

ODREĐIVANJE MEĐUSOBNOG OTPORA UZEMLJENJA BLISKIH UZEMLJIVAČA

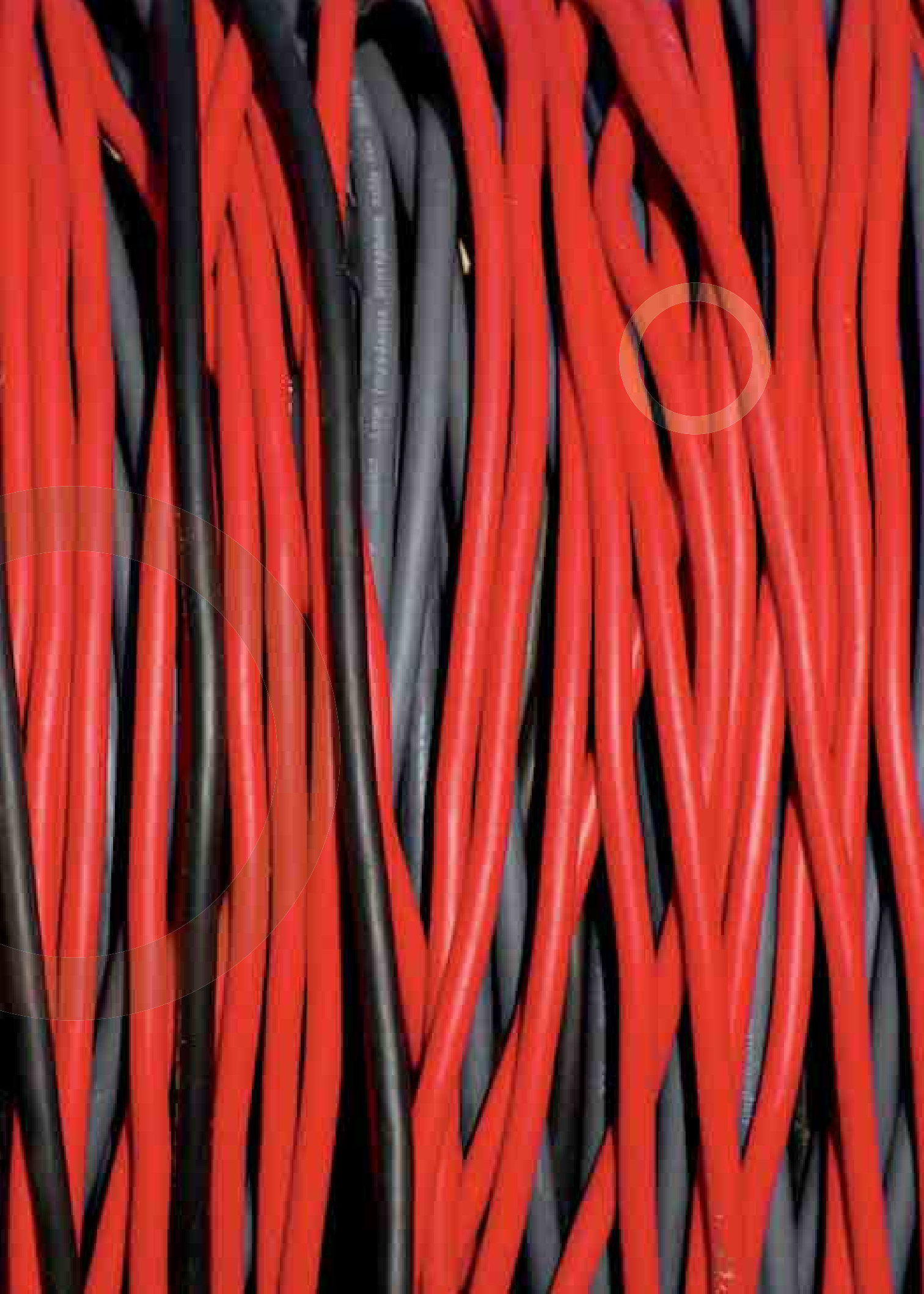
DETERMINATION OF THE MUTUAL GROUND RESISTANCE OF ADJACENT GROUNDING GRIDS

Ivan Sarajčev - Petar Sarajčev - Slavko Vujević, Split, Hrvatska

U članku je obrađena problematika određivanja međusobnog otpora uzemljenja dvaju bliskih, metalno povezanih, uzemljivača. S tom svrhom izveden je izvorni analitički izraz za izračunavanje odgovarajućeg međusobnog otpora uzemljenja među bliskim uzemljivačima. Naime, kod bliskih uzemljivača nazočna je složena elektromagnetska sprega među njima. Pritom je posebice snažno izražena vodljiva komponenta ove sprege. Ona u stanju dozemnog kratkog spoja utječe na povećanje ukupnog otpora uzemljenja pripadnog uzemljivačkog sustava. Poznavanje spomenutog međusobnog otpora uzemljenja je inače bitno za korektno određivanje raspodjele parcijalnih struja dozemnog kratkog spoja u sustavu bliskih uzemljivača. Razmatrana problematika određivanja međusobnog otpora uzemljenja prikazana je na primjeru dvaju konkretnih mrežastih uzemljivača ukopanih u loše vodljivo tlo.

