

Alen Pavlinić, mag.ing.el.  
HEP ODS d.o.o. Elektroistra Pula  
[alen.pavlinic@hep.hr](mailto:alen.pavlinic@hep.hr)

Hrvoje Opačak, mag.ing.el.  
HEP ODS d.o.o. Elektroistra Pula  
[hrvoje.opacak@hep.hr](mailto:hrvoje.opacak@hep.hr)

## ANALIZA UTJECAJA SHUNT PREKIDAČA NA STRUJU JEDNOPOLNOG KRATKOG SPOJA

### SAŽETAK

Kroz rad se sustavno prikazuje tehnologija shunt prekidača kao jednog od novih koncepta uzemljenja razdjelnih mreža koji prvenstveno služi radi stvaranja uvjeta za otklanjanje prolaznih jednopolnih kvarova bez prekida napajanja potrošača, a time i njegovoj osnovnoj svrsi povećanja kvalitete električne energije. Sam rad započinje opisom principa rada shunt prekidača. Dodatno, ukratko se pojašnjavaju principi usklađivanja rada shunt prekidača sa klasičnom zaštitom od jednopolnog kratkog spoja te detekcija faze u kvaru. Potom rad prelazi na razvoj matematičkog modela proračuna struje kvara na mjestu kvara i shunt prekidača za vrijeme rada shunt prekidača baziranog na metodi simetričnih komponenti. Sam model primjenjuje se na testom modelu mreže s promjenjivim načinom osnovnog uzemljenja kako bi se sagledalo kako pojedini parametri mreže, mjesto kvara, uzemljenje mreže i drugi parametri utječu na rad shunt prekidača. Pri tome vrijednosti proračunatih struja kvara se uspoređuju sa strujama koje se javljaju bez shunt prekidača.

**Ključne riječi:** shunt prekidač, uzemljenje, simetrične komponente, kratki spoj, razdjelna mreža

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF SHUNT CIRCUIT BREAKER ON THE EARTH FAULT CURRENT

### SUMMARY

In the paper a systematic view of the shunt circuit breaker technology as a new concept of distribution network grounding is given. This technology is primarily intended to create conditions for the elimination of transient earth faults without the interruption of power supply, and thus its basic purpose is the improvement of energy quality. The work starts with the explanation of the basic principle of the shunt circuit breaker operation. Additionally, a brief description of the faulted phase detection principle and the coordination with conventional earth fault protection is given. Then the work moves in the development of a mathematical model for the calculation of the fault current on the faulted point and shunt circuit breaker point when the shunt circuit breaker is switched on. The model is then applied on a test network with different basic grounding for the purpose of the analysis how the network parameters, fault location, basic grounding and other parameters affect the work of the shunt circuit breaker. Moreover, the calculated values of faulted currents are compared with the one calculated when the shunt circuit breaker is switched off.

**Key words:** shunt circuit breaker, grounding, symmetrical components, short circuit, distribution network

## 1. UVOD

Otvaranjem tržišta električne energije elektroprivrede širom svijeta stalno su suočene s izazovom povećanja kvalitete i pouzdanosti isporuke električne energije sve zahtjevnijih kupaca. Upravo kao jedna od mjera povećanja kvalitete i pouzdanosti isporuke električne energije se javlja uvođenje shunt prekidača (na postojeći način uzemljenja) kao nove koncepcije uzemljenja u razdjelnim mrežama. Osnovni cilj takve koncepcije uzemljenja je stvaranje uvjeta za otklanjanje prolaznih jednopolnih kvarova bez prekida napajanja potrošača. U razdjelnim mrežama bez shunt prekidača radi otklanjanja prolaznih jednopolnih kvarova (na zračnim vodovima) primjenjuje se brzi i spori automatski ponovno uklop što izaziva kratkotrajne prekide napajanja. Kratkotrajni prekidi napajanja su izuzetno štetni osjetljivim kupcima poput industrijskih potrošača i proizvođača spojenih na razdjelnu mrežu. Uvođenjem shunt prekidača moguće je (u određenim uvjetima) otkloniti jednopolne prolazne kvarove bez izazivanja kratkotrajnih prekida napajanja, što je i njegova osnovna prednost u odnosu na automatski ponovni uklop. Dodatno, statistički je dokazano da u distribucijskom sustavu prolazni jednopolni kvarovi čine najveći udio u ukupnim kvarovima pa samim time opravdanost uvođenja shunt prekidača je povećana. U novije vrijeme razmatra se i mogućnost trajnog uzemljenja faze u kvaru putem shunt prekidača. Međutim, navedena primjena je još u fazi istraživanja i eksperimentiranja.

