

UDK 621.316.1:621.316.935:621.3.053

KONCEPT UZEMLJENJA ZVJEZDIŠTA RAZDJELNIH MREŽA NEUTRAL POINT CONCEPT IN DISTRIBUTION NETWORKS

Renato ČUČIĆ - Vitomir KOMEN - Marijana ŽIVIĆ ĐUROVIĆ

Sažetak: U svjetskoj praksi koristi se nekoliko načina uzemljenja zvjezdišta srednjonaponskih mreža. Svaki način ima određene prednosti, ali i nedostatke. Stoga se odluka o načinu uzemljenja provodi posebno za svaku trafostanicu, s obzirom na specifičnost mreže priključene na nju. Tretman zvjezdišta utječe i na pouzdanost opskrbe kupaca, što u uvjetima otvorenog tržišta električnom energijom dobiva sve veću važnost. Uz tehnički važan je i ekonomski jer se pojedina rješenja mogu znatno razlikovati. U radu su opisane značajke najčešće korištenih rješenja. Također je modeliran primjer realne mreže. Na istoj su mreži poslije izvršena mjerenja i uspoređeni su rezultati proračuna modeliranjem te realnim mjerenjem.

Ključne riječi:

- uzemljenje zvjezdišta
- Petersenova prigušnica
- relejna zaštita
- kratki spoj
- pouzdanost opskrbe
- SN mreža

Abstract: In worldwide practice there are several ways of earthing the neutral point of medium voltage networks that are used. Each method has certain advantages and disadvantages. Therefore, each decision for the method of earthing is made individually for each substation, concerning the specificity of the network connected to the substation. Neutral point treatment influences the reliability of the supply to the customers, which gains in importance under circumstances of the free electricity market. Besides the technical approach, the economic approach is also important, since individual solutions can vary significantly. This paper describes features of the solutions that are mostly used. An example of a real network is also modeled. Afterwards, measurements were conducted on the same network, and results of the estimations were compared by modeling and real measurements.

Keywords:

- neutral point earthing
- Petersen coil
- relay protection
- short circuit
- reliability of supply
- MV network

1. UVOD

Način uzemljenja zvjezdišta ima veliku važnost za pogon mreže. S obzirom na različite vrste uzemljenja, u mreži se prilikom jednofaznih dozemnih kvarova mogu pojaviti različite vrijednosti i oblici prenapona i struja kvara. Statistički podaci pokazuju da se u miješanim distributivnim mrežama najčešće pojavljuju upravo ti kvarovi.

U početnoj fazi razvoja, razdjelne srednjonaponske mreže u Hrvatskoj radile su u pogonu s izoliranim zvjezdištem.

Pri takvu pogonu ustanovljen je velik broj kvarova uzrokovanih unutrašnjim prenaponima kod

1. INTRODUCTION

The method of neutral point earthing is of great importance for network operation. Concerning different ways of earthing, during single-phase-to-earth faults different values of overvoltages and fault current can appear. Statistical data show that in mixed distribution networks, those kinds of faults occur most frequently.

In the initial development phase, medium voltage distribution networks in Croatia operated with an isolated neutral point. This kind of operation showed numerous faults caused by internal overvoltages during earth faults. Therefore, in the 1970's and 1980's, low-ohmic earthing of the neutral point of a 35 kV network was approached,

zemljospojeva. Stoga se sedamdesetih i osamdesetih godina prošlog stoljeća, po uzoru na rješenja iz francuskih razdjelnih mreža, najprije pristupilo uzemljenju 35 kV mreža preko djelatnog otpora male vrijednosti, uz ograničenje struje jednopolnoga kvara na 300 A ili 1000 A (ovisno o karakteristikama mreža). Budući da se naponi dodira unutar i u okolini TS 110/35 kV i TS 35/10 kV mogu relativno jednostavno održati u propisanim granicama, u razdjelnim 35 kV mrežama uglavnom nema većih problema s uzemljenjem zvjezdišta.

Zahvaljujući dobrim pogonskim iskustvima s uzemljenjima 35 kV mreža, osamdesetih se godina na sličan način prelazi i na intenzivnije uzemljenje 10(20) kV mreža. Međutim problem uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreža znatno je složeniji zbog mnogo strožih propisa o opasnim naponima dodira u TS 10(20)/0,4 kV i pripadnim niskonaponskim mrežama. Tehnički propisi određuju apsolutne iznose potencijala koji se, ovisno o vremenu isklapanja kvara, smiju pojaviti na uzemljivačima TS 10(20)/0,4 kV. Prihvaćena je praksa da se pri provedbi uzemljenja 10(20) kV mreža preko djelatnog otpora male vrijednosti koriste otpornici nazivnih struja 150 A i 300 A.

Prijelazom 10 kV razdjelnih mreža na 20 kV naponsku razinu, te prijelazom na izravnu transformaciju 110-20 kV (veći opseg mreže) i širenjem mreža uglavnom kabliranjem, kapacitivna komponenta struje jednopolnoga kratkog spoja znatno se povećala u posljednjih dvadesetak godina [1]. Stoga u nekim 20 kV mrežama nije više zadovoljen uvjet radnoga karaktera struje jednopolnoga kvara (uvjet za prihvatljivu razinu unutrašnjih prenapona). Također, porastom struje jednopolnoga kvara otežavaju se uvjeti za izvedbu uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV, koji su povezani s opasnim naponima dodira. Slijedom navedenog razvijala su se tehnička rješenja za otklanjanje toga problema. Rješenja se zasnivaju na kompenzaciji kapacitivne komponente struje jednopolnoga kratkog spoja pomoću prigušnice smještene između zvjezdišta i uzemljenja trafostanice. Uz to, otvaranjem tržišta električne energije pojavio se zahtjev za većom kvalitetom opskrbe električnom energijom. Veću kvalitetu opskrbe uz određene uvjete moguće je postići primjenom automatske kompenzacijske prigušnice ili *shunt* prekidača.

2. NADOMJESNA SHEMA MREŽE

Za izračun strujnih i naponskih prilika u mreži koristi se metoda simetričnih komponenti. Pomoću te metode trofazni nesimetrični sustav pretvaramo u tri simetrična sustava: direktni, indirektni i nulti (homopolarni) sustav. Pri tome se koristi Fortescueova transformacijska matrica:

following the example of the French distribution network solution, by limitation of an earth fault current of 300 A or 1000 A (depending on the network characteristics). Since touch and step voltage within and around substation 110/35 kV and substation 35/10 kV can be relatively easily be held within prescribed limits, in 35 kV distribution networks there are mostly no substantial neutral point earthing problems.

As a result of good operation experiences with 35 kV neutral earthing, in the 1980's the more intensive 10(20) kV neutral earthing started in a similar way. However, the problem of neutral earthing of 10(20) kV networks is significantly more complex because of strict regulations on dangerous touch voltages in substation 10(20)/0,4 kV and corresponding low-voltage networks. Technical regulations determine the absolute potential values which can, depending on the fault turn-off time, appear on earthing of substation 10(20)/0,4 kV. The practice has been adopted to use resistors of nominal currents 150 A or 300 A during the process of neutral earthing of a 10(20) kV network.

