

Sandra Hutter  
HEP ODS d.o.o., Elektra Zagreb  
[sandra.hutter@hep.hr](mailto:sandra.hutter@hep.hr)

Goran Šagovac  
HEP ODS d.o.o., Elektra Zagreb  
[goran.sagovac@hep.hr](mailto:goran.sagovac@hep.hr)

## POJAVA VISOKIH PRENAPONA U REZONANTNO UZEMLJENOJ SN MREŽI

Članak analizira porast faznih napona na vrijednost veću od linijskih napona u rezonantno uzemljenoj SN mreži uslijed otvorene faze na dijelu dalekovoda. Pri isklopu rastavljača i dijela zračnog voda otvorio se samo jedan pol linijskog rastavljača dok su druga dva ostala uklopljena.

Provedena su ispitivanja u mreži, te su snimljeni oscilogrami struja i napona na transformatoru. Problem je relativno lako riješen zamjenom linijskog rastavljača, a uslijed brze prorade nadnaponske zaštite nije došlo do oštećenja izolacije u mreži. Međutim, potrebno je uzeti u obzir da će se ovakvi poremećaji povremeno događati, zbog sve većeg broja rezonantno uzemljenih mreža sa sve većim kapacitivnim strujama i teretima, kao i visokim stupnjem kompenzacije čime se postiže samogašenje kvarova u mreži. Da li se pri tom treba oslanjati na postojeće zaštite ili je potrebno osmisliti dodatne procedure, zasad ostaje još otvoreno pitanje.

**Ključne riječi:** otvorena faza, rezonantno uzemljena mreža, prenapon, relejna zaštita, izolacija

## OCCURANCE OF THE HIGH OVERVOLTAGES IN A RESONANTLY EARTHED MV NETWORK

### SUMMARY

This paper analyses increase of the phase-to-ground voltage over the value of the phase-to-phase voltage in a resonantly earthed MV network due to open-phase condition of a section of the feeder. After a recloser was opened and a part of a feeder was disconnected, only one pole of the recloser opened while other two remained closed.

Testing in the network were conducted, and the transformer currents and voltages were recorded. The problem was solved with replacement of the line discloser. There were no several insulation damages in the network due to swift protection operation. However, it is necessary to take in the account that this kind of disturbance will occur from time to time, due to higher number of the resonantly earthed networks with higher capacitive currents as well as loads, and a high degree of compensation which is required in order to obtain arc self-extinction. It remains an open question if in this case is enough to rely on the existing protections or if some additional procedures are needed as well.

**Key words:** open-phase, resonantly earthed network, overvoltage, relay protection, insulation

## 1. UVOD

Posebno stanje nesimetrije u mreži je stanje otvorene faze, do kojeg može doći uslijed prekinutog vodiča ili zatajenja jednog pola prekidača. Ova vrsta nesimetrije uzrokuje serijsku rezonanciju između parazitnih kapaciteta vodova prema zemlji i induktiviteta zavojnice.

U stvarnim rezonantno uzemljenim mrežama zabilježeni su visoki prenaponi tijekom kvarova uslijed otvorene faze. Ovi prenaponi značajno prelaze vrijednosti tranzijentnih prenapona u rezonantno uzemljenim mrežama tijekom zemljospoja. Pokazalo se da će na iznos tranzijentnih prenapona utjecati broj vodnih polja, teret po polju, stupanj kompenzacije i dodatni faktori prigušenja [1].

### 1.1. Praksa uzemljenja neutralne točke u distribucijskom području Elektre Zagreb

U DP Elektre Zagreb praksa uzemljenja SN neutralne točke je sljedeća:

- stanice 30/10(20) kV imaju izolirano zvjezdište
- stanice 110/10(20) kV su uzemljene preko malog otpornika
- jedna stanica 110/30kV je uzemljena preko malog otpornika sa strujom zemljospoja ograničenom na 1000A, sa shemom spoja jedan otpornik na dva transformatora.
- u pet pogona je neutralne točka rezonantno uzemljena. Iz tih stanica se djelomično napajaju i ruralne mreže sa kombiniranom kabelskom mrežom i dugačkim nadzemnim vodovima.