## 2. OSNOVNI KONCEPTI SHUNT PREKIDAČA KAO OBLIKA UZEMLJENJA U RAZDJELNIM MREŽAMA

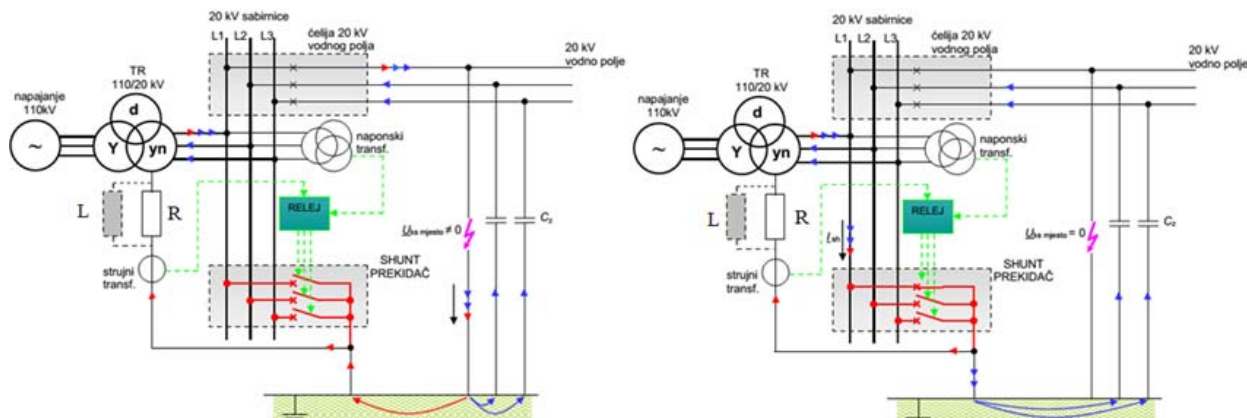
### 2.1. Princip djelovanja

Shunt prekidač se razlikuje od konvencionalnih prekidača po određenim konstrukcijskim osobinama te prema načinu spajanja. Po konstrukcijskim osobinama shunt prekidač omogućuje sklapanje (isklop/uklop) svakog pola prekidača zasebno, a spaja se između sabirnica u postrojenju i uzemljenja što je znatno drugačije u odnosu na konvencionalne prekidače koji se koriste u razdjelnim mrežama. Ideja uporabe shunt prekidača kao oblika uzemljenja leži u činjenici da se dio struje jednopolnog kratkog spoja s mjesta kvara prenese u samo postrojenje koje napaja kvar privremenim (razmatra se i trajno) uzemljenjem faze u kvaru putem samog shunt prekidača. Dodatno, samo mjesto kvara kada je shunt prekidač aktiviran dovodi fazu u kvaru na napon koji bi trebao biti približno 0 (ukoliko se zanemari teret i određene impedancije prilikom razmatranja). Samo smanjenje napona i struje na mjestu kvara djeluje povoljno u pogledu gašenja luka te ako je kvar prolazan moguće je njegovo otklanjanje bez djelovanja prekidača u vodnom polju i bez prekida napajanja potrošača. Na slici 1. je prikazano djelovanje shunt prekidača u mreži uzemljenoj preko otpornika odnosno preko paralelnog spoja otpornika i prigušnice faze. Prema slici 1. razlikuje se slučaj kada je shunt prekidač uključen odnosno isključen. U trenutku nastanka jednopolnog kratkog spoja samom releju treba određeno vrijeme da utvrdi fazu u kvaru pa su prilike u mreži identične kao da nema shunt prekidača. Sama struja kvara u tome slučaju dijeli se na kapacitivnu komponentu struje (koja se zatvara kroz zdrave faze voda u kvaru i ostalih zdravih vodova) te struju koja prolazi kroz otpornik odnosno paralelni spoj otpornika i prigušnice. U trenutku prorade shunt prekidača kapacitivna struja se i dalje zatvara kroz zdrave faze zdravih vodova i voda u kvaru, ali se struja kvara sada zatvara od sabirnica prema uzemljivaču transformatorske stanice gdje se dijeli na dio koji prolazi kroz otpornik ili paralelni spoj otpornika i prigušnice te dio koji prolazi kroz dozemne kapacitete. Sam shunt prekidač moguće je koristiti pored u mreži s uzemljenjem preko otpornika odnosno preko otpornika i prigušnice i u mreži s izoliranim uzemljenjem. U mreži s rezonantnim uzemljenjem smatra se da je uvođenje shunt prekidača jednostavno ekonomski neprihvatljivo te razmatranje neće biti obuhvaćeno ovim radom, iako se u [2] predlaže matematički model proračuna u mreži s rezonantnim uzemljenjem.

### 2.2. Načini korištenja shunt prekidača radi uzemljenja razdjelnih mreža

Temeljno pitanje koje se postavlja je koliko je vremena potrebno da shunt prekidač bude uključen da s jedne strane vrijeme bude dovoljno da se omogući gašenje luka na mjestu kvara, a da s druge strane budu zadovoljeni propisi napona dodira. Što se tiče vremena koje je potrebno za gašenje luka pri uzemljenju faze u kvaru kao okvirno vrijeme preporuča se vrijeme od 0,3 s ([1],[3],[4]) odnosno standardno se koristi vrijeme od 0,2-1s.[3] Dodatno radi određivanja napona dodira, od trenutka nastanka kvara na navedeno vrijeme se zbraja vrijeme kašnjenja releja i uklopa shunt prekidača (približno 100 ms) te ako je zaštita od jednopolnog kratkog spoja blokirana za vrijeme rada shunt prekidača i vrijeme prorade zaštite vodnog polja. S aspekta vremena uzemljenja suštinski postoje dva temeljna načina korištenja shunt prekidača, a to su da se faza u kvaru kratkotrajno ili dugotrajno pa čak i trajno uzemli.[4]

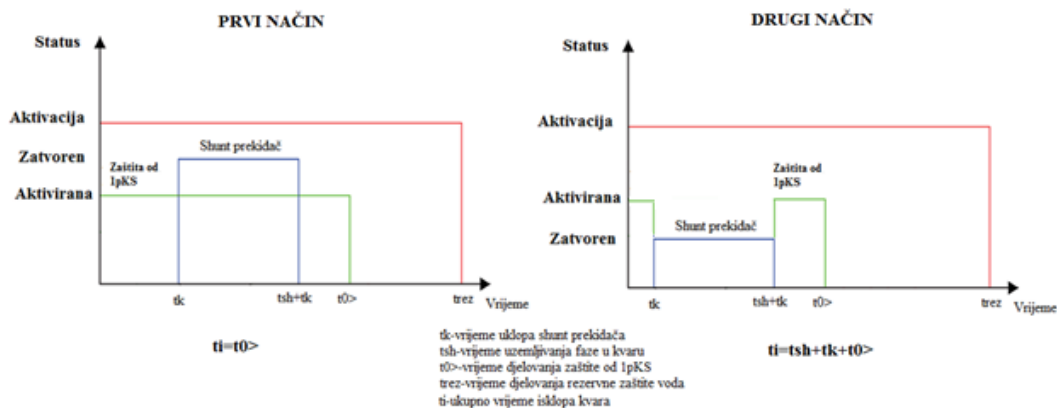
Kratkotrajno uzemljenje izvodi se dakle u vremenu od 0,2-1s s ciljem smanjenja brzih automatskih ponovnih uklopa. Dugotrajno ili trajno uzemljenje putem shunt prekidača nalazi se u fazi razmatranja. Ideja je osigurati napajanje potrošača za vrijeme traženja kvara. Pri tome radi mogućnosti primjene dugotrajnog uzemljenja za vrijeme rada shunt prekidača struja kvara na mjestu kvara i u pojnom postrojenju mora biti smanjena na dostatnu vrijednost i/ili se mora izvršiti ugradnja odgovarajućih uzemljivača, a sve kako bi se zadovoljili naponi dodira. Dodatni, problemi koji se mogu pojaviti u slučaju dugotrajnog uzemljenja su dvojaki. U prvom redu moguće je da je za sekcioniranje kvara potrebno vršiti sklopne operacije na shunt prekidaču što može izazvati probleme oko vođenja sustava, a postoji i problem privremenih prenapona koji mogu izazvati kvar na drugom mjestu u mreži što je posebice nepoželjno. Zato uvođenje dugotrajnog uzemljenja djeluje kao vrlo izazovno rješenje koje treba pažljivo razmotriti.