By transition from 10 kV distribution networks to a 20 kV voltage level, and by transferring to direct transformation of 110-20 kV (greater network volume) and by network extensions mainly by cabling, the capacitive earth fault current has risen to a great extent in the last twenty years [1]. Therefore, some 20 kV networks no longer satisfy the condition of the active character of earth fault current (the precondition for a permissible level of internal overvoltages). Also, with an increase in earth fault current conditions for the process of earthing of substation 10(20)/0,4 kV have been complicated insofar as they have been connected with dangerous touch voltages. As a result of the above mentioned problems, technical solutions for problem elimination were developed. The solutions are based on the compensation of the capacitive component of earth fault current by the means of a coil located between the neutral point and the substation earthing. In addition to that, with the opening of a free electricity market, there appeared a demand for greater quality of electrical power supply. Greater quality of supply can be achieved with certain conditions by using an automatic compensation coil or shunt circuit-breaker.

2. EQUIVALENT NETWORK SCHEME

To calculate current and voltage circumstances in the network, the method of symmetrical components is used. Using this method, the three-phase asymmetrical system is converted into three symmetrical systems: direct (positive), indirect (negative) and zero (homopolar) system. For that purpose the Fortescue transformation matrix is used:

$$\underline{S} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdje su $\underline{a} = e^{j120^\circ}$ i $\underline{a}^2 = e^{j240^\circ}$ matematički operatori, koji predstavljaju fazni pomak.

Nesimetrične struje pojedinih faza \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} i \underline{I}_{L3} transformiramo u simetrične komponente faze L1 (struje $\underline{I}_{(0)L1}$, $\underline{I}_{(1)L1}$, $\underline{I}_{(2)L1}$) pomoću izraza:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{(0)L1} \\ \underline{I}_{(1)L1} \\ \underline{I}_{(2)L1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ostalih 6 simetričnih komponenti dobivamo pomoću sljedećih izraza:

- za fazu L2:

$$\underline{I}_{(0)L2} = \underline{I}_{(0)L1} \quad (3)$$

$$\underline{I}_{(1)L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)L1} \quad (4)$$

$$\underline{I}_{(2)L2} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)L1} \quad (5)$$

- za fazu L3:

$$\underline{I}_{(0)L3} = \underline{I}_{(0)L1} \quad (6)$$

$$\underline{I}_{(1)L3} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)L1} \quad (7)$$

$$\underline{I}_{(2)L3} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)L1} \quad (8)$$

Na sličan način možemo transformirati napone u simetrične komponente.

Uzimajući u obzir pojavu dozemnoga spoja u mreži, tada vrijedi:

- u direktnom sustavu:

$$\underline{U}_{(1)} = \underline{E} - \underline{I}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(1)} \quad (9)$$

- u indirektnom sustavu:

$$\underline{U}_{(2)} = -\underline{I}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(2)} \quad (10)$$

- u nultom sustavu:

$$\underline{U}_{(0)} = -\underline{I}_{(0)} \cdot \underline{Z}_{(0)} \quad (11)$$

Prema njemačkom VDE propisu, prilikom izračuna struje kratkoga spoja na mjestu kvara uzimamo u obzir napon, koji je za faktor $c = 1,1$ (izračun maksimalnih struja) ili $c = 1,0$ (izračun minimalnih struja) veći od nazivnoga faznog napona mreže. Na taj način dobivamo:

$$\underline{I}_{K1} = 3 \cdot \frac{c \cdot \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}}}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (12)$$

Naponi se računaju prema sljedećem izrazu:

where $\underline{a} = e^{j120^\circ}$ and $\underline{a}^2 = e^{j240^\circ}$ are mathematical operators, representing phase shift.

Asymmetrical currents of individual phases \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} and \underline{I}_{L3} are transformed into symmetrical components of phase L1 (current $\underline{I}_{(0)L1}$, $\underline{I}_{(1)L1}$, $\underline{I}_{(2)L1}$) using the expression:

The other 6 symmetrical components are gained using the following expressions:

- for phase L2:

- for phase L3:

Voltages can be transformed to symmetrical components in similar way.

Concerning the phenomenon of earth fault in the network, it is applied:

- in direct system:

- in indirect system:

- in zero system:

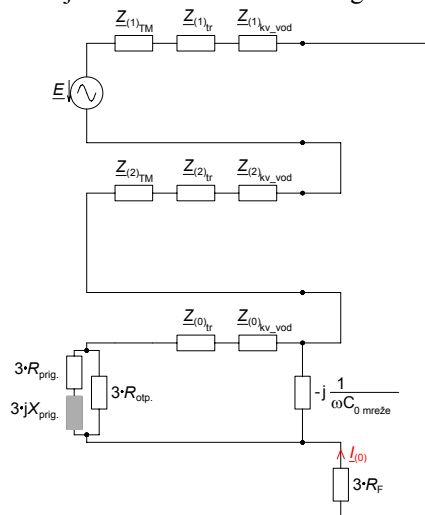
According to German VDE regulation, during calculation of short circuit current on the fault spot, the voltage, which is for factor $c = 1,1$ (maximum current calculation) or $c = 1,0$ (minimal current calculation) greater than the nominal phase voltage of the network, is taken into account. In that way we get:

The voltages are calculated according to the following expression:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \cdot \left(\underline{a}^2 - \frac{\underline{Z}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \right) \\ E \cdot \left(\underline{a} - \frac{\underline{Z}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Uzimajući u obzir djelomičnu kompenzaciju, prilikom dozumnoga spoja dobivamo sljedeću nadomjesnu shemu:

Taking partial compensation into account, during earth fault we get the following equivalent scheme:



Slika 1. Nadomjesna shema za djelomično kompenzirano mrežu s dozumnim spojem
Figure 1. Equivalent network scheme of partially compensated network with earth fault

U tom se slučaju, uz uzimanje u obzir prijelaznoga otpora, struja jednofaznoga kratkog spoja računa prema izrazu:

In this case, taking into account fault resistance, earth fault current is calculated according to the following expression:

$$\underline{I}_{k1} = 3 \cdot \underline{I}_{(0)} = 3 \cdot \frac{E}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} + 3 \cdot R_F} \quad (14)$$

3. NAČINI UZEMLJENJA ZVJEZDIŠTA

3. WAYS OF NEUTRAL POINT EARTHING

Pristup uzemljenju zvjezdišta srednjonaponskih mreža razlikuje se od države do države. Na način uzemljenja zvjezdišta utječu mnogi čimbenici. Jedan od osnovnih je veličina kapacitivne struje. U Europi se prije krenulo u sustavno kabliranje te su se stoga posljedice velikih kapacitivnih struja (npr. nužan prelazak pogona s maloohmskim uzemljenjem u pogon s rezonantnim uzemljenjem u Francuskoj) osjetile prije nego u Hrvatskoj.

The approach to neutral point earthing of medium voltage networks varies from country to country. Numerous factors influence the method of neutral point earthing. One of the main factors is the capacitive earth fault current. In Europe, systematic cabling started earlier, so that the consequences of great capacitive currents (e.g. necessary transition of operations with low resistance earthing to operations with resonant earthing in France) were visible before that of Croatia.

