

# Uzemljenje neutralne točke u distribucijskoj mreži

---

**Babić, Stjepan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:662776>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**UZEMLJENJE NEUTRALNE TOČKE U DISTRIBUCIJSKOJ  
MREŽI**

**Završni rad**

**Stjepan Babić**

**Osijek, 2022. godina.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 30.08.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Stjepan Babić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4484, 23.07.2018.
<b>OIB Pristupnika:</b>	93024583869
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Uzemljenje neutralne točke u distribucijskoj mreži
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	U završnom radu potrebno je opisati načine uzemljenja zvjezdišta transformatora u distribucijskoj mreži. Nadalje, potrebno je opisati utjecaj načina uzemljenja na strujno-naponske prilike u normalnom pogonu te u uvjetima kratkog spoja. Na računalnom modelu, potrebno je prikazati primjer utjecaja načina uzemljenja zvjezdišta transformatora na strujno-naponske prilike u uvjetima kratkog spoja. Tema je
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	30.08.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	07.09.2022.
<b>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</b>	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 09.09.2022.

**Ime i prezime studenta:**

Stjepan Babić

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4484, 23.07.2018.

**Turnitin podudaranje [%]:**

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Uzemljenje neutralne točke u distribucijskoj mreži**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	<b>3</b>
<b>3. OPĆENITO O ZEMLJOSPOJU</b> .....	<b>4</b>
3.1. Prikaz zemljospoja superpozicijom.....	5
3.2. Raspodjela struja zemljospoja.....	6
<b>4. NAČINI UZEMLJENJA ZVJEZDIŠTA</b> .....	<b>8</b>
4.1. Mogući načini i kriteriji pri izboru uzemljenja .....	8
4.2. Uzemljenje zvjezdišta .....	9
4.2.1. Načini uzemljenja zvjezdišta.....	9
4.2.2. Značajke neposrednog uzemljenja .....	10
4.2.3. Značajke uzemljenja preko prigušnice .....	11
4.2.4. Značajke uzemljenja preko otpora.....	12
4.3. Kompenzacija struje zemljospoja (rezonantno uzemljenje).....	14
4.3.1. Struja zemljospoja pri rezonantnom uzemljenju .....	14
4.3.2. Značajke rezonantnog uzemljenja zvjezdišta .....	15
4.4. Usporedba načina uzemljenja zvjezdišta.....	17
<b>5. PRIMJER SN MREŽE S IZOLIRANIM ZVJEZDIŠTEM</b> .....	<b>19</b>
5.1. Mogući načini pogonskog uzemljenja razmatrane SN mreže .....	20
5.2. Odabir načina pogonskog uzemljenja 20 kV mreže.....	22
5.3. Razmatrana SN mreža.....	22
5.3.1. Postojeće stanje mreže 35 kV.....	22
5.3.2. Razmatrana mreža 20 kV .....	22
<b>6. PRORAČUN STRUJA KVARA I ODBIR OPREME ZA UZEMLJENJE NT 20 kV</b> .....	<b>23</b>
6.1. Procjena očekivanih kapacitivnih struja u 20 kV mreži.....	23
6.2. Proračuni kapacitivnih struja u SN mreži TS 35/20 kV Cerna .....	24
6.3. Uzemljenje preko otpornika.....	24
6.4. Uzemljenje preko otpornika i prigušnice .....	26
6.4.1. Odabir otpornika i prigušnice.....	26
6.4.2. Struja jednopolnog kvara .....	28
6.5. Uzemljenje preko automatski regulirane (Petersenove) prigušnice .....	30
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>31</b>

<b>8. PRILOZI.....</b>	<b>32</b>
<b>9. LITERATURA.....</b>	<b>34</b>
<b>10. SAŽETAK.....</b>	<b>36</b>
<b>11. ABSTRACT.....</b>	<b>37</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>38</b>

## 1. UVOD

Način uzemljenja neutralne točke zvjezdišta transformatora od velike je važnosti za elektroenergetsku mrežu. Razlog tomu su karakteristike svakog od načina uzemljenja jer one mogu utjecati na oblik i vrijednost prenapona i struje. Elektroenergetske mreže se na početku izgradnje protežu preko male površine dok kasnijim proširenjima zauzimaju veću površinu. Iz prakse je evidentno kako je na početku izgradnje mreže bilo optimalno i ekonomski isplativo, zvjezdišta ostaviti galvanski odvojena od zemlje. Ovaj način uzemljenja zvjezdišta se naziva izolirano zvjezdište. Danjim rasprostranjem mreže se galvansko spajanje mreže sa zemljom ipak pokazuje boljim rješenjem. Metoda uzemljenja neutralne točke direktno utječe na rad mreže, opremu te zaštitu i automatiku.

Za visokonaponske mreže (110 kV i više) se kao optimalno rješenje uzima se direktno uzemljenje neutralne točke. Direktnim uzemljenjem se snižava cijena opreme i danja ulaganja u mrežu jer takav način uzemljenja limitira unutarnje prenapone koji određuju razinu izolacije mreže.

No, za razliku od visokonaponskih mreža, rješenje uzemljenja neutralne točke srednjenaponskih mreža (6 – 35 kV) puno je kompliciranije i složenije jer se u obzir moraju uzeti razni faktori koji svi jednako utječu na rad mreže te se svi ti uvjeti nikada u potpunosti neće zadovoljiti. Drugim riječima, ne postoji jedinstveno rješenje uzemljenja neutralne točke srednjenaponske mreže. Ušteda koja bi se postigla smanjenjem razine izolacije je zanemariva. Posebna pažnja se treba obratiti na opasnosti i prijetnje koje bi naponi i struje zemljospoja uzrokovali na instalacijama korisnika mreže, koje su povezane s objektima distribucijske mreže. Upravo iz toga se razloga provode posebne mjere zaštite ograničavanjem, kako vrijednosti tako i trajanja struja zemljospoja.

Jedan od pokazatelja potrebe za mijenjanjem pogona sa izoliranim zvjezdištem jest sve veći porast kvarova u mreži, posebice ako se istodobno pojave dva ili više kvarova na različitim fazama. Upravo to upozorava na pojavu nedozvoljenih prenapona u mreži. Kako bi se donijela ispravna odluka o tome treba li se prijeći na uzemljeno zvjezdište, u obzir se trebaju uzeti problemi izazvani velikom strujom dozemnog spoja te i oni problemi izazvani prenaponom u jednofaznom dozemnom spoju. Način uzemljenja neutralne točke bira se na osnovu dostupnih sredstava, a da se pri tom ostvare svi uvjeti sigurnog rada mreže. Pažljivo se razmatraju svi nedostaci i prednosti različitih načina uzemljenja te se uvijek pronađu najmanje dva rješenja za uzemljenje neutralne točke.

Prve hrvatske srednjenaponske mreže (35 kV) su izgrađene i puštene u rad sa izoliranim zvjezdištem, ali su se danjim razvojem mreža pojavili mnogi problemi uzrokovani prenaponima. 70-tih godina 20. stoljeća se pojavilo rješenje problema uzemljenjem preko malooskog otpora, te se tim načinom ograničila struja kvara na 300 A. Kako se ovo pokazalo dobrim rješenjem, 80-tih godina se prešlo na

uzemljenje 20 kV mreža. No uzemljenje ovakvih mreža puno je složenije jer za njih postoje dodatni propisi koji ograničavaju potencijale koji se smiju pojaviti na uzemljivačima takvih pogona. Otpornici koji se koriste u ovim slučajevima su oni otpornici nazivnih struja 150 A i 300 A.

Kao što se može primijetiti ideje i tehnologije uzemljenja su znatno napredovale te su se razvile dvije glavne ideje, uzemljenje preko maloomskog otpora i kompenzacija. S vremenom su ovi načini usavršili i pokazali najboljim načinima uzemljenja.



## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Uzemljenje neutralne točke tema je mnogih znanstvenih radova. Neki od tih radova spomenuti su u ovom poglavlju s ciljem pregleda područja teme rada.

Autor literature [1] razmatra moguće načine uzemljenja neutralne točke u distribucijskim mrežama te, uspoređujući sa državama koje su odavno prešle na uzemljeno zvjezdište i uzimajući u obzir sve tehnokonomske zahtjeve, dolazi do zaključka u kojem smatra da se treba izabrati uzemljenje automatskom prigušnicom. Predstavlja prijašnje pristupe uzemljenju neutralne točke u Hrvatskoj i objašnjava na koji način treba pristupiti uzemljenju neutralne točke automatskom prigušnicom.

Literatura [2] opisuje tri načina uzemljenja neutralne točke. Autor koristi program MATLAB kako bi proveo simulaciju uzemljenja neutralne točke na sva tri načina i na temelju rezultata dolazi do zaključka. Potrebno je razmotriti sve stvarne i specifične uvjete i s obzirom na njih donijeti odluku o načinu uzemljenja.

Autori u literaturi [3] predlažu uzemljenje neutralne točke Petersenovom prigušnicom. U slučaju jednopolnog kvara će se impedancija prigušnice prilagoditi kako bi se struja zemljospoja približila vrijednosti 0 A. Za simuliranje su koristili program EMTDC/PSCAD te su rezultati te simulacije pokazali kako je metoda uzemljenja Petersenovom prigušnicom vrlo pogodno rješenje jer je njome moguće složeno upravljanje impedancijom te njome harmonijske komponente struje zemljospoja.

Autori literature [4] prezentiraju i uspoređuju karakteristike različitih metoda uzemljenja u srednjenaponskim mrežama te kakav utjecaj te metode i duljine vodova imaju na struju kvara. Pokazali su da dulji vodovi izazivaju veće struje kvara, a iznos prenapona ovisi o načinu uzemljenja. Također su predložili uzemljenje prigušnicom. Simulacija ovog problema je provedena u MATLAB-u te se vidi kakvo značenje simulacija može imati pri određivanju metode uzemljenja neutralne točke.

Autori u literaturi [5] daju čitateljima članka teorijsku podlogu te detaljno opisuje karakteristike različitih načina uzemljenja neutralne točke koji se danas prakticiraju. Istraženi su sigurnost, zahtjevi Nacionalnog električnog kodeksa i radna razmatranja, kao što je kontinuitet usluge. Na kraju su dani primjeri primjene unutar raznih industrija.

Autori literature [6] objašnjavaju u kojim se slučajevima može pojaviti prenapon između nule i zemlje te zašto je njezino ograničavanje kritično za sigurnost i rad distribucijske mreže. Eksperimentom prezentiraju zašto je način ograničenja prenapona odabran u radu najefikasniji.

### 3. OPĆENITO O ZEMLJOSPOJU

Kod promatranja prilika pri zemljospoju važna je veza voda i zemlje, koju sačinjavaju uglavnom dozemni kapaciteti, pa se kao prvo približenje mogu uzeti u račun samo oni. To znači da se zanemaruju djelatni otpor, induktivitet i odvod, pa čak i međusobne kapacitete vodova. Nakon toga može se kapacitet sve tri faze koncentrirati u jedan.

