

Neuzemljeni sustav

Sigurnjak, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:832047>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

FILIP SIGURNJAK

NEUZEMLJENI SUSTAV

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**NEUZEMLJENI SUSTAV
UNGROUNDDED SYSTEM**

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Brodski električni sustavi

Mentor: Izv. prof. Dr. Sc. Aleksandar Cuculić

Student: Filip Sigurnjak

Studijski smjer: EITP

JMBAG: 0112085007

Rijeka, svibanj 2023.

Student: Filip Sigurnjak

Studijski program: EITP

JMBAG: 0112085007

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom „Neuzemljeni sustav“ izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Aleksandra Cuculića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezoao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Filip Sigurnjak

Student: Filip Sigurnjak
Studijski program: EITP
JMBAG: 0112085007

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor



SAŽETAK

U završnom radu iznesen je pregled osnovnih značajki neuzemljenih električnih sustava, njegove primjene te prednosti i mana korištenja takvih sustava. Objasnjeno je ponašanje sustava u normalnim uvjetima i u uvjetima kvara. Poseban fokus stavljen je na primjenu takvih sustava na brodovima i načine detekcije spoja s masom.

Ključne riječi: neuzemljeni sustav, kapacitivno uzemljenje, plutajući sustav, izolirani terminal

SUMMARY

In this work, an overview of the basic features of ungrounded electrical systems, its application, and the advantages and disadvantages of using such systems was presented. The behaviour of the system under normal conditions and under fault conditions is explained. A special focus is placed on the application of such systems on ships and ways of detecting the ground faults.

Keywords: ungrounded system, IT system, unearthed system, capacitance grounding, floating system

SADRŽAJ

SAŽETAK	III
SUMMARY	III
SADRŽAJ	IV
1. UVOD	1
2. OSNOVNE ZNAČAJKE NEUZEMLJENOG SUSTAVA	2
1.1. ŠTO JE UZEMLJENJE TE NJEGOVA ULOGA.....	2
1.2. PRIMJENA NEUZEMLJENOG SUSTAVA, PREDNOSTI I MANE	3
1.3. PARAZITNI KAPACITETI U NEUZEMLJENOM SUSTAVU.....	5
1.4. KAKO IZMJERITI PARAZITNI KAPACITET	6
1.5. RAZLIKA IZMEĐU UZEMLJENJA NEUTRALNE TOČKE I UZEMLJENJA OPREME.....	7
3. PONAŠANJE NEUZEMLJENOG SUSTAVA U RAZLIČITIM UVJETIMA RADA	8
3.1. NORMALNI UVJET	8
3.2. SPOJ S MASOM.....	9
3.3. IZOLACIJA ZA NEUZEMLJENI SUSTAV.....	10
3.4. TRANZIJENTNI PRENAPONI.....	11
3.5. POJAVA FEROREZONANCIJE U NEUZEMLJENOM SUSTAVU KOD SPOJA S MASOM.....	16
3.5.1. FEROREZONANCIJA.....	16
4. DETEKCIJA STRUJE ZEMNOG SPOJA	20
4.1. LOKALIZACIJA KVARA	20
4.2. LOCIRANJE KVARA	20
5. SPAJANJE SUSTAVA S KOPNENIM PRIKLJUČKOM	23
6. PRAVILA REGISTRA	27
7. OSTALI NAČINI SPAJANJA UZEMLJENJA	29
7.1. UZEMLJAVANJE PREKO OTPORNIKA VISOKOG OTPORA	29
8. ZAKLJUČAK	30
9. POPIS SLIKA	31
10. LITERATURA	33

1. UVOD

Neuzemljeni električni sustav je sustav gdje nema direktne poveznice između električnog sustava (zvjezdišta generatora, transformatora) i zemlje. Odnosno nema direktnog puta gdje se električna struja može zatvoriti prema zemlji. Pored ovog načina postoji još i direktno uzemljavanje zvezdišta generatora, preko otpornika te preko impedancije.

Neuzemljeni sustavi se koriste u nekim industrijskim postrojenjima te na brodovima, gdje je kontinuitet bitan te sustav mora nastaviti raditi ukoliko dođe do zemnog spoja u jednoj od faza prema masi.

No, neuzemljeni sustavi mogu biti opasni jer svaki kvar u sustavu, ako ga ne riješimo na vrijeme ili ne otkrijemo može uzrokovati štetu na osoblju ili opremi. To je jedan od razloga zašto se ovakav sustav ne primjenjuje u stambenim okruženjima, gdje je sigurnost primarna briga. Ujedno može dovesti do pojave tranzijentnih napona (višestruko viših napona od linijskog.)

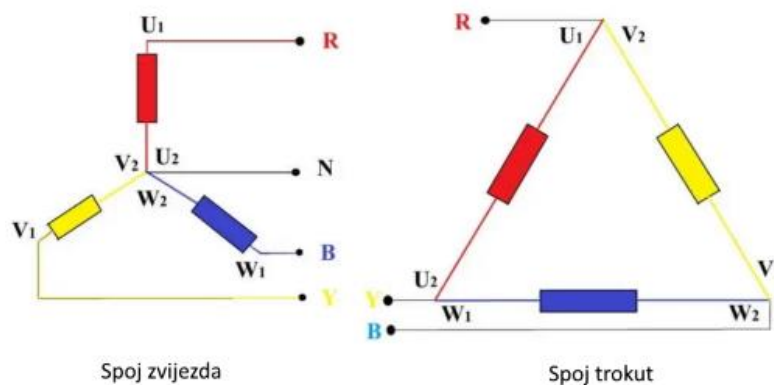
Neuzemljeni sustav se još naziva i kapacitivno uzemljenje, ukoliko postoje dvije vodljive podloge sa nabojima, a između njih se javlja dielektrik, to svojstvo odgovara kondenzatoru. Upravo tako se i ponaša neuzemljeni sustav, svaka pojedina linija ili linija prema masi se može promatrati kao ploča na kojoj se nalaze različiti naboji, a između njih se nalazi u dielektrik, npr. na brodu zrak. Zato postoji kapacitivna poveznica između linija i mase te se zvijezdište generatora nalazi na istom potencijalu kao i trup broda.

Kod ovakvog sustava zahtijevaju se posebne procedure za detekciju zemnog spoja, zbog toga što je struja premala da bi došlo do aktiviranja prekidača ili određene zaštite kada dođe do zemnog spoja. Sustav ne smije predugo ni biti u zemnom spoju, jer se stvara veće opterećenje na izolaciji te može doći do pregaranje iste (vrijeme ovisi o ocjeni izolacije koju sustav koristi) ili do pojave drugog zemnog spoja, što će rezultirati na kraju kratkim spojem i isključenjem generatora iz sustava, rezultat toga će biti nestanak izvora napajanja na brodu.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE NEUZEMLJENOG SUSTAVA

1.1. ŠTO JE UZEMLJENJE TE NJEGOVA ULOGA

Na brodovima za proizvodnju električne energije koristimo sinkrone generatore, koji nam na statorskoj strani dvaju trofaznu izmjeničnu struju, namotaji mogu biti ili u delta ili u zvijezda spoju. Ukoliko je sustav potpuno simetričan na izlazu ćemo imati jednake amplitude napona te će pomak između faza biti za 120° stupnjeva. Frekvencija mreže na brodovima je 60 Hz-a [12].



Slika 1. Zvijezda spoj

Slika 2. Delta spoj

Izvor: Shipboard Electrical Power Systems by Mukund Patel

Izraz „uzemljenje opreme“ se u elektroindustriji koristi za uzemljavanje opreme odnosno metalnog kućišta koji bi u slučaju zemnog spoja pojedine faze bio opasan za ljude te sam sustav. Uzemljavanje opreme obuhvaća 3 stvari:

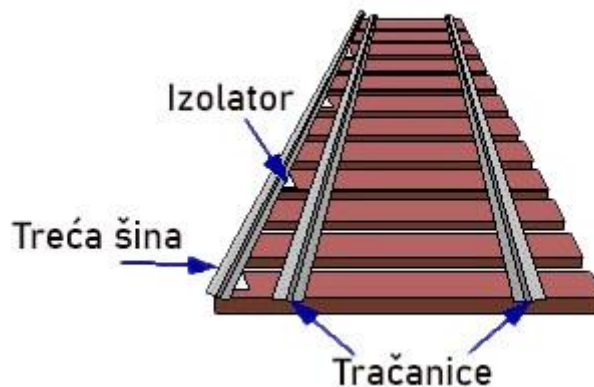
- Spajanje vodljivog djela sustava, odnosno kućišta koji kada je sustav u normalnom radu ne vodi struju
- Osigurati povratni put struje sa što manjom impedancijom u slučaju zemnog spoja
- Sustav se mora uzemljiti preko vodiča za uzemljenje ili uzemljivača

Uzemljenje sustava odnosi se na spajanje neutralne točke u ovom slučaju zvjezdišta generatora, na masu (uzemljenje). U slučaju kada bi došlo do zemnog spoja faze A sa kućištem, struja bi nesmetano tekla do zvjezdišta generatora te bi to prepoznala zaštita od zemnog spoja te bi isključila uređaj iz mreže [13].

1.2. PRIMJENA NEUZEMLJENOG SUSTAVA, PREDNOSTI I MANE

Neuzemljeni sustavi se koristi kod industrijskih procesa i brodova, kao što su:

- Sustavi napajanja u bolnicama, podatkovnim centrima i drugim objektima gdje kvar na zemlji može dovesti do prekida usluge.
- Sustavi s osjetljivom elektroničkom opremom koju mogu oštetiti čak i niske razine struja zemnog spoja.
- Rudarstvo i druga opasna okruženja, gdje uporaba uzemljenih sustava može povećati rizik od električnog udara i eksplozija.
- Baterijski sustavi stanica
- Elektrokemijski sustavi
- Tranzitni elektroenergetski sustav također može biti neuzemljen, no to se onda primjenjuje kod rudarstva ili podzemnih željeznica gdje postoji mogućnost pojave lutajućih struja, koje su odgovorne za ubrzavanja korozije. No, tada osoba ne bi smjela stati na treću šinu (pozitivan potencijal) i zemlju ili tračnicu (negativni potencijal) i zemlju, jer će se struja zatvoriti tim putem kroz osobu [5].



