

Uzemljenje neutralne tačke

Lazar Šćekić
Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet

Sadržaj

- Značaj tretmana neutralne tačke
- Izolovano zvjezdište
- Rezonantno uzemljenje zvjezdišta
- Impedantno uzemljenje zvjezdišta
- Direktno uzemljenje zvjezdišta
- Simulacija uticaja uzemljenja neutralne tačke na strujno-naponske prilike

Uvod

Značaj uzemljenja neutralne tačke

- Tretman neutralne tačke podrazumijeva izbor načina uzemljenja zvjezdišta namotaja transformatora u mreži.
- Izbor načina uzemljenja neutralne tačke predstavlja izuzetno važan tehnokoekonomski problem, čijim se rješavanjem teži postići kompromis između nekoliko suprotstavljenih aspekata, uključujući:
 - Nivo struje kvara u slučaju kratkih spojeva sa zemljom,
 - Nivo prenapona zdravih faza u slučaju kratkih spojeva sa zemljom,
 - Nivo napona dodira i koraka u blizini mjesta kvara,
 - Selektivnost i pouzdano djelovanje zaštitnih releja,
 - Mogućnost neprekidnog napajanja potrošača, kao i
 - Investicione troškove i troškove održavanja.

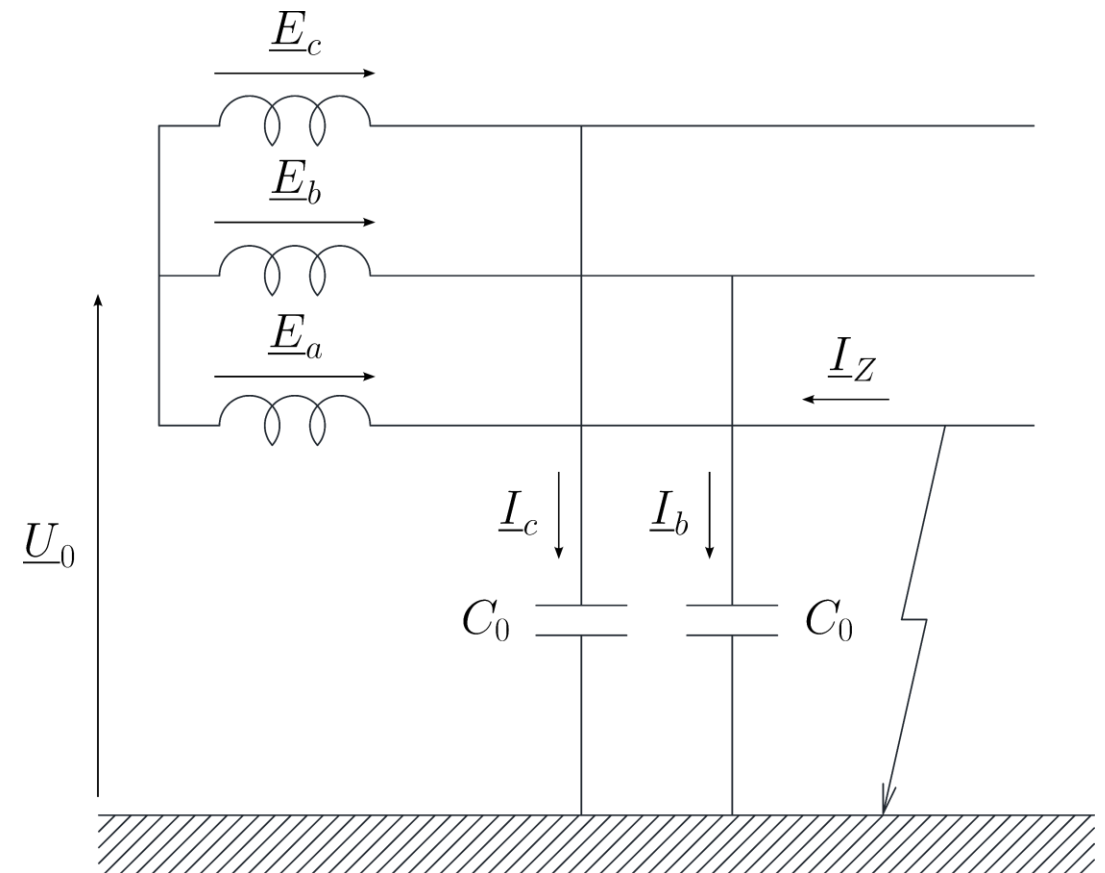
Načini uzemljenja neutralne tačke

- Razlikuju se četiri načina uzemljenja neutralne tačke:
 - Izolovano zvjezdište,
 - Uzemljenje zvjezdišta preko Petersenove prigušnice,
 - Uzemljenje zvjezdišta preko male impedanse i
 - Direktno uzemljenje zvjezdišta.
- Dok se prva tri načina uzemljenja vezuju za distributivne mreže, direktno uzemljenje zvjezdišta se dominantno koristi u prenosnim mrežama visokih i vrlo visokih napona.

Izolovano zvjezdište

Osnovni principi

- Kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom su zvjezdišta svih transformatora izolovana u odnosu na zemlju.
- Jednopolni kratki spoj se u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom naziva zemljospojem.
- Zbog nepostojanja odgovarajućeg povratnog puta kroz zemlju, u slučaju zemljospoja se struja kvara zatvara preko kapacitivnosti zdravih faza prema zemlji, kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1: Zemljospoj u izolovanoj mreži