Kod zdrave mreže jedinu vezu sa zemljom čine dozemni kapaciteti koji stvaraju simetrično opterećenje u sve tri faze. Kapaciteti su spojeni u zvijezdu čije je zvjezdište zemlja. Zbog simetričnosti opterećenja zvjezdište kapaciteta je na istom potencijalu kao i zvjezdište mreže, a to znači da kod zdrave mreže zvjezdište sustava ima potencijal zemlje. Iz toga slijedi da svaki fazni vodič ima prema zemlji napon jednak faznom naponu  $U_f$ . Zbog tih napona u svakom dozemnom kapacitetu teku jednake struje koje svom naponu prethode za  $90^\circ$ , a suma tih struja je nula i kroz zemlju ne teče nikakva struja.

Za slučaj zemljospoja, tj. kada dođe do direktnog spoja jedne faze sa zemljom, bolesna faza nema nikakav napon prema zemlji, ali slika narinutih elektromotornih sila ostaje ista, pa fazni vodiči dolaze na linijski napon prema zemlji. U vektorskoj slici napona potencijal zemlje premjestio se iz zvjezdišta u vrh bolesne faze. Struje u dozemnom kapacitetu bolesne faze nema, ali su struje kroz dozemne kapacitete zdravih faza dane linijskim naponom. Te struje teku kroz zemlju i zatvaraju se kroz mjesto zemljospoja. To je tzv. struja zemljospoja i jednaka je vektorskoj sumi struja iz zdravih faza. Na mjestu kvara teče struja koja je jednaka umnošku faznog napona i kapacitivne susceptancije dozemnih kapaciteta svih triju faznih vodiča.

Normalno je da je opisana pojava nepoželjna jer ima niz štetnih posljedica. Najgora štetna posljedica jest termičko opterećenje vodiča i izolatora uslijed električnog luka na mjestu kvara. Električni luk zemljospoja treba čim prije eliminirati jer može doći do težih oštećenja i ispada iz pogona, a električni luk se može i proširiti (npr. zbog vjetra) pa tako uzrokovati i kratki spoj.

Električni luk se u svakoj poluperiodi pali i gasi, što može dovesti do velikih prenapona uslijed naboja koji se gomilaju u kapacitetima, a nastaju i putni valovi koji dovode prenapone do transformatorskih stanica.

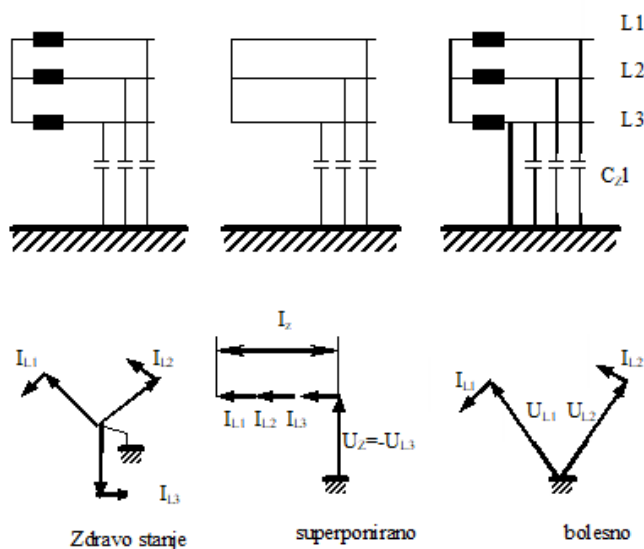
Struja kvara nije obično tako velika da bi dovela do oštećenja u postrojenjima kroz koje prolazi, ali može stvoriti znatne potencijalne razlike na mjestu gdje odlazi u zemlju.

Povećanje napona zdravih faza na iznos linijskog napona povećava naprezanje izolacije kod zdravih faza pa i u njima može doći do zemljospoja i tada zapravo imamo dvopolni kratki spoj preko zemlje.

### 3.1. Prikaz zemljospoja superpozicijom

Struje i napone u mreži za vrijeme zemljospoja mogu se prikazati superpozicijom dvaju stanja i to zdravog stanja i bolesnog stanja. Kako kod mreže u zdravom stanju nema nikakve struje na mjestu zemljospoja, tada je struja na mjestu zemljospoja u superponiranom stanju zapravo stvarna struja na mjestu zemljospoja u bolesnom stanju.

Ako se razmatraju prilike u vezi sa strujom, dobiti ćemo pravilan rezultat uz jednostavniju sliku, ako analiziramo superponirano stanje. Lako je uvidjeti da za superponirano stanje treba ukinuti sve elektromotorne sile i na mjesto zemljospoja dodati napon jednak i suprotan naponu na mjestu zemljospoja prije kvara. Drugim riječima treba uzeti samo pasivni dio mreže i podići ga na fazni napon iznad zemlje. Nakon ovoga lako je uvidjeti da je superpozicija zdravog i superponiranog stanja daje bolesno stanje. Prikaz zemljospoja superpozicijom dan je na Sl. 3.1. .



Sl. 3.1. Prikaz zemljospoja superpozicijom

Sl. 3.1. pokazuje da ako se svakom naponu zdravog stanja doda napon superponiranog stanja, za napon faze L3 se dobije napon nula, a za napone faza L1 i L2 se dobiju linijski naponi. Kad se svakoj struji kroz kapacitete kod zdravog stanja dodaju struje kroz kapacitete superponiranog stanja, koje su sve jednake po fazi i iznosu, dobije se za struju faze L3 iznos nula, a za struje faza L1 i L2 se dobije 1.73 puta veća vrijednost.

Struja zemljospoja može se lako odrediti pomoću superponiranog stanja. Napon  $U_Z$  tjera struju kroz sve dozemne kapacitete spojene paralelno. Pri proračunu treba u račun uzeti dozemne kapacitete svih

triju faza, a ako se radi o mreži, treba uzeti u obzir sumu dozemnih kapaciteta svih galvanski spojenih vodova, ali samo do prvog dvonamotnog transformatora. Pomak napona jednak je iznosu faznog napona na mjestu kvara. Iz navedenog zaključujemo da struju zemljospoja možemo računati pomoću izraza:

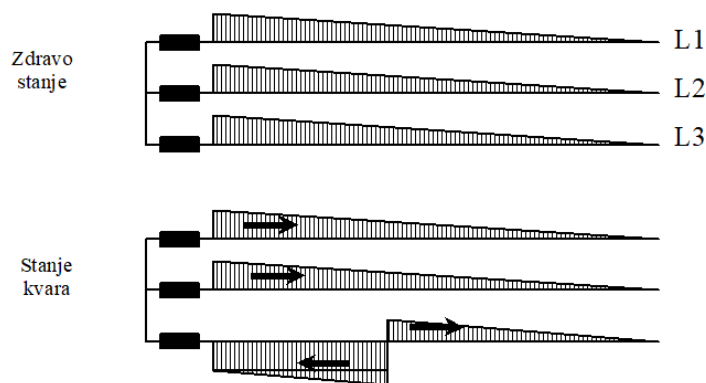
$$I_z = U_f 3\omega C_z l \quad (3-1)$$

Iz (3-1) se vidi da struja zemljospoja ima istu vrijednost bez obzira u kojoj točki mreže nastane zemljospoj.

### 3.2. Raspodjela struja zemljospoja

U dosadašnjem razmatranju prilika u mreži radi jednostavnosti smo koncentrirali dozemne kapacitete. U stvarnosti su dozemni kapaciteti jednoliko raspodijeljeni duž vodova pa su i prilike drukčije.

Kod zdravog stanja struje su u svakom faznom vodiču po iznosu jednake, ali su fazno pomaknute za  $120^\circ$ . Na početku voda svaka struja ima iznos koji odgovara punom iznosu kapaciteta voda, ali se taj iznos postepeno smanjuje i na kraju voda je jednak nuli.



Sl. 3.2. Raspodjela struja zemljospoja

Kao što prikazuje Sl. 3.2. vidi se da je raspodjela struja takva da izvor struje napaja kapacitivno opterećenje raspodijeljeno duž voda.

Superponirano stanje prikazano je najprije trofazo, s time da je zemljospoj negdje na sredini voda. Kako smo već rekli raspodjelu struja ćemo dobiti ako uzmemo da ih tjera napon narinut na mjestu

kvara. U fazi L3 desno od kvara teći će struja koja odgovara ukupnom kapacitetu desno od kvara, te će ta struja postepeno padati do nule prema kraju voda.

U zdravim fazama svi se kapaciteti napajaju strujom koja dolazi sa lijeve strane, tako da na početku svake faze imamo punu struju, po iznosu jednaku onoj u zdravom stanju, i ta struja postepeno duž voda pada na nulu. Desno od mjesta zemljospoja dijagram raspodjela struja izgleda ista kao i kod zdravog stanja, ali prilike u stvari nisu iste jer su ovdje sve struje međusobno u fazi.

Struja faza L1 i L2 dolazi iz faze L3 , tako da na početku faze L3 imamo struju koja je jednaka sumi struja u fazama L1 i L2 , samo što ova struja teče s desna ulijevo, pa je ucrtana s negativnim predznakom. Idući fazom L3 udesno toj se struji dodaje još i ona koja odlazi u dozemne kapacitete, tako da raste sve do mjesta zemljospoja.

Na istoj slici prikazana je i raspodjela struja u zemlji. Desno od zemljospoja sakuplja se sva struja iz kapaciteta svih triju faza i teče ulijevo od mjesta kvara. Lijevo od mjesta zemljospoja se također sakuplja struja iz dozemnih kapaciteta svih triju faza i teče udesno do mjesta kvara.

U praksi je uobičajeno prikazivanje raspodjele struja jednopolno kao što je prikazano na Sl. 3.2.. Pri jednopolnom prikazu ne vodi se računa o predznaku struje već se njezin smjer prikazuje strelicom. Isti prikaz raspodjele struja vrijedi i za struje kroz zemlju. Kao što se vidi iz prikaza, raspodjela struja je takva kao da je na mjestu zemljospoja smješten jednofazni izvor koji napaja jednolično raspoređen teret duž voda.

Ovim prikazujemo samo superponirano stanje, a ne struje koje stvarno teku u mreži. U stvarnosti desno od zemljospoja ne teče nikakva struja (struje za zdravo i superponirano stanje se poništavaju). Prednost ovoga prikaza jest to što su struje superponiranog stanja istofazne u sve tri faze pa ih možemo mjeriti, ako mjerimo sumu struja u sve tri faze. Pri tome se struje zdravog stanja poništavaju i ostaje samo ono što je prikazano na Sl. 3.2..