The article discusses the determination of the mutual ground resistance of two adjacent metallicity connected grounding grids. For this purpose, an original analytical expression for calculating the corresponding mutual ground resistance of two adjacent grounding grids has been developed. There is a complex electromagnetic coupling between adjacent grounding grids. The conductive component of this coupling is particularly evident. During a ground fault, this component markedly increases the ground resistance of the corresponding grounding system. It is essential to establish the aforementioned mutual ground resistance correctly in order to determine the distribution of the partial ground fault currents in a system of adjacent grounding grids. The determination of mutual ground resistance is presented using two specific grounding grids buried in poorly conductive soil.

Ključne riječi: bliski uzemljivač; međusobni otpor uzemljenja; vodljiva sprega
Key words: adjacent grounding grid; mutual ground resistance; conductive coupling



1 UVOD

Uzemljivači su redovito sastavni dijelovi elektroenergetskih postrojenja, koja se susreću u elektroprivredi ili u industriji. Oni se sastoje od niza galvanski spojenih vodiča (uzemljivačko užje, traka), ukopanih u zemlji. Na uzemljivače se redovito spajaju i zaštitna užad nadzemnih vodova, kao i metalni ekrani elektroenergetskih kabela. Tako nastaju složeni sustavi uzemljenja [1].

Osnovne značajke uzemljivača, odnosno uzemljivačkog sustava, bitne za njegovu zaštitno djelovanje jesu:

otpor uzemljenja uzemljivača, odnosno ukupni otpor uzemljenja uzemljivačkog sustava, potencijal uzemljivača, odnosno uzemljivačkog sustava, u odnosu na tzv. neutralnu zemlju, raspodjela potencijala po površini tla nad uzemljivačem kao i u njegovoj okolini (potencijalno polje), naponi dodira i koraka koje ljudi mogu premostiti tijekom trajanja kvara sa zemljom; isti su dijelovi potencijalnog ljevka uzemljivača.

Glede zaštitnog djelovanja uzemljivača, odnosno uzemljivačkog sustava, najnepovoljniji kvarovi sa zemljom jesu: jednopolni kratki spoj u uzemljenoj mreži (mreže s izravno ili posredno uzemljenim zvjezdastima energetske transformatora) i dvostruki zemljospoj u izoliranoj mreži.

Kod bliskih, metalno spojenih, uzemljivača u stanju dozemnog kvara dolazi do snažne konduktivne sprege među njima, [2]. Naime, svaki od pripadnih uzemljivača nalazi se ujedno u potencijalnom polju susjednog uzemljivača. Stoga se otežava (smanjuje) odvođenje struje dozemnog kvara s dotičnih uzemljivača u zemlju. To ima za posljedicu povećanje ukupnog otpora uzemljenja pripadnog uzemljivačkog sustava u odnosu na paralelni spoj uzemljivača bez utjecaja vodljive veze među njima.

Dakle, u ovom slučaju povećanje ukupnog otpora uzemljenja može se uvažiti uvođenjem međusobnog otpora uzemljenja. Pomoću međusobnog otpora uzemljenja uvažava se međudjelovanje uzemljivača kada oni odvede struju u okolno tlo. Dakle, pri modeliranju bliskih uzemljivača koristi se međusobni otpor uzemljenja. Pod pojmom bliski uzemljivači smatraju se oni uzemljivači kod kojih je međusobna udaljenost mjerljiva s najstaknutijom dimenzijom uzemljivača. Određivanje međusobnog otpora uzemljenja i njegov utjecaj na ukupni otpor uzemljenja prikazuje se u ovom radu.

1 INTRODUCTION

Grounding grids are essential components of electrical power switchyards, which are encountered in electrical power supply and industry. They consist of a series of galvanically connected conductors (ground wires, grounding strips) buried in the soil. Overhead shield wires are regularly connected to grounding grids, as well as the metallic screens of electric power cables, thereby creating complex grounding systems [1].

The basic properties of a grounding grid, i.e. grounding system, essential for the protective function are as follows:

the ground resistance of a grounding grid, i.e. the total ground resistance of a grounding system, the potential of a grounding grid, i.e. a grounding system, in reference to the neutral ground, the distribution of potential on the ground surface over the grounding grid as well as in its vicinity (potential field), touch voltage and step voltage, which a person could bridge during a ground fault; they present parts of the potential profile of the grounding grid.

Regarding the protective function of a grounding grid, i.e. a grounding system, the worst case ground faults are as follows: a single pole short circuit in grounded networks (networks where the neutral points of the power transformers are directly or indirectly grounded) and a double ground fault in networks with isolated neutral points.