Velik broj korištenih načina uzemljenja zvjezdišta u svijetu razlog je ustupaka između dvaju glavnih i međusobno suprotnih zahtjeva [2]:

A great number of applied methods for neutral point earthing in the world is the reason for cession between two main and mutually opposite requests [2]:

- smanjivanje amplitude struje zemljospoja, što može uzrokovati teškoće pri otkrivanju kvarova
- dopuštanje većih amplitude struja zemljospoja, što olakšava detekciju zemljospoja, ali može uzrokovati opasne napone dodira, a u tom je slučaju i povećan broj ispada.

- Lowering current amplitude of earth fault, which can cause difficulties during fault detection
- Allowing greater earth fault current amplitudes, which makes earth fault detection easier, but can cause dangerous touch voltages, and in that case an increased number of outages

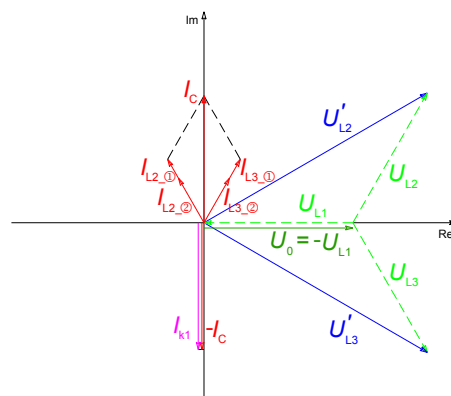
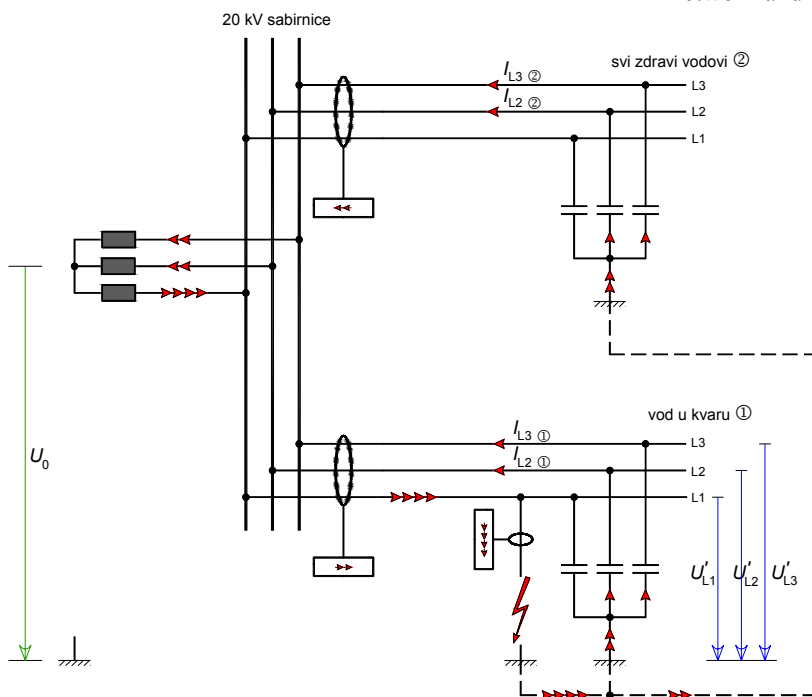
U Hrvatskoj se koriste četiri načina uzemljenja zvjezdišta 20(10) kV mreža:

- izolirano zvjezdište
- maloohmsko uzemljenje
- djelomična kompenzacija
- rezonantno uzemljenje.

Uz problematiku uzemljenja zvjezdišta vezana je i primjena *shunt* prekidača jer se sa stajališta kvalitete opskrbe električnom energijom njegovom uporabom može postići sličan učinak kao i ugradnjom prigušnice (rezonantno uzemljenje).

3.1. Izolirano zvjezdište

Zvjezdišta 10(20) kV mreža bila su u početku neuzemljena (izolirana). Danas je tendencija da se takvi sustavi zbog svojih nedostataka napuštaju. U takvim sustavima zvjezdište je odvojeno od zemlje. Jedini spoj sa zemljom ostvaruje se preko dozemnih kapaciteta dalekovoda i kabela. Pri nastanku zemljospoja struje teku preko dozemnih kapaciteta zdravih faza (slika 1). Uz zanemarenje odvoda i uzdužnih impedancija, struja na mjestu kvara ovisi o kapacitivnoj struji mreže i o prijelaznom otporu.



Slika 2. Prilike pri kvaru uz izolirano zvjezdište te vektorski dijagram napona i struja
 Figure 2. Earth fault in system with unearthed neutral point and phasor diagram

Vektorski dijagram prikazan na slici 1 vrijedi za tzv. metalni zemljospoj. Pri malim vrijednostima prijelaznog otpora napon zvjezdišta približno je jednak faznom naponu. Faktor prenapona u zdravim fazama u stacionarnom dijelu kvara uz neki mali prijelazni otpor može iznositi do 1,9. U tranzijentnom dijelu kvara faktor prenapona može imati znatno više vrijednosti u slučaju

Four ways of neutral point earthing of 20(10) kV networks are used in the Croatian distribution system:

- Isolated neutral point
- Low resistance earthing
- Partial compensation
- Resonant earthing

The problem of neutral point earthing is connected with the use of the shunt circuit breaker, as a similar quality of supply can be achieved when a coil (resonant earthing) is used.

3.1. Isolated neutral point

Neural points of 10(20) kV networks were not earthed (isolated) at the beginning. Today's tendency is to abandon those systems due to their disadvantages. In such systems, the neutral point is disconnected from the earth. The only connection with the earth is achieved across ground level capacities of power lines and cables. During the earth fault, currents flow through earth capacities of healthy phases (Figure 1.). Neglecting draining and longitudinal impedances, the current on the fault point depends on the capacitive current of the network and on fault resistance.

The phasor diagram shown in Figure 1 is valid for so-called metallic earth faults. At low values of fault resistance, the voltage of the neutral point is approximately the same as the phase voltage. The overvoltage factor in healthy phases in the stationary part of the fault with a low fault resistance can be up to 1,9. In the transient part of fault, the overvoltage factor can

intermitirajućega zemljospoja.

Prednosti mreža s izoliranim zvjezdištem:

- prilikom zemljospoja, koji statistički predstavlja najčešći kvar, u slučaju relativno male kapacitivne struje dolazi do samogašenja kvara ako je riječ o prolaznom kvaru, odnosno kvarni vod se u tom slučaju ne isklapa te se time pozitivno utječe na kvalitetu opskrbe električnom energijom
- zbog relativno male struje zemljospoja uvjeti za izvedbu uzemljivača TS 20(10)/0,4 kV u načelu nisu problematični
- jednostavnost odnosno ekonomičnost izvedbe.

Nedostaci mreža s izoliranim zvjezdištem:

- u mrežama s izoliranim zvjezdištem moguća je pojava intermitirajućih prenapona, s relativno visokim faktorom prenapona, koji mogu uzrokovati dvostruki zemljospoj u drugim dijelovima mreže
- unutrašnji prenaponi viši su nego u uzemljenim mrežama
- otežana je detekcija kvarova u odnosu na uzemljene mreže
- kod većih kapacitivnih struja ne dolazi do samogašenja struja prolaznih zemljospojeva.