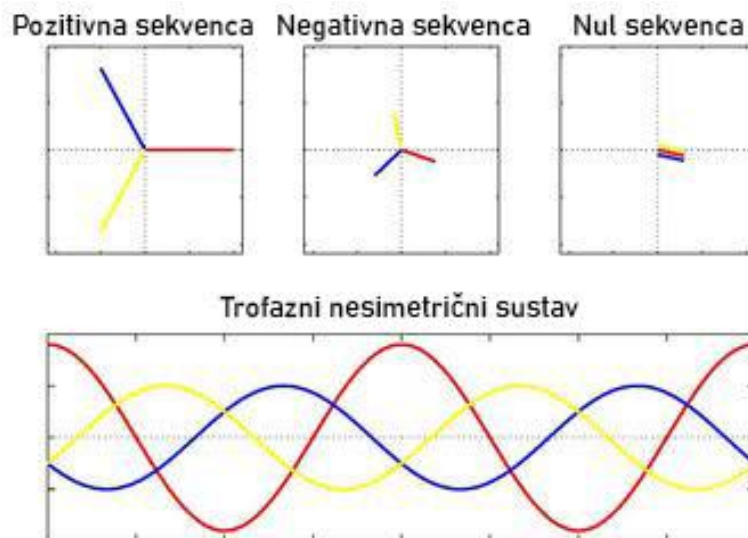
Slika 3. Treća šina i tračnica

Izvor: <https://americaexplained.files.wordpress.com/2011/03/3rd001.gif?w=150&h=98>

Glavna prednost koju ima neuzemljeni sustav je da prilikom zemnog spoja, jedne od faza triju faza, sustav nastavi sa radom. Iako je sustav tada opterećeniji, ovaj sustav također limitira struju zemnog spoja zbog visoke impedancije, što nam ujedno i smanjuje mogućnost da dođe do štete na opremi te mogućnost nastanka eksplozije na mjestima gdje postoje zapaljivi plinovi [5].

Naravno ovakav način uzemljenja ima i svojih nedostataka, kao što je mogućnost pojave tranzijentnih prenapona, koji mogu dostizati vrlo velike vrijednosti [8]. Ako nemamo dobro odabranu izolaciju, sa vremenom može doći do taljenja i omogućiti put struji kroz parazitni kapacitet, što će dovesti do drugog zemnog spoja, odnosno kratkog spoja, aktiviranje zaštite od kratkog spoja i isključiti uređaj [3]. Još jedan problem je pojava fero rezonancije [7].

Kod brodova specijalne namjene, poput primjerice ratnih brodova primjena neuzemljenog sustava u zvijezda spoju ima još jednu veliku prednost. Naime, ukoliko je sustav u kvaru ili nelinearno opterećen javljaju se nesimetričnosti koje je moguće prikazati pomoću nul-sekvencijalne, pozitivno-sekvencijalne i negativno-sekvencijalne struje. Nul sekvencijalna struja ima svojstvo da se zatvara kroz zvijezdište generatora te dodatno opterećuje mrežu i stvara smetnje na niskim radio frekvencijama i sonaru. Zbog visoke impedancije neuzemljenog sustava vrijednost nul-sekvencijalne struje se smanjuje, a time i smetnje koje on može uzrokovati [13].



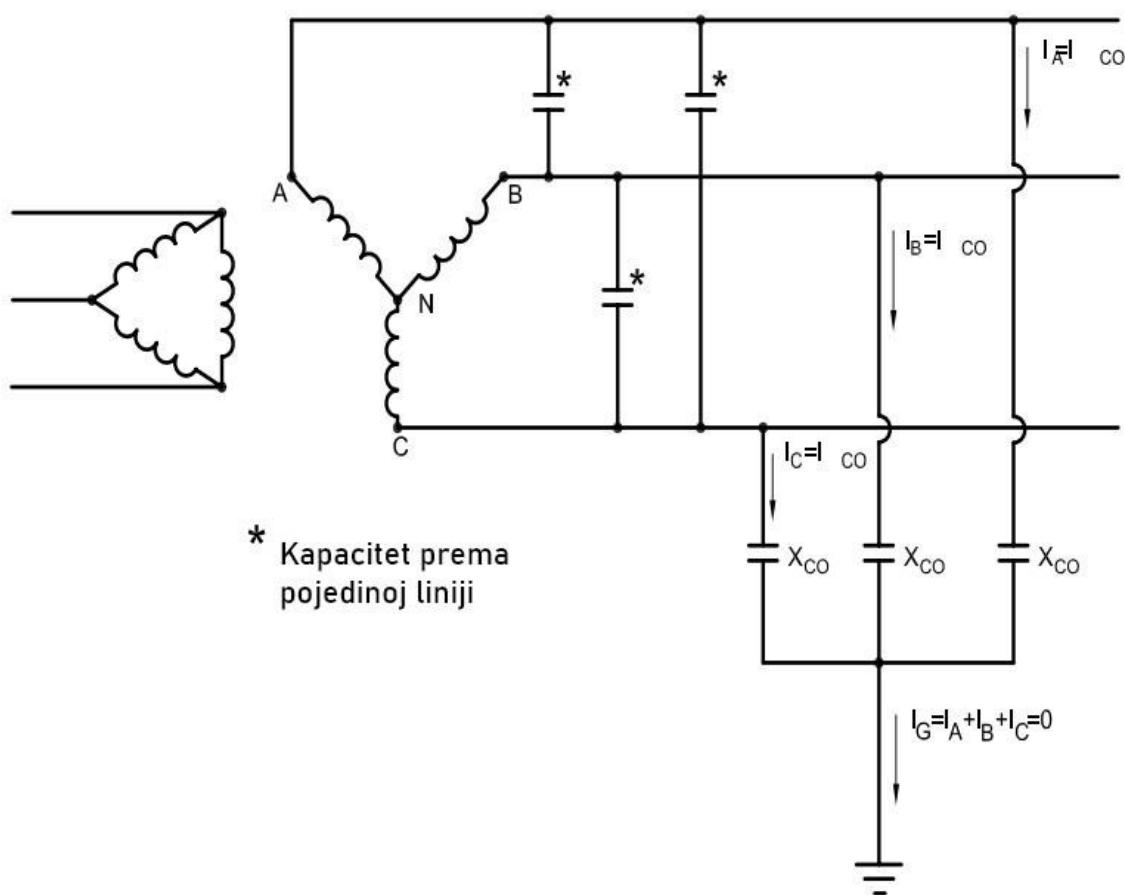
Slika 4. Nesimetrični sustav

Izvor:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e0/Unbalanced_symmetrical_components.pdf/page1-400px-Unbalanced_symmetrical_components.pdf.jpg

1.3. PARAZITNI KAPACITETI U NEUZEMLJENOM SUSTAVU

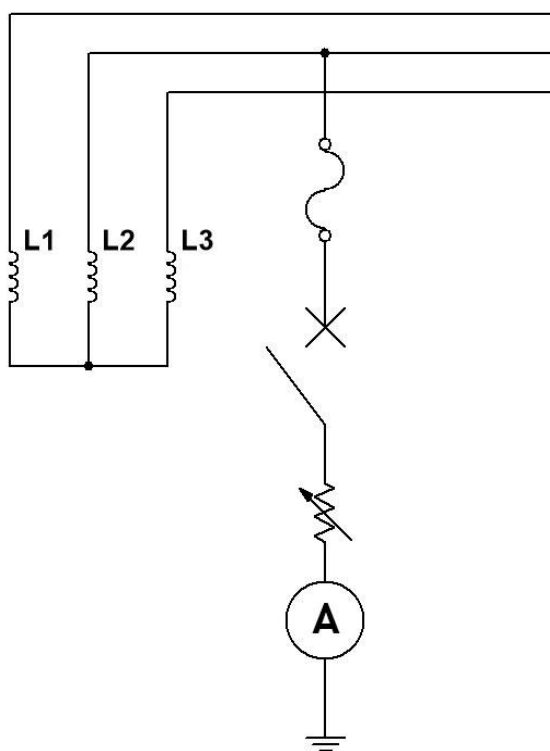
Neuzemljeni sustav nema direktno uzemljenje između pojedinih vodiča i mase. No svejedno postoji razina kapacitivne sprege između linijskih vodiča i zemlje, kao i između samih vodiča. Iako sustav ima naziv neuzemljeni sustav, on zapravo funkcionira kao kapacitivno uzemljeni sustav zbog parazitnog kapaciteta koji se javlja između vodiča i zemlje. Kapacitet između faza nije jako bitan za karakteristike uzemljenja sustava i možemo ga zanemariti radi jednostavnosti. Pretpostavljamo da je kapacitivna reaktancija ravnomjerno raspoređena prema masi X_{CO} [5].



Slika 5. Neuzemljeni sustav te kapacitivna veza između pojedinih linija te mase
Izvor: 142TM IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial
Power Systems

1.4. KAKO IZMJERITI PARAZITNI KAPACITET

Izračun parazitnog kapaciteta u sustavu nije jednostavan zbog toga što treba poznavati položaj vodiča, razmak između vodiča i zemlje, svojstvo materijala, frekvenciju, napon mreže te karakteristike medija koji se nalazi između tih dvaju točaka, a koji može varirati s obzirom na vlažnost zraka i temperaturu. Parazitni kapacitet se određuje preko struje zemnog spoja koja se može izmjeriti ili procjeniti. Prije nego se krene sa mjerenjem struje zemnog spoja, mora se isključiti napajanje, a zatim se jedna od linija poveže s masom (trupom broda) na način da se serijski spoje: brzo djelujući osigurač od 10A, strujni prekidač, reostat i ampermetar. Kada se sprovodi test napajanje mora biti uključeno. U početnom položaju, reostat mora biti podešen na maksimalnu vrijednost otpora, a prekidač mora biti otvoren. Kada se prekidač zatvori, vrijednost promjenjivog otpornika će se pomalo približavati prema nuli. U tom slučaju na ampermetru će se prikazati vrijednost struje zemnog spoja pomoću koje se može odrediti kapacitet. Pri završetku testa, reostat se vraća na maksimalnu vrijednost, a prekidač se otvara [9].