With metallicly connected adjacent grounding grids during a ground fault, there is strong conductive coupling between them [2]. Each of the corresponding grounding grids is also located in the potential field of the neighboring grounding grid. The dissipation of the ground fault current from the grounding grid to the ground is thereby impeded. Consequently, the total ground resistance of the corresponding grounding system is increased.

According to the network theory, in this case the increase of the total ground resistance can be taken into account by introducing mutual ground resistance. Using mutual ground resistance, it is possible to take the interactions of the grounding grids into account when they conduct the current into the surrounding soil. In modeling adjacent grounding grids, mutual ground resistance is used. Adjacent grounding grids refer to grounding grids at a mutual distance that is approximately equal to one or two times their largest dimension. This article presents the determination of mutual ground resistance and its impact on total ground resistance.

2 KOEFICIJENT PORASTA UKUPNOG OTPORA UZEMLJENJA

Na slici 1 prikazan je sustav bliskih uzemljivača A i B. Oni pripadaju odgovarajućim postrojenjima A i B. Dotični uzemljivači su međusobno dobro metalno spojeni. Primjerice, oni su povezani, osim s uzemljivačkim užetom, još i s metalnim ekranima elektroenergetskih kabela koji povezuju pripadna postrojenja A i B. Na današnjem stupnju tehničkog razvika, to su najčešće jednožilni kabele s krutom izolacijom izvedenom od umreženog polietilena [3]. Njihov metalni ekran je dobro vodljiv (izrađen je od bakra), a preko njega se nalazi vanjski plašt od izolacijskog materijala (PVC, polietilen, poliolefin i sl.). Dotični vanjski plašt svrstava ove kabele u skupinu tzv. kabela izoliranih u odnosu na zemlju [4] i [5]. Naime, kod ovih kabela ne dolazi do odvođenja dijela struje dozemnog kvara s metalnog ekrana kabela u okolno tlo.

Oznake upotrijebljene na slici 1 imaju sljedeća značenja:

- R_A, R_B - vlastiti otpori uzemljenja uzemljivača A i B, respektivno,
- R_M - međusobni otpor uzemljenja zbog vodljive sprege između uzemljivača A i B,
- I_u - ukupna struja koju odvodi pripadni uzemljivački sustav,
- I_A, I_B - parcijalne struje koje odvođe uzemljivači A i B, respektivno,
- V_A, V_B - potencijali, respektivno, uzemljivača A i B u odnosu na neutralnu zemlju.

S obzirom da su dotični uzemljivači dobro galvaniski spojeni, zadovoljena je sljedeća relacija:

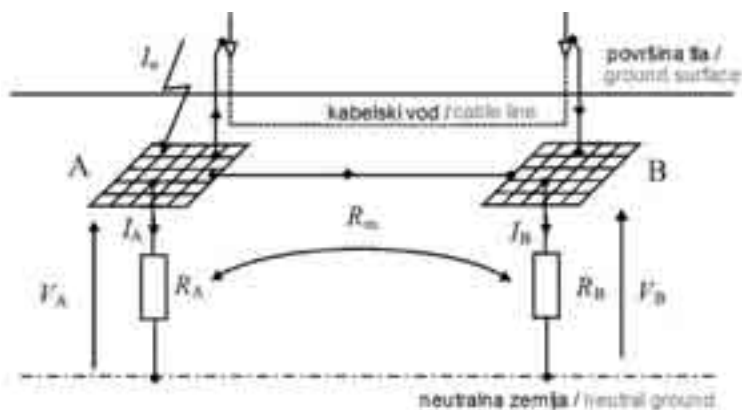
2 THE COEFFICIENT OF INCREASE OF TOTAL GROUND RESISTANCE

In Figure 1, a system of adjacent Grounding Grids A and B, is presented. They belong to the corresponding substations, A and B. These grounding grids are metallically connected. Besides being connected by the ground wire, they are also connected by metallic power cable screens which connect the corresponding substations, A and B. At the present level of technical development, these are most commonly single core cables with solid polyethylene (XLPE) insulation [3]. Their metal screen is a good conductor (copper), with an outer jacket of insulating material (PVC, polyethylene, polyolefin etc.). Due to the outer jacket, this cable is classified in the group of so-called insulated cables in reference to the ground [4] and [5]. With these cables, the ground fault current does not dissipate from the metallic cable screen into the surrounding soil.

The symbols used in Figure 1 have the following definitions:

- R_A, R_B - ground resistance of Grounding Grids A and B, respectively
- R_M - mutual ground resistance due to conductive coupling between grounding grids, A and B,
- I_u - total current passing through the corresponding grounding system,
- I_A, I_B - partial currents passing through Grounding Grids A and B, respectively,
- V_A, V_B - potentials, of Grounding Grids A and B, respectively, in reference to the neutral ground.