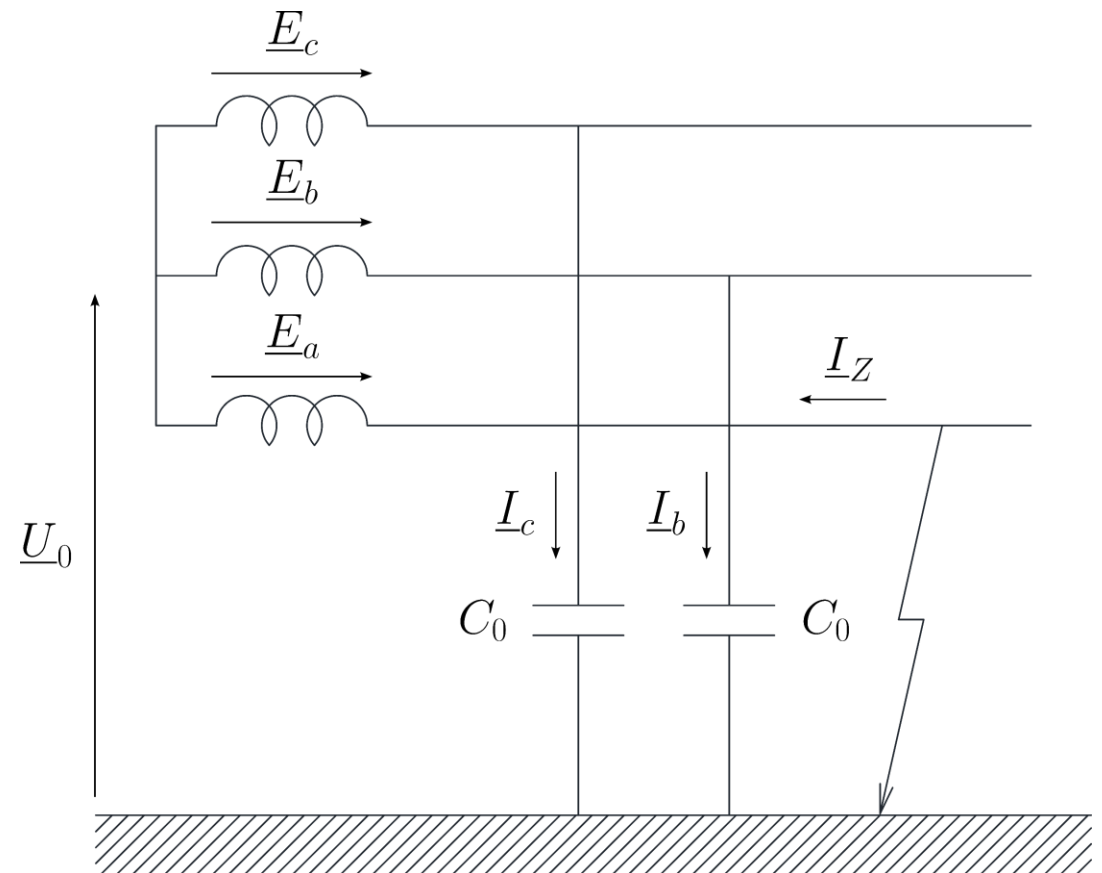
Naponske prilike u slučaju zemljospoja

- U slučaju zemljospoja, napon faze a na mjestu kvara je jednak nuli.
- Napon zvjezdišta, koji je jednak naponu nultog redosljeda, postaje jednak po modulu, a suprotan po smjeru, elektromotornoj sili faze a :

$$\underline{U}_z = \underline{U}_o = -\underline{E}_a$$

- Zbog promjene napona zvjezdišta, naponi zdravih faza postaju jednaki linijskim naponima:

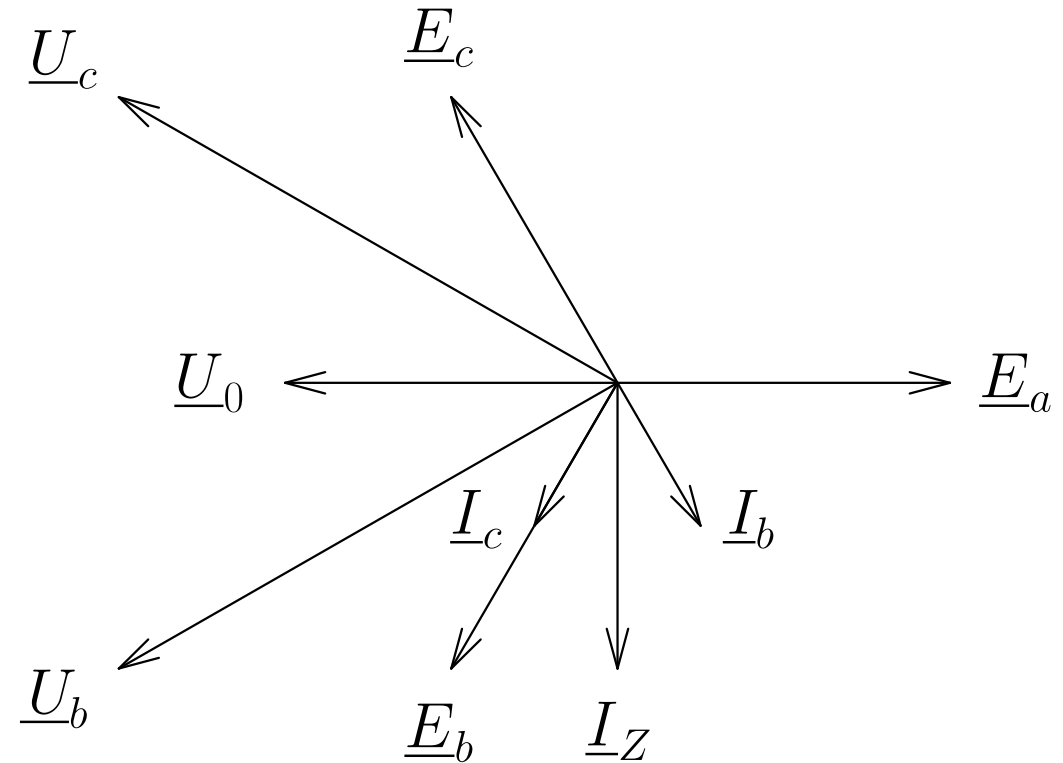
$$\begin{aligned}\underline{U}_b &= \underline{U}_z + \underline{E}_b = \underline{E}_b - \underline{E}_a \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_z + \underline{E}_c = \underline{E}_c - \underline{E}_a\end{aligned}$$



Slika 1: Zemljospoj u izolovanoj mreži

Naponske prilike u slučaju zemljospoja

- Fazorski dijagram u slučaju zemljospoja prikazan je na Slici 2.
- Kao što se uočava, iako je napon faze a jednak nuli, trougao linijskih napona \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} i \underline{U}_{ca} je očuvan.
- Kako je primarni namotaj transformatora SN/NN spregnut u trougao, u mreži niskog napona se ne osjećaju posljedice zemljospoja.
- S aspekta naponskih prilika, zemljospoj se može dozvoliti u produženom trajanju ako je izolacija faznih provodnika dimenzionisana za linijske napone.