Slika 1. Rad shunt prekidača--shunt prekidač iskllopljen (lijevo) i uklopljen (desno)[1]

### 2.3. Koordinacija rada shunt prekidača sa zaštitom od jednopolnog kratkog spoja

Glavni problem koordinacije rada shunt prekidača i zaštite od jednopolnog kratkog spoja su prorada i resetiranje releja u vodnom polju. Pri tome se izbjegava situacija u kojoj dolazi do isklapanja prekidača vodnog polja dok je shunt prekidač uklopljen. Temeljno postoje dva načina koordinacije rada shunt prekidača i zaštite od jednopolnog kratkog spoja. Prvi način je da zaštita od jednopolnog kratkog spoja ostaje aktivirana za vrijeme rada shunt prekidača. Time se postiže brži isklon jednopolnog kratkog spoja ukoliko kvar nije otklonjen od strane shunt prekidača. No, kako za vrijeme rada shunt prekidača struja kvara na mjestu kvara može poprimiti vrlo male vrijednosti potrebno je podešavanje zaštite od jednopolnog kratkog spoja na minimalne vrijednosti. Navedeno nije jednostavno postići te se mogu pojaviti problemi nedovoljne osjetljivosti releja te utjecaja greške strujnih mjernih transformatora. Dodatno, podešavanje zaštite od jednopolnog kratkog spoja u normalnom pogonu ograničeno je nesimetrijom tereta. Drugi način je da zaštita od jednopolnog kratkog spoja ostaje blokirana za vrijeme rada shunt prekidača. Time se postiže sporiji isklon u slučaju trajnog kvara te se mogu pojaviti problemi s naponom dodira. Blokiranje se može postići u sekundarnom sustavu ili podešenjem zaštite od jednopolnog kratkog spoja na dovoljnu visoku vrijednost. Na slici 2. prikazana su temeljno podešenja za oba slučaja.



Slika 2. Koordinacija rada shunt prekidača i zaštite od 1pKS-a

## 2.4. Detekcija faze u kvaru

Identifikacija faze u kvaru nužna je radi određivanja koji će pol shunt prekidač uklopiti prilikom nastanka jednopolnog kratkog spoja. Pri tome razvijeno je više metoda identifikacije faze u kvaru. Detekcija faze u kvaru se temeljno provodi mjerenjem faznih napona na sabirnicama. Prilikom pojave idealnog jednopolnog kratkog spoja bez prijelazne impedancije poznato je da faza u kvaru pada na vrijednost 0, a napon zdravih faza naraste na linijsku vrijednost. Stoga, faza koja ima najnižu vrijednost napona je i faza u kvaru. Međutim, navedena metoda je suviše jednostavna jer u slučaju pojave veće prijelazne impedancije moguće je da napon faze u kvaru bude i viši od napona u zdravim fazama (posebice kod izoliranog uzemljenja). S druge strane shunt prekidač ne smije uklopiti na višepolne kvarove. Iz navedenog i drugih razloga u praksi se dodaje nekoliko dodatnih kriterija kako bi se spriječilo pogrešno djelovanje shunt prekidača što ovisi i o načinu osnovnog uzemljenja razdjelne mreže. Detalji o dodatnim uvjetima mogu se naći u literaturi [4],[5]. Samim izborom uvjeta za uklop shunt prekidača može se utjecati na sigurnost uklopa odgovarajućeg pola, ali i ograničiti područje rada shunt prekidača. Stoga, treba oprezno proučiti algoritme identifikacije faze u kvaru i njihov utjecaj na rad shunt prekidača u konkretnoj mreži prilikom pojave jednopolnih kratkih spojeva.

## 3. MATEMATIČKI MODEL ZA ANALIZU SHUNT PREKIDAČA

U slučaju kada je shunt prekidač uključen njegov rad u stacionarnom stanju se može modelirati metodom simetričnih komponenti. Analiza se provodi na identičan način kao što se modelira istovremeni jednopolni kratki spoj u dvije različite točke mreže. To de facto i implicira da korištenje shunt prekidača je istovjetno izazivanju dvostrukog jednopolnog kratkog spoja u različitim točkama mreže, ali u istoj fazi. Sama analiza nije jednostavna kao u proračunu jednopolnog kratkog spoja obzirom da se radi o kompleksnoj vrsti kvara. Modeli proračuna koji su postavljeni u radu se temeljno baziraju na [2],[4],[6],[7]. Radi potrebe analize dvostrukog jednopolnog kratkog spoja prvo se vrši grupiranje komponentnih impedancija (direktna, inverzna i nulta) na tri vrste i to na zajedničke za obje vrste kvara, na one koje su određene samo prvim kvarom te na one koje se odnose samo na drugi kvar. Čvorište i predstavlja mjesto shunt prekidača, a čvorište k mjesto kvara. Pri tome model obuhvaća i teret s impedancijom  $Z_l$  koji se pretpostavlja kao simetričan s prekidom u nultom sustavu radi samih transformatora Dy5. Za slučaj uključenosti shunt prekidača i radijalnog napajanja razdjelne mreže pojedine impedancije komponentnih sustava prema slici 3. imaju sljedeće vrijednosti:

$$Z_{di} = 0, Z_{dk} = Z_{di} \quad (1)$$

$$Z_{ii} = 0, Z_{ik} = Z_{di} \quad (2)$$

$$Z_{oi} = 0, Z_{ok} = Z_{oi} \quad (3)$$

$$Z_{idz} = Z_{ikz} = Z_{idAM} + Z_{dT}, Z_{ioz} = (Z_{iT} + 3 \cdot Z_{in}) || (1/(j\omega C_{1SN})) \quad (4)$$

gdje su:

$Z_{di}, Z_{oi}$  - direktna i nulta impedancija voda do mjesta kvara[Ω]

$Z_{dAM}$  - direktna impedancija napojne mreže[Ω]