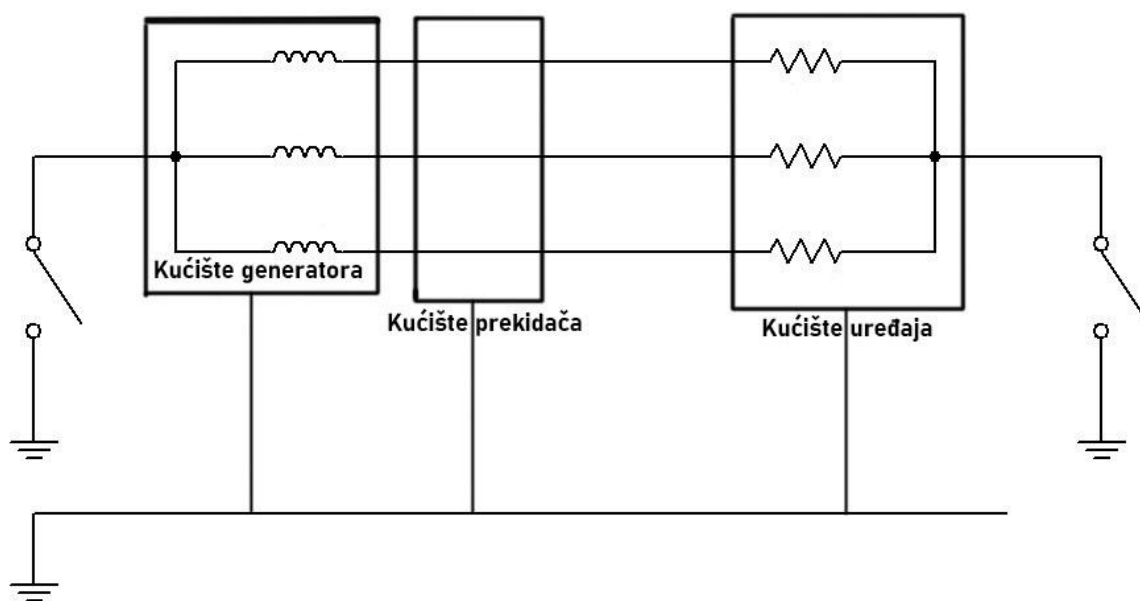


Slika 6. mjerenje struje zemnog spoja

Izvor: <https://megaresistors.com/products/neutral-grounding-resistor/capacitance-to-ground/>

1.5. RAZLIKA IZMEĐU UZEMLJENJA NEUTRALNE TOČKE I UZEMLJENJA OPREME

Postoji razlika između uzemljenja neutralne točke i uzemljenja opreme. Za to postoje dva različita imena, uzemljenje neutralne točke i uzemljenje opreme ili šasije. Uzemljenje šasije se koristi za ljudsku sigurnost, a uzemljenje neutralne točke za sigurnost sustava i željeni rad. Sustav ostaje neuzemljen dok god ne zatvorimo sklopku između neutralne točke i mase, iako su uređaji uzemljeni [13].



Slika 7. Razlika između uzemljenja neutralne točke i šasije
Izvor: *Shipboard Electrical Power Systems* by Mukund Patel

3. PONAŠANJE NEUZEMLJENOG SUSTAVA U RAZLIČITIM UVJETIMA RADA

3.1. NORMALNI UVJET

Kada je sustav u normalnim radnim uvjetima, u simetričnom stanju, međusobni fazni pomak struja zemnog spoja I_{CO} , će imati jednaku vrijednost na svakoj pojedinoj fazi i iznositi će 120° . Ujedno će se tako odnositi i fazni naponi između trupa broda (mase) i pojedine linije. Kako nemamo direktnog uzemljenja neutralne točke generatora u zvijezda spoju, svaka linija je uzemljena na masu preko parazitnog kapaciteta ako da u normalnim uvjetima vrijedi [6] [11]:

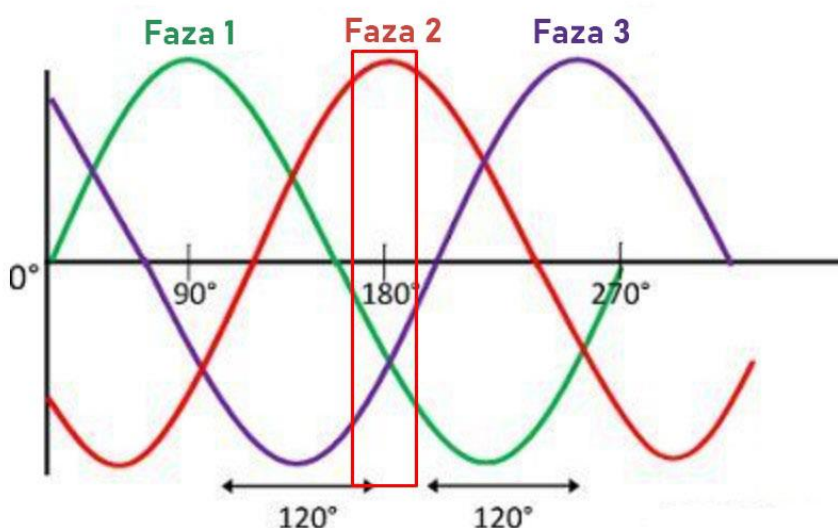
$$I_A=I_{CO}, I_B=I_{CO}, I_C=I_{CO} \quad (3.1.1)$$

Kako su sve struje jednake amplitude i fazno pomaknute, struja prema zemlji neće teći.

$$I_G=I_A+I_B+I_C=0 \quad (3.1.2)$$

Ujedno će tako i naponi prema zemlji u ukupnom zbroju biti jednaki nuli. tako da će neutralna točka zvjezdista generatora imati tu vrijednost.

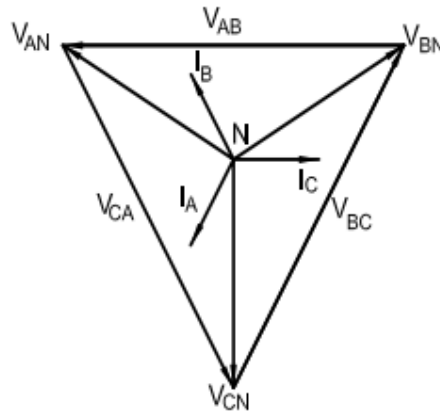
$$U_A+U_B+U_C=0 \quad (3.1.3)$$



Slika 8. Simetričnost sustava

Izvor: <https://circuitglobe.com/wp-content/uploads/2017/03/wave-shape-three-phase-systems.jpg>

Fazne pomake između struja i napona se može prikazati vektorski. Gdje su fazni naponi pomaknuti jedan prema drugome za 120° stupnjeva. Fazne struje prethode naponu za 90° stupnjeva te su također pomaknute za 120° stupnjeva. One prethode naponu zbog djelovanja parazitnih kapaciteta. Zvezdište generatora, tj. neutralna točka se postavlja u sjecište svih vektora [10].



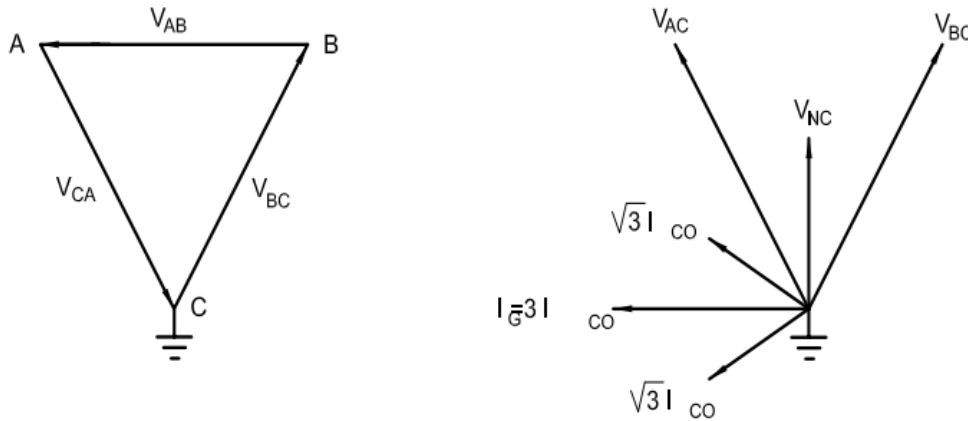
Slika 9. vektorski prikaz faznih i linijskih napona u normalnom radu

Izvor: 142™ IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems

3.2. SPOJ S MASOM

Ukoliko dođe do spoja s masom (trupom broda) jedne od faza, sustav više neće raditi u normalnom stanju. Npr. ako dođe do spoja faze C sa masom, omogućiti će se put struji I_{CO} da se zatvori preko parazitnog kapaciteta, a ta struja ujedno i ovisi o samom kapacitetu. Nema više razlike potencijala između faze C i mase, jer će se masa nalaziti na toj vrijednosti napona, a to za posljedicu ima povećanje napona na preostalim fazama za $\sqrt{3}$ puta. Kako se masa nalazi na potencijalu faze C, neutralna točka neće više iznositi 0 V tako da se faze sada prema neutralnoj točki odnose kao linijski naponi. Naponi međusobno više neće biti pomaknuti za 120° stupnjeva, nego za 60° . Naponi između dvaju faza koje nastavljaju sa radom, faze C i faze A će iznositi $\sqrt{3} \cdot U_A = U_{AC}$ linijski napon. Napon između faze C i faze B će iznositi $\sqrt{3} \cdot U_B = U_{BC}$ linijski napon. Struje će također međusobno biti pomaknute za 60° stupnjeva, a ne više za 120° stupnjeva te će se isto tako struje povećati za $\sqrt{3}$ puta u odnosu na struje koje su tekle kroz parazitni kapacitet prije nastanka zemnog spoja. Odnos između napona i struje U_B i $I_B = (\sqrt{3} \cdot I_{CO})$, kao i U_A i $I_A = (\sqrt{3} \cdot I_{CO})$ će još uvijek ostati 90° stupnjeva. Fazni pomak

između napona U_C (potencijal neutralne točke) i struje zemnog spoja I_C će iznositi 90° stupnjeva, no ovdje je razlika što struja nije za $\sqrt{3}$ puta veća nego 3 puta [5] [10].