Slika 2: Fazorski dijagram u slučaju zemljospoja

Struja zemljospoja

- Naponi zdravih faza uzrokuju kapacitivne struje \underline{I}_b i \underline{I}_c koje se sumiraju na mjestu kvara i čine struju zemljospoja \underline{I}_z .
- U skladu sa terminalnim uslovima na mjestu kvara u slučaju jednopolnog kratkog spoja, struja zemljospoja je data relacijom:

$$\underline{I}_z = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_o = \frac{3E_f}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o}$$

gdje se uz zanemarljiv uticaj na tačnost može uvesti pretpostavka:

$$\underline{I}_z \cong \frac{3E_f}{\underline{Z}_o} = j3E_f\omega \sum_{i=1}^n C_{oi}L_i$$

gdje je \underline{Z}_o ekvivalentna kapacitivna reaktansa mreže nultog redosljeda, koja predstavlja sumu kapacitivnih reaktansi nultog redosljeda svih vodova u galvanski povezanoj mreži.

Preporuke

- Prelazak na uzemljenje neutralne tačke se preporučuje kada kapacitivna struja zemljospoja pređe sljedeće granične vrijednosti:
 - 20 A u kablovskoj ili mješovitoj 10 kV mreži,
 - 15 A u kablovskoj ili mješovitoj 20 kV mreži i
 - 10 A u 35 kV mreži.
- Pretpostavka je da pri vrijednostima struja manjim od graničnih dolazi do samostalnog gašenja električnog luka na mjestu kvara.
- Pri većim strujama zemljospoja može doći do uzastopnog paljenja i gašenja električnog luka na mjestu kvara, što može rezultirati intermitentnim prenaponima amplitude trostruke vrijednosti nominalnog faznog napona.

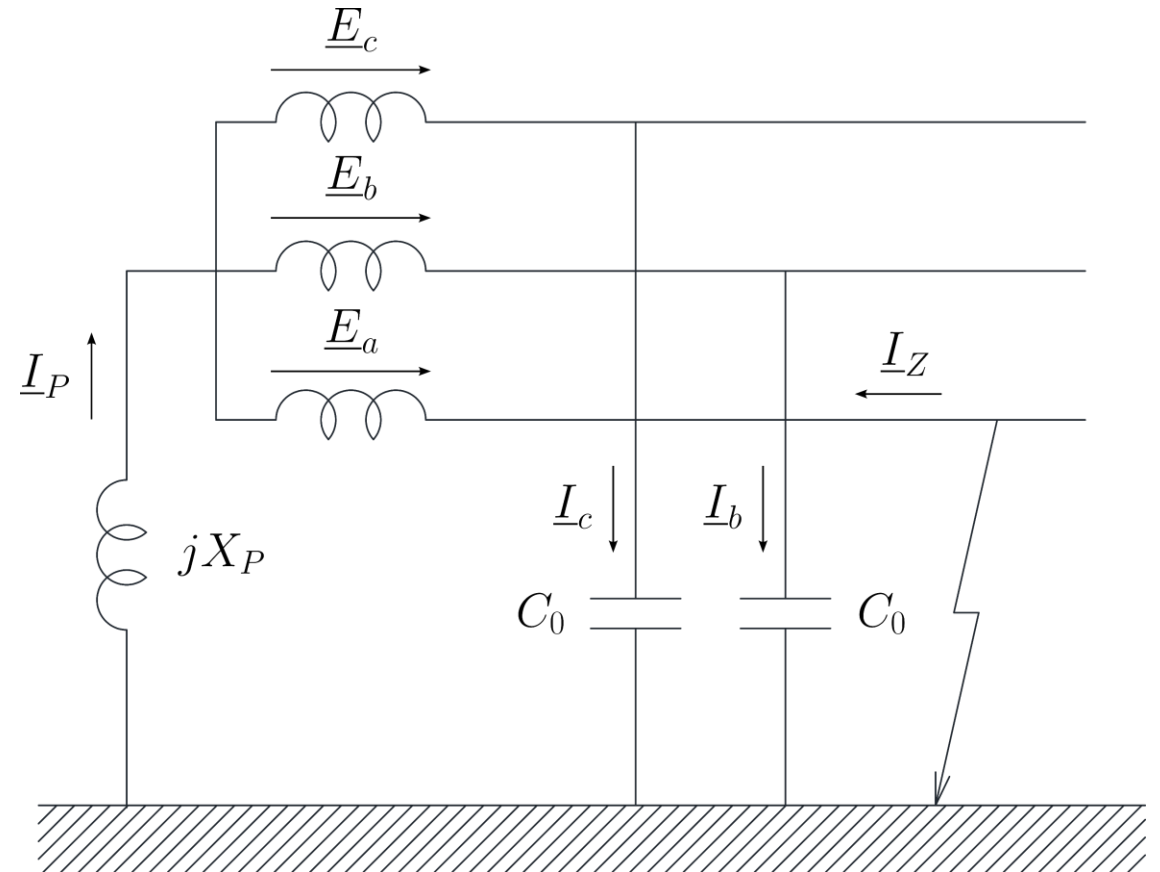
Prednosti i mane

- Prednosti mreža sa izolovanom neutralnom tačkom su:
 - Očuvanje kontinuiteta napajanja zbog mogućnosti privremenog rada sa zemljospojem,
 - Minimalna termička i mehanička naprezanja opreme usljed niskih struja zemljospoja, kao i
 - Jednostavnost i izbjegavanje investicionih troškova i troškova održavanja koji prate ostale načine uzemljenja neutralne tačke.
- Mane mreža sa izolovanom neutralnom tačkom su:
 - Povećana naponska naprezanja u slučaju zemljospoja,
 - Rizik od intermitentnih prenapona i dvostrukog zemljospoja,
 - Problemi u selektivnoj detekciji kvarova usljed niskih struja zemljospoja i
 - Podložnost pojavi ferorezonanse usljed interakcije kapacitivnosti mreže i nelinearnih induktivnosti mjernih transformatora.