Odluka da se pređe sa uzemljenja neutralne točke preko malog otpornika na rezonantno uzemljenje je donesena zbog visokih kapacitivnih struja koje se javljaju u mreži. Općenito, kod uzemljenja neutralne točke preko malog otpornika prema propisima vrijedi uvjet da struja zemljospoja mora biti ograničena na 300 A u gradskim mrežama odnosno na 150 A u ruralnim mrežama. Rezonantno uzemljenje se ne koristi u kabelskoj mreži u centru grada Zagreba, iako su kapacitivne struje već i tamo prešle vrijednosti dozvoljene propisima.

## 2. POJAVA VISOKIH PRENAPONA U MREŽI POGONA VELIKA GORICA

### 2.1. Uklopno stanje mreže i zapisi događaja iz mjernih centara

U pogonu Velika Gorica je nekoliko puta zabilježeno stanje pri kojem se javio porast faznih napona na vrijednost veću od linijskih napona, što je kasnijom analizom utvrđeno da se desilo uslijed otvorene faze na dijelu dalekovoda zbog neispravnog linijskog rastavljača.

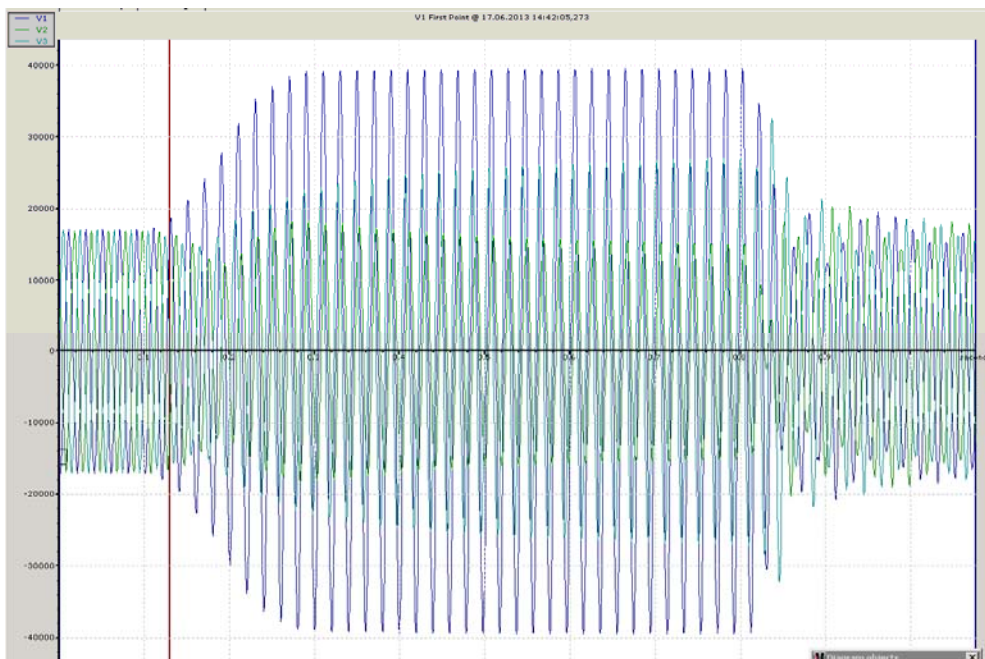
Po isklupu linijskog rastavljača i dijela voda na ZV Kravarsko, došlo je do porasta napona i nakon toga svaki put su isključena 3 ili 4 voda. Vodna polja su isključena uslijed prorade nadnaponske zaštite. U tom trenutku u stanici 110/20 kV Velika Gorica bila su u pogonu dva transformatora koji su napajali 20 kV mrežu, te je ispao onaj koji je napajao zračnu mrežu. Na tom transformatoru je u paralelu sa vlastitom regulacionom prigušnicom bila priključena i Petersenova prigušnica od transformatora koji nije bio u pogonu a koja se koristila kao fiksna. Fiksna prigušnica je podešena na 120 A sa paralelno priključenom regulacijskom prigušnicom podešenom na 218 A, odnosno ukupna je kompenzirano 338 A sa natkompenzacijom od otprilike 5%. Neutralna točka drugog transformatora je uzemljena preko jedne regulacione prigušnice koja je u tom trenutka bila podešena na 286 A.

