

# Raspodjela struje kratkog spoja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju

---

**Hudek, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:011172>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**RASPODJELA STRUJE KRATKOG SPOJA U  
VISOKONAPONSKOM ELEKTROENERGETSKOM  
POSTROJENJU**

**Diplomski rad**

**Matija Hudek**

**Osijek, 2019.**

## Sadržaj:

|  |    |
|--|----|
| <b>1. UVOD</b> .....   | 1  |
| <b>1.1. Zadatak diplomskog rada</b> .....                            | 1  |
| <b>2. REDUKCIJSKI FAKTOR</b> .....                                   | 2  |
| <b>2.1. Redukcijski faktor kabela</b> .....                          | 5  |
| <b>2.2. Redukcijski faktor nadzemnih vodova</b> .....                | 11 |
| <b>2.2.1. Kratki spoj unutar postrojenja</b> .....                   | 12 |
| <b>2.2.2. Kratki spoj u blizini postrojenja</b> .....                | 17 |
| <b>3. MODEL ZA SIMULACIJE</b> .....                                  | 21 |
| <b>3.1. Programski paket CDEGS</b> .....                             | 24 |
| <b>3.2. Unos podataka</b> .....                                      | 26 |
| <b>4. REZULTATI SIMULACIJE</b> .....                                 | 30 |
| <b>4.1. Rezultati na susjednim transformatorskim stanicama</b> ..... | 32 |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b> .....  | 38 |
| <b>LITERATURA</b> .....  | 39 |
| <b>SAŽETAK</b> .....   | 40 |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 41 |
| <b>ŽIVOTOPIS</b> .....   | 42 |

# 1. UVOD

Svako elektroenergetsko postrojenje mora imati zadovoljavajući uzemljivački sustav kako bi postrojanje bilo sigurno u slučaju kvara. Za ispravno projektiranje uzemljivača potrebno je znati koliko iznosi struja kvara koja će se zatvoriti preko uzemljivača u zemlju. Kroz uzemljenje neće proći cijela struja kvara već jedan dio, a drugi dio struje kvara poteći će kroz zaštitnu užad dalekovoda ili električnu zaštitu kabela do uzemljivačkog sustava susjednih postrojenja. Omjer struje kvara koja će se zatvoriti kroz uzemljenje u zemlju i ukupne struje kvara je redukcijski faktor. Uz pomoć redukcijskog faktora može se točno odrediti za koliku struju kvara je potrebno dimenzionirati uzemljivački sustav, time se sprječava predimenzioniranje uzemljivačkog sustava što pridonosi značajnim financijskim uštedama.

U ovom radu obrađena je raspodjela struje kratkog spoja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju. Teorijski je obrađen način izračuna raspodjele struje kvara pomoću redukcijskog faktora. U trećem poglavlju prikazan je primjer na kojemu se vršila simulacija jednofaznog kratkog spoja i unos podataka. U primjeru postoji glavno postrojenje na koje je spojeno pet susjednih postrojenja. Četvrto poglavlje prikazuje grafički dobivene rezultate simulacije, redukcijski faktor glavnog postrojenja i raspodjelu struje kvara prema susjednim postrojenjima.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

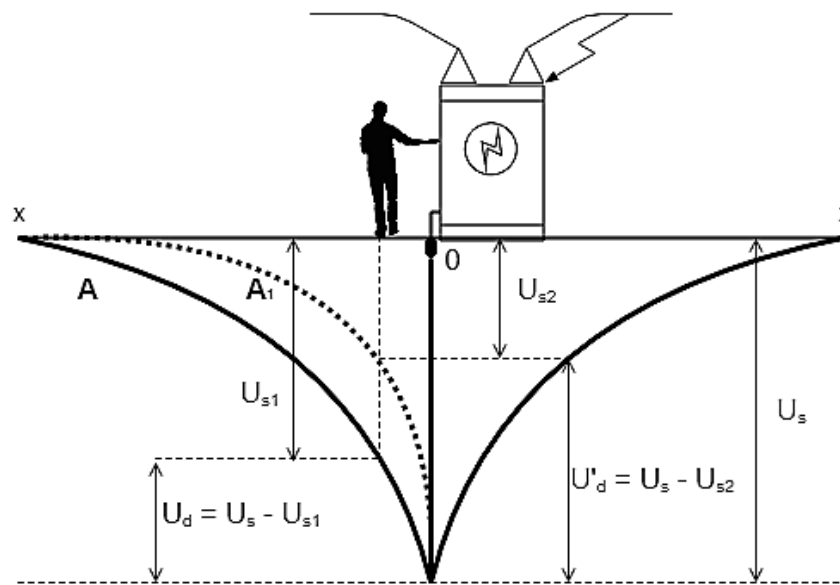
U diplomskom radu potrebno je prikazati načine izračuna redukcijskog faktora uzemljivačkog sustava elektroenergetskog postrojenja. Nadalje, potrebno je objasniti na koji način se može utjecati na promjenu vrijednosti redukcijskog faktora. U programskom paketu potrebno je izraditi model elektroenergetskog postrojenja i okolne mreže te provesti simulacije raspodjele struje kratkog spoja.