Zvezdište uzemljeno preko Petersenove
prigušnice

Osnovni principi

- Petersenova prigušnica se priključuje između zvjezdišta transformatora i zemlje kao na Slici 3.
- Ideja uzemljenja preko Petersenove prigušnice je da se kapacitivna struja zemljospoja kompenzuje induktivnom strujom nultog redosljeda koja teče kroz prigušnicu.
- Kako kapacitivna struja koju je potrebno kompenzovati varira sa uklopnim stanjem mreže, reaktansa Petersenove prigušnice X_P se najčešće može regulisati automatski.



Slika 3: Zemljospoj u kompenzovanoj mreži

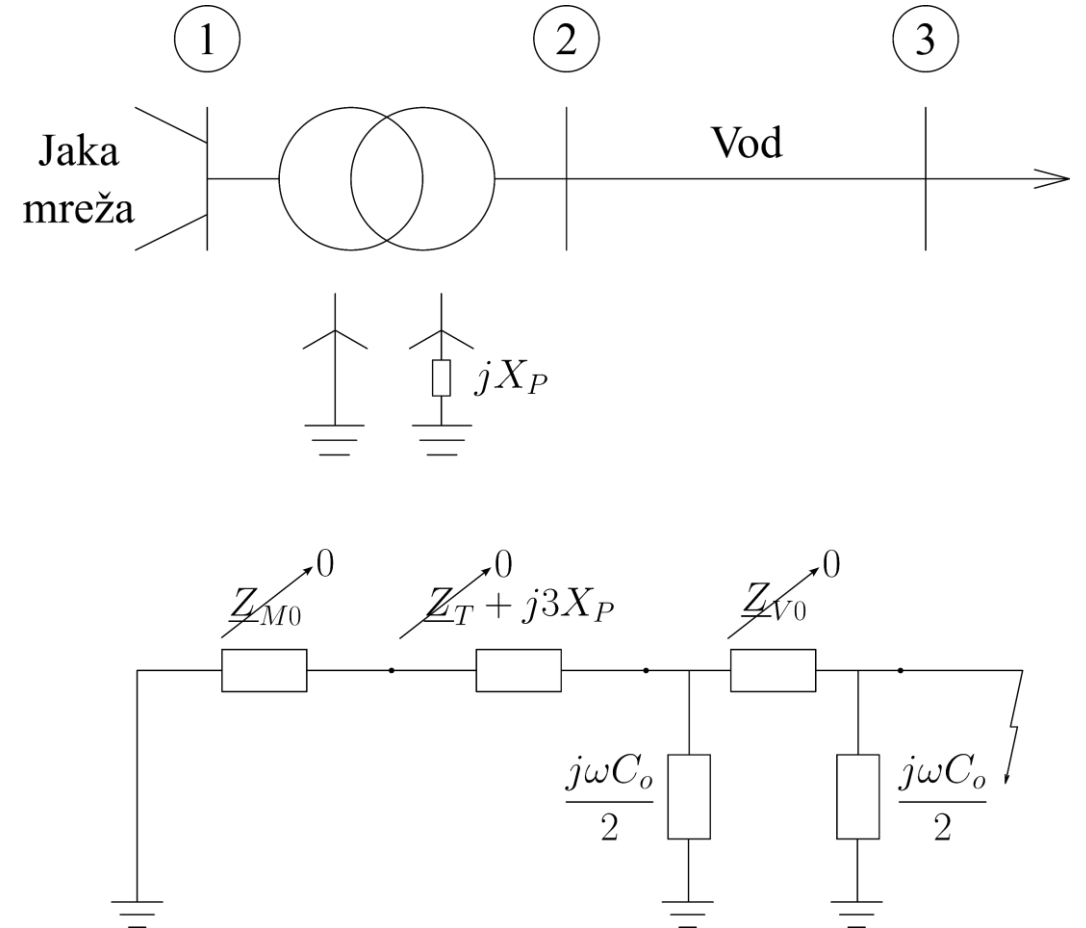
Idealna kompenzacija struje zemljospoja

- Petersenovom prigušnicom se može postići idealna kompenzacija struje zemljospoja.
- Idealna vrijednost reaktanse X_P određuje se iz uslova da je ekvivalentna impedansa nultog redosljeda jednaka nuli.
- Kao što se uočava sa Slike 4, ovo se postiže ako je zadovoljeno:

$$1 - 3\omega^2 L_P C_o = 0$$

odnosno:

$$X_P = \frac{1}{3} X_{Co}$$



Slika 4: Šema nultog redosljeda u kompenzovanom sistemu

Preporuke

- Idealna kompenzacija struje zemljospoja se ne preporučuje zbog opasnosti od pojave rezonantnih prenapona koji mogu nastati u slučaju prekida faznih provodnika.
- Adekvatna kompenzacija postiže se primjenom Petersenove prigušnice čija se reaktansa X_P razlikuje od idealnog podešenja za $\pm 10\%$.

Prednosti i mane

- Prednosti uzemljenja neutralne tačke preko Petersenove prigušnice su:
 - Obezbjedenje samostalnog gašenja električnog luka na mjestu kvara, čime se minimizuje rizik od intermitentnih prenapona,
 - Očuvanje kontinuiteta napajanja zbog mogućnosti privremenog rada sa zemljospojem, kao i
 - Minimalna termička i mehanička naprezanja opreme usljed niskih struja zemljospoja.
- Mane uzemljenja neutralne tačke preko Petersenove prigušnice su:
 - Povećana naponska naprezanja u slučaju zemljospoja,
 - Problemi u selektivnoj detekciji kvarova usljed niskih struja zemljospoja,
 - Povećana opasnost od pojave rezonantnih prenapona u slučaju prekida faznih provodnika, kao i
 - Složenost i visoki troškovi investicije i održavanja.