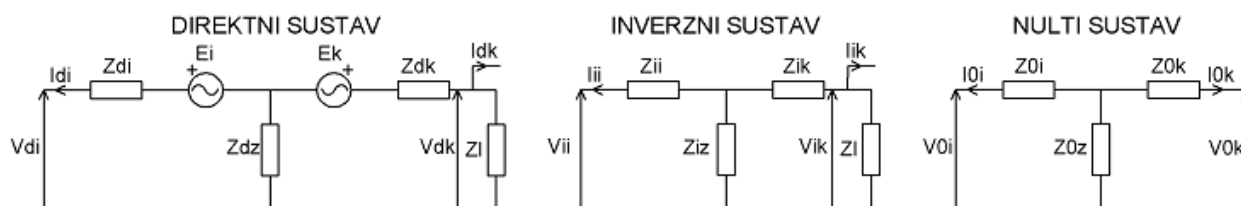
$Z_{dT}$  - direktna impedancija transformatora[Ω]

$Z_{oT}$  - nulta impedancija transformatora ili transformatora za uzemljenje[Ω]

$C_{sn}$  - nulti kapacitet razdjelne mreže[F]

$Z_n$  - impedancija ovisna o uzemljenju mreže[Ω]

Impedancija ovisna o uzemljenju mreže određuje se prema tablici I. U tablici I. oznake  $R_n$  i  $L_n$  predstavljaju vrijednosti otpornika i induktiviteta prigušnice za uzemljenje mreže, a  $\omega$  kružnu frekvenciju.



Slika 3. Nadomjesni model proračuna dvostrukog jednopolnog kratkog spoja

Tablica I. Vrijednosti impedancije ovisne o uzemljenju mreže

Vrsta uzemljenja	$Z_n$
Izolirano	$\infty$
Uzemljeno preko otpornika	$R_n$
Djelomična kompenzacija	$R_n    (\omega L_n)$
Rezonantno	$\omega L_n$

Ukoliko se pretpostavi da je faza u kvaru faza R tada se uvjeti na mjestu kvara i i k mogu postaviti prema:

$$\vec{V}_{di} + \vec{V}_{ii} + \vec{V}_{oi} = 3 \cdot R_{sh} \cdot \vec{I}_{di} \quad (5)$$

$$\vec{I}_{Si} = \vec{I}_{Ti} = 0 \rightarrow \vec{I}_{di} = \vec{I}_{ii} = \vec{I}_{oi} \quad (6)$$

$$\vec{V}_{dk} + \vec{V}_{ik} + \vec{V}_{ok} = 3 \cdot R_f \cdot \vec{I}_{dk} \quad (7)$$

$$\vec{I}_{Sk} = \vec{I}_{Tk} = 0 \rightarrow \vec{I}_{dk} = \vec{I}_{ik} = \vec{I}_{ok} \quad (8)$$

gdje su:

$V_{di}, V_{ii}, V_{oi}, V_{dk}, V_{ik}, V_{ok}$  - direktna, inverzna i nulta komponenta napona na mjestu kvara i i k[Ω]

$I_{di}, I_{ii}, I_{oi}, I_{dk}, I_{ik}, I_{ok}$  - direktna, inverzna i nulta komponenta struje na mjestu kvara i i k[A]

$I_{Si}, I_{Ti}, I_{Sk}, I_{Tk}$  - struje faze S i T na mjestu i i k[A]

$R_{sh}$ -otpor shunt kruga[Ω]

$R_f$ -otpor na mjestu kvara[Ω]

Ukoliko se odrede naponi u komponentnim sustavima prema slici 3. na mjestu kvara i i k te se uvrste u uvjete za komponente napone danim s (5) i (7) tada se mogu odrediti struje  $I_{di}$  i  $I_{dk}$  te struje kvara na mjestu shunt prekidača  $I_{ki}$  i mjestu kvara  $I_{kk}$  prema:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_{ki} \\ \vec{I}_{kk} \end{bmatrix} = 3 \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_{di} \\ \vec{I}_{dk} \end{bmatrix} = 3 \cdot \begin{bmatrix} \vec{Z}_{11} & \vec{Z}_{12} \\ \vec{Z}_{21} & \vec{Z}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_i - \frac{\vec{E}_k \cdot \vec{Z}_{dx}}{k_d} \\ \frac{\vec{E}_k \cdot \vec{Z}_l}{k_d} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$(\vec{Z}_{dx})$

(10)

gdje su:

$E_i, E_k$  - fazni naponi na mjestu i i k[V]

$Z_l$  - impedancija kojom se modelira teret[Ω]

$k_d, k_i, k_{1d}, k_{1i}$  – uvedeni koeficijenti

Uvedeni koeficijenti u izrazima (9) i (10) određuju se prema:

$$k_d = \vec{Z}_l + \vec{Z}_{dk} + \vec{Z}_{dx} \quad (11)$$

$$k_i = \vec{Z}_l + \vec{Z}_{ik} + \vec{Z}_{ix} \quad (12)$$

$$k_{1d} = \vec{Z}_{di} \cdot \vec{Z}_{dk} + \vec{Z}_{di} \cdot \vec{Z}_l + \vec{Z}_{di} \cdot \vec{Z}_{dx} + \vec{Z}_{dk} \cdot \vec{Z}_{dx} + \vec{Z}_l \cdot \vec{Z}_{dx} \quad (13)$$

$$k_{1i} = \vec{Z}_{ii} \cdot \vec{Z}_{ik} + \vec{Z}_{ii} \cdot \vec{Z}_l + \vec{Z}_{ii} \cdot \vec{Z}_{ix} + \vec{Z}_{ik} \cdot \vec{Z}_{ix} + \vec{Z}_l \cdot \vec{Z}_{ix} \quad (14)$$

Prilikom korištenja matematičkog modela definiranog prema (9), (10) unutar ovog rada se uvažava da naponi na mjestu kvara ( $E_i$  i  $E_k$ ) su jednaki faznom naponu mreže, a teret se modelira kao da je koncentriran na kraju dionice voda (ili samom kraju voda) te da je čisto omskog karaktera.

U slučaju da se ne razmatra utjecaj tereta ( $Z_l \rightarrow \infty$ ) izrazi (9) i (10) se znatno pojednostavljuju i prelaze u (15) i (16).

$$\begin{bmatrix} I_{ki} \\ I_{kk} \end{bmatrix} = 3 \cdot \begin{bmatrix} I_{di} \\ I_{dk} \end{bmatrix} = 3 \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E_i \\ E_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0i} + Z_{0s} + Z_{ii} + Z_{is} + Z_{di} + Z_{ds} + 3 \cdot R_{sh} & Z_{is} + Z_{ds} + Z_{0s} \\ Z_{is} + Z_{ds} + Z_{0s} & Z_{0k} + Z_{0s} + Z_{ik} + Z_{is} + Z_{dk} + Z_{ds} + 3 \cdot R_f \end{bmatrix} \quad (16)$$

Izrazima (9) i (10) te (15) i (16) postavljena su dva modela za proračun struja kvara na mjestu shunt prekidača ( $I_{ki}$ ) i na mjestu kvara ( $I_{kk}$ ) sa i bez utjecaja struje tereta za vrijeme rada shunt prekidača. Samim postavljenim matematičkim modelima moguće je zaključiti da struja kvara na mjestu kvara i shunt prekidača ovisna je pored o parametrima i uzemljenju mreže, faznim naponima, mjestu kvara i o otporu shunt kruga, otporu na mjestu kvara, ali u općem slučaju i o samoj veličini tereta.