Since said grounding grids are firmly connected galvanically, the following expression is valid:



Slika 1 – Nadomjesna shema sustava bliskih uzemljivača A i B
Figure 1 – Equivalent diagram of a system of adjacent grounding grids, A and B

$$V_A \approx V_B \approx V_u \quad (1)$$

Temeljem potonje relacije, odgovarajući ukupni otpor uzemljenja pripadnog uzemljivačkog sustava jednak je sljedećem izrazu:

Based upon the previous expression, the corresponding total ground resistance of the grounding system is equal to the following expression:

$$R_u = \frac{V_u}{I_u} \quad (2)$$

U ovaj otpor uzemljenja uključena je, dakako, i konduktivna sprega koja vlada među spomenutim bliskim uzemljivačima. Naime, uzemljivač A nalazi se u potencijalnom lijevku uzemljivača B i obratno. To dovodi do povećanja ukupnog otpora uzemljenja navedenog sustava bliskih uzemljivača. Može se stoga postaviti sljedeći omjer:

This ground resistance also includes the conductive coupling that features prominently between the aforementioned adjacent grounding grids. Grounding Grid A is located in the potential profile of Grounding Grid B, and vice versa. This leads to an increase in the total ground resistance of the system of adjacent grounding grids. Therefore, the following ratio can be established:

$$\eta = \frac{R_u}{R'_u} \quad (3)$$

u kojem su:

in which:

η - koeficijent porasta ukupnog otpora uzemljenja; on općenito zadovoljava relaciju $\eta \geq 1$,
 R'_u - nadomjesni otpor uzemljenja spomenutih uzemljivača, bez utjecaja vodljive sprege među njima, njegova je vrijednost dana sljedećim izrazom:

η - coefficient of increase of total ground resistance, which generally satisfies the expression $\eta \geq 1$,
 R'_u - equivalent ground resistance of the aforementioned grounding grids, without the effect of the conductive coupling between them, the value of which is expressed as follows:

$$R'_u = \frac{R_A \cdot R_B}{R_A + R_B} \quad (4)$$

3 ANALITIČKI IZVOD MEĐUSOBNOG OTPORA UZEMLJENJA

3 ANALYTIC DERIVATION OF MUTUAL GROUND RESISTANCE

Korištenjem oznaka i simbolike prezentirane na slici 1 i relacije (1), stanje u navedenom uzemljivačkom sustavu može se opisati sljedećom matričnom jednadžbom:

By using the symbols presented in Figure 1 and Expression (1), the aforementioned grounding system can be described by the following matrix equation:

$$\begin{bmatrix} R_A & R_m \\ R_m & R_B \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I_A \\ I_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \cdot V_u \quad (5)$$

Rješenjem potonje matrične jednadžbe po parcijalnim strujama I_A i I_B , dobije se:

By solving the above matrix equation according to partial currents I_A and I_B , the following is obtained:

$$I_A = \frac{R_B - R_m}{R_A \cdot R_B - R_m^2} \cdot V_u, \quad (6)$$

$$I_B = \frac{R_A - R_m}{R_A \cdot R_B - R_m^2} \cdot V_u. \quad (7)$$

Nadalje, sa slike 1, također, slijedi da je:

Furthermore, from Figure 1, it also follows that:

$$I_u = I_A + I_B. \quad (8)$$

Uvrštenjem (6) i (7) u (8), dobije se:

By inserting (6) and (7) into Expression (8), the following is obtained:

$$I_u = \frac{R_A + R_B - 2 \cdot R_m}{R_A \cdot R_B - R_m^2} \cdot V_u. \quad (9)$$

Iz izraza (2) i (9), slijedi da je:

From Expressions (2) and (9), it follows that:

$$R_u = \frac{R_A \cdot R_B - R_m^2}{R_A + R_B - 2 \cdot R_m}. \quad (10)$$

Potonji izraz jasno pokazuje da međusobni otpor uzemljenja utječe na povećanje ukupnog otpora uzemljenja. Naime, za $R_m = 0$ izraz (10) poprima vrijednost prema izrazu (4).

The above expression clearly demonstrates that mutual ground resistance increases total ground resistance. For $R_m = 0$, Expression (10) obtains a value according to Expression (4).