Zvezdište
impedanse

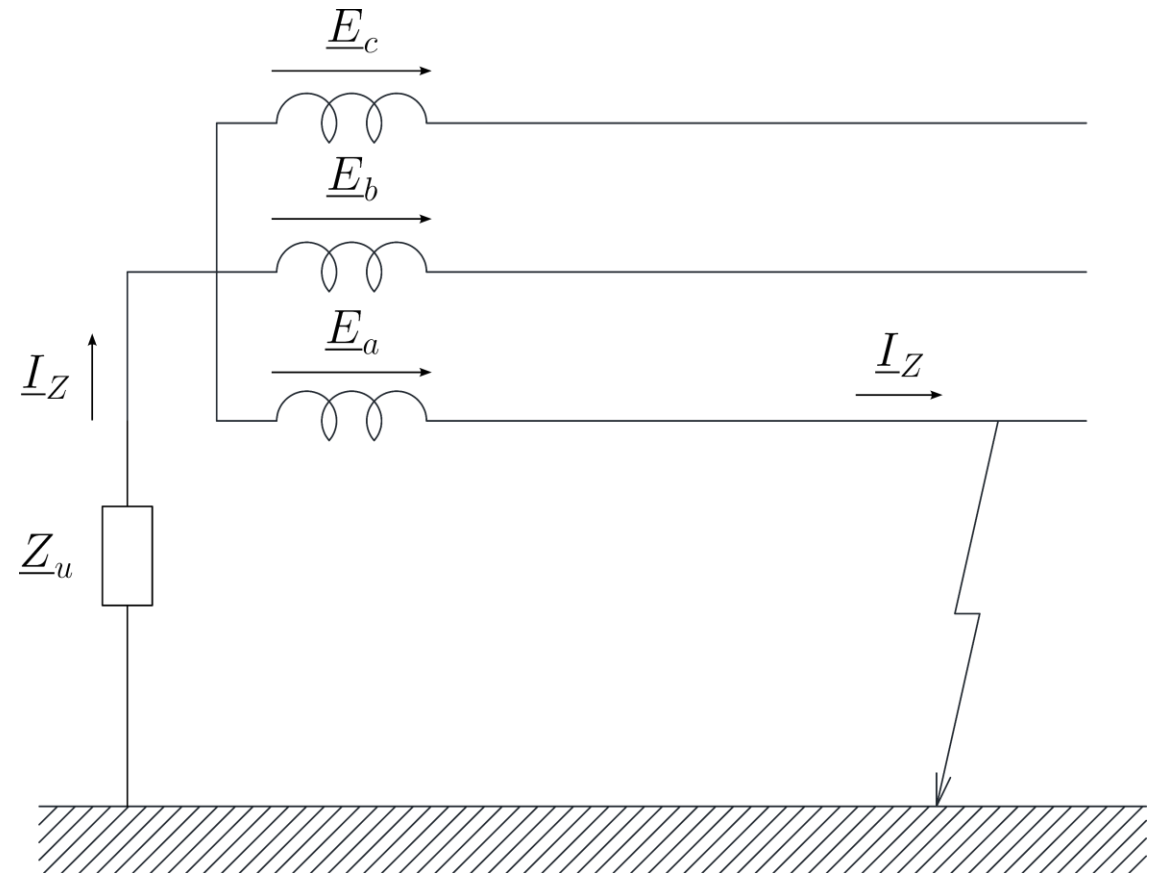
uzemljeno

preko

male

Osnovni principi

- Impedantno uzemljenje zvjezdišta podrazumijeva priključenje male impedanse \underline{Z}_u između zvjezdišta i zemlje kao na Slici 5.
- Uzemljenjem zvjezdišta preko male impedanse se značajno smanjuje impedansa sistema nultog redosljeda u odnosu na mrežu sa izolovanim zvjezdištem, čime se povećava struja zemljospoja i obezbjeđuje stabilan električni luk na mjestu kvara.
- Na ovaj način se zemljospoj suštinski pretvara u jednopolni kratki spoj.



