

mr. sc. Dubravko Franković
Tehnički fakultet, Rijeka
dubravko.frankovic@riteh.hr

Izv. prof. dr. sc. Viktor Šunde
Tehnički fakultet, Rijeka
viktor.sunde@riteh.hr

mr. sc. Josip Karneluti
5E d.o.o. Rijeka
josip.karneluti@5e-rijeka.hr

PRIVREMENO UZEMLJENJE I KRATKO SPAJANJE U POSTROJENJIMA VISOKOG NAPONA

SAŽETAK

Uzemljenje postrojenja visokog napona svakako je jedan od najvažnijih sustava bilo da se radi o pogonskom uzemljenju bilo zaštitnom uzemljenju. Izvođenje bilo kakvih radova na elementima i sustavima visokonaponskih postrojenja iziskuje osiguravanje mjesta rada kako bi osobe koje vrše radove bile zaštićene od strujnog udara odnosno opasnih dodirnih napona. Navedeno se postiže privremenim uzemljivanjem i kratko-spajanjem dijelova postrojenja na kojima se vrše radovi.

U radu se prikazuje metodologija privremenog uzemljivanja i kratko-spajanja uz osvrt na sve relevantne veličine kao što su uzemljivački sustav postrojenja, različite vrste sabirničkih konfiguracija, karakteristične struje kvara u postrojenjima, određivanje širine zaštitne zone privremenog uzemljivača. Posebno su razmotreni sustavi s jednostrukim sabirnicama i sustavi s dvostrukim sabirnicama.

Ključne riječi: uzemljenje, kratko-spajanje, kvar, zaštitna zona, sigurnost

TEMPORARY EARTHING AND SHORT-CIRCUITING IN HIGH VOLTAGE INSTALLATIONS

SUMMARY

Grounding is one of the most important substation's systems whether it is related to system grounding or safety grounding. Performance of any activities on substation's equipment or systems necessitates work-place safeguarding in such a way that the personnel conducting necessary actions are protected against electric shock or dangerous touch-voltages. Afore mentioned is achieved through temporary earthing and short-circuiting of substation equipment.

The methodology for temporary earthing and short-circuiting will be explained throughout the paper and all relevant factors, such as substation grounding system, different busbar configurations, characteristic substation fault currents, temporary earthing protection zone width determination, will be reviewed. Substations with single and double busbar configurations will be analyzed separately.

Keywords: grounding, short-circuiting, fault, protection zone, safety

1. UVOD

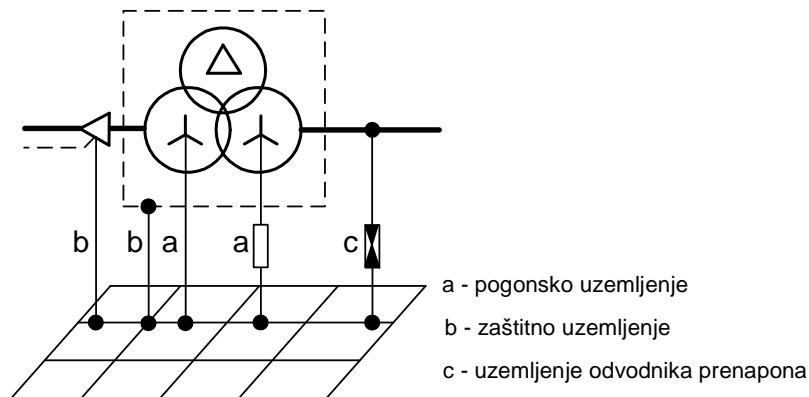
U električnim postrojenjima (EP) i kućanstvima ljudi su izloženi opasnosti od struja, najčešće, industrijske frekvencije, koje su za čovjeka i najopasnije. Do električnog udara dolazi kada osoba svojim tijelom ili dijelom tijela premosti određenu potencijanu razliku. Posljedice električnog udara zavise od efektivne vrijednosti struja koje prolaze kroz tijelo čovjeka i njihovom trajanju. Smatra se da su granične struje pri kojima je još uvijek moguće odvojiti se od dijelova pod naponom 12,5 mA za muškarce odnosno 8 mA za žene [1].

Iz prethodno navedenog proizlazi potreba za pouzdanim osiguranjem mjesta rada u visokonaponskim (VN) električnim postrojenjima, gdje je opasnost od strujnog udara najveća. Naime, kako će u nastavku teksta biti pokazano, mjesto rada može pod određenim okolnostima doći pod napon, a osobe koje se nalaze u dodiru s takvim mjestom izložene su opasnosti od strujnog udara.

Situacije u kojima mjesto rada koje je uzemljeno i osigurano može doći pod napon mogu se javiti u dva slučaja – pogrešna manipulacija, kada se na mjesto rada dovodi puni fazni napon odnosno – inducirani napon uslijed protjecanja struje kroz susjedni, prostorno odmaknuti, aktivni sabirnički sustav. I u prvom i u drugom slučaju potrebno je provjeriti iznos napona kojeg osoba koja izvodi radove može premostiti.