Tablica I. Duljine pojedinih dionica kabelskih i zračnih vodova i strujno opterećenje

	Duljina dionice zračnog voda	Duljina dionice kabelskog voda	Strujno opterećenje I(A)
ZV Lekenik	41366 m	24545 m	53
ZV Lukavec	60248 m	18596 m	42
ZV Kravarsko	98909 m	21770 m	41
ZV Šijunčare	4513 m	1289 m	16
ZV Veleševac	36359 m	9446 m	37
KB HAC Jug	-	19234 m	28
ZV Ščitarjevo	19255m	17070 m	35

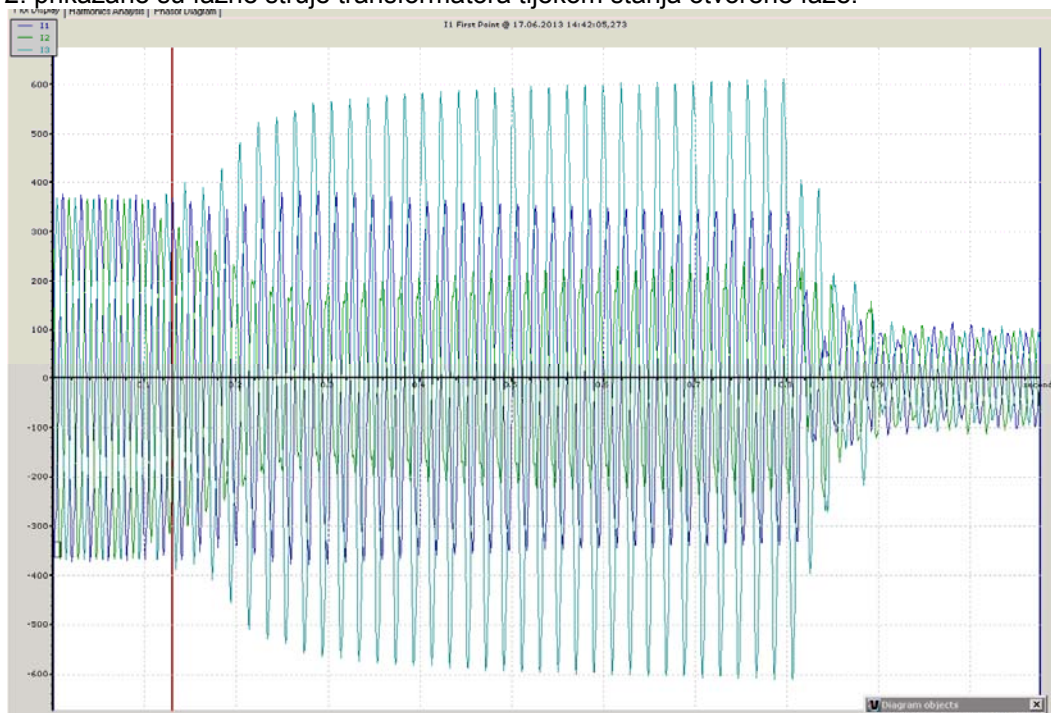
Prosječne kapacitivne struje po kilometru kabela dionice u 20 kV mreži se procjenjuju na 3 A/km, što prema gore navedenim duljinama kabela odgovara ukupnoj kapacitivnoj struji od 273 A. Kapacitivni doprinos nadzemnih vodova ukupne duljine 260 km može se procijeniti na 16 A. Stvarne struje u kapacitivnoj mreži su prema zabilježenom položaju Petersen prigušnice bile 11% veće.

Na slici su prikazani fazni naponi zabilježeni na mjernim centrima u 4TS V.Gorica. Vidljivo je da napon u jednoj fazi doseže gotovo 40 kV. Linijski naponi su očuvani po iznosu, ali se vide viši harmonici koji se pojačavaju i "skok" u 2 faze.