## 2. REDUKCIJSKI FAKTOR

Redukcijski faktor je faktor potreban za dobro i kvalitetno projektiranje uzemljivača trafostanice i sustava uzemljenja okolnih vodova i kabela spojenih na transformatorsku stanicu. Kod jednofaznog kratkog spoja struja kvara teče kroz uzemljivač trafostanice i kroz zaštitno uže nadzemnih vodova ili kroz električnu zaštitu kabela odnosno kroz metalni plašt sve do uzemljivačkog sustava susjednih postrojenja. Redukcijski faktor je omjer struje kvara  $I_{uz}$  koja prolazi kroz uzemljivač trafostanice i ukupne struje jednofaznog kratkog spoja  $I_{uk}$ .

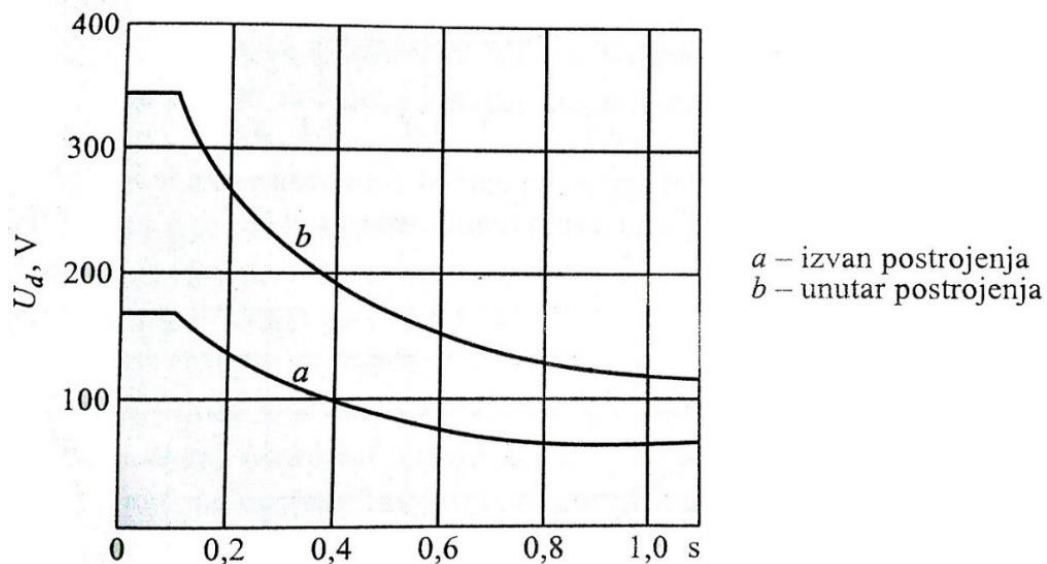
$$r = \frac{I_{uz}}{I_{uk}} \quad (2-1)$$

Struja kvara koja prolazi kroz uzemljivač podiže potencijal tla oko uzemljivača u obliku potencijalnog ljevka. Potencijal tla uz uzemljivač je najveći i nelinearno se smanjuje udaljavanjem od uzemljivača zbog povećanja površine kroz koju struja teče. Potencijal uzemljivača jednak je umnošku otpora uzemljivača i struje koja njime teče. Ako čovjek koji je udaljen 1m dodiruje zaštićen objekt dolazi do razlike potencijala koja uzrokuje dodirni napon, a čovjek zatvara strujni krug.