Kada shunt prekidač ne radi struja jednopolnog kratkog spoja se određuje prema:

$$I_{k1} = \frac{3 \cdot E_d}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3 \cdot R_f} \quad (17)$$

gdje su:

$E_d$  - fazni naponi mreže[V]

$Z_d, Z_i, Z_0$  – ukupna direktna, inverzna i nulta impedancija na mjestu kvara[Ω]

Ukupna direktna, inverzna i nulta impedancija u izrazu (17) se određuje prema:

$$Z_d = Z_i = Z_{dAM} + Z_{dT} + Z_{dL} \quad (18)$$

$$Z^{-1}_0 = (3 \cdot Z^{-1}_{jn} + Z^{-1}_1 0^T) / ((1/(j \cdot \omega \cdot C_{jsn})) + Z^{-1}_1 0^T) \quad (19)$$

#### 4. REZULTATI PRORAČUNA

Rezultati proračuna provest će se na testnom modelu mreže prikazanom prema slici 4. Model mreže se sastoji od modela pojne mreže, transformatora 110/21 kV od tri kabela vodna polja ukupne duljine 20 km i tri zračna vodna polja ukupne duljine 32 km. Odabir uzemljenja mreže odnosno impedancije ovisne o uzemljenju ( $Z_n$ ) se uobičajeno vrši prema tipizaciji danoj u [8]. Unutar rada razmatrat će se tri režima osnovnog uzemljenja mreže:

##### 1) Izolirana mreža

U izoliranoj mreži  $Z_n = \infty$ . No, prema tipizaciji danoj u [8] mreža može biti izolirana samo ukoliko je kapacitivna struja manja od 15 A. Stoga, valja izvršiti provjeru navedenog kriterija. Kapacitivna struja zemljospoja se određuje prema izrazu:

$$I_c = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot C_{sn} \cdot \omega \quad (21)$$

gdje je:

$U_n$  - nazivni napon mreže

Za predmetnu mrežu kapacitivna struja zemljospoja iznosi:

$$I_c = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot C_{sn} \cdot \omega = \sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 5,5582 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 60,49A$$

Stoga, predmetna mreža bi se trebala uzemljiti obzirom da je kapacitivna struja veća od 15 A. No, bez obzira na tu činjenicu proučiti će se rad shunt prekidača ukoliko je mreža izolirana, kako bi se sagledali njegovi efekti u takvoj mreži.

##### 2) Mreža uzemljena preko otpornika

Kako je kriteriji za uzemljenje preko otpornika da omjer struje kroz otpornik i kapacitivne struje bude veći od 3:1 (iznimno 1,5:1) može se zaključiti da minimalna struja kroz otpornik bi trebala biti  $3 \cdot 60,5 = 181,5$  A. Obzirom da je standardizirano 50 A, 150 A i 300 A odabire se 300 A. Stoga, je iznos otpornika odnosno impedancije uzemljenja  $Z_n = 40 \Omega$ .

##### 3) Mreža uzemljena preko otpornika i prigušnice

Kod uzemljenja putem prigušnice i otpornika otpornik se bira da ograniči struju na 50 A. [8] Stoga, za predmetnu mrežu otpornik ima iznos od 240 Ω. Prigušnica se bira prema izrazu:

$$L_n = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_{sn}} \quad (22)$$

Za predmetnu mrežu prema izrazu (22) se dobiva:

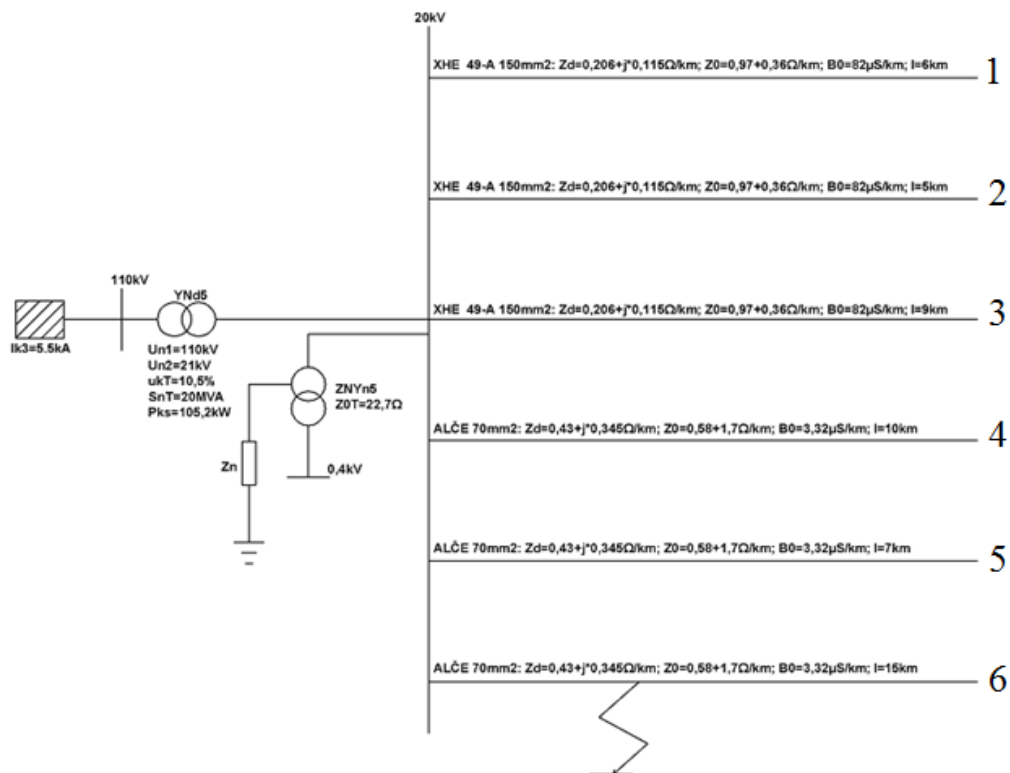
$$L_n = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_{sn}} = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 5,5582 \cdot 10^{-6}} = 607,6 \text{ mH}$$

Na ručno podesivoj prigušnici nije moguće podesiti bilo koju vrijednost induktiviteta već se prigušnice rade u koracima. Ukoliko se posjeduje prigušnica proizvođača Končar tip 2Pe430-7-12/150 optimalni položaj bi bio 2 te  $L_n=615 \text{ mH}$  čime bi mreža bila malo podkompenzirana (iako se preferira nadkompenzacija u iznosu do 15% [9]).