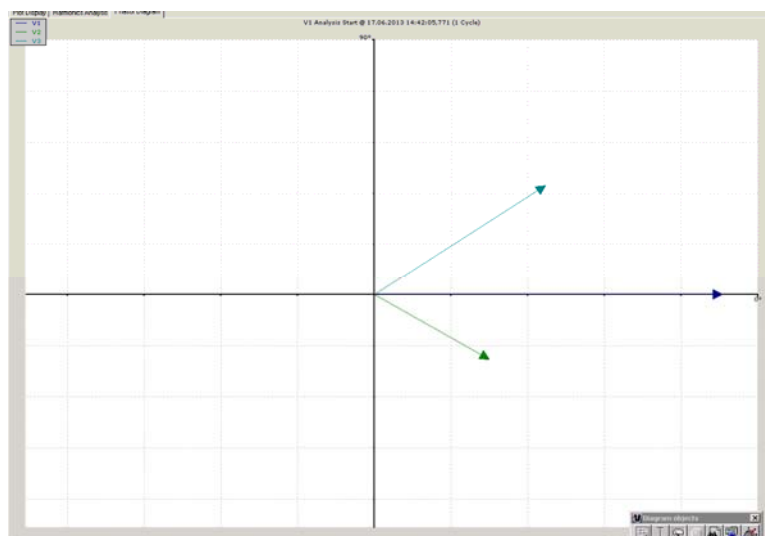


Slika 1. Fazni naponi

Na slici 2. prikazane su fazne struje transformatora tijekom stanja otvorene faze.

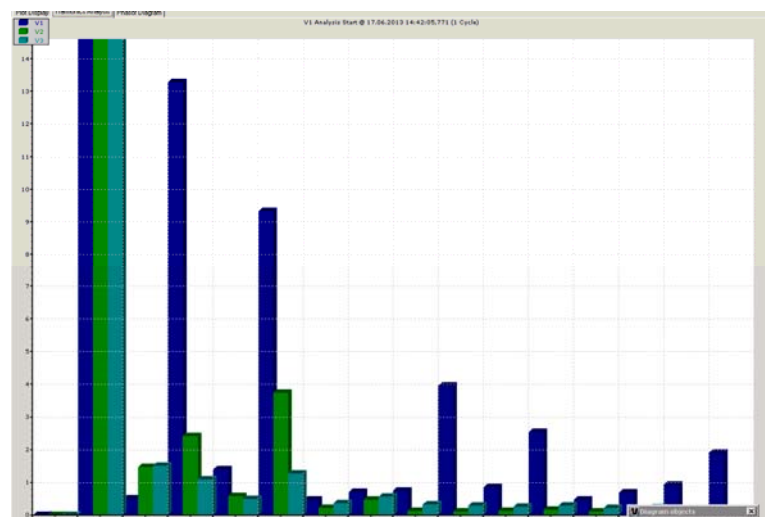


Slika 2. Struje transformatora po fazama



Slika 3. Fazorski dijagram prva perioda iza vremena 0,5 s

Sa fazorskih dijagrama na slici 3. vidljivo je da je došlo do pomaka neutralne točke zvjezdista u suprotnu stranu, što je karakteristično za ovo stanje.



Slika 4. Harmonička analiza – prva perioda iza vremena 0,5 s

Utvrđeno je da se pri isklupu linijskog rastavljača i dijela voda na ZV Krvarsko otvorio samo jedan pol linijskog rastavljača dok su druga dva ostala uklopljena. Problem je riješen zamjenom linijskog rastavljača. Uslijed brze prorade nadnaponske zaštite nije došlo do oštećenja izolacije u mreži.

## 2.2. Prekid faze na pomorskom kabelu

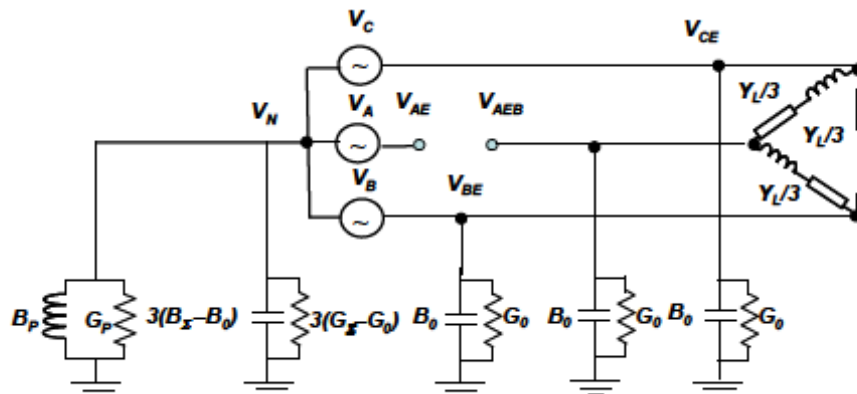
Sličan događaj prekida faze na podmorskom kabelu na kraju 10 kV-tnog izvoda u praznom hodu te pojava nesimetrije napona i struja opisan je u literaturi [4]. SN mreža u navedenom slučaju je imala izoliranu neutralnu točku te duge i slabo terećene kabelskih dionice. Slučaj navodimo zbog toga što je pojava prekida faze relativno rijetka te se stoga često zanemaruje prilikom analiza, međutim u interakciji sa nekim drugim događajima može dovesti do velikih havarija [2], [4].