Zbog opisanih nedostataka, prema postojećim propisima u Hrvatskoj, srednjonaponske mreže mogu biti u pogonu s izoliranim zvjezdištem uz uvjet da kapacitivne struje zemljospoja ne prelaze vrijednosti navedene u tablici 1. Ako kapacitivne struje prelaze navedene veličine, preporučuje se razdvajanje mreža ili uzemljenje zvjezdišta.

Tablica 1. Granične vrijednosti dopuštenih kapacitivnih struja
Table 1. Boundary values of permissible capacitive current

Nazivni napon mreže U_n [kV] Network rated voltage U_n [kV]	Kapacitivna struja I_c [A] Capacitive current I_c [A]
35	10
20	15

Za usporedbu, u njemačkom propisu VDE 0228 (1987), kao maksimalna vrijednost struje zemljospoja pri kojoj se smatra da su ostvareni uvjeti samogašenja u 20 kV mreži pri izoliranom zvjezdištu navodi se vrijednost 35 A. U finskoj se pak literaturi [3], na osnovi uzoraka mjerenih veličina, navodi da je ta granica znatno niža.

possess significantly greater values in the case of intermittent earth fault.

Advantages of the networks with isolated neutral point:

- during earth fault, which statistically represents the most frequent fault, in the case of relatively low capacitive current it results in self extinction of the fault if it is a transient fault, i.e. the fault line does not deenergize, and it positively affects the quality of the electrical power supply
- because of the relatively low fault current, conditions for earthing implementation of substation 20(10)/0,4 kV are basically not a problem
- simplicity and cost-effectiveness of the performance

Disadvantages of networks with an isolated neutral point:

- in networks with an isolated neutral point, intermittent overvoltages can occur, with relatively high overvoltage factors, which can cause double earth faults in different parts of the network
- internal overvoltages are much greater than in earthed networks
- fault detection is more difficult than in earthed networks
- at higher capacitive currents there is no self-extinction of currents of the transient earth faults

Because of the aforementioned disadvantages, according to existing regulations in the Republic of Croatia, medium voltage networks can operate with an isolated neutral point given the condition that capacitive earth fault currents do not exceed the values given in Table 1. If capacitive currents exceed the given values, it is recommended to separate the networks or to perform earthing of the neutral point.

By comparison, in German regulation VDE 0228 (1987), the maximum value of earth faults current at which it is considered that conditions of self-extinction are realized in 20 kV network when the isolated neutral point is 35 A. On the other hand, Finnish literature [3] based on samples of measured values states that the limit is considerably lower.

3.2. Maloohmsko uzemljenje

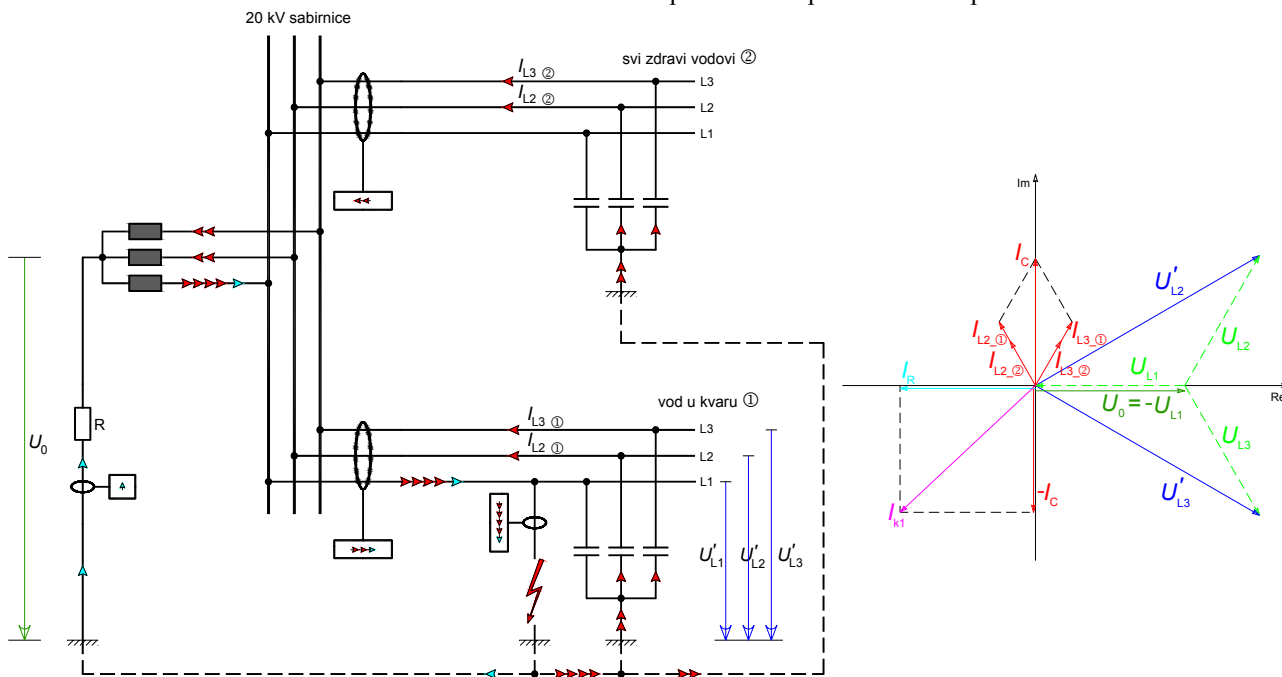
Osnovni cilj prelaska pogona iz sustava s izoliranim zvjezdištem u sustav s maloohmskim uzemljenjem jest smanjenje unutrašnjih prenapona i omogućivanje pouzdanijeg rada zaštite. Time se također uklanja mogućnost pojave intermitirajućih prenapona.

Pri odabiru otpornika potrebno je uzeti u obzir dva u osnovi suprotna kriterija. S jedne strane poželjna je što manja struja zbog nižih napona dodira, dok je s druge strane poželjno da struja ima što veći iznos jer su u tom slučaju niži unutrašnji prenaponi koji prilikom kvarova naprežu izolaciju. Da bi unutrašnji prenaponi bili unutar prihvatljivih vrijednosti, izborom otpornika treba postići pretežno radni karakter struje kvara na mjestu jednopolnoga kratkog spoja. To je moguće ako je zadovoljen kriterij $I_R : I_C \geq 3 : 1$. U težim uvjetima uzemljenja dopušta se uzimanje u obzir kriterija $I_R : I_C \geq 1,5 : 1$. Za provedbu maloohmskog uzemljenja 10(20) kV mreža tipizirani su otpornici nazivnih struja 150 A i 300 A. Ako na područjima s visokim specifičnim otporom tla uz odgovarajuća isklopna vremena zaštitnih uređaja te uz razumne troškove za poboljšanje uzemljivača TS 20(10)/0,4 kV ne možemo ostvariti dovoljno niske otpore uzemljenja, tada nije uputno primjenjivati maloohmsko uzemljenje, već je potrebno zvjezdište ostaviti izolirano ili izvršiti kompenzaciju kapacitivne struje.