Slika 5: Zemljospoj u impedantno uzemljenoj mreži

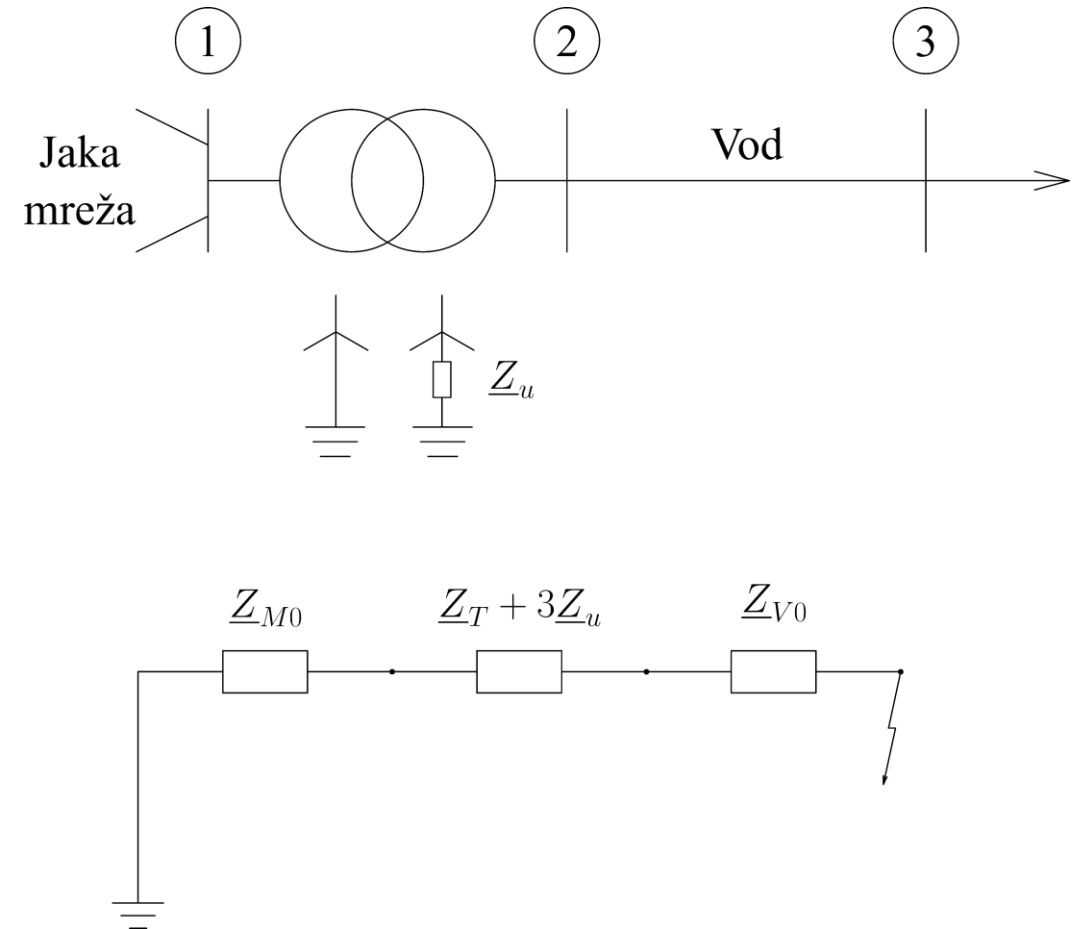
Struja zemljospoja u impedantno uzemljenoj mreži

- Kao što se uočava sa Slike 6, trostruka vrijednost impedanse uzemljenja \underline{Z}_u figuriše u šemi sistema nultog redosljeda.
- Polazeći od osnovne jednačine za struju kvara u slučaju jednopolnog kratkog spoja:

$$\underline{I}_z = \frac{3E_f}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o}$$

lako se pokazuje da je struja zemljospoja sada približno jednaka:

$$\underline{I}_z \cong \frac{E_f}{\underline{Z}_u}$$



Slika 6: Šema nultog redosljeda u impedantno uzemljenoj mreži

Preporuke

- Kao mala impedansa se najčešće koristi metalni ili elektrolitički otpornik.
- Na Slici 7 je prikazan metalni otpornik naznačenog napona 6 kV, naznačene struje 300 A, namijenjen primjeni u mreži naznačenog napona 10 kV.
- Struja zemljospoja se na našim prostorima najčešće ograničava na 150 ili 300 A, mada su na tržištu dostupni i otpornici naznačenih struja 700 i 1000 A.