Slika 10. Vektorski prikaz sustava u zemnom spoju
 Izvor: 142™ IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems

Slika sa desne strane se dobiva jednostavnom translacijom vektora u zajedničku točku, a u ovom slučaju to je masa. Ovakav sustav i dalje nastavlja sa radom, zbog toga što je trokut odnosa napona i dalje ostao isti kao i u normalnom radu sustava samo što je sada sustav za $\sqrt{3}$ puta više opterećeniji. Iz toga razloga je potrebna odgovarajuća izolacija vodova da ne bi došlo do pregrijavanja ili do moguće pojave još jednog spoja sa masom. Dva spoja sa masom bi označavala direktan kratki spoj u sustavu, što bi dovelo do aktiviranja zaštite i izbacivanja odgovarajućeg prekidača.

3.3. IZOLACIJA ZA NEUZEMLJENI SUSTAV

Za razliku od uzemljenog sustava, kod neuzemljenog sustava izolacijski nivo kabela treba biti veći zbog toga što, je sustav kada dođe do zemnog spoja opterećeniji za $\sqrt{3}$ puta. Oznake izolacijskog napona za neuzemljene sustave obično se izražavaju kao postotak napona sustava. Specifične postotne vrijednosti mogu varirati ovisno o standardima i smjernicama koje se slijede. Ovdje su neke najčešće korištene vrijednosti izolacijskog napona za neuzemljene sustave:

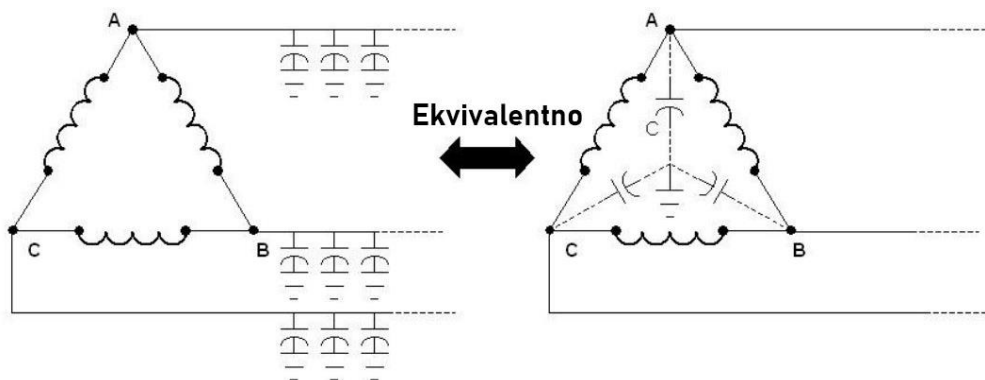
- Ocjena izolacije od 175% nazivnog napona, obično se koristi za privremene prenapone ili prijelazne napone koji se mogu pojaviti u sustavu. Ova viša ocjena izolacije osigurava da izolacija može izdržati skokove ili udare napona bez kvara.
- Ocjena izolacije od 200 % nazivnog napona, često se koristi za dugotrajne prenapone. Omogućuje dodatnu marginu sigurnosti za rukovanje trajnim prenaponima koji mogu nastati zbog kvarova ili drugih nenormalnih uvjeta [3].

Nekakvo pravilo bi bilo da bi neuzemljeni kabel od 6.6 kV odgovarao uzemljenom kabelu od 11 kV. Odnosno 6.6/6.6 kV neuzemljenog kabela, možemo koristiti za 6.6/11 kV uzemljenog kabela. U_0/U označava naponsku klasu gdje U_0 označava fazni napon, a U linijski napon. Za neuzemljene sustave vrijedi kV/kV , a za uzemljene vrijedi $kV/1.75*kV$, odnosno $kV/\sqrt{3}*kV$. U elektroenergetskim sustavima se često vrijednost $\sqrt{3}$ uzima kao 1.75 [3].

3.4. TRANZIJENTNI PRENAPONI

Jedan od problema kod zemnog spoja kod ovakvog sustava je da ukoliko se zemni spoj ne ukloni čim prije, naponi na preostale dvije faze koje nastavljaju sa radom, mogu biti višestruko veći. Ne samo $\sqrt{3}$ puta, nego već i do šest-sedam puta, što može opasno povećati mogućnost proboja izolacije u jednoj od preostalih dviju faza, a što može naposljetku dovesti do još jednog zemnog spoja, koji će rezultirati kratkim spojem te gašenjem kompletnog sustava.

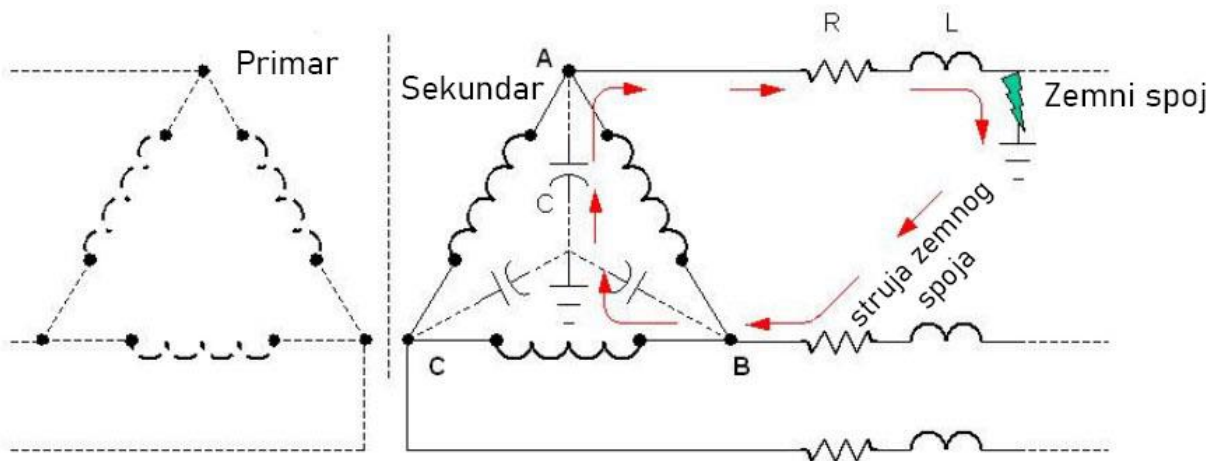
Schema neuzemljenog sustavu u delta spoju i prilike koje dovode do pojave tranzijentnih prenapona prikazane su na slikama 11 i 12 [8].



Slika 11. Neuzemljeni sustav u delta spoju

Izvor: *Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults IEEE*

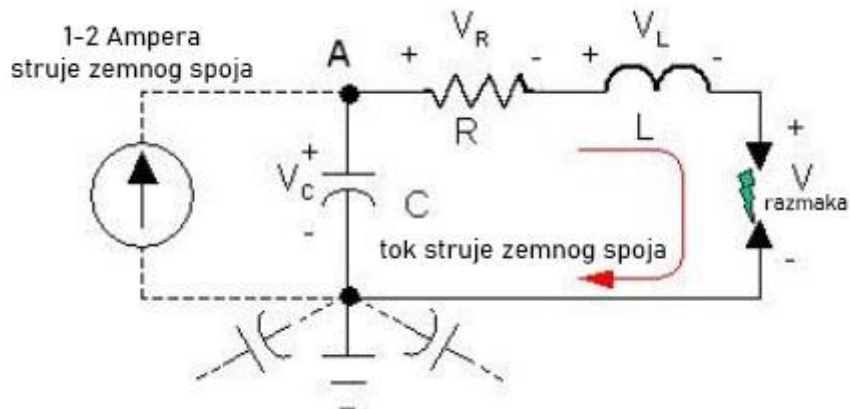
Put struje kada dođe do zemnog spoja npr. u fazi A, prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 12. put struje zemnog spoja

Izvor: *Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults*

Svaki vodič ne može biti savršen već mora imati nekakvu vrijednost otpora R, induktiviteta L i kapaciteta C. Za potrebe simulacije odabran je napon mreže od 480 Vrms, 60 Hz i takva vrijednost parazitnog kapaciteta biti takva da struja zemnog spoja iznosi 1 A. Osim o parazitnom kapacitetu struja zemnog spoja također ovisi o duljini kabela, parazitnom kablaskoj izolaciji, razmaku između kabela, itd. [8].



Slika 13. ekvivalentni prikaz toka struje zemnog spoja

Izvor: *Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults*

Napon koji se nalazi na kondenzatoru C, može se izračunati pomoću Ohmova zakona

$$E = I \cdot Z = I \cdot (R + jX_C) = I \cdot R + j \cdot I \cdot X_C \quad (3.2.3)$$

gdje je:

E – Napon [V]

I – Struja [A]

Z – Impedancija [Ω]

j – imaginarna jedinica ($\sqrt{-1}$, fazni pomak od 90 stupnjeva)

X_C – kapacitivna reaktancija [Ω]

Za potrebe simulacije X_C se dobiva preko formule:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f} \quad (3.2.4)$$