2. UZEMLJENJE U POSTROJENJU

Uzemljenje u postrojenju dijeli se najčešće na pogonsko ili radno, zaštitno, gromobransko i združeno uzemljenje [2]. Uzemljenje dijela mreže u normalnom pogonu naziva se pogonskim uzemljenjem (nultočke generatora, transformatora). U skupinu zaštitnih uzemljenja ubrajaju se sekundarne stezaljke namota strujnih i naponskih mjernih transformatora, odnosno kućišta svih uređaja koja u slučaju kvara mogu doći pod napon, odnosno uzemljenja za zaštitu osoblja za vrijeme rada na visokonaponskim dijelovima postrojenja. U skupinu zaštitnih uzemljenja ubrajaju se i privremeni uzemljivači odnosno kratkospojnici. Treću skupinu uzemljenja čini gromobransko uzemljenje u koje se ubraja i uzemljenje odvodnika prenapona, ali i uzemljenja namijenjena odvođenju statičkih naboja, lutajućih struja i sl. Ukoliko su pogonsko i zaštitno uzemljenje spojeni na isti uzemljivač, kao što je slučaj na slici 1., takvo uzemljenje nazivamo još i združenim.



Slika 1. Različite skupine uzemljenja u postrojenju

Uzemljivački sustav postrojenja do sada je bio predmet razmatranja mnogobrojnih analiza i studija u kojima su se analizirale kako impulsne karakteristike [3], tako i međusobni utjecaj dijelova uzemljivačkog sustava na druge vodljive instalacije u zemlji [4].

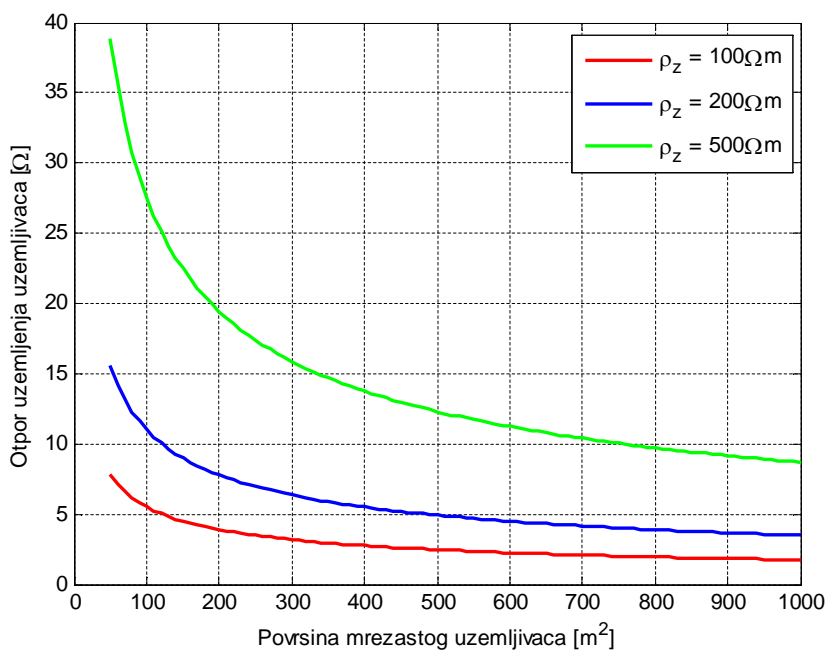
2.1. Uzemljivački sustav postrojenja

Složeni uzemljivački sustav visokonaponskog postrojenja čini paralelna kombinacija nekoliko različitih uzemljivača: uzemljivački sustav samog postrojenja (najčešće mrežasti uzemljivač); bakrena užad ili traka položena uz VN kabele ukoliko se stanica napaja kabelski; otpor uzemljenja nadzemnih vodova priključenih na postrojenje; otpor uzemljenja priključenih niskonaponskih mreža napojenih preko srednjenaponskih (SN) vodova čiji vodljivi plaštevci služe kao veza ovih uzemljenja.

Uzemljivač električnog postrojenja može se konkretno izvesti na više načina u ovisnosti o tehnokonomskoj analizi, međutim, jedno od najčešće korištenih rješenja, kada se radi o većim vanjskim postrojenjima, svakako je mrežasti uzemljivač. Smatra se da je za većinu proračuna uzemljivačkog sustava dovoljno točna približna formula za određivanje otpora uzemljenja:

$$R_z = \frac{0,55\rho_z}{\sqrt{A}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

U gornjem izrazu ρ_z označava specifični otpor zemljišta (izražen u Ωm), a A ukupnu površinu na kojoj se prostire uzemljivačka mreža (izražena u m^2).



Slika 2. Otpor mrežastog uzemljivača u ovisnosti o površini uzemljivača i specifičnom otporu zemljišta

Prema slici 2. vidljivo je da nema osobite koristi od ugradnje mrežastog uzemljivača jako velike površine obzirom da se ukupan otpor uzemljivača malo smanjuje za veliko povećanje površine uzemljivača. Međutim, kako bi se održali gradijenti potencijalnog lijevka u dozvoljenim granicama u i oko postrojenja mrežasti uzemljivač izvodi se na većoj površini no što bi to bilo opravdano sa stanovišta postizanja otpora uzemljenja odgovarajuće vrijednosti.

2.2. Privremeno uzemljivanje i kratko-spajanje

Za sigurno izvođenje bilo kakvih radova na opremi visokonaponskih postrojenja u beznaponskom stanju ili u blizini dijelova postrojenja pod naponom, nužno je osigurati mjesto rada. Jedna od tih faza, uzemljivanje i kratko-spajanje, obavlja se primjenom prijenosnih ili stalnih naprava za uzemljivanje i kratko-spajanje.

Dovođenje pogonskog napona uslijed greške na privremeno uzemljeni dio postrojenja ili pak induciranje napona na privremeno uzemljenom dijelu zbog prolaza struje u drugim paralelnim vodičima, stvara na uzemljenom vodiču određeni potencijal prema zemlji. Na samom mjestu uzemljivanja neće biti nikakvog potencijala, ali s udaljavanjem od mjesta uzemljivanja potencijal vodiča raste. Na taj način stvoreni potencijali mogu iznositi i više od 1000 V.