Slika 7: Otpornik OVN-6/300
kompanije FMT Zaječar

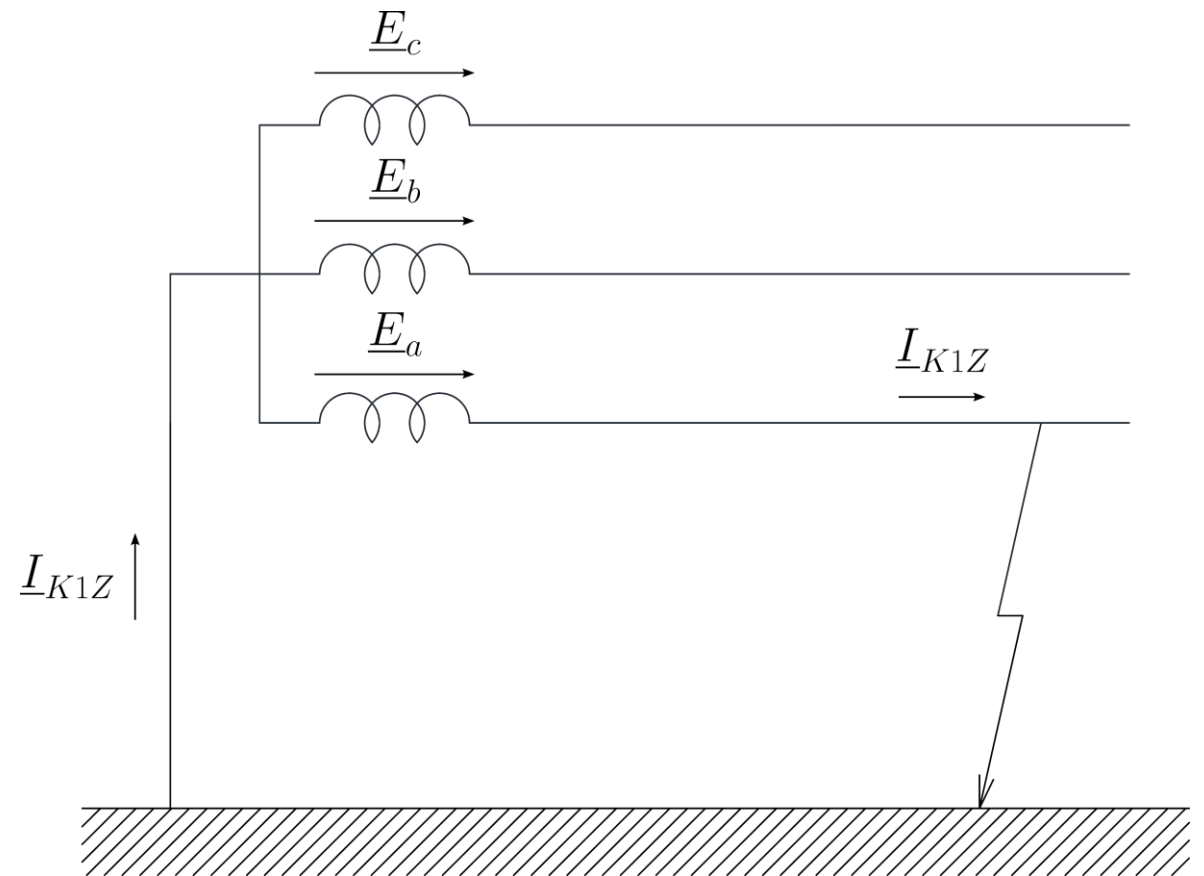
Prednosti i mane

- Prednosti uzemljenja neutralne tačke preko male impedanse su:
 - Obezbjedenje stabilnog električnog luka na mjestu kvara, čime se minimizuje rizik od intermitentnih prenapona i
 - Relativno jednostavno postizanje selektivnosti zaštite.
- Mane uzemljenja neutralne tačke preko male impedanse su:
 - Visoke struje zemljospoja koje zbog povećanih termičkih i mehaničkih naprezanja opreme zahtijevaju trenutno isključenje elementa u kvaru,
 - Negativan uticaj na pouzdanost napajanja krajnjih potrošača,
 - Povećani naponi koraka i dodira zbog visoke struje koja na mjestu kvara teče kroz uzemljivač, kao i
 - Složenost i visoki troškovi investicije i održavanja.

Direktno uzemljeno zvjezdište

Osnovni principi

- Direktno uzemljenje zvjezdišta podrazumijeva vezivanje zvjezdišta na zemlju kao na Slici 8.
- U slučaju jednopolnog kratkog spoja je napon zvjezdišta približno jednak nuli, čime se sprečava drastično povećanje napona zdravih faza do linijskih vrijednosti.
- Direktno uzemljenje se bez izuzetka koristi u prenosnim mrežama visokih i vrlo visokih napona, gdje povećanje potreba za izolacijom opreme rezultira višestrukim povećanjem investicionih troškova.



Slika 8: Zemljospoj u impedantno uzemljenoj mreži

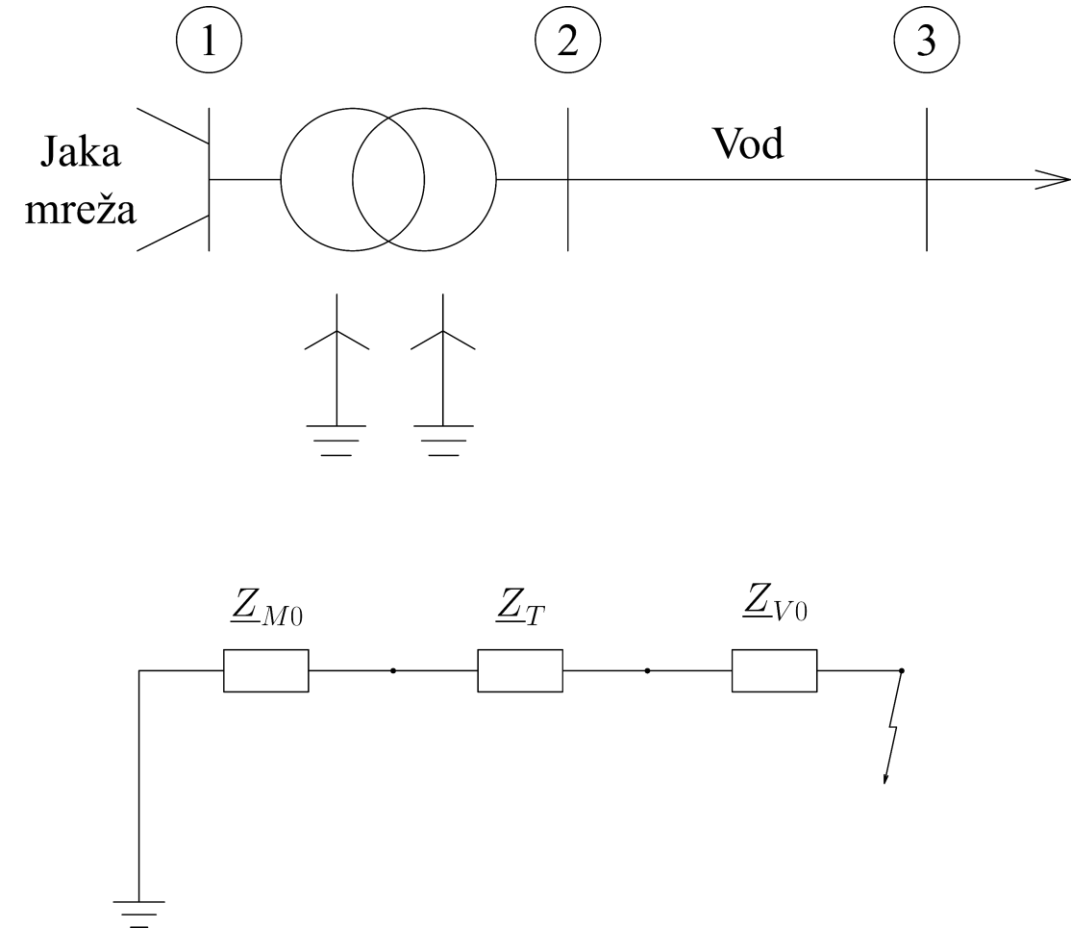
Struja K1Z u direktno uzemljenoj mreži

- U slučaju direktno uzemljene mreže, struja jednopolnog kratkog spoja određuje se primjenom osnovne relacije:

$$\underline{I}_{K1Z} = \frac{3E_f}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o}$$

nakon formiranja zamjenskih šema direktnog, inverznog i nultog redosljeda.

- Struja jednopolnog kratkog spoja u direktno uzemljenoj mreži ima vrlo visoke vrijednosti koje zahtijevaju trenutno isključenje kvara.



Slika 9: Šema nultog redosljeda u direktno uzemljenoj mreži

Efikasno uzemljena mreža

- Za ocjenu tretmana zvjezdišta u pogledu struja i napona kratkog spoja koristi se faktor uzemljenja:

$$\underline{k}_u = \frac{\underline{Z}_o}{\underline{Z}_d}$$

koji je očigledno definisan kao odnos ekvivalentnih impedansi nultog i direktnog redosljeda u odnosu na mjesto kvara.