## 4. NAČINI UZEMLJENJA ZVJEZDIŠTA

Kod većih kapacitivnih struja zemljospojeva ne dolazi do samogašenja struja prolaznih zemljospojeva. To znači da prolazni zemljospojevi prelaze u trajne. O navedenim graničnim strujama zemljospoja postoje različita mišljenja u stručnoj literaturi. U našim tehničkim propisima utvrđene su slijedeće granične struje nakon kojih treba pristupiti uzemljenju zvjezdišta:

$$U_n = 10 \text{ kV} \quad - \quad I_c = 20 \text{ A}$$

$$U_n = 20 \text{ kV} \quad - \quad I_c = 15 \text{ A}$$

$$U_n = 35 \text{ kV} \quad - \quad I_c = 10 \text{ A}$$

Usporedbe radi, navodimo granične vrijednosti za kapacitivne struje zemljospojeva u Njemačkoj:

$$U_n = 10 \text{ kV} \quad - \quad I_c = 35 \text{ A}$$

$$U_n = 20 \text{ kV} \quad - \quad I_c = 35 \text{ A}$$

$$U_n = 35 \text{ kV} \quad - \quad I_c = 40 \text{ A}$$

Osnovni kriterij za prelazak na pogon sa uzemljenim zvjezdištem je visina kapacitivne struje zemljospoja koja je dana u prethodnom tekstu za različite naponske nivoe. Ta struja je prvenstveno uvjetovana kabelima u mreži, a veoma malo nadzemnim vodovima, no u nekim je slučajevima potrebno provesti uzemljenje i mreža s nadzemnim vodovima kako bi se ograničili prenaponi uslijed dozemnih kvarova.

### 4.1. Mogući načini i kriteriji pri izboru uzemljenja

Dobra svojstva uzemljenja zvjezdišta doći će do izražaja tek ako se u nekoj mreži ispravno odabere vrijednost impedancije između zvjezdišta sistema i zemlje. Putokaz pri odlučivanju nam mogu biti:

1. Prenaponi što se javljaju u mreži
2. Šteta na mjestu kvara kao posljedica veličine struje dozemnog kvara
3. Mogućnost primjene standardnih releja i sklopnih aparata za selektivno isključivanje dozemnog kvara
4. Zaštita od atmosferskih prenapona

S obzirom na karakter i veličinu impedancije u vanjskom krugu između zvjezdišta sustava i zemlje razlučujemo ove načine uzemljenja zvjezdišta:

- A. Uzemljenje zvjezdišta s Petersenovim svitcima ili rezonantno uzemljenje

## B. Izravno ili kruto uzemljenje

Uzemljenje preko otpora

Uzemljenje preko prigušnice

S ovim vrstama uzemljenja može se postići:

- Djelotvorno (efikasno) uzemljenje
- Nedjelotvorno (neefikasno) uzemljenje

Podjela načina između “A” i “B” izvršena je da se naglasi bitna razlika među njima. Mreža s kompenziranom strujom zemljospoja je u pogledu naponskih i strujnih prilika koje vladaju u mreži za vrijeme zemljospoja jednog faznog vodiča te u pogledu cijele koncepcije pogona, srodna neuzemljenim mrežama. U tako uzemljenim mrežama dimenzionira se izolacija i bira oprema kao u neuzemljenim mrežama, a sa konstrukcijskog stajališta one se svrstavaju u neuzemljene. Taj je način uzemljenja u svom početku bio uobičajena praksa u Europi, a sam po sebi se prirodno nametnuo već onda kada su se počele javljati teškoće s prevelikom kapacitivnom strujom zemljospoja.

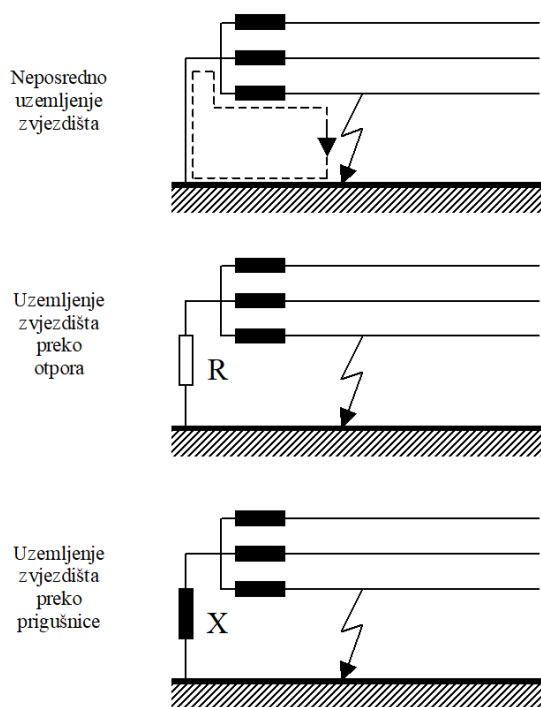
Druga koncepcija uzemljenja zvjezdišta (“B”), koju karakterizira težnja k umjetnom povećanju struje dozemnog kvara u odnosu na struju zemljospoja neuzemljene ili kompenzirane mreže. Takva se praksa najprije počela razvijati u Americi, a sastoji se u tome da se u vanjskom krugu ostvari spoj zvjezdišta i zemlje, bilo neposredno (sa zanemarivom impedancijom) ili posredno preko neke vrijednosti impedancije (pri čemu ona može biti pretežno djelatna ili pretežno induktivna). Cilj ovog zahvata je da se struja dozemnog spoja jedne faza toliko poveća da se osigura pouzdano i selektivno isklapanje mjesta kvara, kao i pri ostalim kvarovima na izolaciji.

## 4.2. Uzemljenje zvjezdišta

### 4.2.1. Načini uzemljenja zvjezdišta

Kod uzemljenog zvjezdišta ne može doći do štetnih naponskih posljedica uslijed zemljospoja, pa je time jedan dio problema riješen. Može doći samo do manjih poremećaja naponskih prilika, ali su ti poremećaji to manji što je mreža efikasnije uzemljena.

S druge strane, uzemljenjem zvjezdišta svaki zemljospoj se pretvara u jednopolni kratki spoj te je struja kvara znatno povećana. Zbog ove velike struje kvara relejna zaštita u vrlo kratkom vremenu isklapa bolesni vod te se tako na mehanički način rješava problem struja. Jedina mana ovakvog rješenja je to što potrošači priključeni na isklopljeni vod prilikom isklapanja ostaju bez napajanja. Ovaj nedostatak se vrlo djelotvorno može riješiti višestrukim snabdijevanjem ili primjenom automatskog ponovnog uklapanja APU.



Sl. 4.1. Načini uzemljenja zvjezdišta

Uzemljenjem zvjezdišta smo namjerno povećali struju kvara što nije povoljno. Da bi tu struju ograničili poduzimaju se različite mjere, a najčešće je ograničenje struje zemljospoja uzemljenjem preko otpora što se redovito primjenjuje u mrežama nižih napona. Drugi načini ograničenja struje zemljospoja su da se uzemlje samo neki transformatori u istoj TS ili da se uzemlje samo transformatori u nekim čvorištima mreže.

#### 4.2.2. Značajke neposrednog uzemljenja

Radi velikih struja kvara treba u neposredno uzemljenim mrežama sve dozemne spojeve odmah isključiti. Dakle velike struje jednopolnih kratkih spojeva zahtijevaju ugradnju zaštitnih naprava s brzim djelovanjem, što je razmjerno skupa investicija.



Isti razlog može kod stupova nadzemnih vodova prouzročiti visoke napone koraka i dodira, pa se može ukazati potreba za smanjenjem otpora uzemljenja stupova, što je također dodatna investicija.

Velike struje jednopolnog kratkog spoja mogu nepovoljno utjecati na telekomunikacijske vodove, naročito u razgranatim nadzemnim mrežama. Ova pojava može potaknuti zahtjev da se grade kabelaške umjesto nadzemnih mreža što je naravno skuplje.

Ako se kratki spojevi isključuju pomoću učinkovitih prekidača, tada je u nadzemnim mrežama preporučljivo primijeniti tehniku APU, kako bi se smanjio broj prekida pogona. Pri tome su najinteresantniji jednopolni kratki spojevi, jer su najčešći, a i velika većina među njima su prolazni po svojoj naravi. Primjena tehnike APU povećava također cijenu mreže, a povećavaju se i naprezanja prekidača radi relativno čestog rada.

Poseban problem kod neposredno uzemljenih kabelaških mreža je taj što veliki dio struje zemljospoja teče povratno kroz olovni plašt kabela pa ukoliko ne dođe do pravovremenog isključenja može doći do oštećenja i deformacija olovnog plašta na odgovarajućoj dionici. S druge strane mogu dodatni padovi napona u olovnom plaštu izazvati naknadne (sekundarne) proboje izolacije. Zbog toga se naročito mora obratiti pozornost na termičku izdržljivost olovnog plašta, kao i na kontinuiranost povratnog puta (naročito na mjestima spojnica kabela). Ovaj problem se djelotvorno rješava polaganjem dodatnog bakrenog vodiča spojenog s olovnim plaštom koji bi u slučaju dozemnog kvara preuzeo većinu struje kvara, a time se i dodatno smanjuje štetni utjecaj na telekomunikacijske vodove.

Navedeni razlozi dovoljni su da se direktno uzemljenje ne preporučuje u srednjenaponskim mrežama, bez obzira što postoje još i dodatne poteškoće da se ostvari djelotvorno uzemljenje.

Ove manjkavosti neposrednog uzemljenja mogu se izbjeći posrednim uzemljenjem zvjezdišta. Posredno uzemljenje zvjezdišta ostvaruje se umetanjem otpornika ili prigušnice između zvjezdišta i zemlje, a u istu svrhu mogu se koristiti i učinkoviti transformatori visoke nulte impedancije koji se neposredno uzemljuju.

#### **4.2.3. Značajke uzemljenja preko prigušnice**

Isto kao i kod mreža uzemljenih preko otpora, i kod mreža koje su uzemljene preko prigušnice, treba odmah isključiti svaki dozemni spoj jednog faznog vodiča. Zato se ovdje rijetko događaju dvostruki ili višestruki dozemni spojevi, osim ako reaktancija prigušnice nije velika, a izolacija slaba. Brzim isključenjem se eliminiraju i ostale neugodne posljedice što su u vezi sa duljim trajanjem kvara, a selektivno djelovanje zaštite se postiže dosta lako.

Osim s prigušnicom između zvjezdišta i zemlje može se uzemljenje preko reaktancije ostvariti i s transformatorom čija je nulta impedancija velikog iznosa, a koji se neposredno uzemlji. Tako se ostvaruje uzemljenje preko velike reaktancije u praksi, koje nije jako rasprostranjeno.