Nakon uvrštenja izraza (4) i (10) u (3), slijedi da je:

After inserting Expressions (4) and (10) into Expression (3), it follows that:

$$\eta \cdot \frac{R_A \cdot R_B}{R_A + R_B} = \frac{R_A \cdot R_B - R_m^2}{R_A + R_B - 2 \cdot R_m}. \quad (11)$$

Rješenjem izraza (11) po veličini R_m dobiva se sljedeća kvadratna jednačba:

By solving Expression (11) according to the value R_m , the following quadratic equation is obtained:

$$R_m^2 - 2 \cdot \eta \cdot \frac{R_A \cdot R_B}{R_A + R_B} \cdot R_m + (\eta - 1) \cdot R_A \cdot R_B = 0. \quad (12)$$

Ova se kvadratna jednačba, korištenjem izraza (4), može napisati u sljedećem obliku:

By using Expression (4), this quadratic equation can be written in the following form:

$$R_m^2 - 2 \cdot \eta \cdot R'_u \cdot R_m + (\eta - 1) \cdot R'_u \cdot (R_A + R_B) = 0. \quad (13)$$

Korijeni potonje kvadratne jednačbe glase:

The roots of the above quadratic equation are as follows:

$$(R_m)_{1,2} = \eta \cdot R'_u \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{\eta - 1}{\eta^2} \cdot \frac{R_A + R_B}{R'_u}} \right). \quad (14)$$

Budući da fizikalno mora biti zadovoljena sljedeća relacija:

Since the following ratio must be satisfied physically:

$$R_m < \eta \cdot R'_u, \quad (15)$$

iz (14) slijedi traženo rješenje međusobnog otpora uzemljenja:

the solution sought for mutual ground resistance ensues from Expression (14):

$$R_m = \eta \cdot R'_u \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\eta - 1}{\eta^2} \cdot \frac{R_A + R_B}{R'_u}} \right). \quad (16)$$

Ovo rješenje ima fizikalnog smisla.

This solution is physically sound.

4 PRIMJER PRORAČUNA

4 CALCULATION EXAMPLE

Za primjer proračuna su odabrani mrežasti uzemljivači A i B prema slici 2. Uzemljivač A pripada postrojenju 110 kV. Njegove su dimenzije 100 x 100 m. Uzemljivač B pripada elektrani, koju čini generator s pripadnim blok transformatorom. Dimenzije potonjeg uzemljivača jesu 25 x 25 m. Oba navedena uzemljivača su izrađena iz bakrenog užeta presjeka 70 mm². Dimenzije oka uzemljivača A neka su 10 x 10 m, a uzemljivača B 5 x 5 m, kao što je prikazano na slici 2. Neka su dotični uzemljivači ukopani u slabo vodljivo homogeno tlo specifičnog električnog otpora $\rho = 1\,000 \Omega\text{m}$, na dubini 1,2 m.

For a calculation example, Grounding Grids A and B were chosen, according to Figure 2. Grounding Grid A belongs to a 110 kV switchyard. Its dimensions are 100 x 100 m. Grounding Grid B belongs to an electrical power plant, consisting of a generator with the corresponding step-up transformer. The dimensions of the latter are 25 x 25 m. Both grounding grids are realized by copper wire, with a cross section of 70 mm². Let a mesh square of Grounding Grid A be 10 x 10 m, and 5 x 5 m for Grounding Grid B, as shown in Figure 2.

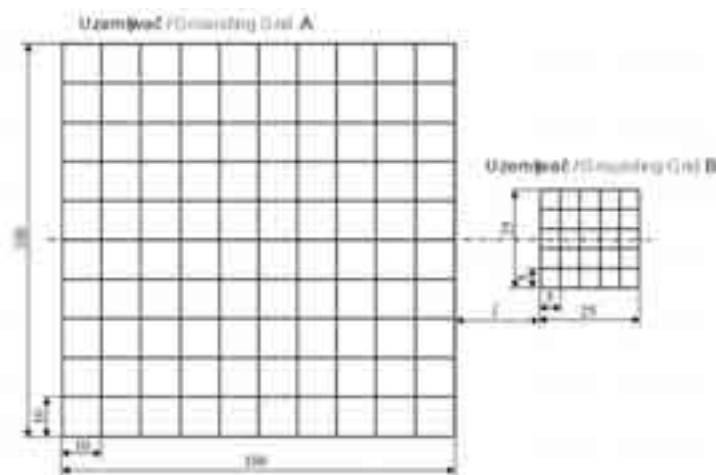
Let these grounding grids be buried in poorly conductive homogeneous soil of a specific electrical resistivity of $\rho = 1\,000 \Omega\text{m}$, at a depth of 1,2 m.

Galvanska veza među dotičnim uzemljivačima neka je ostvarena metalnim ekranima jednožilnih kabela s izolacijom od umreženog polietilena. Riječ je o tri jednožilna kabela koji čine kabelski vod 110 kV. Dotični kabelski vod povezuje spomenuti blok transformator u elektrani s navedenim postrojenjem 110 kV. Metalni ekrani dotičnih jednožilnih kabela su od bakra, presjeka 95 mm² svaki. Ovi kabeli spadaju u skupinu tzv. kabela izoliranih u odnosu na zemlju.

Let the galvanic connection between the grounding grids be achieved using a metallic single-core cable screen insulated with polyethylene (XLPE). Three single-core cables form a 110 kV cable line. This cable line connects the aforementioned step-up transformer in the power plant with the aforementioned 110 kV switchyard. The metallic screens of the single-core cables are of copper, each with a cross-section of 95 mm². These cables belong to the group of so-called insulated cables in reference to the ground.