Potpuno sigurnim može se smatrati samo ono područje privremeno uzemljenih i kratko-spojenih vodiča na kojima je stvoreni potencijal vodiča prema zemlji manji od dozvoljenog napona dodira. To područje naziva se "zonom štice privremenog uzemljivača" pa je unutar njega dozvoljeno dodirivanje golih vodiča rukama.

Prilikom rada u elektroenergetskim postrojenjima nužno je poštivanje "pet zlatnih pravila" zaštite na radu, među kojima je i privremeno uzemljivanje te kratko-spajanje.

Međutim, takvo uzemljivanje ne smije se provoditi proizvoljno jer je područje šticećenja privremenog uzemljivača ograničeno. Naime, područje šticećenja i potreban broj privremenih uzemljivača određuje se uzimajući u obzir razne utjecaje i moguće događaje u postrojenju kao što su:

- Elektrostatski utjecaj (kapacitivne struje);
- Međuinduktivni utjecaj susjednih sabirnica protjecanim strujom jednopolnog kvara;
- Pogrešnim rukovanjem narinut pogonski napon na privremeno uzemljene i kratko-spojene sabirnice (tropolni kratki spoj).

U rasklopištima su kapacitivne veze među sustavima sabirnica vrlo male zbog relativno kratkih dužina sabirnica. Stoga se elektrostatski utjecaj može zanemariti. Međusobni elektromagnetski utjecaj među bliskim sabirničkim sustavima je direktno proporcionalan međusobnom induktivnom djelovanju i iznosu struje jednopolnog kratkog spoja kojom su protjecane susjedne bliske sabirnice, obzirom da je takav utjecaj najznačajniji kad su sutavi protjecani nesimetričnim strujama. Pogrešnom manipulacijom narinut pogonski napon na sabirnički sustav na kojem se radi, a koji je uzemljen i kratko-spojen na jednom kraju, nastaje na sabirnicama tropolni kratki spoj. Jedinični pad napona direktno je proporcionalan uzdužnoj impedanciji vodiča i struji tropolnog kratkog spoja.

Međuinduktivni utjecaj i pogrešna manipulacija moraju se uzeti u obzir prilikom određivanja područja šticećenja privremenog uzemljivača.

U dva gore navedena slučaja (b i c), područje šticećenja privremenog uzemljivača, odnosno minimalni broj mjesta predviđenih za postavljanje privremenih uzemljivača treba odrediti tako da privremeni uzemljivač, odnosno uzemljivači, osiguraju mjesto rada (na npr. sabirnicama) na način da potencijal sabirnica prema zemlji bude manji ili jednak dopuštenom naponu dodira. Dopušteni napon dodira ovisi o vremenu djelovanja zaštite odnosno o trajanju kvara.

3. IMPEDANCIJE SABIRNIČKIH SUSTAVA

3.1. Jednostruke sabirnice

Za postrojenja s jednostrukim sustavom sabirnica potrebno je odrediti matricu impedancija faznih - sabirničkih vodiča, temeljem podataka o geometriji sabirnica.

Vlastita impedancija sabirničkog vodiča računa se prema sljedećim relacijama [5]:

$$\bar{Z}_{vl} = R_1 + 0,05 + j0,0628 \cdot \ln \frac{93,1 \cdot \sqrt{\rho}}{d_s} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (2)$$

gdje su:

- R_1 - jedinični djelatni otpor vodiča sabirnica,
- ρ - specifični otpor zemljišta,
- d_s - vlastita srednja geometrijska udaljenost (SGU) sabirničkog vodiča.

Izraz za vlastitu SGU vodiča nije jednoobrazan, već ovisi o tipu sabirnica (cijevne, užaste, puni profili). U tablici I. dani su izrazi za vlastitu SGU najčešće korištenih izvedbi sabirničkih vodiča.

Međusobna impedancija sabirničkih vodiča računa se prema relaciji:

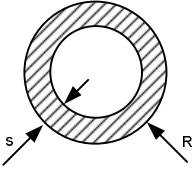
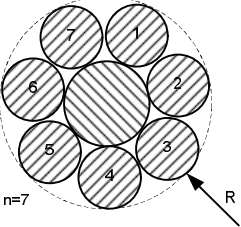
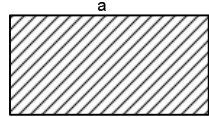
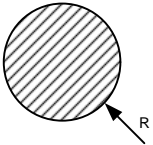
$$\bar{Z}_m = R_1 + 0,05 + j0,0628 \cdot \ln \frac{93,1 \cdot \sqrt{\rho}}{d_m} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (3)$$

Značenje oznaka isto je kao u izrazu za vlastitu impedanciju sabirnica osim što se u prethodnom izrazu pojavljuje oznaka d_s koja označava međusobnu udaljenost sabirničkih vodiča.