Prigušnice koje se koriste za uzemljenje zadovoljavaju uvjet:

$$\frac{X_0}{X_d} \leq 3 \quad (4-1)$$

pa se kod tako uzemljenih mreža mogu upotrijebiti odvodnici prenapona za pogon s djelotvorno uzemljenim zvjezdištem, čime se smanjuju izdatci. Ako gornji uvjet nije zadovoljen, potrebno je upotrijebiti odvodnike prenapona za puni napon mreže.

Struje jednopolnog kvara su kod ovako uzemljenih mreža su manje nego kod neposredno uzemljenih pa je manji i induktivni utjecaj na paralelne telekomunikacijske vodove. Slično kao i kod mreža uzemljenih preko otpornika, i u ovom slučaju se uzemljuje samo onoliko zvjezdišta da se osigura pouzdano djelovanje relejne zaštite.

Najbolja strana uzemljenja preko prigušnice u odnosu na uzemljenje preko otpora jest to da joj je vrijednost otpora praktički neovisno o temperaturi okoline, kao i o temperaturi namotaja.

#### **4.2.4. Značajke uzemljenja preko otpora**

U mrežama uzemljenim preko otpora mora se svaki dozemni kvar odmah isklopiti. Stoga će zbog vrlo kratkotrajnog povišenja napona pogonske frekvencije zdravih faza biti jako smanjena vjerojatnost pojave dvostrukih i višestrukih dozemnih spojeva. Ovim postupkom se otklanja još jedan nedostatak neuzemljenih mreža, a to je mogućnost nesreća radi dugotrajnog gorenja električnog luka.

Kod uobičajenih vrijednosti otpora koji se susreću u ovako uzemljenim mrežama, povišeni naponi pogonske frekvencije zdravih faza prema zemlji skoro su jednaki onim u neuzemljenim mrežama, dok će zvjezdište doći na skoro puni fazni napon prema zemlji. Zbog toga se u mrežama uzemljenim preko otpora moraju upotrijebiti odvodnici prenapona dimenzionirani za puni napon mreže kao i u neuzemljenim mrežama, što povećava troškove u odnosu na djelotvorno uzemljenje.

Uzemljenje zvjezdišta preko otpornika, u pogledu prenapona što ih izaziva pojava dozemnog spoja kao i njegovo isključenje, skoro sasvim isključuje opasnost od njihovog razornog djelovanja.

Uzemljenje zvjezdišta treba tako izvesti da djeluje relejna zaštita od kratkog spoja u slučaju dozemnog spoja na bilo kojem mjestu u mreži kao i kod neposrednog uzemljenja. Razlika je u tome što se umetanjem otpora između zvjezdišta i zemlje znatno smanjuje jakost struja jednopolnog kratkog spoja.

Zbog toga je potrebno paziti da struja jednopolnog kratkog spoja ne padne na vrijednosti kod kojih bi bila nesigurna prorada relejne zaštite. To je razlog da se u kabelskim mrežama teži k većim jakostima dozvoljenih struja kratkog spoja, nego u nadzemnim mrežama, jer se te struje mogu znatno smanjiti pri udaljenim kvarovima zbog dosta velike impedancije u povratnom krugu kratkog spoja (olovni plašt i zemlja). Da se osigura pouzdano djelovanje relejne zaštite pri dozemnom spoju jedne faze, treba uzeti u obzir kako se mijenja otpor otpornika za uzemljenje s temperaturom, prijelazni otpor uzemljenja stupova nadzemnih vodova i prijelazni otpor kvara (električnog luka).

Jakost struja jednopolnog kratkog spoja nije ovisna samo o omskoj vrijednosti otpornika već i o broju uzemljenih zvjezdišta. Budući da svako daljnje uzemljeno zvjezdište povećava ukupne troškove izgradnje mreže, ne teži se uzemljenju većeg broja zvjezdišta od onog koji je dovoljan za pouzdano djelovanje relejne zaštite prilikom dozemnog spoja jednog faznog vodiča. Tu se javlja razlika u odnosu na neposredno uzemljenje koje ne izaziva dodatne troškove i gdje se uzemljuju sva dostupna zvjezdišta.

Manji iznosi struja jednopolnog kratkog spoja kod mreža uzemljenih preko otpora, nego u neposredno uzemljenim mrežama, uzrok su manjem induktivnom utjecaju na paralelne telekomunikacijske vodove, što može biti vrlo značajno za praksu.

Preporučljiva je upotreba uređaja za automatsko ponovno uklapanje (APU) koji bi eliminirao većinu prolaznih kvarova (nadzemne mreže).

Kod mreža radijalne konfiguracije uzemljenih preko otpornika u pogonu, za zaštitu od jednopolnog kratkog spoja koriste se obični nadstrujni releji, koji se priključuju posredstvom triju strujnih transformatora ili putem kabelskih obuhvatnih transformatora.

Možemo zaključiti, uzemljenjem zvjezdišta 20 kV mreže preko otpornika postižu se slijedeće prednosti u eksploataciji mreže:

- brzo i selektivno djelovanje relejne zaštite od jednopolnih kvarova, s mogućnošću ugradnje brzog sistema automatskog ponovnog uključanja (APU) u nadzemnu mrežu; time se otklanja većina prolaznih kvarova;
- smanjenje razine unutarnjih prenapona, te otklanjanje mogućnosti pojave intermitirajućih prenapona
- eliminacija pojave dvostrukih zemljospojeva

Navedene prednosti u potpunosti su potvrđene u mrežama koje su prešle na rad sa uzemljenim zvjezdištem (Pula, Varaždin, itd.). Zato se u Republici Hrvatskoj postepeno teži prelasku na rad sa uzemljenim zvjezdištem.

### 4.3. Kompenzacija struje zemljospoja (rezonantno uzemljenje)

#### 4.3.1. Struja zemljospoja pri rezonantnom uzemljenju

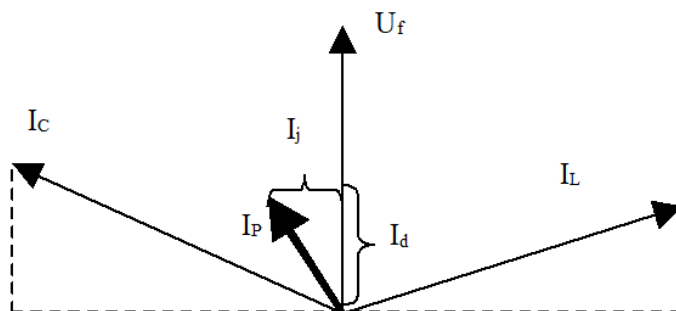
Osnovna ideja ovog načina zaštite od zemljospoja jest da se dozemni kapaciteti kompenziraju prigušnicama, čija je ukupna reaktancija brojčano jednaka reaktanciji svih dozemnih kapaciteta mreže. Pri tome prigušnice ne moraju biti raspoređene duž voda kao dozemni kapaciteti, pa čak niti po pojedinim fazama, već je dovoljno reaktanciju prigušnice koncentrirati i priključiti je u zvjezdište mreže. Ovakva prigušnica najčešće se naziva Petersenova prigušnica ili Petersenka, mada je bilo i nekih drugih izvedaba.

Kod zemljospoja zvjezdište poprima fazni napon prema zemlji, pa kroz prigušnicu teče induktivna struja prema zemlji, koja se zatvara kroz mjesto zemljospoja. Na mjestu kvara sada teku kapacitivna i induktivna struja istog iznosa, pa se poništavaju. Na mjestu kvara više ne teče nikakva struja, a dozemni se kapaciteti napajaju iz petersenki kao iz izvora.

Kako na mjestu kvara ne teče nikakva struja uzrokovana naponom, tako će se eventualno nastali luk uslijed prolaznog uzroka (npr. atmosferski prenaponi), odmah ugasiti i kvar će nestati. Izraz za dimenzioniranje petersenke dan je relacijom:

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C_z l} \quad (4-2)$$

Ako je uzrok kvara trajan, zemljospoj će ostati, ali neće biti štetnih posljedica koje bi mogle izazvati struje na mjestu kvara, tako da ostaje samo poremećaj naponskih prilika. U tom slučaju nije potrebno bolesni vod isključiti, već se pogon može nastaviti do povoljnog momenta za popravak.



Sl. 4.2. Preostala struja zemljospoja

U stvarnosti nije moguće u potpunosti dokinuti struju zemljospoja, već na mjestu kvara teče neka mala struja koju zovemo preostala struja zemljospoja. Komponente ove struje prikazane su na Sl. 4.2.

Sl. 4.2 zorno predočava komponente ove struje. Jalova komponenta nastaje uslijed razlike kapacitivne struje u dozemnim kapacitetima i induktivne struje kroz Petersenku. Ova pojava je posljedica stalne promjene dozemnih kapaciteta (uslijed promjene visine vodiča, ukapčanja i iskapčanja i sl.), tako da se petersenke ne mogu točno udesiti, naročito ako se reguliraju samo u stupnjevima. Djelatna komponenta nastaje uslijed djelatnih gubitaka u vodovima, transformatorima i petersenkama, dok se još javlja i komponenta uslijed viših harmonika jer su petersenke udešene za rezonanciju samo pri osnovnoj frekvencij.

Preostalu struju zemljospoja možemo računati pomoću izraza:

$$I_P = \sqrt{I_d^2 + I_j^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} \quad (4-3)$$

Ova struja obično iznosi 5÷10 %  $I_Z$  za nadzemne vodove ili 3÷6 %  $I_Z$  za kabele. Tako npr. u 10 kV-njoj mreži s 1000 km jednostrukih vodova struja zemljospoja iznosi 330 A, a preostala struja i do 30 A, ali će se električni luk ipak gasiti jer je preostala struja pretežno djelatna (struja i napon istodobno prolaze kroz nulu), pa se luk lakše gasi nego kod kapacitivne. Prema iskustvu može se dopustiti preostala struja od 100 A kod 110 kV mreže. Iz navedenog zaključujemo da nije potrebno težiti točnom podešenju petersenki jer ne možemo bitno utjecati na preostalu struju. Preostala struja najlakše se određuje mjerenjem (slično kao i  $I_Z$ ), tako da vatmetarskim instrumentima odredimo jalovu i djelatnu komponentu, a dio koji otpada na više harmonike izračunamo.

Raspodjela struja je takva da jalova komponenta struje izvire iz petersenki, a djelatna iz mjesta kvara (isto kao i kod struja zemljospoja nekompensirane mreže).

#### **4.3.2. Značajke rezonantnog uzemljenja zvjezdišta**

Primjena Petersenovih svitaka je jedan od načina da se smanje struje kvara u odnosu na pogon s neuzemljenim zvjezdištem. Smanjuju se do vrijednosti kod kojih se električni luk između faznog vodiča i zemlje gasi sam od sebe, ako mu je uzrok prolazne naravi. Zbog toga je u mrežama u kojima su česti prolazni zemljospojevi (pretežno nadzemne mreže) korisno primijeniti uzemljenje pomoću Petersenovih svitaka. Kod takvih mreža, kao i kod malih neuzemljenih mreža bitno smanjuje broj sklopnih operacija s prekidačima da bi se otklonila smetnja (broj isključenja zbog dozemnih spojeva iznosi oko 20÷30 % broja isključenja kod ostalih načina uzemljenja).