Sumarno pojedini parametri koji će biti korišteni za bazni slučaj pri razmatranim uzemljenjima mreže predstavljeni su tablicom II.

Tablica II. Bazni parametri u proračunu

Parametar	Vrijednost
Fazni napon mreže ( $E_d=E_i=E_k$ )	$21/\sqrt{3} \text{ kV}$
Otpor shunt kruga ( $R_{sh}$ )	$0,5 \Omega$
Otpor na mjestu ( $R_f$ )	$0 \Omega$
Mjesto kvara	VP 6 na 5 km
Impedancija ovisna o uzemljenju ( $Z_n$ )	Izolirano - $Z_n = \infty \Omega$
	Preko otpornika - $Z_n = 40 \Omega$
	Preko otpornika i prigušnice - $Z_n = (j \cdot \omega \cdot 615 \cdot 10^{-3})    240 \Omega$
Teret ( $Z_l$ )	$Z_l = \infty \Omega$



Slika 4. Testni model mreže s tehničkim parametrima

U nastavku se analizira u odnosu na bazni slučaj kako mjesto kvara, otpor shunt kruga i na mjestu kvara te teret utječu na vrijednosti struja kvara tokom rada shunt prekidača pri razmatranim načinima uzemljenja mreže.

#### 4.1. Analiza rada shunt prekidača u izoliranoj mreži

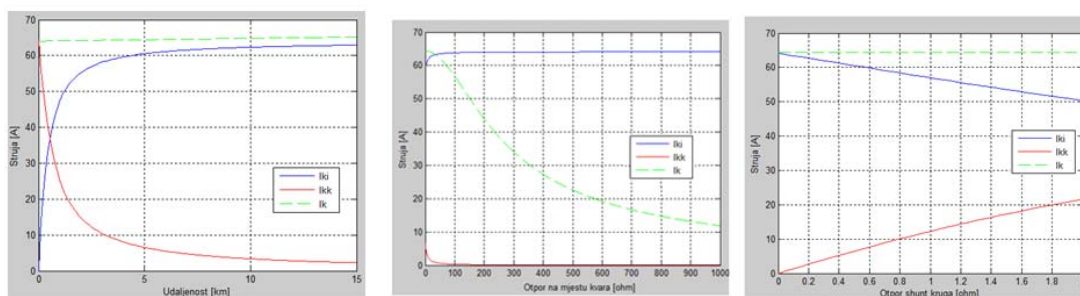
Prema baznom slučaju (parametri prema tablici II. i slici 4.) dobivaju se vrijednosti struje kvara:

- shunt prekidač uključen:  $I_{ki}=60,5373 \text{ A}$ ,  $I_{kk}=6,507 \text{ A}$



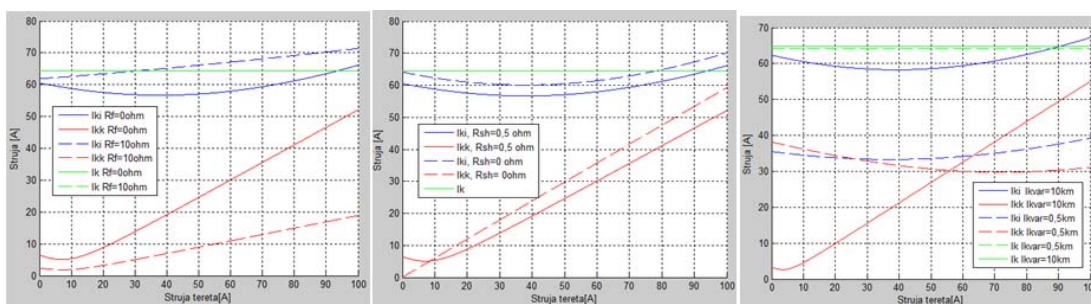
- shunt prekidač isključen (ili bez njega):  $I_k = 64,4285 \text{ A}$

Na slici 5. prikazana je ovisnost struje kvara na mjestu kvara i shunt prekidača te struje jednopolnog kratkog spoja, koji je dobiven matematičkim modelom bez utjecaja struje tereta, pri promjeni nekog parametra ovisnosti uz ostale parametre prema baznom slučaju. Prema slici 5. moguće je zaključiti da povećanjem udaljenosti mjesta kvara povećava se i efikasnost shunt tehnologije jer se struja kvara na mjestu kvara naglo smanjuje. Dodatno, isto se dešava povećanjem otpora na mjestu kvara te smanjenjem otpora u shunt krugu. S druge strane smanjenje struje kvara na mjestu kvara ujedno znači i povećanje struje kvara na mjestu shunt prekidača. Ukoliko se sagleda odnos sa i bez shunt tehnologije tada nije za isključiti u svim uvjetima da struja kvara na mjestu kvara i shunt prekidača ne poprimi iznos struje jednopolnog kratkog spoja. Sagledavajući isključivo struju kvara na mjestu kvara moguće je i zaključiti da shunt tehnologija za konkretno razmatranu mrežu neće u svim uvjetima niti stvoriti uvjete za samogašenje luka obzirom da je poznato da je granica samogašenja luka u izoliranoj mreži pri 20 kV naponu oko 35 A. [10]



Slika 5. Izolirana mreža - utjecaj parametra ovisnosti na struje kvara model bez tereta

Ukoliko se razmotri model s utjecajem tereta tada se razmatranje dodatno komplicira te utjecaj struje tereta može bitno poremetiti struju kvara na mjestu kvara i shunt prekidača. Iz priložene slike 6. moguće je zaključiti da struja tereta može znatno povećati struje kvara pri čemu sam utjecaj zavisi o konkretno odabranoj kombinaciji ostalih utjecajnih parametra. Dodatno, može se zaključiti da i minimalne vrijednosti otpora na mjestu kvara utječu na smanjenje utjecaja struje tereta na struju kvara na mjestu kvara te da struja kvara na mjestu shunt prekidača može u nekim uvjetima i prijeći vrijednost struje jednopolnog kratkog spoja. Zanimljivo je zamijetiti i da model s teretom pokazuje određene suprotnosti u zaključcima u odnosu na model bez tereta. Primjerice u modelu bez tereta zaključilo bi se da je povoljnije imati što manji otpor shunt kruga kako bi struja kvara na mjestu kvara bila što manja. Međutim, u modelu sa teretom vidljivo je da manji otpor shunt kruga može značiti i znatno veći utjecaj struje tereta, a time i veću struju kvara na mjestu kvara. Stoga, teret se svakako mora uzimati u obzir prilikom razmatranja kolike će se struje kvara pojaviti.