Dakle, matrica faznih impedancija sustava sabirničkih vodiča glasi:

$$\bar{Z}_{sab} = \begin{bmatrix} Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} \\ Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} \\ Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (4)$$

Tablica I. Izrazi za vlastitu SGU različitih tipova sabirnica

<p>CIJEVNE SABIRNICE</p>		$d_s = R - 0,3s \quad (s/R < 0,5)$
<p>UŽASTE SABIRNICE</p>		$n=3 \rightarrow d_s = 0,677R$ $n=7 \rightarrow d_s = 0,726R$ $n=19 \rightarrow d_s = 0,758R$ $n=37 \rightarrow d_s = 0,768R$ $n > 61 \rightarrow d_s = 0,7788R$
<p>PROFILNE SABIRNICE</p>		$d_s = 0,2235(a+b)$
<p>SABIRNICE OD PUNOG VODIČA</p>		$d_s = 0,7788R$

Dijagonalni elementi matrice $[Z_{sab}]$ računaju se prema izrazu (2), dok se vrijednost vandijagonalnih elemenata računa prema izrazu (3).

3.2. Dvostruke sabirnice

U postrojenjima s dvostrukim sustavom sabirnica potrebno je uzeti u obzir oba sustava sabirnica, međutim, obzirom da je od interesa samo jedinični pad napona na sabirničkom sustavu koji je uzemljen, matrica impedancija faznih vodiča imat će dimenziju 3x6, a ne 6x6 koliku bi dimenziju imala kada bi od interesa bili padovi napona na oba sabirnička sustava. Matricu impedancija faznih vodiča, kao i u prethodnom odjeljku, gradimo koristeći izraze (2) i (3), odnosno:

$$\bar{Z}_{sab} = \begin{bmatrix} Z_{R1R1} & Z_{R1S1} & Z_{R1T1} & Z_{R1R2} & Z_{R1S2} & Z_{R1T2} \\ Z_{S1R1} & Z_{S1S1} & Z_{S1T1} & Z_{S1R2} & Z_{S1S2} & Z_{S1T2} \\ Z_{T1R1} & Z_{T1S1} & Z_{T1T1} & Z_{T1R2} & Z_{T1S2} & Z_{T1T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ m \end{bmatrix} \quad (5)$$

Indeks 1 i 2 označavaju sabirnički sustav 1 i 2, respektivno.

4. STRUJE KVARA U ELEKTRIČNOM POSTROJENJU

4.1. Tropolni kratki spoj

Tropolni kratki spoj svakako je jedan od najtežih kvarova koji se mogu pojaviti u visokonaponskom postrojenju i kojega je potrebno u najkraćem vremenu otkloniti budući da za sobom ostavlja razarajuće posljedice. Privremenim uzemljivanjem i kratko-spajanjem dijela postrojenja na kojem se planiraju vršiti radovi te potom dovođenjem istog, uslijed pogrešne manipulacije, pod puni napon stvoreni su svi preduvjeti za nastanak simetričnog tropolnog kratkog spoja uz istovremeni spoj sa

zemljom. Maksimalne struje kratkog spoja, u mreži HEP-a, koje se mogu pojaviti veličine su 15 kA za 400 kV mrežu, 25 kA za 220 kV i 40 kA za 110 kV [6]. Za srednjonaponske mreže te su struje ograničene na 12,5 kA, što odgovara prekidnim moćima ugrađenih prekidača. Snage kratkog spoja s kojima se ulazi u proračune iznose 250 MVA, 500 MVA odnosno 750 MVA za mreže 10 kV, 20 kV i 35 kV, respektivno. Jasno je, da točan iznos struje kratkog spoja ovisi o poziciji postrojenja u mreži te uklopnom stanju u trenutku kvara. Struju trolnog kratkog spoja relevantnu za dimenzioniranje sustava privremenih uzemljivača nije potrebno posebno računati, ako je poznat i dostupan podatak o njenoj najvećoj vrijednosti. Ako pak takav podatak nije dostupan, potrebno je izvršiti proračun kratkog spoja uz najnepovoljnije uvjete u mreži, odnosno uz uvjete koji daju najveću struju.

4.2. Jednopolni kratki spoj

Jednopolni kratki spoj, kao primjer izrazite nesimetrije u sustavu karakteriziran je također velikim iznosom struje u pogođenoj fazi, ukoliko se radi o kruto uzemljenoj mreži (VN mreže) ili iznosom struje koja je određena impedancijom za ograničenje struje jednopolnog kvara (SN mreže). Nadalje, ako su u pitanju SN distribucijske mreže, postoji još i mogućnost izoliranog pogona mreže, u kojem slučaju veličinu struje jednopolnog kvara definira ukupna vrijednost dozemnog kapaciteta galvanski povezane mreže. Vrijednosti kapacitivnih struja zemljospoja znaju „narasti“ i na više stotina ampera, a budući su maksimalne vrijednosti kapacitivnih struja zemljospoja u izoliranim mrežama određene propisom, poduzimaju se odgovarajuće mjere za njihovo ograničenje odnosno poništavanje[7].

Apsolutne vrijednosti maksimalnih struja jednopolnog kvara u VN mrežama slične su po iznosu strujama navedenim u poglavlju 4.1.

Jednopolni kvar posebno je interesantan pri projektiranju privremenih uzemljivača budući je struja jednopolnog kvara mjerodavna za određivanje veličine induciranog napona u sabirničkom sustavu koji je uzemljen, ali se nalazi dovoljno blizu aktivnog sustava kojim teče spomenuta struja, da bude zahvaćen elektromagnetskim poljem koje ta struja proizvodi.

Kao i kod trolnog kratkog spoja, struju jednopolnog kvara nije potrebno posebno računati ako je poznat ili dostupan podatak o njenoj najvećoj vrijednosti. Ako pak takav podatak nije dostupan, potrebno je izvršiti proračun kratkog spoja uz najnepovoljnije uvjete u mreži, odnosno uz uvjete koji daju najveću struju jednopolnog kvara.

