

Izvedba izenačitve potencialov v elektroenergetskem objektu

Urban Metod Peterlin¹

¹Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana
urban.peterlin@eimv.si

Implementation of equalization of potentials in an electrical power facility

Abstract. *The paper presents an example of suboptimal design and implementation of a potential equalization system and a connection to an earthing system. It is not sensible to connect the equipotential bonding, which is carried out in individual rooms with copper conductors, to the armature and through it to the external earthing ring of the building. The inclusion of materials with poorer conductivity in the equipotential bonding system and in the earthing system impairs their efficiency. From the point of view of electromagnetic compatibility, conductors and joints must ensure optimal conductivity, both for small and large currents, at low frequencies and also at high-frequency transients.*

1 Uvod

Ozemljitveni sistem v elektroenergetskem objektu - gledano s stališča zagotavljanja elektromagnetne združljivosti - razdelimo na tri podsisteme:

- glavni ozemljitveni sistem v zemlji in temeljih oz. betonskih ploščah zgradbe in povezave med nadstropji,
- sistem izenačitve potencialov v posameznih prostorih in povezave med njimi,
- sistem zaščite pred delovanjem strele (prepreči nastanek prevelikih prehodnih prenapetosti v sekundarnih tokokrogih in napravah).

Sistem izenačitve potencialov v elektroenergetskem objektu težko ločimo od ozemljitvenega sistema. Glavna razlika med njima je, da sistem izenačitve potencialov ni nujno položen v zemljo - ne služi odvajanju toka v zemljo, temveč zmanjšanju potencialnih razlik med deli objekta oz. napravami v njem. V objektih ju zaradi varnostnih zahtev (napetost dotika, napetost koraka, odvod atmosferskih razelektritev) obravnavamo skupaj.

Ustrezna zasnova, kakovostna izvedba, opravljeno preizkušanje in ustrezno vzdrževanje vseh treh podsistemov so temeljni pogoji, ki v elektroenergetskem objektu zagotavljajo:

- zaščito ljudi in živali pred previsokimi napetostmi dotika in koraka,
- zaščito naprav pred kratkostičnimi tokovi in atmosferskimi razelektritvami,
- elektromagnetno združljivost med električnimi in elektronskimi napravami v objektu.

V članku je prikazan primer neoptimalne zasnove in izvedbe sistema izenačitve potencialov ter povezave na ozemljitveni sistem. Izenačitve potencialov, ki so v

posameznih prostorih izvedene z bakrenimi vodniki, ni smiselno priključevati na armaturo in preko nje na zunanji ozemljitveni obroč zgradbe. Prav tako ni nobenega utemeljenega razloga za povezovanje notranjega bakrenega obroča za izenačevanje potencialov na zunanji ozemljitveni obroč z Rf (nem. Rostfrei oz. rostfreier stahl, fr. acier inoxydable oz. inox, ang. stainless steel, slo. nerjavno jeklo) trakom.

2 Zasnova in izvedba

Elektroenergetski objekt je sestavljen iz dveh delov:

- V enem delu se nahaja 110 kV kabelski prostor in nad njim 110 kV GIS stikališče.
- V drugem delu so v pritličju prostori (DEA, TR LR, stikališče 20 kV, LR, AKU) ter v prvem nadstropju komandni in telekomunikacijski prostor).

Zasnova in izvedba glavnega ozemljitvenega sistema in sistema izenačitve potencialov:

- Ozemljilna mreža na platuju objekta je izvedena z Cu vrvjo prereza 120 mm².
- Temeljne ozemljitve so izvedene v temeljih zgradbe z valjancem Fe/Zn dimenzije 40x4 mm, ki je z varjenjem povezan z armaturo v temeljih.
- Gradbene jeklene armature so medsebojno varjene.
- Iz temeljne ozemljitve so izvedeni notranji in zunanji izpusti.
- Zunanji izpusti so izvedeni iz Rf dimenzije 30x3,5 mm. V temeljih so izpusti z običajnim varjenjem spojeni na temeljno ozemljitev (Fe/Zn 40x4 mm). V zemlji so izpusti spojeni na ozemljitveni obroč okrog zgradbe (Cu vrv prereza 120 mm²) z eksotermnim varjenjem.
- Notranji izpusti so izvedeni z Rf ozemljitvenimi elementi (slika 1), ki so varjeni na armaturo zgradbe pred zalivanjem betona.