3.2. Low-ohmic earthing

The main goal of transition from the system with an isolated neutral point to a system with low-ohmic resistance earthing is the reduction of internal overvoltages and the enablement of a more reliable protection operation. Furthermore, it also eliminates the possibility of the occurrence of intermittent overvoltages.

With regard to the choice of resistors, it is necessary to take the two criteria, which are basically opposites, into account. On one hand, as low a current as possible is desirable because of lower touch voltages, and on the other hand it is desirable that the current has as high of a value as possible, since in that case the internal overvoltages that stress the isolation during faults are lower. For internal voltages to be within acceptable values, the choice of resistor should achieve a mostly active character of fault current. This is possible if the criterion $I_R : I_C \geq 3 : 1$ is satisfied. Under worse earthing conditions, it is permissible to take the criterion $I_R : I_C \geq 1,5 : 1$ into account. For implementing low resistance earthing of a 10(20) kV network, resistance of nominal currents 150 A and 300 A are standardized. If with the areas with a high specific resistance of the earth with corresponding switch off times of protection devices and with reasonable expenses for improvement of the earthing of substations 20(10)/0,4 kV it is not possible to achieve low enough earthing resistances, in that case it is not recommendable to use low resistance earthing, but it is necessary to leave the neutral point isolated or to perform compensation of capacitive current.



Slika 3. Prilike pri kvaru uz maloohmsko uzemljenje te vektorski dijagram napona i struja
 Figure 3. Earth fault in system with low-ohmic resistance earthing and phasor diagram

Struja kvara sastavljena je od kapacitivne i radne komponente. Iz vektorskoga dijagrama prikazanog na slici 2 vidljivo je da se ta struja nalazi u III. kvadrantu u odnosu na referentni napon zvjezdišta.

Prednosti mreža s maloohmskim uzemljenjem:

- jednostavna i pouzdana zaštita (u odnosu na sustav s izoliranim zvjezdištem)
- intermitirajući prenaponi ne mogu se pojaviti (smanjena vjerojatnost nastanka dvostrukoga zemljospoja)
- niži unutrašnji prenaponi (u odnosu na sustav s izoliranim zvjezdištem).

Nedostaci mreža s maloohmskim uzemljenjem:

- svaki kvar, pa tako i prolazni, uzrokuje ispad napajanja, što je nepoželjno i čime se smanjuje kvaliteta opskrbe električnom energijom
- zbog veće struje kvara (u odnosu na sustav s izoliranim zvjezdištem) otežani su uvjeti za uzemljivače TS 20(10)/0,4 kV sa stajališta napona dodira, a posebno na područjima s visokim specifičnim otporom tla.

3.3. Djelomična kompenzacija

Više čimbenika utjecalo je na to da su kapacitivne struje pojedinih 20 kV mreža u proteklih dvadesetak godina (od kada se sustavno počelo primjenjivati maloohmsko uzemljenje zvjezdišta) znatno porasle. Prijelazom 10 kV mreže na 20 kV naponsku razinu kapacitivna struja mreže povećava se na dvostruku vrijednost. Kapacitivna struja također se povećava razvojem odnosno širenjem mreže i to posebice kabliranjem. Iz kriterija za maloohmsko uzemljenje zvjezdišta $I_R : I_C \geq 1,5 : 1$, pri upotrebi otpornika 150 A, proizlazi preporučena vrijednost kapacitivne struje od 100 A, iznad koje je potrebno kompenzirati kapacitivnu struju mreže.

Budući da je kapacitivna struja nekih 20 kV mreža premašila vrijednost 100 A uz maloohmsko uzemljenje za predmetne mreže predloženo je tehničko rješenje za kompenzaciju kapacitivne struje, koje se sastoji od paralelnoga spajanja ručno podesive prigušnice k postojećem maloohmskom otporniku (slika 3).

Fault current is made of a capacitive and an active component. From the phasor diagram shown in Figure 2, it is visible that the current is in quadrant III concerning the reference neutral point voltage.

Advantages of networks with low resistance voltage include:

- simple and reliable protection (in comparison to the system with isolated neutral point)
- intermittent overvoltages cannot occur (reduced possibility of double earth fault occurrence)
- internal overvoltages are lower (in comparison to the system with an isolated neutral point)

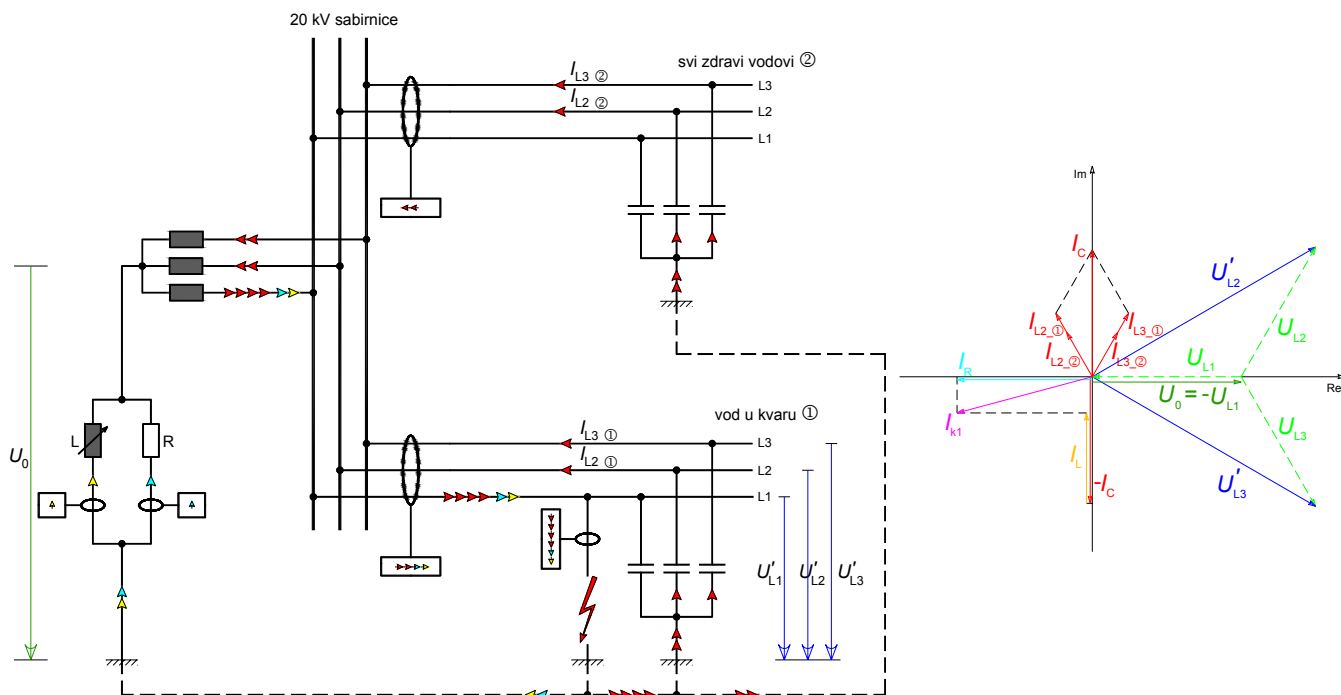
Disadvantages of networks with low resistance earthing include:

- each fault, and therefore even transient, cause outage of the power supply, which is undesirable and which reduces the quality of the electrical power supply
- due to a greater fault current (in comparison to the system of the isolated neutral point), aggravation of conditions for earths of substation 20(10)/0,4 kV from the touch voltage point of view, and especially in areas with high specific earth resistance

3.3. Partial compensation

Various factors influenced the significant growth of capacitive currents of individual 20 kV networks in the last twenty years (after systematic approach to low resistance neutral point earthing). By transition of 10 kV networks to 20 kV voltage level, the capacitive current of the network is doubled. Capacitive current is also growing through development, i.e. expansion of the network and especially by cabling. From the criteria for low resistance neutral point earthing $I_R : I_C \geq 1,5 : 1$, using the resistor 150 A results in the recommended value of capacitive current of 100 A, above which it is necessary to compensate for the capacitive current of the network.