4.3. Ostali kvarovi i poremećaji

Nesimetrija napona napajanja odnosno nesimetrija uzrokovana nesimetrijom koju unose neprepleteni nadzemni vodovi može biti uzrokom da se ne pojavljuju jednaki padovi napona u svim fazama uzemljenih sabirnica koje se dovode greškom pod napon. U tom slučaju, potrebno je provjeriti jedinični pad napona za sve faze uzimajući još u obzir i impedanciju vodiča za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje te impedanciju uzemljenja postrojenja, obzirom da kvar nije više simetričan i da se dio struje kvara zatvara kroz zemlju. Da bi se takav proračun mogao izvršiti potrebno je modificirati model kvara i uvažiti navedeno.

Nadalje, moguće su i druge kombinacije kvarova koje uključuju dvostruke kvarove na istom sustavu sabirnica ili kvarove među različitim sistemima sabirnica, no zbog ograničenja u prostoru, ti se proračuni neće pokazati u ovom radu.

5. ODREĐIVANJE ZONE ŠTIĆENJA I BROJA PRIVREMENIH UZEMLJIVAČA U ELEKTRIČNOM POSTROJENJU

5.1. Zona šticećenja privremenog uzemljivača

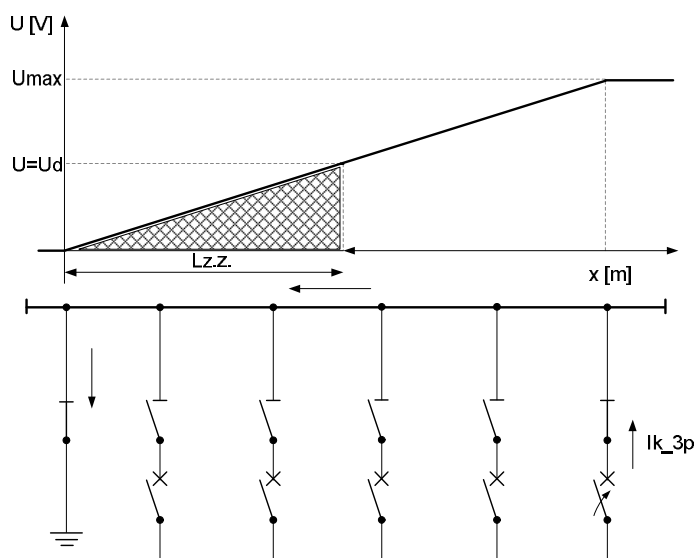
Uzemljivanje i kratko spajanje, na mjestu rada, pruža zaštitu na jednoj kraćoj i točno određenoj dionici vodiča. Zona odnosno područje šticećenja privremenog uzemljivača mora osigurati da na mjestu rada potencijal prema zemlji bude manji ili jednak dopuštenom naponu dodira. Dopušteni napon dodira definiran je krivuljom koja daje ovisnost dozvoljenog napona o vremenu trajanja napona. U postrojenjima visokog napona trajanje napona uzrokovanog protjecanjem struje kvara ovisi o vremenu djelovanja zaštite kojom se kvar otklanja tj. ukupno vrijeme od nastanka kvara do isklopa prekidača zaduženog za zaštitu npr. sabirnica pogođenih kvarom. Navedeno vrijeme jednako je zbroju vremena podešenog na

zaštitnom releju i vlastitom vremenu prorade prekidača. Slika 3. prikazuje širinu zaštitne zone privremenog uzemljivača za slučaj pogrešne manipulacije prekidačem.

Sve dok, prema oznakama na slici 3., vrijedi $U < U_d$, odnosno dok je potencijal vodiča prema zemlji manji od dopuštenog napona dodira, uzemljivanje i kratko spajanje pruža djelotvornu zaštitu.

Zbog toga je jasan zahtjev da se naprave za uzemljivanje i kratko spajanje postavljaju što bliže mjestu rada, odnosno da naprave za uzemljivanje i kratko spajanje budu vidljive s mjesta rada.

U slučaju pogrešne manipulacije prekidačem, sabirnički sustav koji je uzemljen i kratko spojen, dovodi se pod iznos punog napona što za posljedicu ima nastanak trolnog kratkog spoja. Struja kratkog spoja, stvorit će duž uzemljenih sabirnica pad napona u ovisnosti o jediničnoj vlastitoj impedanciji sabirničkih vodiča.



Slika 3. Određivanje širine zaštitne zone privremenog uzemljivača – pogrešna manipulacija

Napon će linearno rasti od vrijednosti nula, koja vlada na mjestu uzemljivanja i kratkog spajanja do vrijednosti koja je definirana strujom kratkog spoja i ukupnom impedancijom kratko-spojenih sabirnica. U smjeru suprotnom od izvora napona nema potencijala na vodičima. Zona šticejenja privremenog uzemljivača određena je visinom potencijala na koje dolazi vodič protjecan strujom kratkog spoja i trajanjem kvara.