Slika 1. Ozemljitveni element [1]

Izvedbo spojev Rf traka na zunanji obroč izveden iz bakrene vrvi prereza 120 mm² prikazuje slika 2 (spoj izveden eksotermno). Slika 3 prikazuje izvedbo spojev v 110 kV kabelskem prostoru na notranji obroč izveden iz bakrenega vodnika dimenzije 40x5 mm (spoj izveden z križno vijačno sponko).



Slika 2. Spoj Rf trak - bakrena vrv



Slika 3. Spoj Rf trak - bakreni trak

V 110 kV GIS stikališču so pod elementi GIS skladno z zahtevami proizvajalca opreme nameščeni ploščati bakreni vodniki, na katere je ozemljen GIS. Skozi odprtine v betonski plošči so narejene povezave na bakreno mrežo, nameščeno pod stropom v 110 kV kabelskem prostoru. Bakrena mreža pod stropom je na šestih mestih s ploščatim bakrenim vodnikom povezana na bakren obroč pri tleh. Vsi ploščati bakreni vodniki so dimenzije 40x5 mm. Od notranjega obroča za izenačitev potencialov pri tleh do zunanega ozemljitvenega obroča položenega okrog zgradbe je bilo v začetnem stanju izvedenih šest povezav z Rf dimenzije 30x3,5 mm dolžine približno 3 m. Kasneje, po prvih meritvah impedanc povezav, sta bili dodani še dve iz bakra.

Za izenačevanje potencialov v prostorih z dvojnimi podom (prostor lastne rabe, komandni prostor, telekomunikacijski prostor) je na stene pod montažnim podom nameščen obroč iz ploščatega bakrenega vodnika dimenzije 40x5 mm. V ostalih prostorih (stikališče 20 kV, TR LR, AKU, DEA) je na stene prostora nameščena bakrena zbiralka 40x5 mm. Omenjeni bakreni obroči in zbiralke so povezani z bakrenim vodnikom (slika 4) preko Rf ozemljitvenih elementov (slika 1) z železno armaturo v betonskih stenah.

V posameznih prostorih so kabelski kanali in police, zbiralke za izenačitev potencialov v omarah sekundarnih sistemov, telekomunikacijskih sistemov in lastne rabe ter ostali prevodni deli, povezani na bakreni obroč oziroma zbiralko na steni.



Slika 4. Povezava obroča izenačitve potencialov na armaturo

3 Meritve impedanc povezav

Meritve upornosti povezav se običajno opravljajo z inštrumentom z enosmernim virom napetosti. Na obravnavanem objektu so bile opravljene z vrivanjem izmeničnega toka (80 A) v merjeni tokokrog ter merjenjem porazdelitve toka in napetosti (slika 5) na posameznem ozemljitvenem izvodu z osciloskopom.

Meritev omogoča merjenje celotne impedance povezave (vodnikov oz. armature z vključenimi impedancami spojev) od izhodiščne točke do mesta, na katerem izvajamo meritve. Pri meritvah smo kot izhodišče vzeli ozemljitveni izvod od zunanjega obroča na vogalu zgradbe (prikazano na sliki 6), ki je namenjen priključitvi strelovodnega odvoda in izvajali meritve impedanc povezav med to točko in posameznim ozemljitvenim izvodom v 110 kV kabelskem prostoru (slika 5) oziroma povezavami obroča izenačitve potencialov na armaturo v ostalih prostorih (slika 4).

Čeprav s takšnimi meritvami ne dobimo informacije o impedanci neke povezave pri visokih frekvencah, jih lahko uporabimo kot indikacijo. Predvsem to velja za povezave, ki so nedostopne za pregled (zemlja, beton).

Priključitev na ozemljitveni izvod prikazuje slika 5. S pomočjo velikega krokodilčka z vklopom stikala vrivamo tok v merjeni tokokrog, porazdelitev nato merimo z Rogowski tuljavami. Zgornja Rogowski tuljava na sliki 5 meri porazdelitev toka proti notranjemu bakrenemu obroču, spodnja porazdelitev toka proti zunanemu ozemljitvenemu obroču. S pomočjo manjšega krokodilčka merimo potencialno razliko oziroma padec napetosti med izhodiščem in mestom priključitve.