Proboji u krutoj izolaciji (kabelske mreže) ne mogu nestati sami od sebe, tako da je u kabelskim mražama većina kvarova trajne naravi. U tom slučaju smetnja ne nestaje sama od sebe kao što je slučaj

u nadzemnim mrežama, i zbog toga se Petersenove prigušnice rijetko primjenjuju u kabelskim mrežama, a prvenstveno se primjenjuju u mrežama s pretežno nadzemnim vodovima.

Obzirom na oblik i izvedbu mreže, rezonantno uzemljenje više dolazi do izražaja kod nadzemnih mreža radijalne konfiguracije s jednostrukim vodovima. Budući da će većina kvarova nestati bez isključenja vodova i jer je manja vjerojatnost pregaranja vodiča, može se izbjeći potreba za izgradnjom dvostrukih vodova i tako izbjeći znatne investicije. Ovo je naročito opravdano u područjima rijetke naseljenosti gdje su opterećenja relativno mala, a udaljenosti relativno velike.

U zamkastim mrežama i u mrežama radijalne konfiguracije s višestrukim paralelnim vodovima, jače dolazi do izražaja ona prednost Petersenke u maloj struji kvara pri dozemnom spoju jedne faze (zbog manjih štetnih utjecaja na telekomunikacijske vodove, manje opasnosti od pregaranja vodiča, od velikih napona koraka i dodira itd.).

U mrežama s Petersenovim prigušnicama unutarnji naponi su rjeđi i manjih su amplituda od onih u neuzemljenim mrežama pa se obzirom na kvarove u izolaciji može očekivati sigurniji pogon, jer je izolacija i zaštita od prenapona jednaka kao i u neuzemljenoj mreži. Sve ovo poboljšava kontinuiranost pogona.

Što se tiče zaštite od dozmnih spojeva, ona se obično izvodi na isti način kao i kod neuzemljenih mreža. Isto je tako identična i prenaponska zaštita, jer se i ovdje moraju primijeniti odvodnici prenapona za rad sa neuzemljenim zvjezdištem.

Mreže uzemljene preko Petersenovih svitaka ne mogu se povezati s mrežama koje nisu tako uzemljene bez posebnih zahvata ili ako se međusobno galvanski ne odvoje transformatorima s odvojenim



Sl. 4.3. Primjer Petersenove prigušnice [14]

namotima. Djelovanje dozemnog spoja se prenosi, kao i u neuzemljenim mrežama, na zdrave faze svih galvanski spojenih dijelova mreže.

Rezonantno uzemljenje je vezano s razmjerno visokim troškovima za Petersenove prigušnice, a uz to treba voditi brigu da prigušnica bude udešena prema dozemnim kapacitetima vodova, što se vrši promjenom broja otcjepa na prigušnici. Dozemni spoj u uvjetima različitim od rezonantnih će prouzročiti znatne štete, ako mreža nema odgovarajuću zaštitu od takvih slučajeva.

#### **4.4. Usporedba načina uzemljenja zvjezdišta**

Za sve navedene načine zaštite od zemljospoja razmatrane su prednosti i mane kod raznih vrsta kvara i za razne smetnje. Ove prednosti i mane zorno prikazuje Tablica 4.1.

Kod prolaznih kvarova sve vrste zaštite imaju samo dobre strane za sve smetnje koje nastaju i uslijed električnog luka i uslijed velike struje i uslijed poremećaja naponskih prilika. Kod trajnih kvarova izolirano zvjezdište štiti samo od prevelike struje i prevelikih napona, dok kompenzacija ne štiti od prevelikih napona, a uzemljenje štiti od oba poremećaja. Što se tiče prekida pogona do njega mora doći samo kod uzemljenja zvjezdišta.

Mogućnost trajnog rada s zemljospojem u jednoj fazi ne mora biti prednost jer u takvim okolnostima raste vjerojatnost pojave veoma neugodnih dvostrukih zemljospojeva. Smatra se da postoje uvjeti za nastanak dvostrukog zemljospoja ako je mreža radila sa zemljospojem duže od dva sata. Ova vrijednost uzeta je okvirno jer postoji mogućnost nastanka zemljospoja i u kraćem, ali i u dužem vremenu pogona mreže u stanju zemljospoja.

U ovisnosti o ovim karakteristikama proizlaze i područja primjene pojedinih vrsta zaštite. Izolirano zvjezdište može se primijeniti samo kod mreža malog napona, recimo do 20 kV, gdje se električni luk sam po sebi gasi. Kompenziranje struje zemljospoja preko petersenke upotrebljava se sve do napona od 150 kV, jer na tim naponima uzemljenje zvjezdišta ne može doprinijeti većim uštedama na izolaciji, a ne mogu se izbjeći štetne posljedice ispadanja iz pogona. Uzemljenje zvjezdišta se primjenjuje u najširim naponskim granicama, sve do najviših prijenosnih napona, s tim da se za najviše prijenosne napone primjenjuje isključivo direktno uzemljenje, jer se efikasnim uzemljenjem zvjezdišta mogu postići znatne uštede u izolaciji. Negativne posljedice prekida napajanja rješavaju se višestrukim napajanjem ili upotrebom automatskog ponovnog uključivanja (APU).

Tablica 4.1. Usporedba zaštite od zemljospoja

Vrsta zaštite	Prednost ili mana				Područje primjene
	Prolazni kvar	Trajni kvar		Prekid pogona	
		STRUJA	napon		
Izolirano zvjezdište	+	0	0	+	do 20 kV
Kompenzacija	+	+	-	+	do 150 kV
Uzemljenje zvjezdišta	+	+	+	-	do 400 kV

Na nižim naponskim razinama uobičajeno je uzemljenje preko otpora kojim se ograničava struja zemljospoja na određeni iznos. Time rješenjem gubimo na poboljšanju naponskih prilika u mreži, ali je ovaj način zaštite uobičajen za distribucijske mreže najnižih napona.



## 5. PRIMJER SN MREŽE S IZOLIRANIM ZVJEZDIŠTEM

S obzirom na različite vrste uzemljenja, u mreži se prilikom zemljospoja, koji su najčešći kvarovi u mreži, mogu pojaviti različite vrijednosti i oblici prenapona i struja kvara. U inicijalnim fazama razvoja većina distribucijskih mreža u Hrvatskoj bila je u izoliranom pogonu. U takvim prilikama su se uslijed zemljospoja pojavljivali prenaponi koji su uzrokovali brojne kvarove i probleme u mreži. Stoga se s vremenom pristupilo uzemljenju neutralne točke 35 kV mreže preko malooskog otpornika uz ograničenje struje zemljospoja, najčešće na iznos od 300 A. Ovaj način uzemljenja 35 kV (pretežno zračne) distribucijske mreže pokazao se vrlo dobar u pogonu pa se s vremenom prešlo i na slično rješenje u 10 i 20 kV mrežama. Međutim, uslijed sve većeg razvoja i povećanja veličine pojedinih distribucijskih 10 i 20 kV mreža, odnosno povećanja kabelskih instalacija u tim mrežama, rasle su i ukupne kapacitivne struje zemljospoja u istoj mreži. Stoga se pojavio problem kapacitivnog karaktera struje zemljospoja odnosno prihvatljive razine prenapona koji se pojavljuju u mreži.

Jedno od rješenja navedenog problema je primjena kompenzacijske prigušnice preko koje se obavlja uzemljenje neutralne točke mreže. Osnovni kriterij za prelazak srednjenaponske mreže na rad s uzemljenim zvjezdištem je visina kapacitivne struje zemljospoja galvanski vezane mreže ( $I_c$ ). Prema važećoj tehničkoj regulativi (preuzeti "Propisi o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja", Sl.list 19/68) granične struje zemljospoja do kojih se očekuje "samostalno" gašenje prolaznih zemljospoja su:

- $I_c = 20 \text{ A}$  ( $U_n = 10 \text{ kV}$ )
- $I_c = 15 \text{ A}$  ( $U_n = 20 \text{ kV}$ )
- $I_c = 10 \text{ A}$  ( $U_n = 35 \text{ kV}$ )

Ukoliko kapacitivna struja zemljospoja prijeđe navedene iznose, zahtijeva se prelazak na rad sa uzemljenim zvjezdištem. Kapacitivna struja zemljospoja neke mreže prvenstveno je uvjetovana vrstom i dužinom kabela, a veoma malo nadzemnim vodovima.

S obzirom na različite vrste uzemljenja, u mreži se prilikom zemljospoja, koji su najčešći kvarovi u mreži, mogu pojaviti različite vrijednosti i oblici prenapona i struja kvara. Odabir načina uzemljenja nul točke utječe i na pouzdanost opskrbe kupaca, što u uvjetima otvorenog tržišta električnom energijom ima iznimno veliku važnost.

## 5.1. Mogući načini pogonskog uzemljenja razmatrane SN mreže

Za određivanje vrste pogonskog uzemljenja SN mreže, potrebno je sagledati vrijednosti napona i struja koje se pojavljuju prilikom zemljospoja u istoj mreži.

Napon neutralne točke u normalnom pogonu jednak je nuli samo kod mreža koje su idealno simetrične tako da sve tri faze sustava imaju jednake električne parametre. Simetriju u normalnom pogonu najviše narušavaju zračni vodovi, osobito dugi vodovi kod kojih nije izveden preplet faza. Nesimetrija transformatora i kabelskih vodova je praktično zanemariva. Većina distribucijskih potrošača (osim npr. željeznica i ostalih specifično priključenih potrošača) ne unosi veće nesimetrije u sustav.

U Hrvatskom elektroenergetskom sustavu obično se razmatraju četiri zasebna slučaja uzemljenja neutralne točke distribucijske SN mreže:

- mreža s izoliranom nul točkom,
- mreža izolirana preko otpornika male vrijednosti otpora,
- mreža uzemljena preko kombinacije otpornika i kompenzacijske prigušnice,
- mreža izolirana preko kompenzacijske prigušnice (s djelomičnom i rezonantnom kompenzacijom),

Načini uzemljenja koji su opisani u prethodnim poglavljima sumarno su sa svojim karakteristikama prikazani u sljedećoj tablici:

Tablica 5.1. Mogućnosti kod uzemljenja NT

Način uzemljenja	Karakteristike
Izolirana mreža	nema potrebe za dodatnim investicijama kapacitivna struja zemljospoja problemi s otkrivanjem kvara
Uzemljenje preko otpora	potrebne su manje dodatne investicije djelomična kompenzacija struje zemljospoja jednostavna nadogradnja relejne zaštite u slučaju zemljospoja na zračnim vodovima, dolazi do beznaponske pauze (djelovanje APU), a kod kabelskih mreža dolazi do isključenja
Uzemljenje preko prigušnice i otpornika	potrebne su dodatne investicije srednje veličine djelomična kompenzacija struje zemljospoja smanjenje struja zemljospoja u radijalnom dijelu mreže te smanjenje napona koraka i dodira po dubini mreže
Uzemljenje preko prigušnice	potrebne su znatne dodatne investicije, naročito u slučaju automatske prigušnice potpuna (kod automatske prigušnice) ili skoro potpuna (kod ručno podesive prigušnice) kompenzacija struje zemljospoja mogućnost nastavka pogona u slučaju zemljospoja (tzv. Njemački sustav) potrebna složena nadogradnja sustava relejne zaštite

Vidljivo je da sva četiri različita sustava imaju određene prednosti i mane pri pogonu.