Sl. 2.1. Raspodjela potencijala i napon dodira

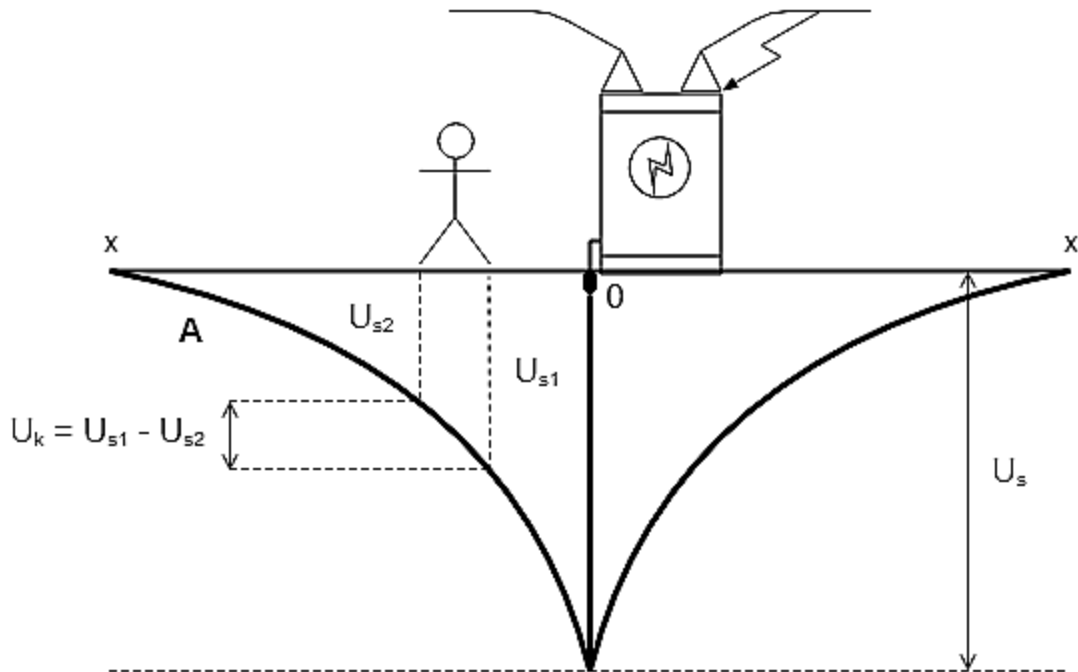
Slika 2.1. prikazuje raspodjelu potencijala oko uzemljivača u obliku lijevka, slojevi tla koji su bliže uzemljivaču zbog manjeg presjeka troše više struje (pružaju veći otpor prolasku struje). Potencijal je prikazan krivuljama A i A<sub>1</sub>. Napon U<sub>s</sub> je maksimalni potencijal na mjestu uzemljivača, U<sub>s1</sub> je potencijal na mjestu gdje stoji čovjek. Razlika maksimalnog potencijala U<sub>s</sub> i potencijala mjesta stajanja U<sub>s1</sub> je napon dodira U<sub>d</sub> mjereno na udaljenosti od 1 metar. Krivulja A<sub>1</sub> je strmija od krivulje A, to znači da se više potencijala troši blizu uzemljivača što rezultira većim dodirnim naponom U'<sub>d</sub>.



Sl. 2.2. Graf dozvoljenog napona dodira u ovisnosti o vremenu trajanja kvara [2].

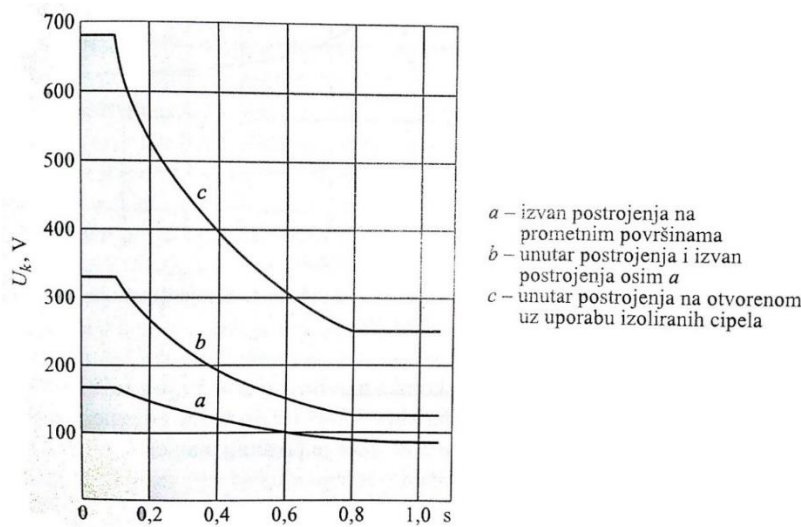
Dozvoljeni napon dodira za struje kvara koje traju dulje od jedne sekunde iznose 125 volti unutar postrojenja i 50 volti izvan postrojenja. Unutar postrojenja je dozvoljen veći napon dodira zbog korištenja obuće s većom izolacijom. Za dozvoljeni dodirni napon od 50 volti uzeto je u obzir da je prosječan otpor čovjeka prosječno 1000 ohm-a, a struja bezopasna po čovjeka 50 miliampera.