Meritve na ozemljitvenih izvodih iz Rf so pokazale, na prvi pogled, nepričakovane rezultate meritev. Vrivani tok je namreč v približno 90 % tekel proti notranjemu bakrenemu obroču in po kabelskih policah in kanalih, ki so povezani z njim, ter po bakrenih povezavah na bakreno mrežo pod stropom namesto, da bi tekel po najkrajši poti na zunanji obroč. Za takšno razdelitev toka sta se po premisleku pokazala dva možna vzroka, in sicer slabo izvedeni spoji na zunanjem ozemljitvenem obroču ali pa razlika v prevodnosti kombinacije uporabljenega materiala (Cu in Rf). Ob takem rezultatu smo pomislili na slabo izvedene spoje na zunanjem

obroču (slika 2), vendar je vizualni pregled spoja, ki smo ga odkopali, pokazal, da je ustrezno izveden, kar je potrdila tudi meritev prevodnosti spoja. Nadaljnje ugotavljanje vzroka za takšno razdelitev toka je bilo ugotavljanje lastnosti Rf.



Slika 5. Priključitev na Rf trak

4 Lastnosti Rf oziroma inox-a

Rf - inox oziroma nerjavno jeklo je zlitina na osnovi železa, ki vsebuje najmanj 10,5 % kroma z dodanimi primesmi ogljika običajno max. 0,08 %, mangana max. 2 %, fosforja max. 0,045 %, žvepla max. 0,03 %, silicija max. 1 %, niklja in molibdena. S spreminjanjem odstotkov kemijskih elementov v zlitini dobimo različne vrste nerjavnega jekla, ki ustrezajo različnim aplikacijam [2].

Obstajajo štiri glavne vrste nerjavnih jekel [3]:

- Avstenitna - najpogostejša vrsta nerjavnega jekla. V primerjavi z drugimi vrstami vsebujejo povišane vrednosti kroma, molibdena in niklja. Vsestranska in znana po izkazovanju odlične trdnosti in kovnosti.
- Feritna - vsebujejo med 10,5 % in 30 % kroma, imajo običajno nizko vsebnost ogljika, ki ne presega 0,1 %. So magnetna in izbrana predvsem zaradi odpornosti proti temperaturni oksidaciji in razpokanju zaradi napetosti.
- Dupleksna - združujejo avstenitna in feritna, kar ima za posledico kovino, ki je močnejša od obeh, višja trdnost lahko privede do znatnega zmanjšanja teže. Zaradi odlične odpornosti proti koroziji, tudi v zahtevnih okoljih, je idealna za uporabo v morskih aplikacijah.
- Martenzitna - strukturno podobna feritnim. S povišano vsebnostjo ogljika (do 1,2 %) jih je mogoče v veliki meri utrditi. Še posebej so uporabni za izdelavo medicinskih orodij in kirurških instrumentov.

Za pritrdilne in povezovalne elemente pri izvedbi ozemljitvenega sistema, izenačitve potencialov in sistema zaščite pred delovanjem strele se najpogosteje uporablja avstenitno jeklo - inox-z oznako A2 oziroma 304 (18/8) in A4 oziroma 316 (18/10) [4].

Inox z oznako A2 vsebuje običajno 18 % kroma in 8 % niklja. Obstaja več zlitin z oznako A2, ki so modifikacije zlitine 18/8. Razlika med njimi je v količini dodanega kroma (18-20 %) in niklja (8-10,5 %). Ustrezna vsebnost kroma zagotavlja na površju inox-a

nastanek pasivnega filma kromovega oksida, ki preprečuje površinsko korozijo in s tem prodor korozije v globlje strukture, kljub temu pa lahko obledi oziroma izgubi lesk in postane moten. Vsebnost kroma v zlitini zagotavlja nerjavnost jekla in visoko odpornost proti koroziji, vendar je ne preprečuje v celoti [2]. Uporaben je za strelovodne sisteme, vendar ni primeren za polaganje v zemljo [4].