## **5.2. Odabir načina pogonskog uzemljenja 20 kV mreže**

Prema „Tehničkim preporukama za izvedbu uzemljenja zvjezdišta SN mreža“, HEP ODS, rujan 2010., prednost kod izbora uzemljenja zvjezdišta treba dati tehničko-ekonomskom rješenju za pojedine slučajeve, prema slijedećem redoslijedu:

1. uzemljenje preko otpornika
2. uzemljenje preko kompenzacijske prigušnice i otpornika
3. uzemljenje preko kompenzacijske prigušnice

## **5.3. Razmatrana SN mreža**

### **5.3.1. Postojeće stanje mreže 35 kV**

Pojna točka kompletnog SN raspjeta je TS 110/35/10 kV Županja 2. Mreža 35 kV uzemljena je u TS 110/35/10 kV Županja 2 maloohmskim otpornikom s ograničenjem struje jednopolnog kvara na 300A, njeno uzemljenje ostaje postojeće i nije predmet ovog završnog rada.

### **5.3.2. Razmatrana mreža 20 kV**

Mreža 20 kV, raspjet iz TS 35/20 kV Cerna prikazana je na Sl. 8.1. Kompletna razmatrana mreža podijeljena je na šest 20 kV odvoda koji su priključeni na dvije sekcije sabirnice 20 kV u TS 35/20 kV Cerna.

## 6. PRORAČUN STRUJA KVARA I ODBIR OPREME ZA UZEMLJENJE NT 20 kV

### 6.1. Procjena očekivanih kapacitivnih struja u 20 kV mreži

Iznosi kapacitivnih struja u mrežama s izoliranim neutralnim točkama mogu se procjenjuju se na temelju sljedećih procijenjenih vrijednosti kapacitivnih struja po duljini sredjenaponskih vodova ovisno o tipu voda:

Tablica 6.1. Procijenjene vrijednosti doprinosa kapacitivnoj struji zemljospoja

Tip SN voda	Pogonski napon [kV]	Ic1 [A/km]
Nadzemni vod Al/Če 3x50/8	10 kV	0,05
Nadzemni vod Al/Če 3x50/8	20 kV	0,1
Kabelski vod XHE49- A 3x(1x150)	10 kV	1,4
Kabelski vod XHE49- A 3x(1x150)	20 kV	2,8

Procjena kapacitivnih struja zemljospoja obavljena je za mrežu prikazanu o prilogu Sl. 8.1. koja se napaja iz TS 35/20 kV Cerna. Procjena je izvršena za trenutno uklopno stanje pri čemu su dobiveni sljedeći rezultati:

Tablica 6.2. Doprinos struji zemljospoja - procjena

R.br.	Polje	Duljina [km]	KB [km]	DV [km]	Ic [A]
1.	=K1 KB CIGLANA	14,20	8,68	5,52	24,85
2.	=K2 DV FARMA SLATINE	33,55	15,54	18,01	45,29
3.	=K5 DV GRADIŠTE	19,29	6,55	12,74	19,62
4.	=K6 DV ŠIŠKOVCI- RETKOVCI	24,39	0,51	23,88	3,83
5.	=K7 KB CERNA	3,75	3,75	0,00	10,49
6.	=K8 DV ANDRIJAŠEVCI	10,43	3,57	6,85	10,69
TS 35/20 kV Cerna					114,77

Očekivane kapacitivne struje su oko 114 A pri radu sa nazivnim naponom 20 kV. Procjena se odnosi na trenutno uklopno stanje, a raspored doprinosa po poljima vidljiv je iz gornje tablice.

## 6.2. Proračuni kapacitivnih struja u SN mreži TS 35/20 kV Cerna

Proračun kapacitivnih struja obavljen je korištenjem programskog alata NEPLAN s računskim metodama prema IEC 60909. Proračun je proveden za trenutno uklopno stanje prema Sl. 8.1. (u prilogu) uz pretpostavljeno izolirano zvjezdište energetskih transformatora. Za trenutno uklopno stanje dobiveni su sljedeći rezultati:

Tablica 6.3. Doprinos struji zemljospoja po poljima - proračun

R.br.	Pojje	Ic [A]
1.	=K1 KB CIGLANA	28,47
2.	=K2 DV FARMA SLATINE	51,95
3.	=K5 DV GRADIŠTE	21,93
4.	=K6 DV ŠIŠKOVCI-RETKOVCI	3,18
5.	=K7 KB CERNA	12,10
6.	=K8 DV ANDRIJAŠEVCI	11,96
TS 35/20 kV Cerna		129,58

Iz provedenih proračuna vidljivo je da su očekivani iznosi kapacitivnih struja od 129,58 A na naponskom nivou 20 kV, kod maksimalno mogućeg očekivanog raspjeta 20 kV mreže.

## 6.3. Uzemljenje preko otpornika

Uzemljenjem distribucijskih mreža preko otpornika, osim očiglednog ekonomskog aspekta, ostvaruju se i sljedeće prednosti:

1. Predloženim sustavom uzemljenja isključuju se svi zemljospoji kako trajnog tako prolaznog karaktera. Jednopolni zemljospoj ne prelazi u dvostruki zemljospoj ili u složene kvarove. Intermitirani prenaponi nisu mogući.
2. Maksimalni faktor prenapona zavisi o veličini otpornika za uzemljenje i karakterističnim parametrima mreže. U praksi se kreće između 1,8 i 2,5.

3. Prenaponi prema zemlji bilo koje vrste se prigušuju ispod vrijednosti koje bi bile u slučaju izolirane ili kompenzirane mreže.
4. Mreže su jednostavne za održavanje i izgradnju.
5. Relejna zaštita je jednostavnija i pouzdanija od zaštita koje su potrebne kod izoliranih ili kompenziranih mreža.
6. Mogući su utjecaji na telekomunikacijske vodove, ali se takvi utjecaji u praksi lako održavaju u dopuštenim granicama zbog relativno malih struja kvara.
7. Ne mogu nastati naknadni kvarovi jer se oštećena izolacija ne može regenerirati
8. Nisu potrebna nikakva naponska ispitivanja izolacije.

Najveći nedostatak ovog tipa uzemljenja je da se isključuju i prolazni jednopolni zemljospoji te se ne može se postići stalnost isporuke električne energije kao kod izoliranih ili kompenziranih mreža. Međutim, danas praktično uvijek postoje uvjeti za rezervno napajanje potrošača tako da su u realnim uvjetima smanjene štete zbog neisporučene električne energije i prekida napajanja električnom energijom. Navedene nepoželjne pojave otklanjaju se u znatnoj mjeri primjenom APU (automatski ponovni uklop) kod nadzemnih vodova jer je APU neophodan zbog visokog postotka kvarova prolaznog karaktera.

Pogon i održavanje mreža uzemljenih preko otpornika je relativno jednostavan. Investicijska ulaganja su znatno niža u usporedbi s rješenjem zasnovanim na kompenzacijskoj prigušnici (jeftiniji otpornici, znatno jeftiniji građevinski radovi, jeftinija relejna zaštite, jeftiniji strujni transformatori, itd.).

Prema „Tehničkim preporukama za izvedbu uzemljenja zvjezdišta SN mreža“, HEP ODS, rujana 2010., preporuča se izbor nazivne struje otpornika za uzemljenje prema kriteriju:

$$IR : IC \geq 3 : 1 \quad (6-1)$$

Osim u slučaju teških uvjeta za uzemljenje, što za slučaj razmatrane mreže nije slučaj.

Kako izračunata kapacitivna struja razmatrane mreže iznosi  $IC = 127,64 \text{ A}$ , prema navedenom kriteriju, nazivna struja otpornika trebala bi biti viša od  $300 \text{ A}$ , čime bi se otežalo osiguravanje uvjeta bezopasnosti u mreži  $20 \text{ kV}$ . Također je računski dokazano da dodavanjem radne komponente razmatranoj mreži dodatno povećavamo ukupnu struju zemljospoja te će ona poprimiti vrijednost od  $204,17 \text{ A}$ .

Iz navedenih razloga uzemljenje predmetne mreže preko otpornik odbacuje se kao neprihvatljivo.

## **6.4. Uzemljenje preko otpornika i prigušnice**

Prema „Tehničkim preporukama za izvedbu uzemljenja zvjezdišta SN mreža“, HEP ODS, rujan 2010., slijedeći način uzemljenja 20 kV koji se razmatra jest preko malog otpornika s paralelnom prigušnicom i nepotpunom kompenzacijom kapacitivne struje zemljospoja, predviđenih za trajni rad.

Za uzemljenje zvjezdišta 20 kV mreže predviđeni su paralelno spojeni otpornik i kompenzacijska prigušnica, jedan otpornik i prigušnica za oba energetska transformatora.

Budući da se iz TS 35/20 kV Cerna ne napajaju značajniji industrijski potrošači, kod kojih bi nestanak napajanja značio znatne štete u pogonu, nema značajne potrebe za nastavkom pogona određene sredjenaponske grane raspjeta trafostanice u slučaju zemljospoja. Sukladno tome, pri pojavi zemljospoja preporuka je da se kvarom zahvaćeni vod isključi te, u slučaju zračnih vodova, odradi automatski ponovni uklop (APU).

### **6.4.1. Odabir otpornika i prigušnice**

Uzevši u obzir daljnje širenje kableske mreže te eventualno kabliranje postojeće zračne mreže u budućnosti odabrana je prigušnica s područjem regulacije do nazivne struje 300 A.

Na taj način omogućeno je polaganje novog kabela i/ili kabliranje postojeće zračne mreže za dodatnih cca 63 km na naponskoj razini 20 kV.