## 3. ANALIZA NAPONSKIH PRILIKA U MREŽI

Prema [1] ukoliko pretpostavimo da je u jedno od vodnih polja došlo do prekida faze možemo SN mrežu prikazati nadomjesnom shemom na slici 2. Distribuirane tereti su prikazani sa nadomjesnim konstantnim admitancijama spojenim u trokut. Faznu nesimetriju između kapaciteta prema zemlji je

zanemarena. Prekid u fazi A uzrokuje odspajanje admitancije vodnog polja sa napona mreže ali i dalje ostaje veza preko linijske admitancije tereta. Fazna kapacitivna struja i dalje teče preko linijske admitancije tereta. Ova pojava se može promatrati i kao povećanje ekvivalentnog nadomjesnog kapaciteta prema zemlji zdravih faza B i C. Ukoliko je struja tereta otprilike pet puta veća od nulte kapacitivne struje dodatna kapacitivna susceptancija jer vrlo blizu polovice fazne susceptancije, što znači da se 50% fazne vrijednosti dodaje na svaku od zdravih faza.

Za ovo stanje je karakteristično i da se uslijed utjecaja tereta mreže ukoliko je prekinuta jedna od faza nekog voda u mreži uvjeti rezonancije ne mijenjaju (između induktiviteta Petersenove prigušnice i ukupnih parazitnih kapaciteta mreže prema zemlji).



Slika 5. Nadomjesna shema mreže

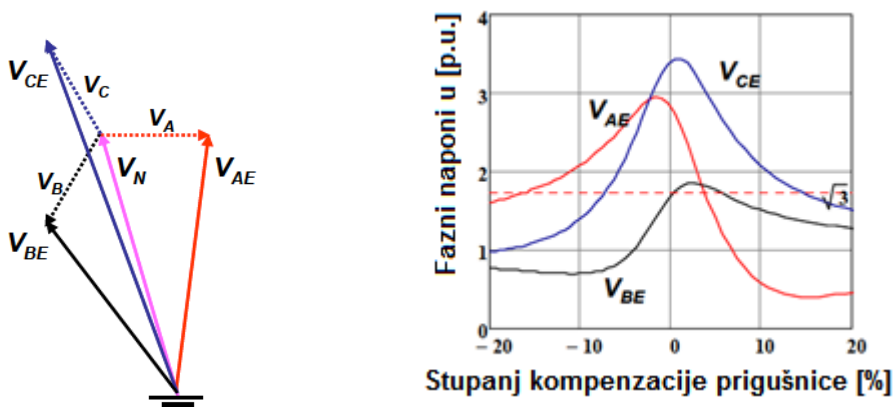
Tereti u vodnom polju sa otvorenom fazom mogu značajno utjecati na iznos nultog napona.

**Najveći nulti prenapon koji se može očekivati tijekom stanja s otvorenom fazom je prema [1]:**

$$V_N = \frac{0.5[d_F + a(m) + j(1 + r(m))]}{N(d_F + d_F) + a(m)} V \quad (1)$$

- omjer  $N = \frac{B_s}{B_0}$  broj vodnih polja,
- pu admitancija  $a(m)$  i  $r(m)$  koje ovise o teretu voda
- faktor prigušenja mreže  $d_F$
- stupanj prigušenja  $d_F$  i stupanj nad/pod kompenzacije Petersenove prigušnice  $v$

Vidljivo je da  $V_N$  dostiže najveću vrijednost ako je stupanj nad/pod kompenzacije  $v$  blizu nule. Odnosno nulti napon će dosegnuti najveću vrijednost ako je Petersenova prigušnica blizu potpune kompenzacije. Prema [1] dodatni gubici dosežu svoj maksimum kad je struja tereta 1.5 puta veća od nulte struje nabijanja voda. Za mrežu Pogona Velika Gorica dobivamo da je najveći nulti prenapon koji se može javiti oko 0.9 faznog napona.