Inox z oznako A4 vsebuje 18 % kroma in 10 % niklja. Tudi pri zlitini A4 obstaja več modifikacij zlitine 18/10. Razlika med njimi je v količini dodanega kroma (16-18 %), niklja (10-14 %) in molibdena (2-3 %) [2]. Uporablja se ga na vseh področjih, kjer se uporablja A2 poleg tega pa ima to prednost, da je ustrezen tudi za pritrdilne in povezovalne elemente pri izvedbi ozemljitvenega sistema v zemlji [4], kajti vsebnost molibdena v zlitini še dodatno povečuje odpornost proti koroziji.

5 Material in oblika

Pri izbiri materiala za sistem izenačitve potencialov in tudi glavni ozemljitveni sistem je treba upoštevati frekvenčno področje, v katerem so elektromagnetne motnje v elektroenergetskem objektu (do nekaj 10 MHz v GIS objektih).

Pri izmeničnih tokih se pojavi izriv toka proti zunanosti vodnika – kožni pojav (ang. skin effect). Visokofrekvenčne toke večinoma prevaja samo površinska plast, ki se z naraščanjem frekvence zmanjšuje.

Površinska plast predstavlja debelino vodnika, znotraj katerega se nahaja približno 63% toka [5]. Gostota toka se od površine vodnika proti notranosti eksponentno zmanjšuje. Na petih debelinah površinske plasti je prisotno približno 99% celotnega toka.

Slaba lastnost inox-a je njegova nizka električna prevodnost v primerjavi z bakrom. Električna prevodnost inox-a je približno 40 krat manjša od bakra [4] (odvisna je od sestave inox-a). Električna prevodnost železa oz. jekla je približno 7 krat manjša od bakra [6] (odvisna je od sestave jekla oz. ali je pocinkano ali ne).

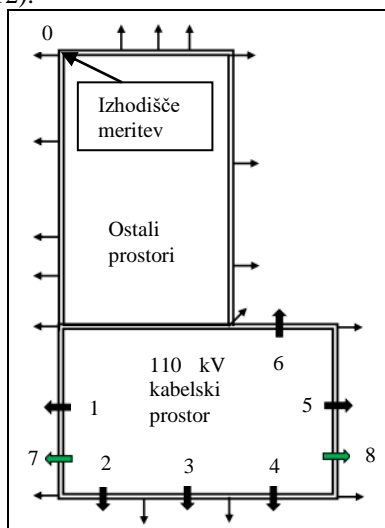
Pri takšnem razmerju v prevodnosti so bakreni vodniki bolj prevodni od Rf vodnikov ali železa tudi v primeru prevajanja tanke površinske plasti - v primeru prevajanja visokofrekvenčnih tokov.

Idealni so vodniki z velikim obsegom po obodu – prerez vodnika ni merilo, lahko je tudi votel, pomemben je njegov premer. V elektroenergetskih objektih se, zaradi mehanskih razlogov in zato, da lahko vodijo velike toke ob okvarah, uporabljajo polni vodniki. Glede oblike ima prednost uporaba ploščatih vodnikov pred okroglimi. Pri isti dolžini in istem prerezu ima ploščati vodnik manjšo induktivnost kot okrogel.

6 Rezultati meritev

Rezultati meritev v 110 kV kabelskem prostoru kažejo precejšnjo razliko v impedancah povezav pri ozemljitvenih izvodih izvedenih z Rf v primerjavi z Cu, kakor tudi pri primerjavi impedanc k notranjemu oz. zunanemu obroču (tabela 1, izvodi 1-8, slika 6).

Opazna je tudi razlika v impedancah v komandnem (K) in telekomunikacijskem (TK) prostoru pri merjenju impedanc povezav na izvodih za povezovanje bakrenega obroča prek armature na zunanji ozemljitveni obroč oziroma preko notranjega bakrenega obroča in njegovih ostalih povezav z zunanjim obročem (tabela 1, izvodi 9-12).



