priručnik za zaštitu od munje i uzemljenje, Kigen, 2009. D
- [6] Ravlić, V. i suradnici: Priprema izgradnje, projektiranje, izgradnja i održavanje metalom oklopljenih i plinom SF₆ izoliranih postrojenja, Ravel, Zagreb, 2009.
- [7] ABB AG: Visokonaponski proizvodi: Upute za uporabu SF₆ plinom izoliranog postrojenja EXK-0.
- [8] Uglešić, I., Milardić, V., Mandić, M., Tokić, A.: Elektromagnetska kompatibilnost u visokonaponskim postrojenjima, Zagreb, ožujak 2008.