Za potrebe numeričkih proračuna otpora rasprostiranja razmatranog složenog uzemljivačkog sustava iskorišten je računalni program EarthGrid, razvijen u sklopu izrade doktorske disertacije [6]. Računalni program EarthGrid temeljen je na frekvencijski ovisnom elektromagnetskom modelu. Dotični računalni program, pri modeliranju uzemljivačkog sustava,

For the numerical calculation of the propagation resistance of the complex grounding system under consideration, the software package EarthGrid was used. This package was developed within the framework of the preparation of a doctoral dissertation [6]. The software package EarthGrid is based upon a frequency-dependent electromagnetic model. In



Slika 2 – Dispozicija bliskih uzemljivača korištena u primjeru proračuna
Figure 2 – Disposition of adjacent grounding grids in the calculation example

koristi tehniku konačnih elemenata primijenjenu na integralnu formulaciju problema u frekvencijskoj domeni. U proračunu se uzima u obzir kompletna elektromagnetska sprega među svim segmentima vodiča koji čine uzemljivački sustav [6]. Vlastite i međusobne impedancije računaju se na osnovi metode srednjeg potencijala, koja je specijalan slučaj Galerkin-Bubnove metode. U postupku rješavanja jednadžbi potencijala koristi se tzv. tanko-žičana aproksimacija. Vodiči uzemljivačkog sustava mogu biti i izolirani u odnosu na okolno tlo, čime se uzimaju u obzir metalni ekrani jednožilnih kabela s izolacijskim vanjskim plaštem. U okviru računalnog programa EarthGriD, tlo se može promatrati kao homogeno ili pak horizontalno složeno višeslojno tlo s proizvoljnim ukupnim brojem slojeva [6].

Pomoću računalnog programa EarthGriD izračunati su prvo vlastiti otpori uzemljenja dotičnih uzemljivača bez utjecaja vodljive sprege među njima. Dobivene su, respektivno, sljedeće vrijednosti:

$$R_A = 4,474 \, \Omega, \quad (17)$$

$$R_B = 17,420 \, \Omega. \quad (18)$$

Zatim su pomoću istog računalnog programa računati ukupni otpori uzemljenja pripadnog uzemljivačkog sustava, uz uračunavanje konduktivne sprege među dotičnim uzemljivačima. To je urađeno za različite udaljenosti, l , među bliskim rubovima dotičnih uzemljivača. Naime, uzemljivač B

modeling a grounding system, this program uses the finite-element technique applied to the integral formulation of a problem in a frequency domain. The calculation takes into account the complete electromagnetic coupling among all the segments of the conductors that make up the grounding system [6]. Self-impedance and mutual impedance are calculated on the basis of the average potential method, which is a special case of the Galerkin-Bubnov method. Thin-wire approximation is used in solving the equations of potential. The conductors of a grounding system can be insulated in reference to the surrounding soil, which takes into account the metallic screens of the single-core cables with insulating outer jackets. Within the framework of the EarthGriD software package, the soil may be considered as homogenous or even horizontally stratified in multiple layers with an arbitrary total number of layers [6].

First, the self-ground resistances of the grounding grids without the influence of their mutual conductive coupling were calculated using the EarthGriD software package. The following values were obtained:

Subsequently, using the same software package, the total ground resistances of the corresponding grounding system were calculated, taking into account the mutual conductive coupling of the grounding grids. This was performed for various distances, l , between the adjacent edges of the corresponding grounding grids. Grounding Grid B was moved away

Tablica 1 – Ukupni otpori uzemljenja pripadnog uzemljivačkog sustava za različite udaljenosti među pojedinim uzemljivačima

Table 1 – The total ground resistances of the corresponding grounding system for various distances between individual grounding grids

l [m]	0,5	10	20	50	100
R_u [Ω]	4,271	4,191	4,123	3,978	3,846

odmican je od uzemljivača A, po simetriji prikazanoj na slici 2, tako da udaljenost njihovih najbližih rubova l iznosi prema tablici 1. Rezultati proračuna ukupnog otpora uzemljenja, dobiveni računalnim programom EarthGrid, prikazani su konačno u tablici 1.

from Grounding Grid A along the symmetry axis presented in Figure 2, so that the distances between their closest edges, l , are according to Table 1. The final results of the calculation of the total ground resistances, obtained using the EarthGrid software package, are presented in Table 1.