Legenda:

- povezava armature na zunanji ozemljitveni obroč
- povezava notranjega in zunanjega obroča - Rf
- povezava notranjega in zunanjega obroča - Cu

Slika 6. Tloris zgradbe

Tabela 1. Rezultati meritev

Merjena povezava	Impedanca k zunanjemu obroču [Ω]	Impedanca k notranjemu obroču [Ω]
ozem. izvod 1 - Rf	0,091	0,007
ozem. izvod 2 - Rf	0,081	0,008
ozem. izvod 3 - Rf	0,119	0,008
ozem. izvod 4 - Rf	0,094	0,008
ozem. izvod 5 - Rf	0,112	0,008
ozem. izvod 6 - Rf	0,100	0,008
ozem. izvod 7 - Cu	0,022	0,008
ozem. izvod 8 - Cu	0,037	0,009
ozem. izvod 9 - K	0,017	0,009
ozem. izvod 10 - K	0,036	0,007
ozem. izvod 11 - TK	0,023	0,010
ozem. izvod 12 - TK	0,018	0,010

Odstopanje rezultatov meritev je posledica vključevanja materialov slabše prevodnosti (Rf trak, Rf ozemljitveni elementi, armatura, FeZn trak) in kakovosti izvedenih del (kakovosti varov pri varjenju ozemljitvenih elementov na armaturo, kakovosti varjenja armature med seboj in tudi varjenja FeZn traka na armaturo ter varjenja Rf. izvodov na FeZn trak). Pri takšni izvedbi je množica spojev, kjer ima vsak svoj delež pri slabšanju prevodnosti povezave še posebej, če gledamo s stališča višjih frekvenc in zagotavljanja elektromagnetne združljivosti. Impedanca vsake povezave je sestavljena iz impedance vodnikov in kontaktnih impedanc spojev na liniji povezave [7].

7 Zaključek

Ustrezno varjena oz. prekrivana armatura s stališča izenačevanja potencialov zagotavlja elektromagnetni oklep oz. kletko, ki pomaga pri zaščiti električne in elektronske opreme pred motnjami, ki jih povzročajo elektromagnetna polja. Armatura mora biti na več mestih povezana na obroč ali zbiralko izenačitve potencialov, še posebej v tistih prostorih, kjer je nameščena na motnje občutljiva elektronska oprema, in ne obratno.

Izenačitve potencialov, ki so v posameznih prostorih izvedene z bakrenimi vodniki, ni smiselno priključevati na armaturo in preko nje na zunanji ozemljitveni obroč zgradbe. Vključevanje materialov slabše prevodnosti v sistem izenačitve potencialov in v ozemljitveni sistem slabša njuno učinkovitost. S stališča elektromagnetne združljivosti morajo vodniki in spoji zagotavljati optimalno prevodnost, tako za majhne kot velike toke, pri nizkih frekvencah in tudi pri visokofrekvenčnih prehodnih pojavih.

V objektu, kjer je sistem izenačitve potencialov izveden z bakrenimi vodniki - prav tako tudi glavni ozemljitveni sistem v zemlji, ni nobenega utemeljenega razloga ali ovire, da ne bi bile izvedene iz bakrenih vodnikov ustreznega prereza tudi povezave med njima.

Literatura

- [1] Spletna stran Earthing connections HEA system, Najdeno dne 27. junija 2022 na spletnem naslovu: http://www.peteze.si/db/peteze/file/posebnosti/hea-system_en_150615.pdf
- [2] Spletna stran Types Of Stainless Steel: A2 vs A4 or 304 vs 316, Najdeno dne 27. junija 2022 na spletnem naslovu: <https://www.goebelfasteners.com/types-of-stainless-steel-a2-vs-a4-or-304-vs-316/>
- [3] Spletna stran 4 Types of Stainless Steel, Najdeno dne 27. junija 2022 na spletnem naslovu: <https://www.bsstainless.com/4-types-of-stainless-steel>
- [4] Spletna stran Material compatibility and galvanic corrosion, Najdeno dne 27. junija 2022 na spletnem naslovu: <https://www.aflury.ch/en/contd/dshow/documentation/earthing-and-lightning-protection-systems/catd/earthing-and-lightning-protection>
- [5] D. Kwon, M. H Azarian, M. Pecht: Early Detection of Interconnect Degradation by Continuous Monitoring of RF Impedance, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 9, no. 2, 2009.
- [6] Spletna stran Conductive materials, metals and stainless steels properties table, Najdeno dne 27. junija 2022 na spletnem naslovu: https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=en_US
- [7] U. M. Peterlin: Vpliv kontaktne impedance na elektromagnetno združljivost, Zbornik petnajste konference slovenskih elektroenergetikov CIGRE CIRED, 19. – 21. oktober 2021, Laško, Slovenija.