Since the capacitive current of some 20 kV networks has exceeded the value of 100 A with low resistance earthing, for networks concerned, a technical solution is recommended for compensation of capacitive current, consisting of parallel connection of a manually adjustable coil to an existing low-ohmic resistor (Figure 3.)



Slika 4. Prilike pri kvaru uz djelomičnu kompenzaciju te vektorski dijagram napona i struja
 Figure 4. Earth fault in partially compensated system and phasor diagram

Takvim se rješenjem postiže djelomična kompenzacija s preostalom jalovom strujom $I_L - I_C \leq 50$ A, prilikom čega se zadržavaju sve ostale značajke maloohmskoga uzemljenja te stoga nije potrebno mijenjati zaštitne uređaje. Ručna regulacija provodi se u beznaponskom stanju.

S obzirom na veličinu induktivne struje sustav može biti u podkompenzaciji ili nadkompenzaciji, te se stoga struja kvara može nalaziti u III. ili II. kvadrantu u odnosu na referentni napon zvjezdišta (slika 3).

U odnosu na automatsku kompenzacijsku prigušnicu, ručno podesiva prigušnica (u kombinaciji s paralelnim maloohmskim otpornikom) nije predviđena za gašenje prolaznih kvarova, već služi samo za kompenzaciju kapacitivne komponente struje, odnosno za ostvarivanje povoljnijih uvjeta uzemljenja TS 20(10)/0,4 kV (naponi dodira).

Prednosti mreža s djelomičnom kompenzacijom:

- ekonomski vrlo povoljno rješenje u slučaju prethodnoga uzemljenja zvjezdišta s maloohmskim otpornikom
- nisu potrebna dodatna ulaganja u eventualne sanacije uzemljivača TS 20(10)/0,4 kV (naponi dodira)
- unutrašnji prenaponi malo su niži u odnosu na isti sustav s maloohmskim uzemljenjem (zbog ponovnoga zadovoljenja kriterija $I_R : I_C \geq 1,5 : 1$)
- nije potrebno mijenjati sustav zaštite (u odnosu na isti sustav s maloohmskim uzemljenjem)
- budući da se zadržavaju značajke maloohmskoga uzemljenja, također je isključena mogućnost

Such a solution achieves partial compensation with residual reactive power $I_L - I_C \leq 50$ A, during which all other characteristics of the low resistance earthing are retained and therefore it is not necessary to change protective devices. Manual regulation is conducted in an unloaded state.

Concerning the value of the inductive current, the system can be undercompensated or overcompensated, and therefore the fault current can be found in the quadrant III or II concerning the reference voltage of the neutral point (Figure 3).

In comparison with the automatic compensation coil, the manually adjustable coil (in combination with the parallel low-ohmic resistor) is not foreseen for extinction of the transient faults, but it serves only for compensation of capacitive current component, i.e. for achieving favorable conditions of earthing substation 20(10)/0,4 kV (touch voltages).

Advantages of networks with partial compensation are as follows:

- economically favorable solution in the case of previous neutral point earthing with low resistance resistor
- no additional investments are needed for possible repairs of the earthing of substation 20(10)/0,4 kV (touch voltages)
- internal voltages slightly lower in comparison to the same system with low resistance earthing (because of repeated satisfaction of the criterion $I_R : I_C \geq 1,5 : 1$)
- it is not necessary to change the protection system

nastanka intermitirajućega prenapona.

Nedostaci mreža s djelomičnom kompenzacijom:

- budući da se zadržavaju značajke maloohmskoga uzemljenja, vrijede isti nedostaci kao i kod toga sustava uzemljenja.

(in comparison to the system with low resistance voltage)

- since characteristics of the low resistance earthing are kept, the possibility of intermittent overvoltage occurrence is excluded

Disadvantages of the networks with partial compensation include:

- since characteristics of low resistance earthing are being retained, the same disadvantages as with the earthing system are valid

3.4. Rezonantno uzemljenje

Osnovni razlog za ugradnju automatskih kompenzacijskih prigušnica (Petersenovih prigušnica) za rezonantno uzemljenje jest povećanje kvalitete opskrbe električnom energijom s gledišta pouzdanosti napajanja. K tome, automatskom prigušnicom vrši se i kompenzacija kapacitivne struje mreže.

Prema načinu izvedbe automatske kompenzacijske prigušnice za rezonantno uzemljenje obično se dijele na:

- kontinuirane automatske kompenzacijske prigušnice
- stupnjevane automatske kompenzacijske prigušnice

Promjena induktiviteta kod kontinuirane automatske kompenzacijske prigušnice obično se izvodi pomoću pomične jezgre, a kod stupnjevane uklapanjem i isklapanjem pojedinih svitaka.

Pogon kontinuiranih prigušnica s obzirom na radnu komponentu struje jednopolnoga kratkog spoja obično se izvodi na jedan od sljedećih načina:

- otpornik stalno isključen (bez dodatnog otpora – tradicionalna izvedba)
- paralelno priključenje odgovarajućeg otpornika na sekundarnoj strani kompenzacijske prigušnice
- paralelno priključenje odgovarajućeg otpornika na primarnoj strani kompenzacijske prigušnice.

Najčešće se otpornici priključuju s određenim vremenskim zatezanjem nakon nastanka kvara, koje je dovoljno za samogašenje. Nakon priključenja ostvarena je radna komponenta struje dovoljna za proradu zemljospojne zaštite.

Pri stupnjevanoj izvedbi kompenzacijske prigušnice otpornik je obično stalno uključen. Radna komponenta struje kroz otpornik iznosi minimalno 20 A. Budući da granična jalova preostala struja obično iznosi 35 A, struja kvara pri uzemljenju sa stupnjevanom kompenzacijskom prigušnicom ograničena je na 40 A. Prema istraživanjima provedenima u Francuskoj, pri toj struji moguće je samogašenje kvarova.

3.4. Resonant earthing

The main reason to install automatic compensation coils (Petersen coil) for resonant earthing is the increased quality of the electrical power supply from the reliability of the power supply point of view. In addition, the automatic coil conducts the compensation of the capacitive current of the network.