Tablica 6.4. Podaci odabrane prigušnice

1.	Vrsta prigušnice	Uljna
2.	Tipna oznaka	2Pe430-6-12/300
3.	Instalacija	Vanjska montaža
4.	Norma	IEC 60076
5.	Broj faza	1
6.	Nazivna frekvencija	50 Hz
7.	Način hlađenja	ONAN
8.	Nazivni napon	12000 V
9.	Trajna struja prigušnice	5 A
10.	Nazivna struja mreže	50 - <b>100</b> -150 -200 -250 -300 A
11.	Reaktancije prigušnice Xp	219 - <b>118</b> - 81 – 61 – 48 – 40 $\Omega$
12.	Induktivitet prigušnice L	697 - <b>376</b> -258 -191-153 -127 mH
13.	Tip regulacije	Bez napona
14.	Ispitni naponi	LI 75 AC 28
15.	Temperatura okoline	-25 / +40 °C
16.	Dopušteno povišenje srednje temperature namota	65°C
17.	Dopušteno povišenje temperature ulja	60°C
18.	Ukupni gubici (odcjep 50A i struja 5A)	290 W
19.	Priključci	Porculanski izolatori
20.	Dimenzije: Duljina Širina Visina	1055 mm 1045 mm 1240 mm
21.	Masa ulja	240 kg
22.	Masa prigušnice	1060 kg
23.	Zaštita od korozije	Vruće cinčanje

Sve ove vrijednosti dobivene su proračunima. Stvarno stanje moći će se izmjeriti na terenu tek nakon izgradnje trafostanice i ugradnje prigušnice. S tog aspekta je uzimanje ove dodatne sigurnosne margine opravdano jer će najveći trošak nastupiti u slučaju potkompenziranosti mreže, odnosno nemogućnosti instalirane prigušnice za potpunu kompenzaciju mreže. Odabire se ručno podesiva regulacijska prigušnica, tip 2Pe430-6-12/300, proizvođača Končar.

Ugradnjom predmetne prigušnice ostvaruje se funkcija kompenzacije struje zemljospoja u iznosu do 300 A, što ostavlja dovoljno rezerve za budući srednjenaponski rasplet.

Za razmatranu mrežu predloženo podešenje prigušnice iznosi 100 A pri pogonu mreže na 20 kV naponu. Konačno podešenje potrebno je odrediti proračunom i potvrditi nakon puštanja prigušnice u pogon.

Obzirom na izračunatu kapacitivnu struju zemljospoja, odabire se otpornik za uzemljenje neutralne točke sa ograničenjem struje zemljospoja na 150 A, čime će nakon kompenzacije dijela

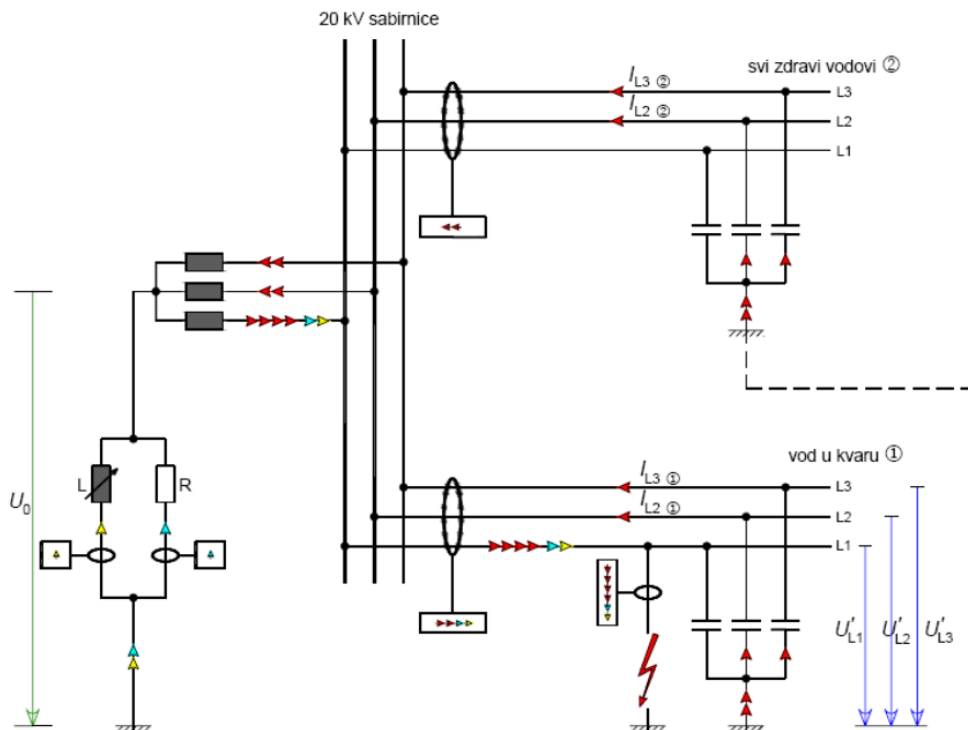
kapacitivne struje (nepotpuna kompenzacija) biti zadovoljen kriterij  $IR : IC \geq 1,5 : 1$  potreban da bi unutrašnji prenaponi bili unutar prihvatljivih vrijednosti, a da se osiguraju relativno laki uvjeti osiguranja bezopasnosti u mreži 20 kV.

Proračun kapacitivnih struja obavljen je korištenjem programskog alata s računskim metodama prema IEC 60909. Proračun je proveden za trenutno uklopno stanje prema Sl. 8.1. (u prilogu) uz pretpostavljeno, otpornikom i prigušnicom uzemljeno zvjezdište energetskih transformatora.

Odabrano je rješenje uzemljenja sredjenaponske mreže preko kombinacije prigušnice i otpornika. Prigušnica je odabrana kao element sa mogućnošću ručne izmjene veličine jalove snage (induktiviteta). Ručna izmjena obavlja se u beznaponskom stanju.

### 6.4.2. Struja jednopolnog kvara

Proračun struja jednopolnih kvarova uz pretpostavljene konfiguracije uzemljenja neutralne točke, tj. paralelne kombinacije  $R=80 \Omega$  i  $XL=118 \Omega$  za rad na naponu 20 kV, izvršen je programskim alatom s računskim metodama prema IEC 60909. Rezultati proračuna struja jednopolnih kvarova su 129,58 A.



Sl. 6.1. Nadomjesna shema 20 kV mreže s neutralnom točkom uzemljenom kompenzacijskom prigušnicom s djelomičnom kompenzacijom [15]

Pri stupnjevanoj izvedbi kompenzacijske prigušnice otpornik je obično stalno uključen.

Kvar u mreži 20 kV u raspletu TS 35/20 kV Cerna rezultirat će kapacitivnim strujama u iznosu od:

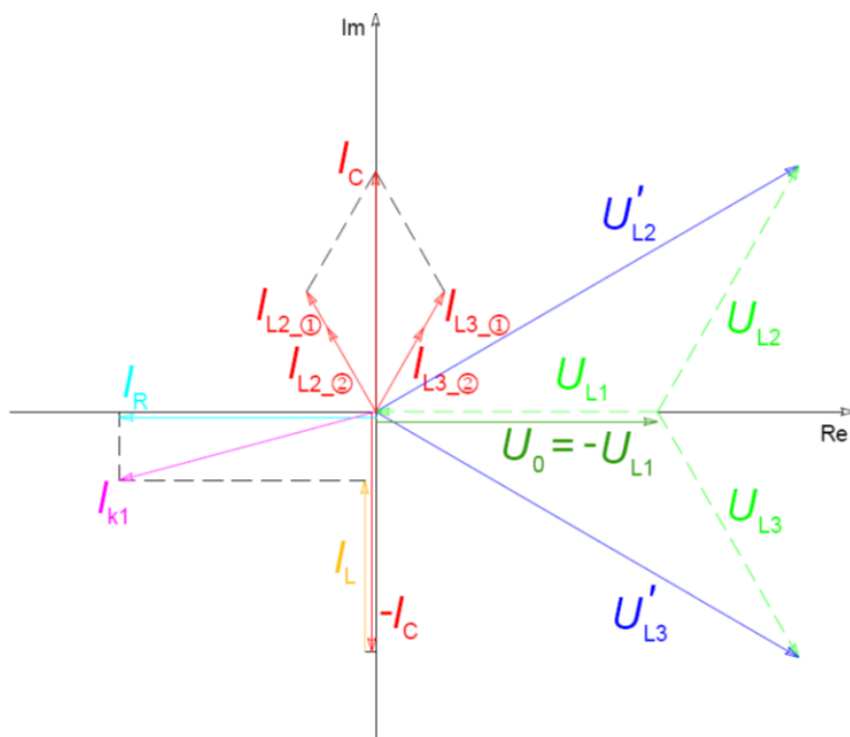
$$I_{c20} = 129,58 \text{ A}$$

Također, predloženo podešenje prigušnice iznosi

$$I_{L20} = 100 \text{ A.}$$

Rezultantna reaktivna komponenta struja kvara iznosit će u tom slučaju  $I_{C20} - I_{L20} = 29,58 \text{ A}$ , čime se osigurava da se i nakon isključenja voda sa najvećim doprinosom kapacitivnoj struji (DV Farma Slatine) zadrži približno radni karakter struje slijedećeg kvara.

Vektorski dijagram kvalitativno je prikazan na Sl. 6.2.:



Sl. 6.2. Vektorski dijagram zemljospoja 20 kV mreže s neutralnom točkom uzemljenom kompenzacijskom prigušnicom s djelomičnom kompenzacijom [15]

Ukupna struja jednopolnog kratkog spoja u mreži 20 kV iznosit će:

$$I_{k1} = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \quad (6-2)$$

Ukupna struja jednopolnog kratkog spoja iznosit će 152,89 A i bit će djelatnog karaktera. U slučaju odabira otpornika struje zemljospoja 150 A, zadovoljen je i kriterij  $I_R : I_C \geq 1,5 : 1$  potreban da bi unutrašnji prenaponi bili unutar prihvatljivih vrijednosti.

### **6.5. Uzemljenje preko automatski regulirane (Petersenove) prigušnice**

Kako je u prethodnom poglavlju opisano, uzemljenjem preko otpornika i prigušnice postižu se zadovoljavajuće strujno naponske prilike, stoga nije potrebno izvoditi ekonomski najnepovoljnije, iako u pogonu najprihvatljivije rješenje uzemljenja sa automatski reguliranom kompenzacijskom prigušnicom.