Pad napona duž sabirnice, od mjesta kratkog spajanja i uzemljivanja računa se iz poznatog ili izračunatog podatka o maksimalnoj struji kratkog spoja u postrojenju i izračunatog podatka o vlastitoj impedanciji vodiča sabirnica, odnosno:

$$\begin{bmatrix} V'_R \\ V'_S \\ V'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} \\ Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} \\ Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{kR} \\ I_{kS} \\ I_{kT} \end{bmatrix} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (6)$$

U prethodnom izrazu struja I_k označava struju kratkog spoja. Za sustav dvostrukih sabirnica izraz (6) se modificira i glasi:

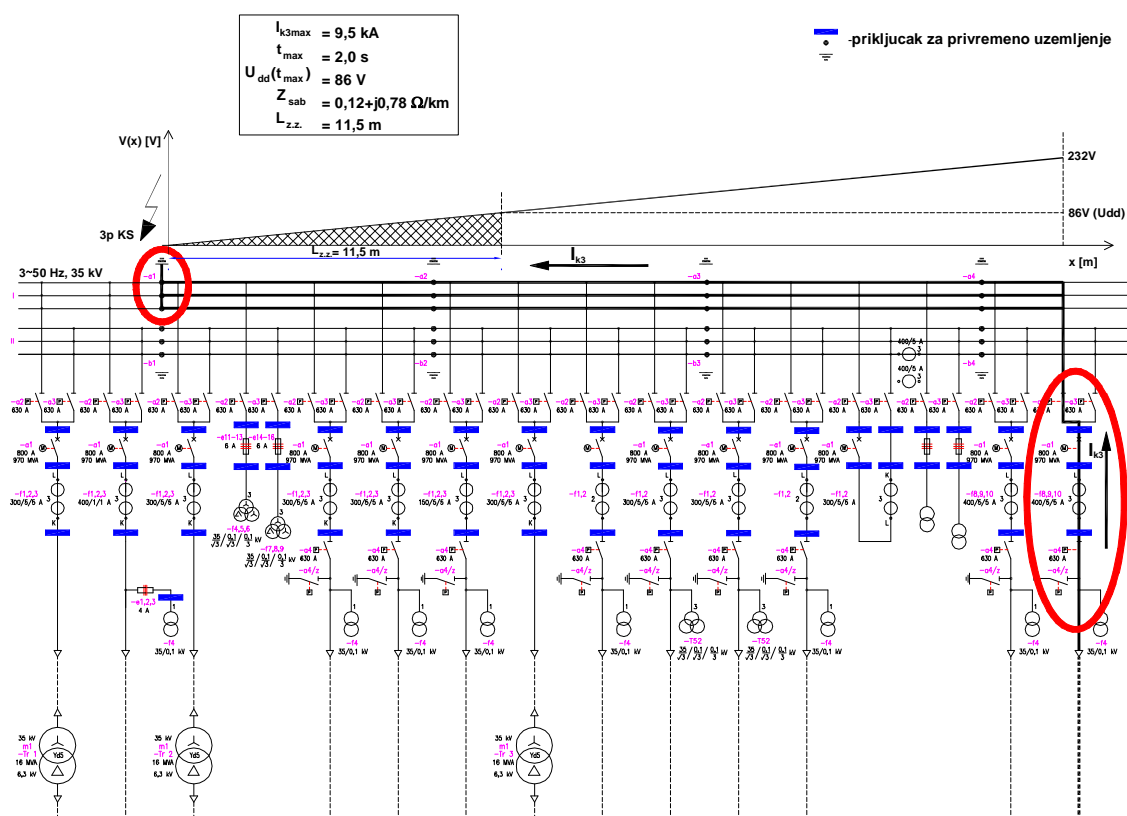
$$\begin{bmatrix} V'_{R1} \\ V'_{S1} \\ V'_{T1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{R1R1} & Z_{R1S1} & Z_{R1T1} & Z_{R1R2} & Z_{R1S2} & Z_{R1T2} \\ Z_{S1R1} & Z_{S1S1} & Z_{S1T1} & Z_{S1R2} & Z_{S1S2} & Z_{S1T2} \\ Z_{T1R1} & Z_{T1S1} & Z_{T1T1} & Z_{T1R2} & Z_{T1S2} & Z_{T1T2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{kR1} \\ I_{kS1} \\ I_{kT1} \\ I_{nR2} \\ I_{nS2} \\ I_{nT2} \end{bmatrix} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (7)$$

U izrazu (7) pojavljuje se još i veličina I_n koja označava normalne pogonske struje.

Da bi se mogla odrediti zona šticećenja privremenog uzemljivača potrebno je poznavati maksimalno vrijeme trajanja kvara, koje se preuzima iz npr. plana podešenja relejne zaštite za razmatrano postrojenje. Potom se iz dijagrama ili tablice dozvoljenih dodirnih napona očitava iznos dopuštenog napona koji se dijeli s najvećom od vrijednosti napona dobivenih u (6) ili (7), odnosno:

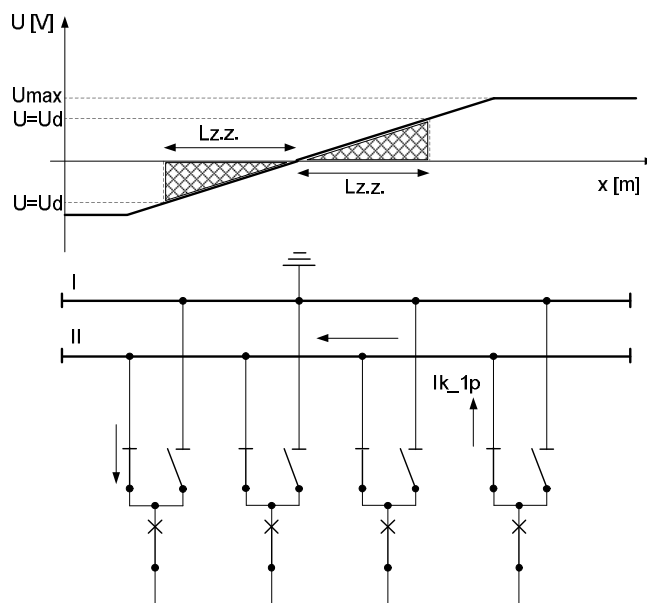
$$L_{z.z.} = \frac{U_{dd}}{\sqrt{I_n}} [m] \quad (8)$$