Sl.6 Vektorski dijagram i fazni naponi [p.u.] u ovisnosti o stupnju pod/nad kompenzacije prigušnice

Vrijednosti faznih napona  $V_{AE}$ ,  $V_{BE}$  i  $V_{CE}$  su određene vektorskim zbrojem nultog napona  $V_N$  i napona (izvora) između faze i nule, odnosno mogu se dobiti supstitucijom nultog napona na fazne prema nultočki.

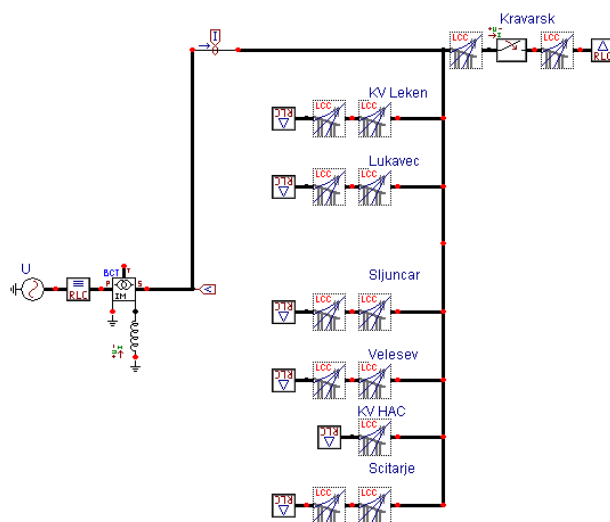
$$V_{AE} = V_N + V \quad (2)$$

$$V_{BE} = V_N + a^2 V \quad (3)$$

$$V_{CE} = V_N + a V \quad (4)$$

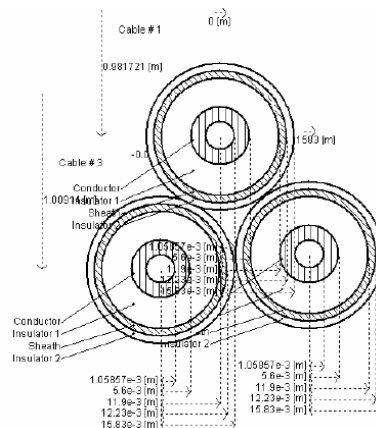
Prenaponi u slučaju otvorene faze rastu sa porastom tereta [1]. Broj vodnih polja značajno utječe na iznos prenapona te sa većim brojem vodnih polja iznos prenapona pada. Dodatno prigušenje (npr. otpornik ugrađen uz prigušnicu) utjecat će na smanjenje prenapona, odabirom otpornika koji injektira struju postići će se također smanjenje iznosa prenapona. S obzirom da će otpornik priključen paralelno uz prigušnicu utjecati i na smanjenje povratnih prenapona time će se poboljšati i uvjeti za samogašenje struja zemljospoja u mreži. Analiza prigušenja napona prema [1] uslijed zasićenja naponskih transformatora nije pokazala značajno smanjenje prenapona.