- Faktor uzemljenja suštinski predstavlja odnos napona zdravih faza za vrijeme trajanja kvara u odnosu na naznačeni linijski napon.
- Efikasno uzemljenim mrežama se smatraju mreže kod kojih je faktor uzemljenja k_u u svim čvorovima manji od 0,8. Pokazuje se da je ovo ispunjeno ako u svim čvorovima važi:

$$0 < \frac{X_o}{X_d} \leq 3 \qquad \frac{R_o}{R_d} \leq 1$$

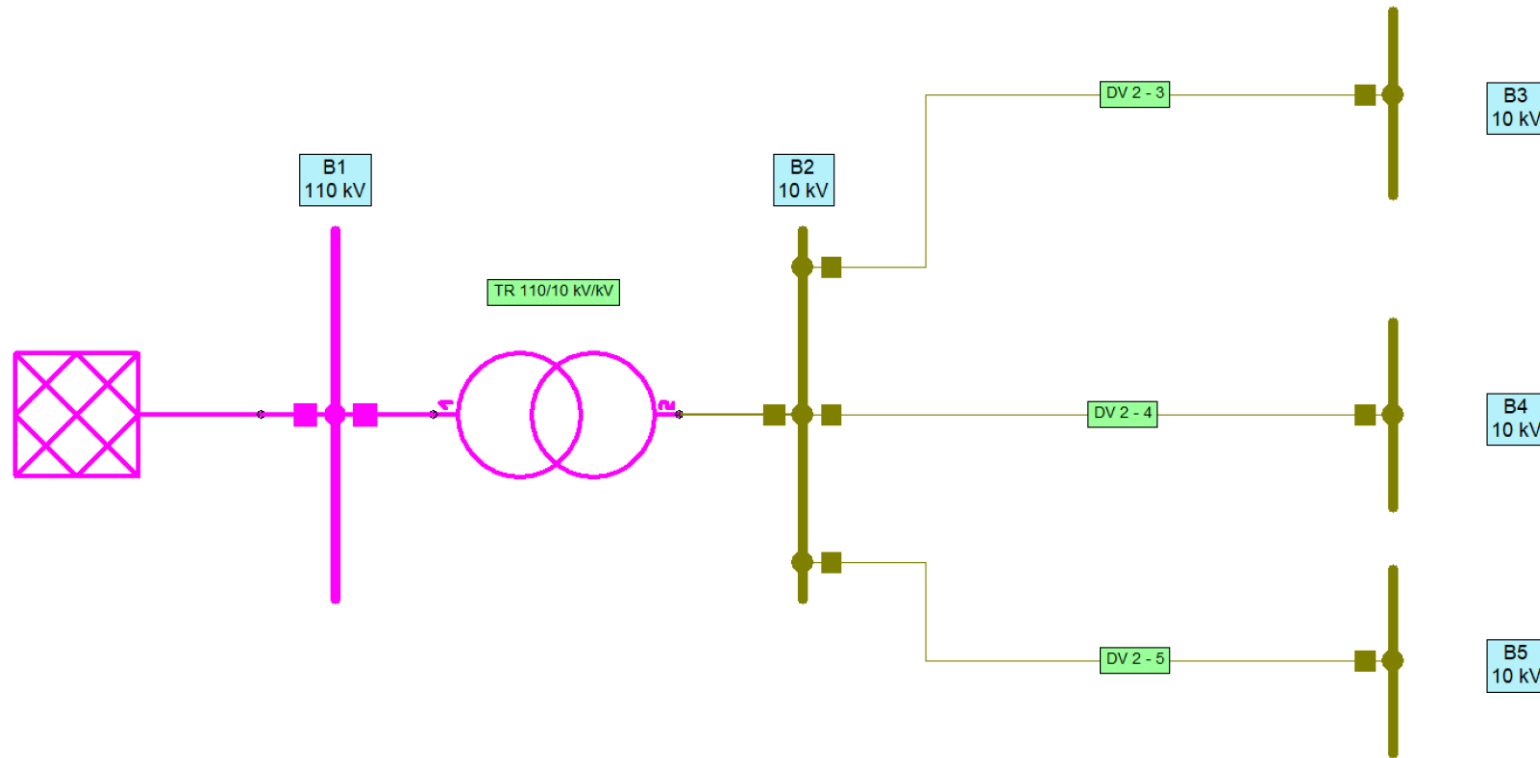
Prednosti i mane

- Prednosti direktnog uzemljenja neutralne tačke su:
 - Eliminisanje rizika od intermitentnih prenapona i prenapona zdravih faza u slučaju jednopolnog kratkog spoja, kao i
 - Jednostavno postizanje selektivnosti zaštite.
- Mane direktnog uzemljenja neutralne tačke su:
 - Visoke struje jednopolnog kratkog spoja koje mogu biti veće od struja trofaznog kratkog spoja,
 - Negativan uticaj na sigurnost sistema i pouzdanost napajanja krajnjih potrošača zbog obaveznog trenutnog isključenja elementa u kvaru,
 - Povećani naponi koraka i dodira zbog visoke struje koja na mjestu kvara teče kroz uzemljivač, kao i
 - Izražen elektromagnetni uticaj na okolinu.

Analiza uticaja uzemljenja neutralne tačke na strujno-naponske prilike

Zadatak

- Za distributivnu mrežu prikazanu na Slici 10 sprovesti proračun kratkih spojeva ako je zvjezdište sekundarnog namotaja transformatora izolovano, uzemljeno preko Petersenove prigušnice, uzemljeno preko otpornika od $20\ \Omega$, odnosno direktno uzemljeno.



Slika 10: Jednopolna šema dijela distributivne mreže

Rješenje

Način uzemljenja	Struja kvara [A]	Naponi zdravih faza [kV]	
		Faza <i>b</i>	Faza <i>c</i>
Izolovano zvjezdište	79,69	10,78	11,71
Rezonantno uzemljenje	1,03	11,09	11,10
Impedantno uzemljenje	177,40	9,06	9,78
Direktno uzemljenje	353,56	7,88	7,64