Uvrštenjem (17) i (18) u (4), dobije se:

By inserting Expressions (17) and (18) into Expression (4), the following is obtained:

$$R_u' = 3,560 \Omega. \quad (19)$$

Korištenjem vrijednosti ukupnih otpora uzemljenja danih u tablici 1 i izraza (19), slijede prema izrazu (3) odgovarajući koeficijenti porasta ukupnog otpora uzemljenja. Njihove vrijednosti su prikazane u tablici 2. Korištenjem potonjih vrijednosti (veličina η), te (17), (18) i (19), izraz (16) daje odgovarajuće vrijednosti međusobnog otpora uzemljenja. Ove su vrijednosti (veličina R_m) također prikazane u tablici 2. To je urađeno za prethodno usvojene udaljenosti, l , među bliskim uzemljivačima.

By using the values of the total ground resistances presented in Table 1 and Expression (19), the corresponding coefficients of the increase in total ground resistance ensue from Expression (3). Their values are presented in Table 2. By using these values (η), as well as Expressions (17), (18) and (19), Expression (16) yields the corresponding values of mutual ground resistance. These values (R_m) are also presented in Table 2. This was calculated for the previously adopted distance, l , between adjacent grounding grids.

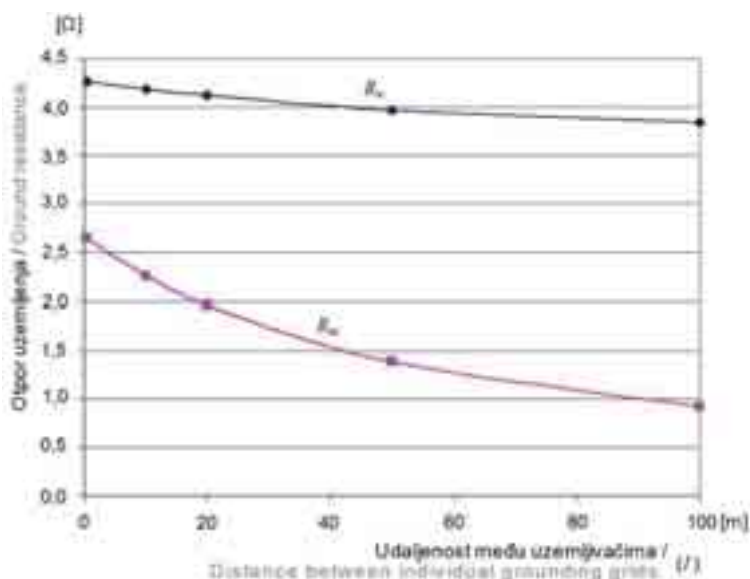
Ovisnost otpora pripadnog uzemljivačkog sustava (R_u) te ovisnost međusobnog otpora uzemljenja (R_m) o udaljenosti među uzemljivačima grafički je ilustrirana na slici 3. Korišteni su pritom, naravno, podaci iz tablica 1 i 2. Valja napomenuti da na netom spomenute veličine, osim udaljenosti, utječu i dimenzije te oblik obaju prisutnih uzemljivača. Da bi se stekao uvid u važnost spomenutih

The dependence of the ground resistance of the corresponding grounding system (R_u) and the dependence of the mutual ground resistance (R_m) on the distance between the individual grounding grids is illustrated in Figure 3, using data from Tables 1 and 2. The values mentioned, except for distance, are also affected by the dimensions and shapes of both grounding grids.

Tablica 2 – Koeficijent porasta ukupnog otpora uzemljenja i međusobni otpori uzemljenja za različite udaljenosti među pojedinim uzemljivačima

Table 2 – The coefficient of increase of the total ground resistances and mutual ground resistances at various distances between individual grounding grids

l [m]	0,5	10	20	50	100
η	1,200	1,177	1,158	1,117	1,080
R_m [Ω]	2,641	2,251	1,959	1,389	0,921



Slika 3 – Ovisnost otpora uzemljivačkog sustava i međusobnog otpora uzemljenja o udaljenosti među uzemljivačima
Figure 3 – Dependence of the ground resistance of the grounding system and the mutual ground resistance on the distance between the grounding grids.

međusobnog otpora uzemljenja između bliskih uzemljivača uveden je sljedeći omjer:

In order to obtain insight into the importance of the mutual ground resistance between adjacent grounding grids, the following ratio was introduced:

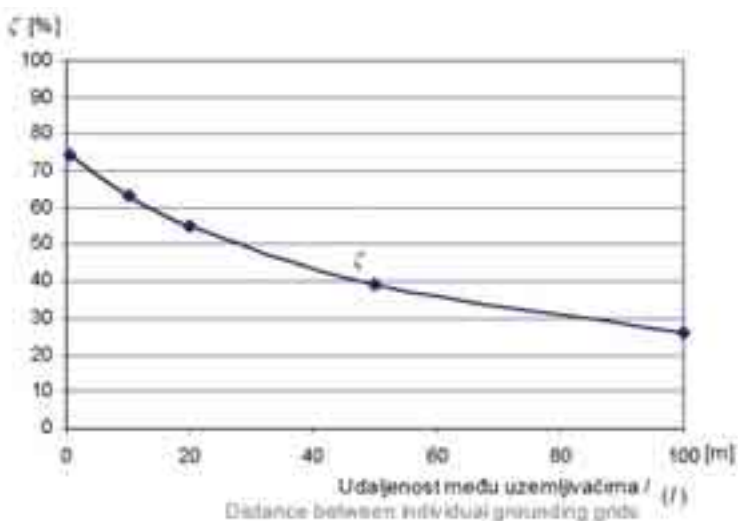
$$\zeta = \frac{R_m}{R_u} \cdot 100 (\%). \quad (20)$$