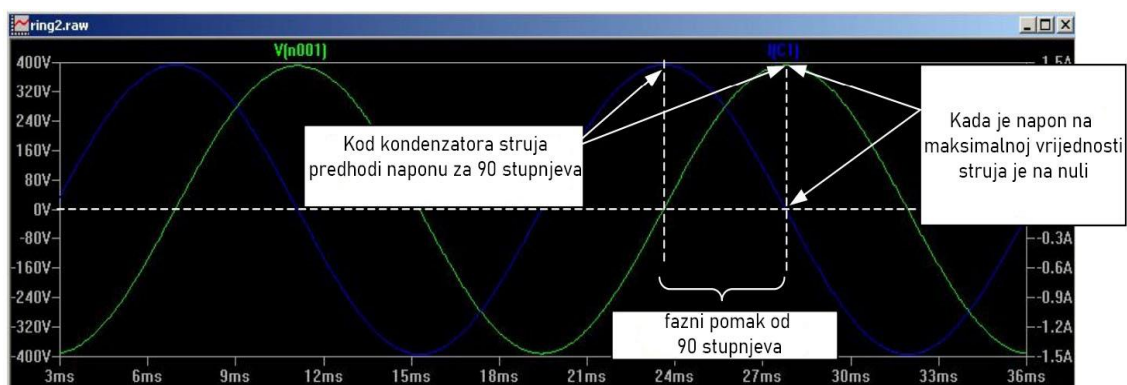
f – frekvencija mreže

Za linijski napon 480 V fazni napon iznosi 277 V. Poznavanjem tih parametara može se izračunati X_C . Zbog jako visoke otpornosti izolacije, može se reći da je impedancija od linije prema zemlji skroz kapacitivnog karaktera. Tako da uvrštavanjem parametara u gore navedenu formulu:

$$277 = IR + jIX_C \quad (3.2.5)$$

$$277 = jIX_C = j \frac{1}{2\pi fC} = j \frac{1}{377C}$$

$$C = \frac{1}{277 \cdot 377} = 9.57 \mu F \approx 10 \mu F$$



Slika 14. Odnos napona i struje kod čistog kapaciteta

Izvor: *Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults*

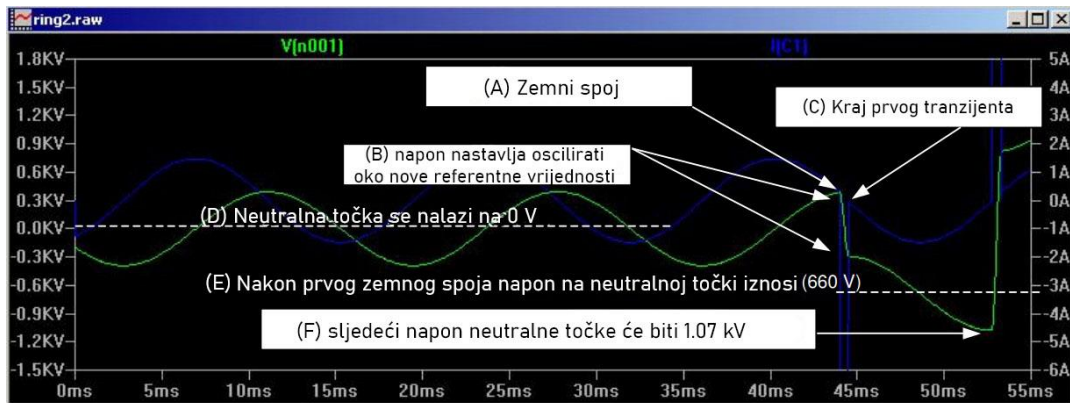
Kada dođe do zemnog spoja kapacitet se isprazni kroz induktivitet kruga do trenutka kada je struja kroz paraziti kapacitet 0 A, odnosno kada napon ide prema maksimalnoj vrijednosti.

Taj se induktivitet suprotstavlja promjenama struje, kao rezultat, napon preko kondenzatora pada na nulu, a zatim počinje rasti prema suprotnom polaritetu.

$$i = -C * \frac{du}{dt} \quad (3.2.6)$$

$$u = -L \frac{di}{dt} \quad (3.2.7)$$

Ispred C i L može stajati znak minus, ukoliko struja ili napon sa više razine padaju prema nižoj što pokazuje sljedeća slika gdje je prvi tranzijent struje negativan, te će on rezultirati negativnim naponom. Tranzijente pojave se dešavaju sve do trenutka, dok više nemamo pojave električnog luka [8].



Slika 15. Trenutak pražnjenja kondenzatora

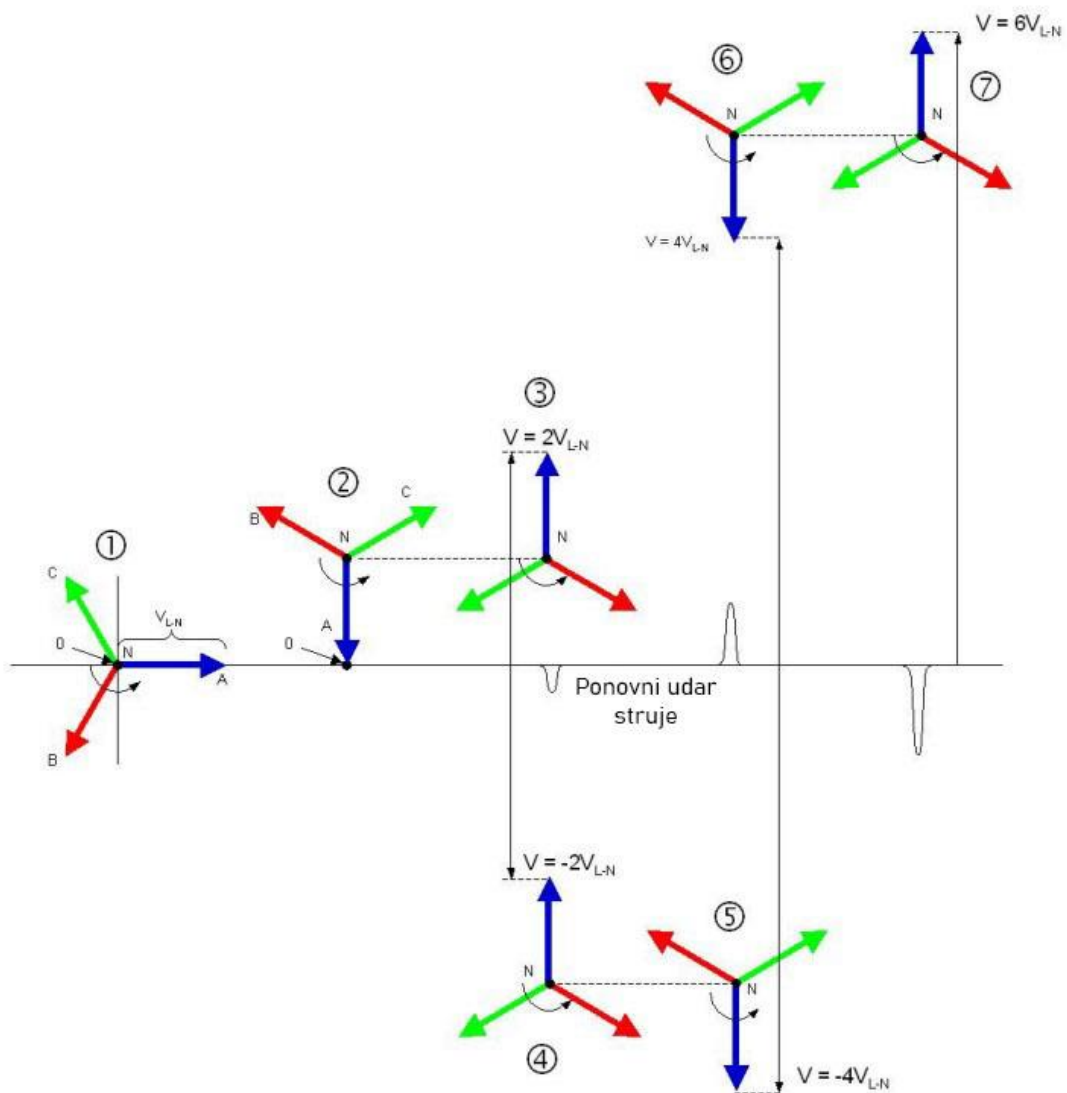
Izvor: *Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults*

Sve daljnjim i daljnjim punjenjima i pražnjenjima kondenzatora, koji će stvarati struju pražnjenja će zbog induktivnosti koja se nalazi u mreži dostizati vrlo visoke napone, koji će kod ove simulacije dostizati čak i do 6 puta više napone, od nazivnih napona, to će naposljedku dovesti do pregaranja izolacije ili uređaja [8].

Sljedeća slika prikazuje:

- Slučaj 1: kada sustav nije u kvaru imamo fazne napone i linijske napone.
- Slučaj 2: kada se desi prvi zemni spoj više nemamo fazne napone, već samo linijske.
- Slučaj 3: U trenutku kada struja pada prema nuli (napon je na maksimalnoj vrijednosti) dešava se električni luk koji će stvoriti tranzijent, napon je u tom trenutku na 2 puta višoj razini od početnog faznog napona.

- Slučaj 4: fazni vektor A, pada na -2 puta viši napon od početnog, upravo zbog toga što je tranzijent negativne vrijednosti, imamo znak minus jer tranzijent struje pada sa više vrijednosti na manju $d(u_2-u_1)$.
- Slučaj 5: fazni vektor dostiže maksimalnu negativnu vrijednost napona, okidanje se opet dešava, no sada će napon za slučaj 6 biti pozitivan jer struja ide od niže vrijednosti prema većoj.
- Slučaj 7: nema više pojava električnog luka te se neutralna točka nalazi na vrlo visokoj vrijednosti napona

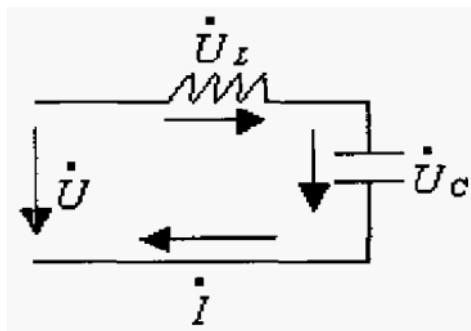


Slika 16. vektorski dijagram ponašanja sustava, zbog tranzijentnih pojava
 Izvor: *Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults*

3.5. POJAVA FEROREZONANCIJE U NEUZEMLJENOM SUSTAVU KOD SPOJA S MASOM

3.5.1. FEROREZONANCIJA

Ferorezonancija je pojava koja se može pojaviti u električnim sustavima koji uključuju transformatore i feromagnetske materijale, a može nastati kao posljedica pojave tranzijentnih prenapona kod spoja s masom u neuzemljenim sustavima. Karakterizira ju interakcija između nelinearnih karakteristika magnetiziranja transformatora te kapaciteta i induktiviteta sustava. Kao posljedica toga može doći do visokih vrijednosti napona i smetnji u sustavu [7].