Na slici 4. prikazan je rezultat proračuna širine zaštitne zone za jedno SN postrojenje nazivnog napona 35 kV s dvostrukim sustavom sabirnica. Struja trolpolnog kratkog spoja iznosi 9,5 kA, a zaštita kojom se štite sabirnice podešena je na 2,0 s. Obzirom na dozvoljeni dodirni napon od 86 V, širina zaštitne zone iznosi 11,5 m. Budući su sabirnice duge 38 m, priključke za privremeno uzemljenje potrebno je postaviti na ukupno 4 simetrično raspoređene lokacije duž sabirnica.



Slika 4. Rezultat proračuna širine zaštitne zone privremenog uzemljivača – pogrešna manipulacija

Na slici 5. prikazana je raspodjela potencijala prema zemlji duž nekog vodiča uzemljenog samo na jednom mjestu (sustav I), a koji se nalazi u zoni utjecaja nekog drugog paralelnog i strujom protječanog vodiča (sustav II).



Slika 5. Određivanje širine zaštitne zone privremenog uzemljivača – inducirani napon

U rasklopnim postrojenjima i transformatorskim stanicama najveći inducirani naponi zbog elektromagnetskog utjecaja mogući su na sabirnicama koje su izvan pogona, dok su druge protjecane nekom strujom. Ta struja može biti:

- pogonska struja;
- struja kratkog spoja nastalog u samom promatranom postrojenju;
- struja kratkog spoja zbog kratkog spoja nastalog u mreži, a ta struja prolazi kroz aktivne sabirnice.

Može se pokazati da čak i pogonske struje reda veličine 1000 A kroz aktivne sabirnice neće prouzročiti veće inducirane napone od 0,05 V/m. Uzrok je u samoj prirodi trofaznog sustava struja i napona. Unatoč horizontalnom razmještaju vodiča sabirnica, utjecaj najbliže faze u promatranom vodiču znatno je oslabljen suprotnim djelovanjem ostalih faznih struja, vektorski pomaknutih za 120° i 240° .

Najopasniji slučaj je nastanak jednopolnog kratkog spoja u promatranom postrojenju ili pak pojava kratkog spoja na bilo kojem priključenom vodu nedaleko od promatranog postrojenja, dakako u onoj fazi čiji je vodič najbliži prvom vodiču pasivnih sabirnica. Veličinu induciranih napona dobivamo na sličan način kao u (7), dakle:

$$\begin{bmatrix} V'_{R1} \\ V'_{S1} \\ V'_{T1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{R1R2} & Z_{R1S2} & Z_{R1T2} \\ Z_{S1R2} & Z_{S1S2} & Z_{S1T2} \\ Z_{T1R2} & Z_{T1S2} & Z_{T1T2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{ks2} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ m \end{bmatrix} \quad (9)$$

U prethodnom izrazu, pretpostavljeno je da je sustav 1 neaktivan i uzemljen, a da kroz sustav 2 protječe struja jednopolnog kratkog spoja u fazi S. Struju jednopolnog kvara potrebno je još pomnožiti redukcijskim faktorom ukoliko se uz sabirnice nalaze i neki drugi paralelni i uzemljeni vodiči (npr. zaštitno uže).

5.2. Broj i pozicija priključaka privremenih uzemljivača

Temeljem svega do sada izloženog, mogu se odrediti kriteriji za određivanje dužine zone šticečenja oko privremenog uzemljivača, kao i za utvrđivanje potrebnog broja uzemljivača na nekoj dionici vodiča.

Kod postrojenja sa samo jednim sustavom glavnih sabirnica i s pomoćnim sustavom sabirnica, koji je prostorno odmaknut, za određivanje zone šticečenja, a time i broja potrebnih uzemljivača, mjerodavan je pad napona duž vodiča izazvan strujom tropsnog kratkog spoja u postrojenju, odnosno kvarom uslijed pogrešne manipulacije.

Kod postrojenja s više sustava sabirnica, a smještenih jednih uz druge, za izračunavanje zone šticečenja i broja uzemljivača mjerodavan je, pored pada napona uzrokovanog strujom kratkog spoja uslijed

pogrešne manipulacije i inducirani napon u uzemljenom sabirničkom sustavu izazvan očekivanom strujom jednogpolnog kratkog spoja u drugom, aktivnom sustavu.

Nadalje, ulazni podaci potrebni za izvođenje proračuna jesu:

- a) geometrija i materijal sabirnica,
- b) očekivana najviša vrijednost struje trolnog kvara,
- c) očekivana najviša vrijednost struje jednogpolnog kvara ukoliko se radi o sustavu s višestrukim sabirnicama,
- d) podešenje zaštitnog uređaja kojima se predmetne sabirnice štite od višepolnih kvarova odnosno jednogpolnih kvarova.

U transformatorskim stanicama i razvodnim postrojenjima, naprave za uzemljenje i kratko spajanje postavljaju se, a spravom moraju biti obuhvaćeni svi vodiči:

- a) na mjestu odvajanja od napona (npr. između sabirničkog rastavljača i prekidača snage),
- b) na mjestu rada,
- c) na svakoj galvanski odvojenoj dionici koja može doći pod pogonski napon ili se na njoj može inducirati napon (npr. između prekidača i izlaznog rastavljača).