Dotični omjer (veličina ζ) je prikazan grafički na slici 4 za usvojene udaljenosti među promatranim uzemljivačima. Korištene su pritom vrijednosti međusobnog otpora uzemljenja u tablici 2 i izraza (19).

This ratio (ζ) is presented graphically in Figure 4 for the adopted distances between the grounding grids studied. Values were used for the mutual ground resistance in Table 2 and Expression (19).

Sa slike 4 je vidljivo da je važnost spomenutog

From Figure 4, it is evident that the importance of



Slika 4 – Ovisnost veličine ζ o udaljenosti među promatranim uzemljivačima
Figure 4 – Dependence of value ζ on the distance between the grounding grids studied

međusobnog otpora velik kod bliskih uzemljivača.

the aforementioned mutual resistance of adjacent grounding grids is considerable.

5 ZAKLJUČAK

U ovom je članku obrađena problematika određivanja međusobnog otpora uzemljenja bliskih uzemljivača. Naime, kod bliskih uzemljivača javlja se značajna konduktivna sprega među njima, što vodi porastu ukupnog otpora uzemljenja pripadnog uzemljivačkog sustava.

Među inim, u prezentiranom članku je izveden izvorni analitički izraz za određivanje spomenutog međusobnog otpora uzemljenja. On omogućuje lako izračunavanje pripadnog međusobnog otpora uzemljenja. Poznavanje međusobnog otpora uzemljenja je inače bitno za korektno određivanje raspodjele parcijalnih struja dozemnog kratkog spoja u pripadnom sustavu uzemljenja.

Određivanje međusobnog otpora uzemljenja provedeno je na konkretnom primjeru dvaju bliskih mrežastih uzemljivača. Pri numeričkom modeliranju dotičnih mrežastih uzemljivača korišten je sofisticirani računalni program naslova EarthGrid. Pritom je po volji mijenjana udaljenost među dotičnim uzemljivačima. Porastom dotične udaljenosti, smanjuje se vrijednost međusobnog otpora uzemljenja, i obratno.

5 CONCLUSION

In this article, the problem of determining the mutual ground resistance of adjacent grounding grids is studied. Significant conductive coupling occurs between adjacent grounding grids, leading to the increased total ground resistance of the corresponding grounding system.

Among other things, the article presents the derivation of an original analytical expression for the determination of said mutual ground resistance, which facilitates its calculation. Knowing the mutual ground resistance is necessary for the correct determination of the distribution of partial ground fault currents in the corresponding grounding system.

The determination of the mutual ground resistance was performed using a specific example of two adjacent grounding grids. In the numerical modeling of these grounding grids, a sophisticated software package, EarthGrid, was used. The distance between the aforementioned grounding grids was varied arbitrarily. As the distance increased, the value of the mutual ground resistance decreased, and vice versa.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] MAJDANDŽIĆ, F., Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Graphis, Zagreb, 2004.
- [2] VUJEVIĆ, S., Kombinirani postupak proračuna uzemljivača u krševitom tlu, Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 1994.
- [3] ABB XLPE Cable Systems, User's Guide, Rev. 2, <http://www.abb.com/cables>
- [4] NAHMAN, J., MIJAILOVIĆ, V., Odabrana poglavlja iz visokonaponskih postrojenja, Akademski misao, Beograd, 2002.
- [5] NAHMAN, J., Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [6] SARAJČEV, P., Elektromagnetski model sustava vodiča u višeslojnom sredstvu, Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2008.

Adresa autora:**Address of author:**

Prof. dr. sc. **Ivan Sarajčev**
Dr. sc. **Petar Sarajčev**, viši asistent
petar.sarajcev@fesb.hr
Prof. dr. sc. **Slavko Vujević**
Sveučilište u Splitu
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodo-
gradnje
Ruđera Boškovića bb
21000 Split
Hrvatska

Prof. **Ivan Sarajčev**, PhD
Petar Sarajčev, PhD, Senior Assistant
petar.sarajcev@fesb.hr
Prof. **Slavko Vujević**, PhD
University of Split
Faculty of Electrical Engineering, Mechanical En-
gineering and Naval Architecture
Ruđera Boškovića bb
21000 Split
Croatia

Uredništvo primilo rukopis:
2008-07-13

Manuscript received on:
2008-07-13

Prihvaćeno:
2008-09-03

Accepted on:
2008-09-03