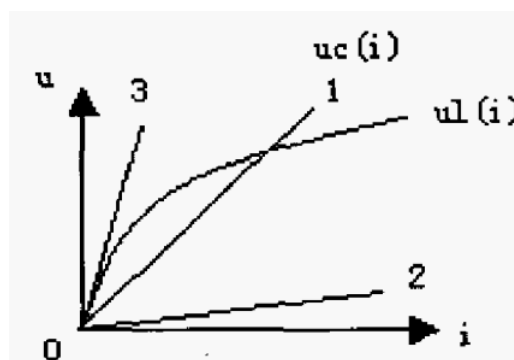


Slika 17. Jednofazni ferorezonantni krug

Izvor: *Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System*

Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu

Rezonantno područje može biti prikazano krivuljom nelinearne induktivne reaktancije ($u_l(i)$). Kada se ta krivulja u nekom trenutku presječe sa krivuljom koja predstavlja kapacitivnu reaktanciju ($u_c(i)$) dolazi do rezonancije [7].



Slika 18. Područje ferorezonancije

Izvor: *Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System*

Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu

Da bi uopće došlo do pojave ferorezonancije, potrebno je proizvesti nekakvo pobuđeno stanje primjerice impulsnim naponom koji se može javiti prilikom vraćanja sustava u normalno stanje nakon zemnog spoja jedne od faza. Taj impulsni napon će dovesti do toga da jezgra transformatora ode u zasićenje i mogućnosti pojave situacije prikazane na slici 18.

Oscilacije koje se javljaju kod ferorezonancije ovise o duljini prijenosnog voda, broju vodova, parazitnom kapacitetu te naponu. Kao primjer, na slici 19 dani su rezultati simulacije ferorezonancije za 10kv mrežu za različite duljine i broj prijenosnih vodova.

Broj prijenosnih vodova	Ukupna dužina voda u kilometrima	Oscilacijski mod
1	2.25	Osciliranje trostruke frekvencije
2	17.25	Osciliranje osnovne frekvencije
3	28.05	Osciliranje na polovini osnovne frekvencije
4	51.3	Osciliranje na polovini osnovne frekvencije
5	76.8	Osciliranje na polovini osnovne frekvencije
6	148.8	Nema ferorezonancije

Slika 19.

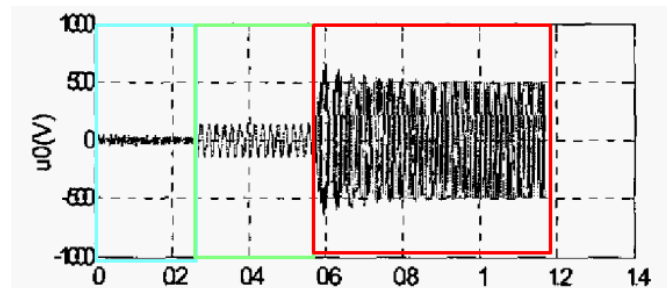
Simulacija izvedena na 10kV mreže

Izvor: Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System

Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu

Oscilacije ujedno ovise i o tome pod kojim faznim kutom napona se sustav vraća u normalni režim rada. Plavi kvadratić prikazuje trenutak u normalnom stanju, zeleni trenutak pojave zemnog spoja, a crveni odgovara povratku sustava u normalno stanje.

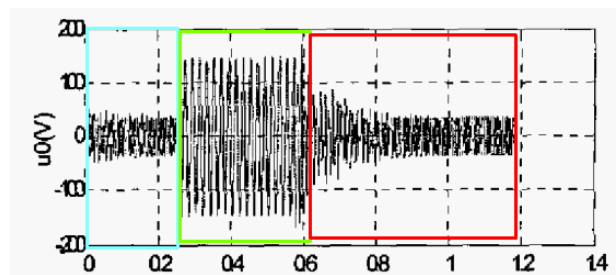
Na slikama 20 do 25 prikazani su primjeri oscilacija za duljinu kablova od jedan kilometar. Na ordinati je dana vrijednost napona neutralne točke (nul-voda) (U_0), a na apscisi vrijeme u sekundama (t) [7].



Slika 20. Vraćanje sustava pod faznim kutom od 72° stupnja

Izvor: *Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System*

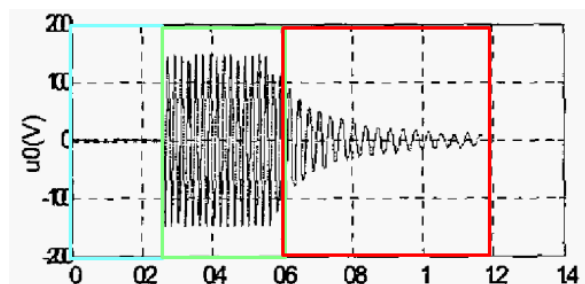
Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu



Slika 21. Vraćanje sustava pod faznim kutom od 216° stupnjeva

Izvor: *Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System*

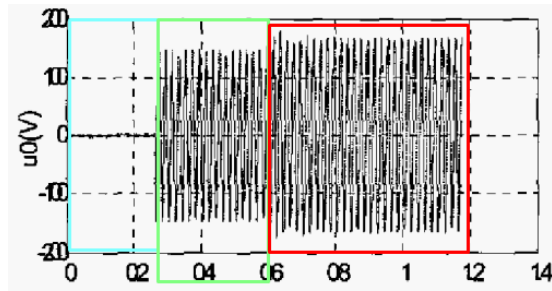
Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu



Slika 22. vraćanja sustava pod faznim kutom od 90° stupnjeva

Izvor: *Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System*

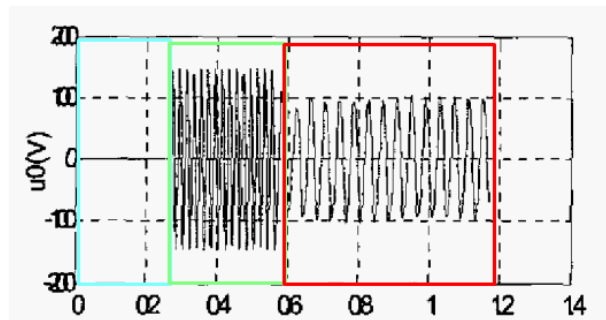
Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu



Slika 23. vraćanja sustava pod faznim kutom od 180° stupnjeva

Izvor: Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System

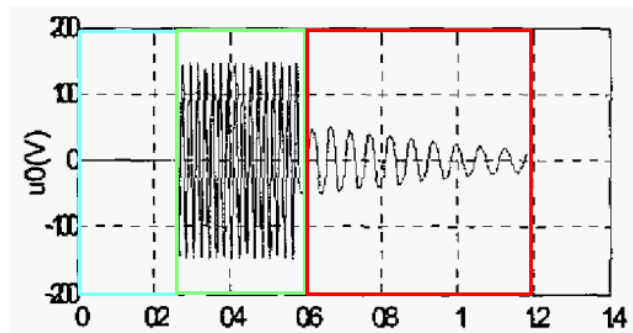
Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu



Slika 24. vraćanja sustava pod faznim kutom od 36° stupnjeva

Izvor: Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System

Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu



Slika 25. vraćanje sustava pod faznim kutom od 270° stupnjeva

Izvor: Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System

Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu

4. DETEKCIJA STRUJE ZEMNOG SPOJA

Jedan od glavnih problema kod neuzemljenog sustava je detekcija zemnog spoja te otklanjanje istog. Najjednostavniji načini detekcije zemnog spoja je su primjena voltmetra, zemno spojnih lampi i naponski osjetljivih releja. Prednost tih metoda je jednostavna implementacija i niska cijena a nedostatak je taj što se ne može direktno odrediti lokacija gdje je točno u sustavu došlo do zemnog spoja [4].

4.1. LOKALIZACIJA KVARA

Postoje dvije metode lokalizacije kvara. Prva je izolacija pojedinog dijela strujnog kruga koja se izvodi na način da se prekine napajanje prema manjim dijelovima sustava, zatim prema pojedinoj grani, dok kvar ne nestane. Za takav način je potrebno imati više osoba koje će raditi na sustavu te moraju dobro poznavati elektroenergetski sustav, no to zahtjeva dosta vremena. Druga metoda je ubacivanjem signala u mrežu te njegovim detektiranjem. Signal se ubacuje između faze u kvaru i mase preko odgovarajućeg elektroničkog generatora impulsa te se taj signal detektira automatski ili ručnim detektorom [4].



Slika 26. Uređaji koji se koriste za lokalizaciju kvara

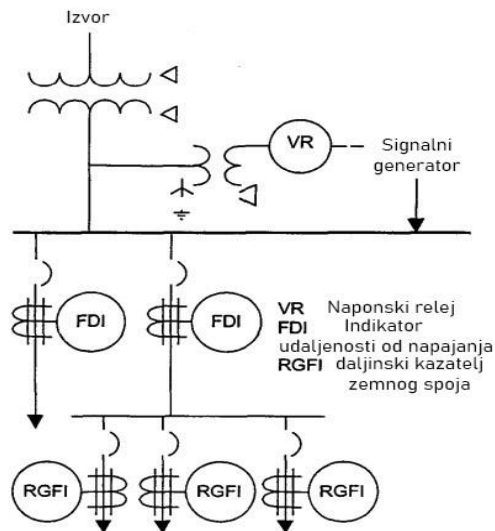
Izvor: <https://www.benderinc.com/products/ground-fault-location-ungrounded/>

4.2. LOCIRANJE KVARA

Točno lociranje kvara nam je potrebno jer lokaliziranje kvara ne uzima u obzir povremene uvjete kvara, više kvarova na fazi, invertirane zemne spojeve (mogu nastati

iskrenja, i prenaponi, jer kod naponskog trokuta faza u kvaru nije točno na potencijalu zemlje).

Za određivanje točnog mjesta kvara je potrebna nulsekvencijalna struja, nulsekvencijalni napon i nulsekvencijalna impedancija te će se proračunski dobiti udaljenost od mjesta kvara. Takav sustav se sastoji od digitalnog releja, nulsekvencijalnog signalnog generatora i daljinskih indikatora zemnog spoja.



Slika 27. Točne detekcije zemnog spoja

Izvor: Baldwin, Thomas, et al. "Fault locating in ungrounded and high-resistance grounded systems." *IEEE Transactions on Industry Applications* 37.4 (2001): 1152-1159.