According to the performance mode for the automatic compensation coil for resonant earthing, coils are most often divided into the following types:

- continuous automatic compensation coil
- graded automatic compensation coil

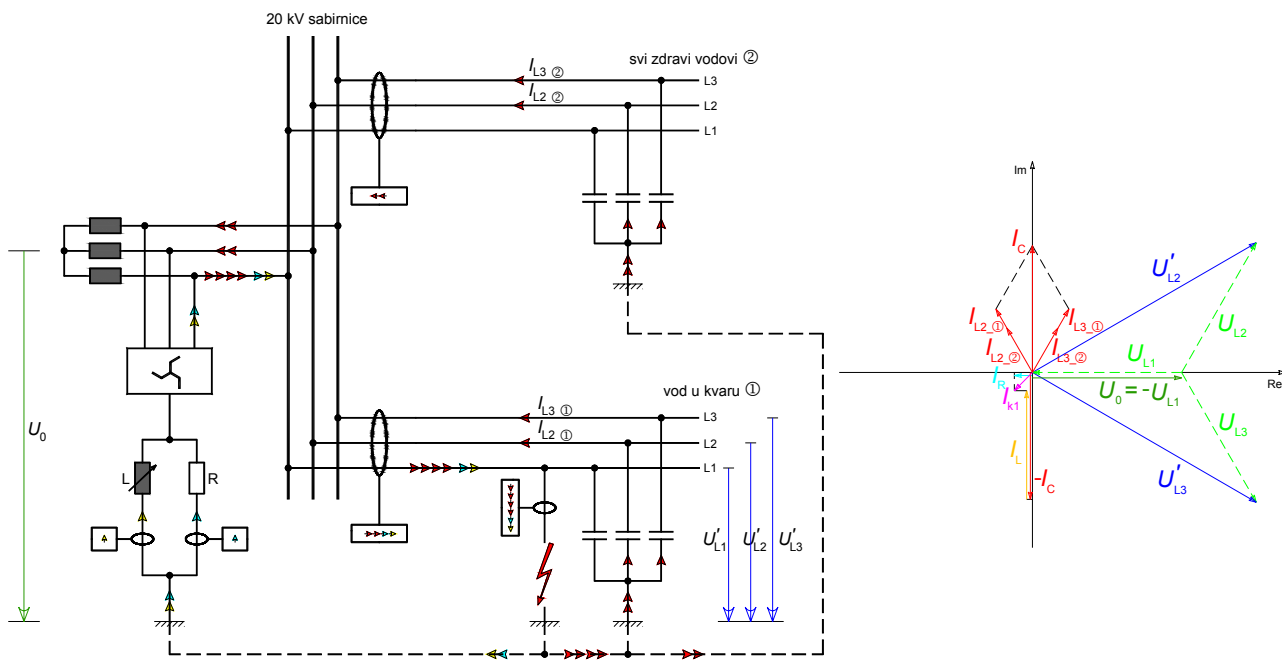
The change of inductance with a continuous automatic compensation coil is usually conducted using a plunger core, and with the graded one by switching individual coils on and off.

Continuous coil operation, concerning active component of earth fault current, is usually conducted in one of the following three ways:

- resistor is constantly switched off (no additional resistor – traditional performance)
- parallel connection of corresponding resistors on the secondary part of compensation coil
- parallel connection of corresponding resistors on the primary part of compensation coil

Mostly, resistors are connected with specific time delays after the beginning of fault, which is sufficient for self-extinction. After connection, the achieved active component of the current is sufficient for going through earth fault protection.

With the graded type of compensation coil, the resistor is usually always switched on. The active component of current through resistor is minimally 20 A. Since border residual current is usually 35 A, the fault current with earthing with a graded compensation coil is limited to 40 A. According to research conducted in France under that current, self-extinction of faults is possible.



Slika 5. Stanje pri kvaru uz rezonantno uzemljenje te vektorski dijagram napona i struja
 Figure 5. Earth fault in resonant earthed system and phasor diagram

Prednosti mreža s rezonantnim uzemljenjem (slika 5):

- zahvaljujući maloj struji kvara omogućeno je samogašenje kvarova, te stoga svaki kvar ne uzrokuje ispad voda (usporedba s maloohmskim uzemljenjem), što pridonosi povećanju kvalitete opskrbe električnom energijom
- opasnost od previsokih potencijala na uzemljivačima TS 20(10)/0,4 kV svedena na minimum te stoga nisu potrebni izdaci za eventualno saniranje uzemljenja
- prilikom gašenja električnog luka povratni napon sporije raste nego kod ostalih uzemljenja te je stoga prag samogašenja povećan (eksperimentalno je utvrđeno da on iznosi 60 A); iz istog se razloga manji broj jednopolnih kvarova razvija u višepolne kvarove, pa je i s tog aspekta broj kvarova manji kod rezonantnoga uzemljenja nego pri izoliranom zvjezdištu (pri jednakim uvjetima).

Nedostaci mreža s rezonantnim uzemljenjem:

- slaba osjetljivost na visokoohmske kvarove (eventualna potreba za sofisticiranijom zaštitom)
- kompenzacijska prigušnica s opremom predstavlja znatan investicijski trošak.

The advantages of networks with resonant earthing (Figure 5) are:

- as a result of fault current it is possible to achieve self extinction of faults, and therefore each fault does not cause outage of the line (in comparison with low resistance earthing), which contributes to the increase in the quality of the electrical power supply
- danger of too high potentials on earths of substation 20(10)/0,4 kV is reduced to minimum and therefore no expenses for possible earthing repair are need
- during extinction of the electrical arc, backfeeding is more slow than with other earthings and therefore the threshold of self extinction is increased (it has been experimentally determined to be 60 A); and for the same reason a smaller number of one-pole (earth) faults is developed in multi-pole faults, and from that aspect too, the number of faults is lesser by resonant earthing than by isolated neutral points (under the same conditions).

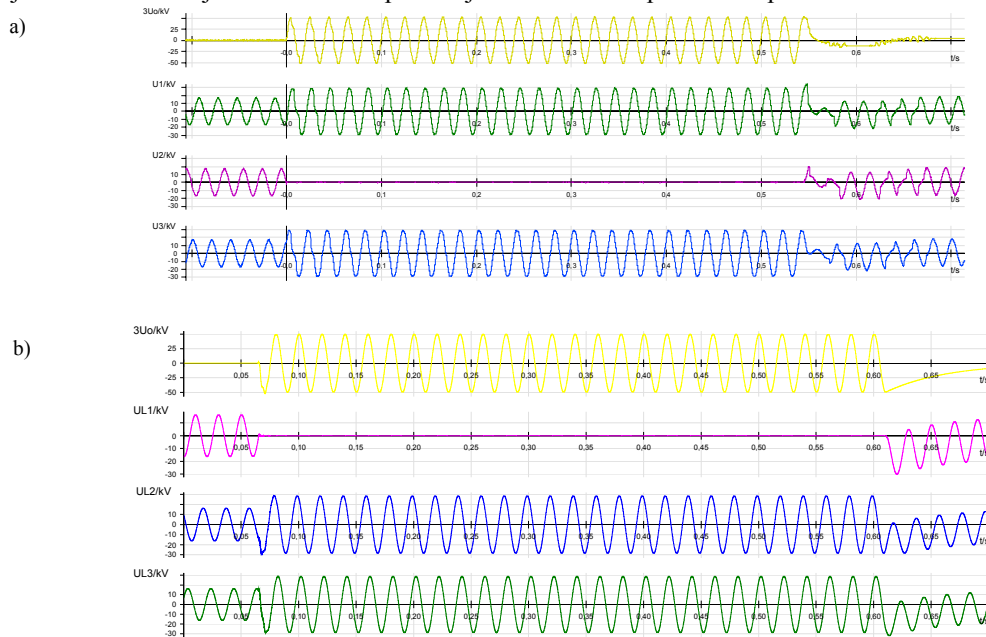
Disadvantages of networks with resonant earthing are:

- poor sensitivity to high-ohmic faults (the possible need for more sophisticated protection)
- compensation coil with equipment represents a great investment

4. USPOREDBA RAČUNSKIH I MJERENIH VRIJEDNOSTI

Rezultati proračuna zasnovanih na modelu mreže, uspoređeni su s rezultatima mjerenja na realnoj mreži. Mjesto kvara u mreži udaljeno je 0,713 km od napojnih 20 kV sabirnica. Na mjestu kvara uzet je u obzir tzv. metalni jednopolni kratki spoj s prijelaznim otporom 0,34 Ω .

Na slici 6 prikazana je usporedba mjerenih i računskih vrijednosti faznih napona na 20 kV sabirnicama. Za primjer je uzeta mreža s djelomičnom kompenzacijom.



Slika 6. Nulti napon i fazni naponi na 20 kV sabirnicama: a) mjerenje; b) izračun (modeliranje)
Figure 6. Zero-sequence voltage and phase voltages on 20 kV supply busbars: a) measured values; b) calculated values

Slika 6 pokazuje da se pri dobrom modelu mreže izračunom mogu postići rezultati vrlo slični onima postignutima mjerenjem. U stacionarnom dijelu kvara prenaponi se kreću najviše do faktora 1,9.

5. ZAKLJUČAK

Ne postoji jedinstven pristup uzemljenju zvjezdišta srednjonaponskih razdjelnih mreža jer svaki sustav ima prednosti i mane. Te su prednosti i mane analizirane u ovome radu. Tendencija je da gradske mreže koje su uglavnom kabelske "ostanu" maloohmski uzemljene, dok se za ruralne mreže uglavnom preporučuje djelomična ili potpuna kompenzacija.

U područjima gdje se uz visoke kapacitivne struje može utvrditi i relativno velik broj dozemnih kvarova preporučuje se upotreba automatske kompenzacijske prigušnice. Ona je naime naprednije tehnološko rješenje, ali zahtijeva znatno veća ulaganja.

Alternativno rješenje koje djelomično može zamijeniti

4. COMPARISON OF CALCULATION AND MEASUREMENT VALUES

The results of calculations based on the network model are compared to results of measurements on the real network. The fault point in the network is 0,713 km away from the feeding 20 kV buses. At the fault point, the so-called metallic earth fault with a fault resistance of 0,34 Ω is taken into account.

Figure 6 shows a comparison of measured and calculated values of phase voltages on 20 kV buses. The network with partial compensation is taken as the example.

Figure 6 shows that with a good network model it is possible to achieve results very similar to those acquired by measurement. In the stationary part of fault, the overvoltage factor does not exceed a value 1,9.

5. CONCLUSION

There is no unique approach to neutral point earthing of medium voltage distribution networks, considering that each system has its advantages and disadvantages. Those were analyzed in this paper. The tendency is to keep public networks, which are mostly cable networks, low resistance earthed, while for rural networks mostly partial or complete compensation is recommended.

In areas with high capacitive current where it can be determined that there is a relatively great number of earth faults, an automatic compensation damper is recommended. It also represents the most up-to-date technological solution, but it also requires a greater investment.

automatsku prigušnicu, a sa stajališta ulaganja znatno je povoljnije, kombinacija je *shunt* prekidača i djelomične kompenzacije. Ako je riječ o području u kojem nema većih problema s otporima uzemljenja TS 20(10)/0,4 kV, tada se može upotrijebiti samo *shunt* prekidač (pretežito nadzemne mreže). Za njega je potrebno izdvojiti približno upola manja sredstva nego za automatsku kompenzacijsku prigušnicu. Prilikom ugradnje *shunt* prekidača također se moraju uzeti u obzir kriteriji za njegovu ugradnju.

U radu je modeliran primjer realne mreže, na kojem su naknadno izvršena mjerenja. Usporedba mjerenih i izračunatih veličina pokazuje da se izrađeni model mreže odaziva slično kao realna mreža. Taj se model može upotrijebiti za daljnja istraživanja strujnih i naponskih prilika u mreži, a posebice za ona stanja koja je teško postići mjerenjem u realnoj mreži.

6. POPIS OZNAKA

radna komponenta struje kvara	I_R ,	A
kapacitivna komponenta struje kvara	I_C ,	A

LITERATURA REFERENCES

- [1] Ćucić, R.: *Modeliranje srednje napetostnoga omrežja za potrebe simulacij enopolnih zemeljskih stikov*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2005
- [2] Kuliš, I. G.: *Rezonantno uzemljenje neutralne točke sredjenaponskih mreža za distribuciju električne energije*, FER, Zagreb, 2003.
- [3] Hänninen, S., et al.: *Earth faults and related disturbances in distribution networks*, IEEE PES SM2001, Vancouver, Canada, 2001

Primljeno / Received: 30.4.2008

Pregledni članak

Adresa autora / Authors' address

Renato Ćucić, B.Sc.E.E.
 Vitomir Komen, Ph.D.
 HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
 V. C. Emina 2
 HR-51000 Rijeka, Hrvatska
 renato.cucic@hep.hr
 vitomir.komen@hep.hr
 Marijana Živić-Đurović, M.Sc.
 Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci
 Vukovarska 58
 HR-51000 Rijeka, Hrvatska
 marijana.zivic@riteh.hr

An alternative solution, which can partially replace an automatic coil, but is significantly economical, from the investment point of view, is the combination of a shunt circuit breaker with partial compensation. If we talk about areas in which there are no greater problems with earthing resistance of substation 20(10)/0,4 kV, only a shunt circuit breaker (mostly overhead networks) can be used. The expenses for it are also two times lower than the expenses for an automatic compensation coil. During installation of the shunt circuit breaker, criteria for its installation also have to be taken into account.

This paper gives an example of a real network model, at which measurements were subsequently conducted. The comparison of measured and calculated values shows that the constructed network model responds in a similar manner as the real network. In further operations, the same model can be used for continued research of current and voltage conditions in the network, and especially for those conditions that are hard to achieve by measurements in the real network.

6. LIST OF SYMBOLS

active component of fault current
capacitive component of fault current

- [4] Žutobradić, S., Damianić M.: *Koncepcija uzemljenja zvjezdišta mreža 10(20) kV u budućnosti*, Energija, Vol. 48, 1999.
- [5] Griffel D., et al.: *A new deal for safety and quality on MV networks*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
- [6] Bizjak, J.: *Dinamična in statična analiza ozemljevanja nevtralne točke energetskega transformatorja v razdelilnem omrežju Slovenije*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2005

Prihvaćeno / Accepted: 29.10.2008

Subject review