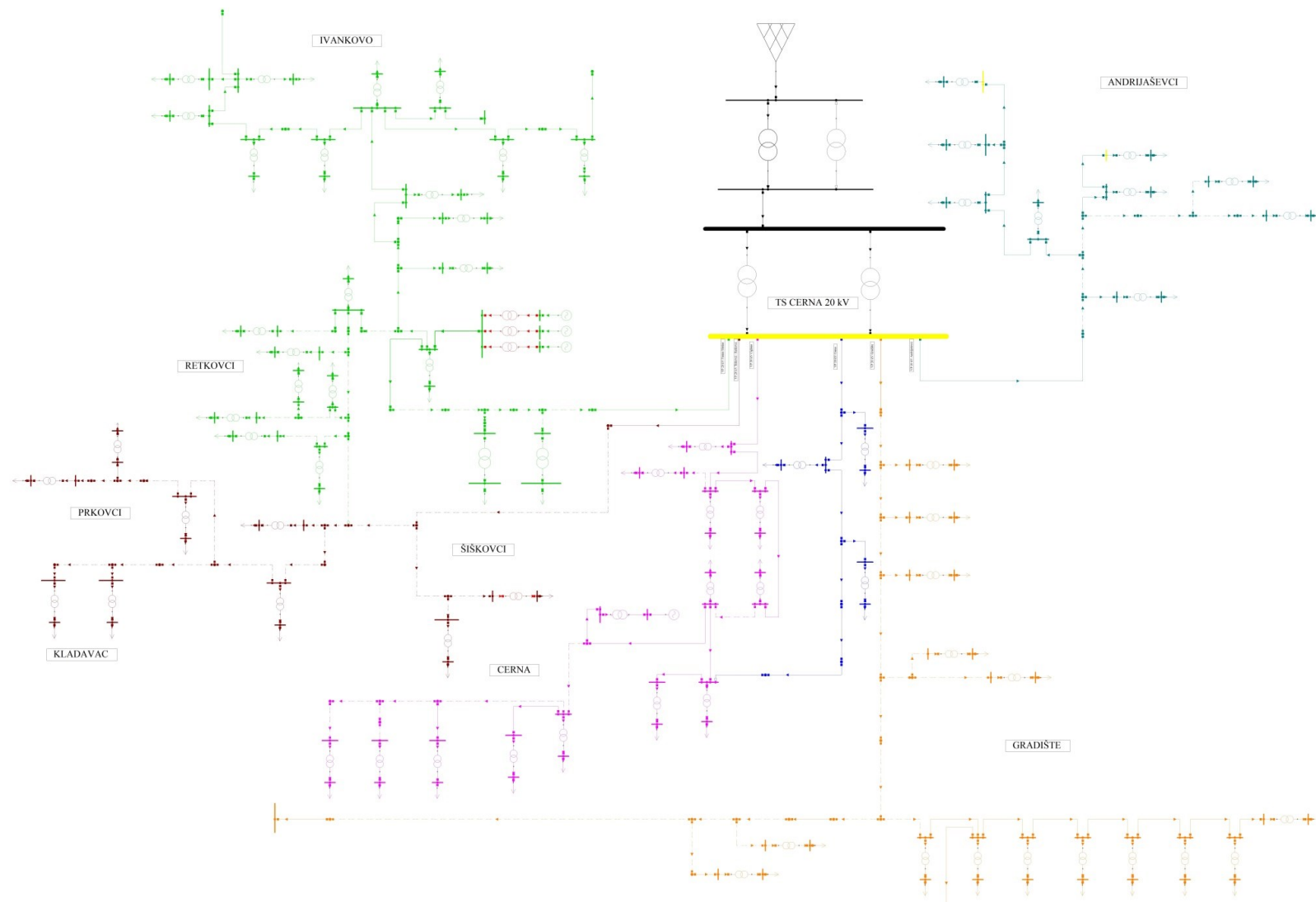
Obzirom na izračunatu kapacitivnu struju u ovom slučaju primijenila bi se tipska Petersenova prigušnica snage 4MVAr, opremljena sustavima za kontrolu kapacitivne struje i automatsko prilagođavanje induktiviteta uklopnim stanjima mreže. Ona bi bila podešena na takav način da poprimi vrijednost od 318 mH jer će onda struja zemljospoja u razmatranoj mreži iznositi 0,6 A. Takva prigušnica imala bi dovoljnu rezervu za buduće dogradnje i promjene u mreži, tj. zamjenu nadzemnih vodova kabelskim.

Osim očiglednih viših troškova izgradnje postrojenja za uzemljenje neutralne točke, ugradnja Petersenove prigušnice zbog vrlo malih struja kvara zahtjeva dodatne radove i investicije na zamjeni relejne zaštite i odgovarajućih senzora (strujnih i naponskih mjernih transformatora).

## 7. ZAKLJUČAK

U radu su opisane i analizirane osnovne činjenice na koje treba obratiti pozornost pri radu mreže s uzemljenim zvjezdištem. Analiza se uglavnom odnosi na srednjenaponske mreže kakve se koriste u distribuciji električne energije, jer su one najviših napona, kakve se koriste u prijenosu električne energije, već prije uzemljene i za njihovo uzemljivanje usvojeno je neposredno uzemljenje zvjezdišta. Postoje razne metode uzemljenja zvjezdišta te svaka od tih metoda ima svoje prednosti i nedostatke. Mreža sa izoliranim zvjezdištem gasi struju zemljospoja ukoliko ta struja nije previsoka te je zaštita od napona dodira jednostavna. No, ako je ta struja previsoka, ne dolazi do samogašenja struje zemljospoja te ako je ta struja prisutna dulje vrijeme, postoji mogućnost nastanka dvostrukog zemljospoja. Također je prorada relejne zaštite u ovakvim mrežama puno nesigurnija. Idealan način uzemljenja zvjezdišta je uzemljenje Petersenovom prigušnicom jer se ta prigušnica automatski prilagođava prilikama u mreži, ali u većini slučajeva je taj način uzemljenja neisplativ jer postoje vrlo veliki dodatni troškovi ugradnje i održavanja. Što se tiče uzemljenja otpornikom i prigušnicom, također su potrebne dodatne investicije, ali one nisu tolikih razmjera kao što je uzemljenje Petersenkom. Uzemljenje otpornikom i prigušnicom će samo djelomično kompenzirati struju zemljospoja te će smanjiti napon dodira i koraka, dok će Petersenova prigušnica potpuno, ili skoro potpuno, kompenzirati struju zemljospoja te će pogon moći nastaviti s radom. Iz simulacije analizirane u ovom radu se vidi da se optimalne strujno naponske prilike dobivaju uzemljenjem preko otpornika i prigušnice uz prihvatljive troškove.

## **8. PRILOZI**



Sl. 8.1. Model 20 kV napajanja iz TS 35/20 kV Cerna

## 9. LITERATURA

- [1] M. Puharić Promjena koncepcije uzemljenja neutralne točke srednjonaponskih mreža; Zagreb 2009. - <https://hrcak.srce.hr/198602>
- [2] Z. Fu, N. Wang, L. Huang and R. Zhang, "Study on Neutral Point Grounding Modes in Medium-Voltage Distribution Network," 2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2014, pp. 154-157, doi: 10.1109/IS3C.2014.51.
- [3] P. Wang, B. Chen, C. Tian, B. Sun, M. Zhou and J. Yuan, "A Novel Neutral Electromagnetic Hybrid Flexible Grounding Method in Distribution Networks," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 3, pp. 1350-1358, June 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2526054.
- [4] S. Ravlić, A. Marušić, „Simulation Models for Various Neutral Earthing Methods in Medium Voltage Systems“, Procedia Engineering, Volume 100, 2015, Pages 1182-1191, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.482>.
- [5] D. D. Shipp and F. J. Angelini, "Characteristics of different power systems grounding techniques: fact and fiction," Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1988, pp. 1535-1544 vol.2, doi: 10.1109/IAS.1988.25261.
- [6] W. Wang, L. Yan, X. Zeng, B. Fan and J. M. Guerrero, "Principle and Design of a Single-Phase Inverter-Based Grounding System for Neutral-to-Ground Voltage Compensation in Distribution Networks," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 2, pp. 1204-1213, Feb. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2612180.
- [7] H. Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja; Tehnička knjiga Zagreb 1967.
- [8] J. Nahman: Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža; Naučna knjiga Beograd 1980...



- [9] V. Srb: Kabelaška tehnika; Tehnička knjiga Zagreb 1970.
- [10] D. Kaiser: Elektrotehnički priručnik; Tehnička knjiga Zagreb 1971.
- [11] S. Babić: Uzemljenje zvjezdišta mreže 10 (20) kV Elektre-Karlovac; Zavod za visoki napon i energetiku ETF Zagreb 1982.
- [12] M. Škarpona, K. Meštrović, R. Ćučić, M. Gjergja, D. Kruljac: Uzemljanja neutralnih točki distributivnih mreža; Stanje u HEP - ODS Elektra Zadar, 9. savjetovanje HRO CIGRE studeni 2009.
- [13] Tehničke preporuke za izvedbu uzemljenja zvjezdišta SN mreža; Zagreb 2010.
- [14] Energetika, gospodarstvo, ekologija i etika (EGE) - <https://www.ege.cz/en/products-and-services/electrical-engineering-division>
- [15] Tehnički proračun TS 110/20 kV GLINA; DALEKOVOD – PROJEKT d.o.o. Zagreb 2014.

## 10. SAŽETAK

Zadatak ovog rada jest opisati pojam zemljospoja, što je on i kakav utjecaj ima na mrežu. Isto tako opisuje značajke svakog od četiri moguća načina uzemljenja neutralne točke koji se mogu pojaviti u distribucijskoj mreži. Prednosti i nedostatke izoliranog zvjezdišta, zvjezdišta uzemljenog otpornikom, zvjezdišta uzemljenog otpornikom i prigušnicom te zvjezdišta uzemljenog Petersenovom prigušnicom. Značajke ovih načina uzemljenja su detaljnije analizirane u simulaciji uzemljenja zvjezdišta srednjenaponske mreže 20kV Cerna. Simulacija je odrađena u programu NEPLAN, program za analiziranje, planiranje, optimiziranje i simuliranje energetskih mreža. Na temelju te simulacije određen je zadovoljavajući način uzemljenja te je svaki način potkrijepljen proračunima.

Ključne riječi: zemljospoj, uzemljenje neutralne točke, Petersenova prigušnica, uzemljenje otpornikom i prigušnicom

## **11. ABSTRACT**

The task of this paper is to describe the term ground fault, what it is and what impact it has on the network. It also describes the features of each of the four possible neutral point grounding methods that may occur in a distribution network. Advantages and disadvantages of an isolated starpoint, a resistor-grounded starpoint, a resistor-and-coil-grounded starpoint, and a Petersen coil-grounded starpoint. The features of these grounding methods are analyzed in more detail in the neutral point grounding simulation of a medium voltage network Cerna (20kV). The simulation was done in NEPLAN, a program for analysis, planning, optimization and simulation of energy networks. On the basis of this simulation, a satisfactory method of exclusion was determined, and each method was supported by calculations.

Index terms: ground fault, neutral point grounding, Petersen coil, resistor-and-coil-grounded starpoint

## **ŽIVOTOPIS**

Autor ovog rada, Stjepan Babić, rođen je 27. rujna 1999. godine u Slavonskom Brodu te je trenutno student Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, na Sveučilištu Josipa Juraj Strossmayera gdje se na drugoj godini opredijelio za smjer elektroenergetike. Prije toga je pohađao Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer elektrotehnika.

---

Potpis autora