Slika 6. Izolirana mreža - utjecaj parametra ovisnosti na struje kvara model s teretom

#### 4.2. Analiza rada shunt prekidača u mreži uzemljenoj preko otpornika

Prema baznom slučaju (parametri prema tablici II. i slici 4.) dobivaju se vrijednosti struje jednopolnog kratkog spoja:

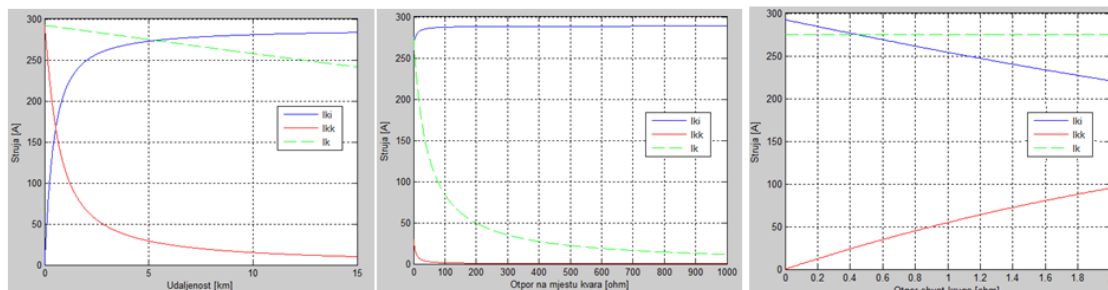
- shunt prekidač uključen:  $I_{ki} = 272,772 \text{ A}$ ,  $I_{kk} = 29,33 \text{ A}$
- shunt prekidač isključen (ili bez njega):  $I_k = 274,97 \text{ A}$

Prema slici 7. vidljivo je da struja kvara na mjestu kvara varira od vrlo malih vrijednosti do vrijednosti struje jednopolnog kratkog spoja ovisno o određenoj kombinaciji utjecajnih parametra. Kao i kod izolirane mreže veću efikasnost shunt tehnologija postiže pri većim udaljenostima od mjesta kvara, većim prijelaznim otporima i manjim otporom shunt kruga. S druge strane struja kvara na mjestu shunt

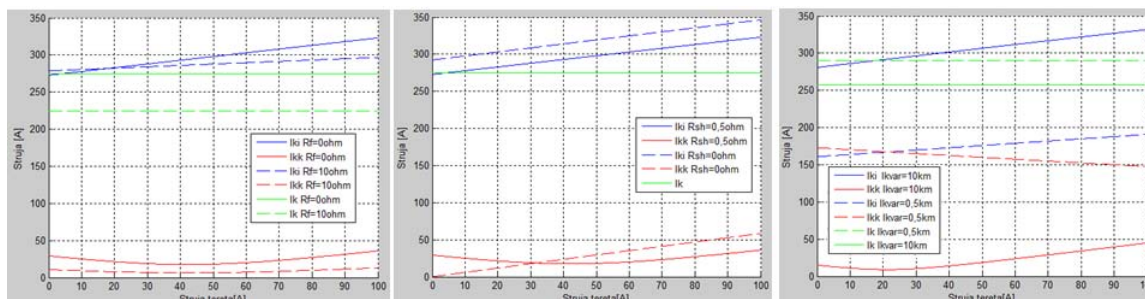


prekidača kod ovog uzemljenja vrlo je učestalo veća od same struje jednopolnog kratkog spoja pri razmatranim situacijama.

Prema slici 8. moguće je zaključiti da je utjecaj struje tereta na struju kvara na mjestu kvara znatno niži u ovome slučaju u odnosu na izoliranu mrežu. Međutim, sama struja kvara na mjestu shunt prekidača u određenim uvjetima prelazi vrijednost struje jednopolnog kratkog spoja što je potrebno predvidjeti prilikom dimenzioniranja uzemljivača.



Slika 7. Mreža uzemljena preko otpornika - utjecaj parametra ovisnosti na struje kvara model bez tereta



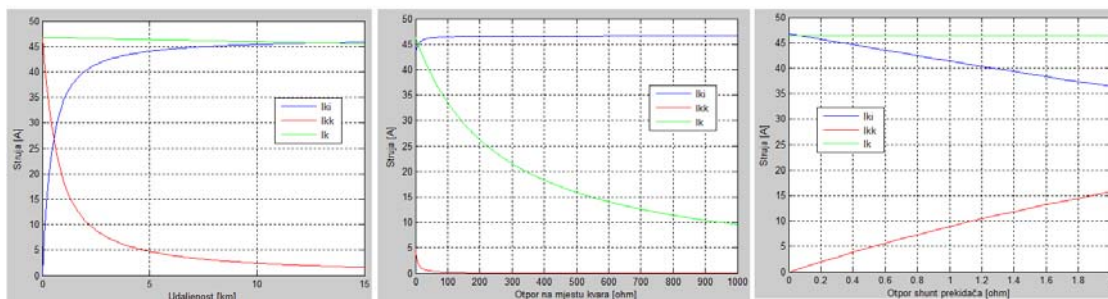
Slika 8. Mreža uzemljena preko otpornika - utjecaj parametra ovisnosti na struje kvara model s teretom