#### 4. MODEL MREŽE



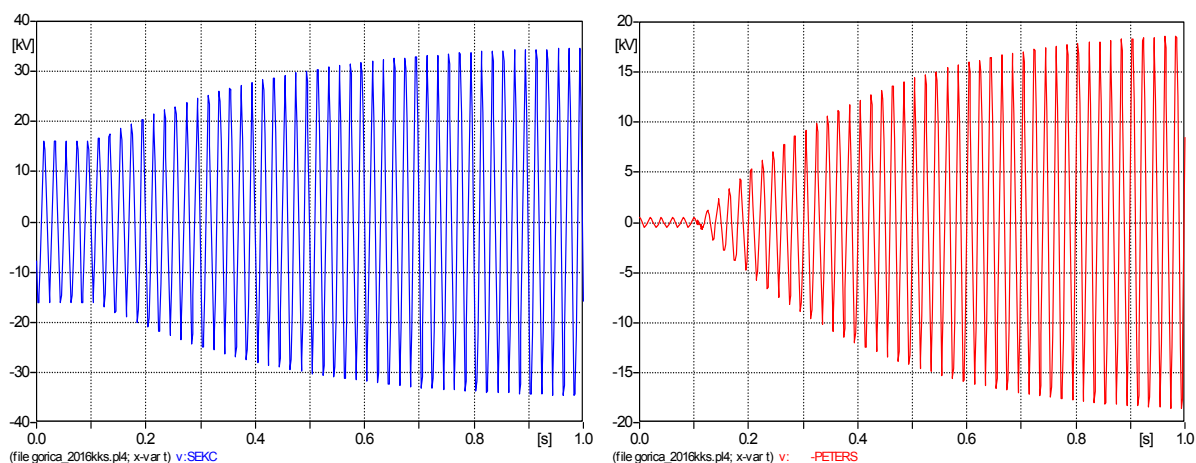
Slika 7. Model mreže

U programu EMTP modelirana je 20 kV mreža sa vodovima koji su bili u pogonu, trofaznim teretima, nadomjesnom 110 kV mrežom i transformatorom 110/20/10,5 kV snage 40/40/13.3 MVA rezonantno uzemljenim na SN strani. Duljine vodova su zadane prema Tablici I. Prema podacima iz pogona kabeli su tipa XHE 49A sa jezgrom iz aluminija presjeka  $185 \text{ mm}^2$ , za modeliranje su korišteni presjeci i dimenziji prema slici 8. sa pretpostavkom da su kabeli polagani u trolist.



Slika 8. Presjek kabela i dimenzije





Slika 9. Napon u fazi C,  $U_{C \max}=34590$  V i napon na Petersen prigušnici  $U_{Pet \max}=18574$  V

#### 4. ZAKLJUČAK

Provedene analize i podaci zabilježeni iz mjernih uređaja ukazuju da se u rezonantno uzemljenoj SN mreži uslijed otvorene faze u dijelu mreže mogu pojaviti izrazito visoki fazni prenaponi i do 2.3 p.u. Najveći prenaponi će se pojaviti ako je Petersenova prigušnica blizu potpune kompenzacije. Prema [1] iznos prenapona u slučaju otvorene faze rastu sa porastom tereta, dok sa većim brojem vodnih polja iznos prenapona pada. Praćenjem nultog napona može se detektirati da se radi upravo o otvorenoj fazi. Iako problem vezani uz otvorenu fazu nisu nepoznati potrebno je dodatno naglasiti mogućnost pojave izrazito visokih prenapona u mreži zbog sve većeg broja rezonantno uzemljenih mreža.

U opisanom slučaju detektirano je da je do otvorene faze došlo zbog zatajenja polova kod isklopa u dvije faze, te je problem riješen sa zamjenom linijskog rastavljača. Uslijed brze prorade zaštite nije došlo do oštećenja izolacije u mreži.

#### 5. LITERATURA

- [1] A. Kalyuzhny, "Analysis of Temporary Overvoltages During Open-Phase Faults in Distribution Networks With Resonant Grounding", Power Delivery, IEEE Transactions on, siječanj 2015., 420-427.
- [2] B. Gustavsen, J.A. Walseth, "A case of abnormal overvoltages in a Petersen grounded 132-kV system caused by broken conductor", Power Delivery, IEEE Transactions on, siječanj 2002., 195-200.
- [3] R. Calone, A. Cerretti, F. M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni, G. Valtorta, "Abnormal ground fault Overvoltages in MV networks: analyses and experimental tests", 21st International Conference on Electricity Distribution, Zbornik radova, Frankfurt, Njemačka, lipanj 2011, 0511.
- [4] D. Mučić, K. Petrić, M. Vlaić, "Nesimetrija napona uslijed prekida faze na pomorskom kabelu 10 kV Drvenik-Vinišće", 4.(10) Savjetovanje HO CIRED, Trogir/Seget Donji, Hrvatska, svibanj, 2014. S03-11.
- [5] S Höne, K Hentschel, "Definition of Criteria to Operate 20kV Networks with Arc Suppression Coils According to Standards", CIRED 2009, 20th International Conference on Electricity Distribution, Prag, Češka, lipanj 2009, 769.
- [6] S. Hutter, G. Šagovac, "Provjera stanja uzemljivačkih sustava distribucijskih stanica TS 10(20)/0.4 kV u rezonantno uzemljenim SN mrežama" 2. Savjetovanje HO CIRED, Umag, Hrvatska, svibanj 2010.