Broj i položaj mjesta za privremeno uzemljivanje i kratko spajanje ovisi o tome s koje strane može doći napon bilo kojeg podrijetla, koliko je dugačka radna dionica i rastavlja li se ta radna dionica na više galvanski odvojenih dionica. Unutar polja, koje je u pravilu kraće od dužine zone štice, uzemljivači se postavljaju prema poznatim pravilima:

- a) svaka galvanski odvojena dionica, a na kojoj se može pojaviti napon bilo kojeg porijekla, mora biti uzemljena,
- b) uzemljenje se mora postaviti sa svih strana odakle bi mogao prodrijeti napon.

Točan redoslijed izvođenja privremenog uzemljivanja te presjeci vodiča za privremeno uzemljenje i kratko-spajanje, kao i prijedlog mogućih pozicija priključaka dani su u [8]. Izvedbene pozicije priključaka se određuju prema projektnoj razradi, vrsti EP-a te mogućnosti izvedbe.

Vrijedi istaknuti da se u SN postrojenjima privremeno uzemljenje i kratko-spajanje izvodi s tri vodiča međusobno spojenih na jednom kraju, na koje se nastavlja četvrti vodič koji se spaja na uzemljenje. Slobodni krajevi vodiča za uzemljenje spajaju se na svaku od faza sustava kojeg se privremeno uzemljuje i to na, unaprijed pripremljene čvrste priključke ili su slobodni krajevi vodiča za privremeno uzemljenje opremljeni priključcima za privremeno spajanje te se spajaju direktno na fazne vodiče.

U slučaju VN postrojenja vodiči za privremeno uzemljenje su odvojeni tako da se svaka faza zasebnim vodičem spaja na uzemljenje. Kratko-spajanje se događa u trenutku kada su sva tri vodiča za privremeno uzemljivanje spojena na oba kraja. I u ovom slučaju na vodičima u postrojenju mogu biti unaprijed montirani čvrsti priključci za spajanje vodiča za privremeno uzemljenje ili su vodiči kojima se vrši privremeno uzemljenje opremljeni priključcima koji se direktno spajaju na fazne vodiče.

6. ZAKLJUČAK

Električna postrojenja, mjesta su gdje je prisutna povećana opasnost od izlaganja ljudi opasno visokim naponima. Izvođenje bilo kakvih radova na opremi EP-a predstavlja dodatno povećanje opasnosti za osoblje koje te radove izvodi. Zadaća privremenog uzemljivanja i kratko-spajanja opreme EP-a jest da osigura mjesto rada od pojave nedozvoljeno visokih napona dodira koje osoblje na radu u EP-u može dijelovima tijela premostiti. Međutim, greškom narinuti pogonski napon na privremeno uzemljeni i kratko-spojeni dio postrojenja ili pak inducirani napon, zbog prolaza struje u drugim paralelnim vodičima, stvara na uzemljenom vodiču određeni potencijal prema zemlji. Na samom mjestu uzemljivanja neće biti nikakvog potencijala, ali s udaljavanjem od mjesta uzemljivanja potencijal vodiča raste. Za grubu procjenu može se reći da je zona štice oko mjesta uzemljivanja i kratko-spajanja, za postrojenja srednjeg napona 10-15 m, a za postrojenja visokog napona 20-30 m, iz čega proizlazi zahtjev da elementi sustava za privremeno uzemljivanje i kratko-spajanje budu vidljivi s mjesta rada. Navedena područja štice privremenih uzemljivača potrebno je shvatiti kao smjernice, a konkretne vrijednosti za različita postrojenja potrebno je odrediti proračunom.

U radu su dati izrazi i prikazana je metodologija određivanja širine zaštitne zone i broja privremenih uzemljivača u električnim postrojenjima. Na konkretnom rezultatu proračuna za postrojenje s dvostrukim sabirnicama pokazano je određivanje područja štice privremenog uzemljivača, broj takvih priključaka i prijedlog njihovog položaja.

LITERATURA

- [1] J. Nahman, V. Mijalović, "Odabrana poglavlja iz visokonaponskih postrojenja", Riža d.o.o., Elektrotehnički fakultet - Akademska misao, 2002.
- [2] F. Majdandžić, "Uzemljivači i sustavi uzemljenja", Dotisak, Graphis d.o.o., 2004.
- [3] S. Žutobradić, "Proračun impulsnih karakteristika složenih uzemljivača", "Elektrotehnika" 1/2, Zagreb, 1986.
- [4] F. P. Dawalibi, R. D. Southey, Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines, IEEE Transactions on power delivery, 4(3), 1989, 1840-1846
- [5] M. Ožegović, K. Ožegović, "Električne energetske mreže I", Dalmacija papir Split, FESB Split, Opal computing, 1996.
- [6] Institut za elektroprivredu i energetiku d.d., "Proračun struja kratkog spoja u postojećoj prijenosnoj mreži 400, 220 i 110 kV hrvatskog EES-a", Zagreb, 2003.
- [7] Energetski institut "Hrvoje Požar" d.o.o., "Provedba uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreža pomoću kompenzacijske prigušnice", Zagreb, 2001.
- [8] J. Karneluti, N. Hrelja, D. Franković, "Sustav označavanja i mjere tehničke sigurnosti elektroenergetskih objekata, postrojenja i uređaja", Stručni skup: Zaštita na radu u graditeljstvu, Bizovačke Toplice, 2007.