Digitalni relej javlja da li se radi o zemnom ili invertiranom zemnom spoju te na kojoj fazi je kvar. Ukoliko se radi o zemnom spoju na nekoj određenoj fazi tada vrijedi:

$$V_{LN} < \alpha |V_{LL}| \quad (4.2.1)$$

$$0 < \alpha < 1/\sqrt{3} \quad (4.2.2)$$

A ako se radi o invertiranom zemnom spoju onda za napon na jednoj od preostalih dviju faza vrijedi:

$$V_{LN} > \beta |V_{LL}| \quad (4.2.3)$$

$$1 < \beta < 1.5 \quad (4.2.4)$$

Kada je zemni spoj detektiran, digitalni relej šalje signal nulsekvencijalnom generatoru da potjera struju u onom djelu kruga koji je u zemnom spoju. Ta struja ne smije biti na istoj

frekvenciji kao i mreža, nego između 10 ili 50 puta veća od nazivne frekvencije, a ujedno se moraju i izbjegavati neparne vrijednosti harmonika, jer je onda teže pronaći gdje se kvar nalazi. Strujno naponski pretvarači omogućuju releju da izračunaju impedanciju, od početka mreže do točke kvara te ujedno na kojem polju je kvar u sustavu. Kada se kvar pronađe generator prestaje odašiljati signal, a relej nastavlja motriti mjesto gdje se kvar desio dok se ne otkloni. U većim industrijskim postrojenjima, ili većim brodovima gdje imamo puno pojedinih polja (opskrbljivača) u sustavu, teže je pronaći gdje je točno kvar, u kojem polju, kojoj grani ili trošilu, zato bi bilo dobro na svakoj pojedinoj grani ili trošilu postaviti daljinski indikator zemljospojnih kvarova koji detektira kuda će protjecati signal kojeg odašilje nulsekvencijalni generator i prikazuje grešku na odgovarajućem zaslonu [4]. Također ova metoda omogućuje kontinuirano praćenje otpora izolacije preko IMD (Insulation monitoring device) uređaja [11].



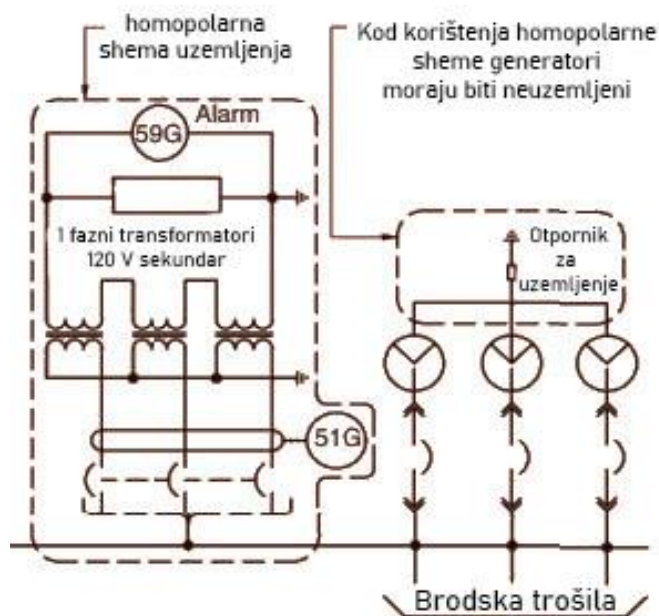
Slika 28. IMD Insulation monitoring device

Izvor: <https://www.bender.de/en/products/insulation-monitoring/>

5. SPAJANJE SUSTAVA S KOPNENIM PRIKLJUČKOM

Dok je brod u luci jedan od glavnih razloga zašto koristi kopneno napajanje je da se smanje utjecaji štetnih emisija sa broda i buka. Često je i ekonomski isplativije koristiti električnu energiju s kopna nego ju proizvoditi pomoću brodskih generatora. Kada se brod priključuje na kopneno napajanje, bitno je da su napon i frekvencija kopnene i brodske mreže usklađeni.

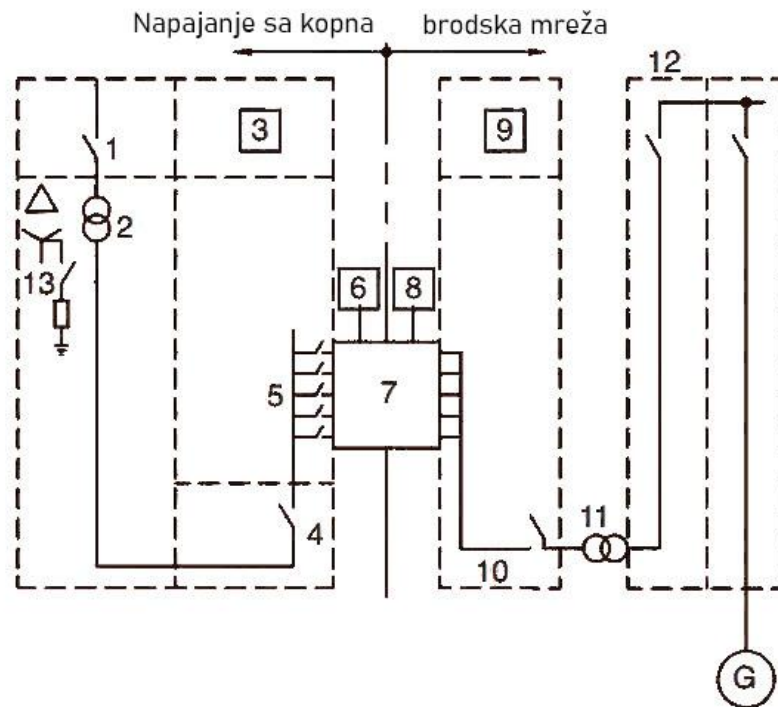
Prilikom spajanja broda na kopneno napajanje, nije poželjno da su kopneno napajanje i brodsko budu neuzemljeni, zbog mogućih pojava tranzijentnih napona te opasnosti za osoblje na brodu. Zbog toga se koristi kopneno napajanje koje je uzemljeno preko neutralnog otpornika, dok ako brod koristi neuzemljeni sustav mora koristiti izolacijski transformator koji ujedno i štiti od nastanka galvanske korozije, koja može nastati zbog toka zemne struje ako su potencijali mase obale i trupa broda različiti. Može se koristiti i neuzemljeni sustav na jednoj i drugoj strani mreže no tada je potrebno koristiti homopolarnu shemu uzemljenja spojena na sabirnice kako bi se mogao detektirati zemni spoj i omogućila dojava putem alarma bez iskapčanja brodskih generatora. U slučaju zemnog spoja alarm javlja grešku.



Slika 29. Homopolarna shema uzemljenja

Izvor: *Low-Voltage Shore Connection Power Systems* by Dev Paul, Vahik Haddadian, Ben Chavdarian, and Kevin Peterson

No, kada se spajamo na kopneno napajanje uglavnom se mora zatražiti (ukoliko to nemamo već na brodu) od strane luke, da se na brod stavi izolacijski transformator. Izolacijski transformatori pružaju galvansku izolaciju između električnog sustava broda i električne mreže s kopna. Ta izolacija pomaže u sprječavanju električnih kvarova ili poremećaja na jednom sustavu da utječu na drugi. Osigurava da se problemi unutar električnog sustava broda, poput kvarova uzemljenja, ne prenose na električnu mrežu s kopna i obrnuto. Također, poboljšavaju sigurnost smanjujući rizik od opasnosti od električnog udara. Namotaj izolacijskog transformatora koji se spaja s brodskim sustavom ostaje neuzemljen, dok se namotaj na kopnenoj strani uzemljuje.



Slika 30. Priključenja broda na kopneno napajanje

Izvor: Low-Voltage Shore Connection Power Systems by Dev Paul, Vahik Haddadian,

Ben Chavdarian, and Kevin Peterson

Komponente standardnog niskonaponskog kopnenog priključka za brodove prikazanog na slici 30 označene su brojevima kako slijedi:

1. Primarni prekidač
2. Transformator na trafostanici
3. Niskonaponska rasklopna ploča

4. Glavni prekidač
5. Prekidači pojedinih linija
6. Napojni vodovi za utičnice
7. Priključno sklopovlje
8. Utikač s fleksibilnim kabelom
9. Brodski kopneni priključak
10. Prekidač na brodskoj strani
11. Izolacijski transformator (opcionalno)
12. Sinkronizacijski prekidač
13. Prekidač za spajanje/odspajanje otpornika za uzemljenje

Kablovi koji se koriste za priključenje moraju biti projektirani da izdrže nazivnu struju, te kratkotrajno struju kratkog spoja. Primjerice kablovi za spajanje brodova s instaliranom snagom do 1,5 kVA, moraju moći izdržati napon od 1000 Vac i struje 500A te kratkotrajno i struje kratkog spoja do 16kA.

Kod ovakvog sustava problem se može desiti kod sinkronizacije broskog i kopnenog napajanja. Ako je brodski generator uzemljen preko vlastitog neutralnog otpornika, a kopno preko vlasitog, tada ukoliko dođe tada do zemnog spoja na bilo kojem mjestu struja zemnog spoja se može podijeliti te teći kroz dva različita uzemljenja. To znači da će se struja zemnog spoja još više povećati, jer sada oba izvora napajaju mjesto gdje je došlo do zemnog spoja. Isto to se može desiti i kada koristimo homopolarnu shemu uzemljenja.

$$I_{GF} = I_{Requivalent}^2 + (I_C)^2 \quad (5.2)$$

$$I_{Requivalent} = (E_{LN}) \left(\frac{(R_{shore}) + (R_{ship})}{(R_{shore}) * (R_{ship})} \right) \quad (5.3)$$

R_{shore} – vrijednost neutralnog otpornika na kopnu u amperima

R_{ship} – vrijednost neutralnog otpornika na brodu u amperima

Kod neuzemljenog sustava stvar je slična samo sada se neće gledati vrijednost struje kroz neuzemljeni otpornik, nego vrijednost struje kroz parazitni kapacitet I_C [2].



Slika 31. Izolacijski transformator

Izvor: <https://www.boatus.com/expert-advice/expert-advice-archive/2015/july/isolation-transformers>

6. PRAVILA REGISTRA

Pravila registra nalažu da trup broda mora biti izveden na način da struja zemnog spoja ni u kojem slučaju ne smije poteći kroz dio broda gdje se nalaze zapaljivi plinovi. Kućišta uređaja moraju biti uzemljena, jer u slučaju zemnog spoja mogu postati vodljiva. Kod kablova pleteni dio odnosno oklop mora biti uzemljen na početku i na kraju. Ukoliko je samo jedan kraj uzemljen, drugi kraj treba izolirati na pravilan način.