#### 4.3. Analiza rada shunt prekidača u mreži uzemljenoj preko otpornika i prigušnice

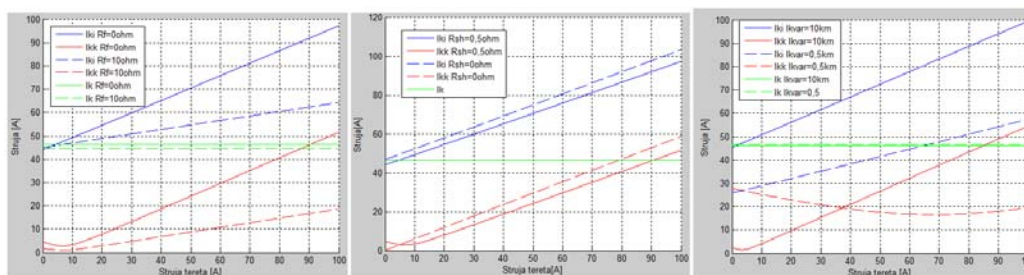
Prema baznom slučaju (parametri prema tablici II. i slici 4.) dobivaju se vrijednosti struje jednopolnog kratkog spoja:

- shunt prekidač uključen:  $I_{ki}=44,06$  A,  $I_{kk}=4,74$  A
- shunt prekidač isključen (ili bez njega):  $I_k=46,35$  A

Prema slici 9. vidljivo je da struja kvara na mjestu kvara varira od vrlo malih vrijednosti do vrijednosti struje jednopolnog kratkog spoja ovisno o određenoj kombinaciji utjecajnih parametara. Kao i kod prethodnih uzemljenja veću efikasnost shunt tehnologija postiže pri većim udaljenostima od mjesta kvara, većim prijelaznim otporima i manjim otporom shunt kruga.



Slika 9. Mreža uzemljena preko otpornika i prigušnice - utjecaj parametra ovisnosti na struje kvara model bez tereta



Slika 10. Mreža uzemljena preko otpornika i prigušnice - utjecaj parametra ovisnosti na struje kvara model s teretom

Prema slici 10. moguće je zaključiti da je utjecaj struje tereta na struju kvara na mjestu kvara i na mjestu shunt prekidača znatno visok u ovome slučaju u odnosu na mrežu uzemljenu preko otpornika. Pri simuliranim uvjetima pokazuje se kako u nekim uvjetima struja kvara na mjestu shunt prekidača može biti dvostruko veće vrijednosti u odnosu na struju jednopolnog kratkog spoja. Dodatno, pokazano je simulacijama da je moguće da i struja kvara na mjestu kvara prijeđe vrijednost same struje jednopolnog kratkog spoja.

## 5. ZAKLJUČAK

Iz same analize stacionarnog stanja primjenom metode simetričnih komponenti pokazano je kako struja kvara na mjestu kvara i shunt prekidača pored o parametrima mreže (vodovima, transformatorima i aktivnoj mreži) značajno ovisi o mjestu kvara, otporu u shunt krugu, otporu na mjestu kvara, struji tereta te osnovnom uzemljenju mreže. Pokazano je kako je shunt prekidač nedjelotvoran pri malim udaljenostima mjesta kvara (teoretski ako je mjesto kvara na sabirnicama praktički su uvjeti jednaki kao da nema shunt prekidača), malim otporima na mjestu kvara te većim otporima u shunt krugu (iako je navedeno kontradiktorno ako se gleda utjecaj tereta) jer se povećava struja kvara na mjestu kvara. Utjecaj struje tereta znatno komplicira cijelu sliku shvaćanja rada shunt prekidača. Sve gore navedene činjenice za stacionarnu analizu vrijede ukoliko se zanemari utjecaj struje tereta. Teret može dovesti do značajnog poremećaja u odnosima. No, utjecaj tereta na struju kvara na mjestu kvara je mali ukoliko postoji neki otpor na mjestu kvara ili ukoliko se poveća otpor shunt kruga. Struja tereta kako je pokazano može dovesti i do prelaska iznosa struje kvara na mjestu kvara iznad struje jednopolnog kratkog spoja. Stoga, razmatranje rada shunt prekidača bez uzimanja u obzir struje tereta u nekim slučajevima može biti rizično i dovesti do povrede sigurnosnih aspekata glede proračuna. Pri razmatranim uzemljenjima najmanji utjecaj struje tereta zabilježen je u mreži uzemljenoj preko otpornika. Rezultati stacionarne analize ukazuju da djelovanje shunt prekidača nije jedinstveno određeno te u nekim uvjetima shunt prekidač svakako neće biti uspješan jer smanjenje struje kvara na mjestu kvara neće biti dovoljno. Dodatno, rezultati stacionarne analize ukazuju da se u nekim slučajevima mogu povećati zahtjevi za zadovoljenje napona dodira odnosno da je potrebno izvođenje boljih uzemljivača ili skraćivanje vremena rada shunt prekidača. Navedeno može biti problematično u vidu iskorištenja, ugradnje i isplativosti same tehnologije. Stoga, bez detaljne analize uvođenja shunt prekidača u konkretnoj mreži razmatranjem osnovnih uvjeta primjene te provođenjem stacionarne analize upitno je da li će se postići maksimalno iskorištenje takve tehnologije ili da se neće načiniti povreda sigurnosnih aspekata glede napona dodira.

## 6. LITERATURA

- [1] Renato Ćučić: "Analiza strujnih i naponskih prilika kod jednopolnih kratkih spojeva u SN mreži s shunt prekidačem", Rijeka, studeni 2006.
- [2] Daniel KOUBA, Karel PROCHAZKA: "The analysis of efficiency of shunt resistor during a single-phase earth fault using the two-port network theory", Cired, Stockholm, Švedska, 2013., lipanj, str. 2147
- [3] Ari Nikander, Pasi Lauri i dr.: "Improving the quality of supply in mv distribution network applying modern shunt circuit breaker", Cired, Frankfurt, Njemačka, 2011., broj 0929
- [4] Jori Tervo: "Analysis of the possible use-cases of phase-earthng circuit breaker in self-healing networks", magistarski rad, Aalto university schools of technology, 2011.
- [5] Projekt NEO 2000: "Shunt protection and control FPC 525", Ljubljana, 2006.

- [6] J. H. Naylor: "Power System Protection Vol 1 - Principles and Components" 2nd ed., The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1995.
- [7] C. L. Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *Trans. AIEE*, edicija II, vol. 37, str. 1027–1140, 1918.
- [8] S. Žutobradić: "Tipizacija rješenja za provedbu uzemljenja zvjezdišta mreža srednjeg napona", studija, 1993.
- [9] Hratmunt Kiank, Wolfgang Fruth: "Planning guide for power distribution plants", Publics Publishing, Erlangen, 2011. god
- [10] V. Komen, R. Ćučić, M. Živić Đurović: "Koncept uzemljenja zvjezdišta razdjelnih mreža", *Engineering Review* 28-2, Tehnički fakultet Rijeka, 2008., p77-89