Ukoliko je sustav uzemljen ili neuzemljen uređaj mora konstantno motriti otpor izolacije pojedine linije prema trupu broda. Kod pada otpora izolacije ispod dozvoljene vrijednosti mora se aktivirati zvučni i svjetlosni alarm.

Kod uzemljenog sustava na brodu prekidač automatski prekida rad, ako vrijednost struje zemnog spoja pređe minimalnu dozvoljenu vrijednost ili jednu trećinu pune vrijednosti struje zemnog spoja. Kod neuzemljenog sustava i sustava uzemljenog preko velikog otpora dolazi do pojave alarma i sustav normalno mora nastaviti s radom.

Registar ne propisuje koja boja kabela se mora koristiti za uzemljavanje, no za uzemljavanje kućišta (radi sigurnosti osoblja) može se koristiti samo žuto/zelena boja.

Kod neuzemljenog sustava naponi za testiranje uređaja poput transformatora, elektromotora, kabela, sklopnih aprata i osigurača, mogu biti vrijednosti 7.5 puta više od normalne vrijednosti faznoga napona zbog provjere kako će se ponašati uređaji u slučaju pojave tranzijentnih napona.

Svi bakreni vodiči koji se koriste za uzemljenje moraju imati odgovarajući poprečni presjek da bi gustoća struje bila manja od 150 A/mm^2 kod maksimalne struje zemnog spoja. Udaljenosti između linija različitih potencijala i između linija i uzemljenog kućišta za različite naponske razine mora biti:

- 250 V minimalno 15 mm,
- 690 minimalno 20 mm
- 1000 V minimalno 25 mm,
- 3,3kV minimalno 55 mm,
- 6,6 kV minimalno 90 mm,
- 11kV minimalno 120 mm,

- 15kV minimalno 160 mm.

Minimalna vrijednost otpora izolacije iznosi za nazivne napone ispod 1 kV 1 M Ω . A za napone iznad 1kV. $(U_n/1000)+1$ u M Ω -ima. Kabeli moraju biti odabrani tako da izdrže linijski napon u slučaju zemnog spoja. Uređaji koji se napajaju sa naponom manjim od 50 V DC ne moraju biti uzemljeni [14] [15].

7. OSTALI NAČINI SPAJANJA UZEMLJENJA

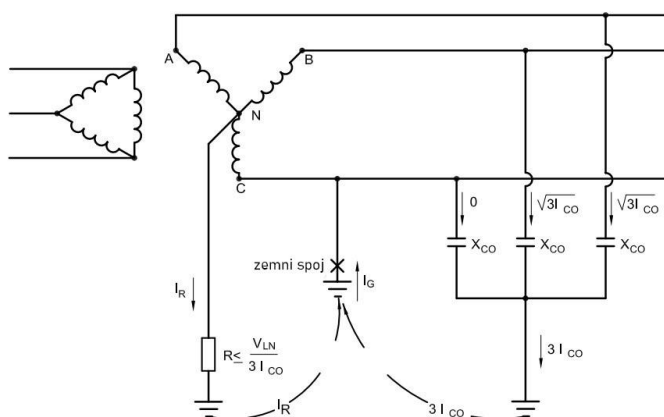
Pored neuzemljenog sustava postoje tu još drugi sustavi uzemljenja poput direktnog uzemljenja zvjezdišta no on se ne primjenjuje kod brodova jer su struje zemnog spoja vrlo velike te bi u slučaju nastanka zemnog spoja zaštita isključila generatore iz rada. Zato je poželjnije koristiti uzemljavanje preko otpornika (visokog otpora). Postoji još uzemljavanje preko zavojnice no taj način se baš ne izvodi na brodovima zbog svoje složenosti te zahtjevu za dosta više prostora, koji je na brodu dosta bitan. Također ukoliko se koristi velika vrijednost induktivne reaktancije za limitiranje struje zemnog spoja tranzijentni naponi su još i viši nego u neuzemljenom sustavu [6].

7.1. UZEMLJAVANJE PREKO OTPORNIKA VISOKOG OTPORA

Kod ovakvog sustava zvjezdište generatora se spaja preko otpornika sa trupom broda te se tako osigurava direktno uzemljenje, preko otpornika koji služi da limitira struju zemnog spoja na (do 20 A) da bi sustav mogao normalno nastaviti sa radom. Smanjuje se i tranzijentni naponi koji mogu iznositi do maksimalno 250% od normalnog faznog napona. U slučaju zemnog spoja struja neće kao kod neuzemljenog sustava iznositi samo $3I_{CO}$, već se mora zbrajati sa strujom vrijednosti neutralnog otpornika u amperima [1].

$$I_G = I_R + 3I_{CO} \quad (20)$$

$$R \leq \frac{V_{LN}}{3I_{CO}} = 3I_{CO} = I_R \quad (21)$$



Slika 32. Uzemljavanje zvjezdišta preko otpornika

Izvor: *Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, 142TM IEEE

8. ZAKLJUČAK

U završnom radu razmatrane su i objašnjene prilike u neuzemljenom električnom sustavu. Objasnjeno je i zašto se takav sustav primjenjuje te njegove prednosti i nedostaci. Iako nema direktne poveznice između zvjezdišta generatora i trupa broda zbog utjecaja parazitnih kapaciteta oni se nalaze na jednakim potencijalima. Kod pojave spoja s masom sustav više nije u normalnim uvjetima te se odnosi napona mijenjaju zbog čega je potrebna odgovarajuća ocjena izolacije da izdrži povećane napone kada je jedna od faza sustava u zemnom spoju. Objasnjena je i pojava ferorezonancije do koje može doći prilikom spoja s masom u neuzemljenom sustavu gdje su prisutna trošila poput transformatora i elektromotora (što je na brodovima gotovo pravilo). Nadalje, u radu su navedena osnovna pravila registra koja se odnose na električnu opremu u neuzemljenom sustavu, maksimalne vrijednosti struja zemnog spoja i načine uzemljavanja kućišta uređaja. Konačno, obrađena je problematika spajanja brodskog neuzemljenog sustava na kopнено napajanje. Može se zaključiti da je unatoč nekim svojim nedostacima neuzemljeni električni sustav predstavlja najbolje rješenje za brodske električne mreže jer omogućuje rad sustava prilikom zemnog spoja jedna faze. Kod ovog sustava zbog vrlo niske struje zemnog spoja te zbog toga što sustav nastavlja dalje sa radom kada dođe do zemnog spoja, vrlo je važno konstantno motrenje otpora izolacije.

9. POPIS SLIKA

Slika 1. Zvijezda spoj	2
Slika 3. Treća šina i tračnica	3
Slika 4. Nesimetrični sustav	4
Slika 5. Neuzemljeni sustav te kapacitivna veza između pojedinih linija te mase	5
Slika 6. Mjerenje struje zemnog spoja	6
Slika 7. Razlika između uzemljenja neutralne točke i šasije	7
Slika 8. Simetričnost sustava	8
Slika 9. vektorski prikaz faznih i linijskih napona u normalnom radu	9
Slika 10. Vektorski prikaz sustava u zemnom spoju	10
Slika 11. Neuzemljeni sustav u delta spoju	11
Slika 12. put struje zemnog spoja	12
Slika 13. ekvivalentni prikaz toka struje zemnog spoja	12
Slika 14. Odnos napona i struje kod čistog kapaciteta	13
Slika 15. Trenutak pražnjenja kondenzatora	14
Slika 16. vektorski dijagram ponašanja sustava, zbog tranzijentnih pojava	15
Slika 17. Jednofazni ferorezonantni krug	16
Slika 18. Područje ferorezonancije	16
Slika 19. simulacija izvedena na 10kV mreže	17
Slika 20. Vraćanje sustava pod faznim kutom od 72° stupnja	18
Slika 21. Vraćanje sustava pod faznim kutom od 216° stupnjeva	18
Slika 22. vraćanja sustava pod faznim kutom od 90° stupnjeva	18
Slika 23. vraćanja sustava pod faznim kutom od 180° stupnjeva	19
Slika 24. vraćanja sustava pod faznim kutom od 36° stupnjeva	19
Slika 25. vraćanje sustava pod faznim kutom od 270° stupnjeva	19
Slika 26. Lokaliziranje zemnog spoja	20
Slika 27. Točne detekcije zemnog spoja	21

Slika 28. IMD Insulation monitoring device.....	22
Slika 29. Homopolarna shema uzemljenje.....	23
Slika 30. Priključenja broda na kopнено napajanje	24
Slika 31. Izolacijski transformator	26
Slika 32. Uzemljavanje zvjezdišta preko otpornika.....	29

10. LITERATURA

- [1] Ground Fault Protection Ungrounded Systems to High-Resistance Grounding, IEEE
- [2] Low-Voltage Shore Connection Power Systems by Dev Paul, Vahik Haddadian, Ben Chavdarian, and Kevin Peterson
- [3] <https://electrical-engineering-portal.com/differences-between-earthed-and-uneearthed-cables>
- [4] Fault locating in ungrounded system and high-resistance grounded system, IEEE
- [5] Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, 142TM IEEE
- [6] Ships Electrical System - Rene Borstlap, Hans ten Katen
- [7] Study on Ferruresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System Zhu Xukai, Yang Yihan, Lian Hongbo, Tan Weipu
- [8] The IT earthing system (unearthed neutral) in LV by François JULLIEN, Isabelle HERITIER
- [9] Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults, IEEE
- [10] <https://megaresistors.com/products/neutral-grounding-resistor/capacitance-to-ground/>
- [11] <https://electrical-engineering-portal.com/ground-faults-ungrounded-systems>
- [12] Brodski električni sustavi, neuzemljeni sustav, izv.prof.dr.sc. Aleksandar Cuculić
- [13] Brodski električni uređaji / Božidar Skalicki, Josip Grilec
- [14] Shipboard electrical power systems by. Mukund R. Patel
- [15] <https://www.yumpu.com/en/document/read/3920645/ship-hslc-rules-pt4-ch8-electrical-installations-dnv-exchange/57>
- [16] https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/elsikkerhets/regulations_relating_to_maritime_electrical_installations.pdf