Osim dodirnog napona potrebno je regulirati i napon koraka zbog razlike potencijala između čovjekovih nogu kada hoda po površini tla dok teče struja kvara. Napon koraka je razlika potencijala između dodirnih dijelova osobe ili živog bića sa zemljom na kojoj postoji razlika potencijala. Napon koraka se definira kao i napon dodira na udaljenost od 1 metar između stopala.



*Slika 2.3. Raspodjela potencijala i napon koraka*

Na slici 2.3. prikazan je grafički prikaz raspodjele potencijala i napon koraka. Raspodjela potencijala oko uzemljivača prikazana je krivuljom A.  $U_{s1}$  je potencijal na kojem se nalazi jedna čovjekova noga, a  $U_{s2}$  je potencijal druge noge. Razlika potencijala  $U_{s1}$  i  $U_{s2}$  je napon koraka  $U_k$ . Dozvoljeni napon koraka u ovisnosti o vremenu prikazan je grafom na slici (2.4).



*Sl. 2.4. Graf dozvoljenih napona koraka u ovisnosti o vremenu [2].*

Kako bi dodirni napon i napon koraka bili u dozvoljenim granicama, potrebno je ispravno projektirati uzemljivač određenog postrojenja. Za ispravno projektiranje uzemljivača potrebno je izračunati redukcijski faktor za struju jednofaznog kratkog spoja kako bi se odredila struja koja će poteći kroz uzemljivač.

## 2.1. Redukcijski faktor kabela

Energetski kabel visokonaponskog postrojenja ima bitnu ulogu kod jednofaznog kvara transformatorske stanice. Kabel preko svoga metalnog plašta odvodi dio struje kvara iz transformatorske stanice u kojoj je kvar do druge transformatorske stanice povezane tim kabelom. Odvođenjem dijela struje jednofaznog kratkog spoja smanjuje se opterećenje na uzemljivač prve transformatorske stanice.

IPO kabel koristio se dugo vremena u visokonaponskim razinama. Plašt kabela je olovni (O) sa čeličnim trakama za mehaničku zaštitu presvučenu slojem impregnirane jute. Izolacija je od impregniranog papira (IP).

Redukcijski faktor kabela  $r_K$  izračunava se iz omjera otpora plašta kabela i ukupnih otpora u strujnom krugu prilikom jednofaznog kratkog spoja.

$$r_K = \frac{R_{pl}}{(R_{pl} + R_{ZK} + R_Z) + j(X_{pl} + X_Z)} \quad (2-2)$$



**Tab. 2.1.** Fizikalne veličine redukcijuskog faktora kabela:

|          |   |
|----------|---|
| $r_K$    | Redukcijski faktor kabela   |
| $R_{pl}$ | Ukupni djelatni otpor metalnog plašta za IPO kabele ili ukupni djelatni otpor električne zaštite XHP i XHE kabela.                  |
| $R_{ZK}$ | Otpor uzemljenja plašta kabela.   |
| $R_Z$    | Ukupni otpor uzemljenja transformatorskih stanica na koje je spojen kabel. Može se i odvojeno napisati kao: $R_Z = R_{Z1} + R_{Z2}$ |
| $X_{pl}$ | Jedinična reaktancija utjecaja armature ili utjecaja električne zaštite kabela.   |
| $X_Z$    | Reaktancija povratnog puta kroz zemlju do transformatorske stanice na koju je priključen kabel bez utjecaja armature. [1]           |

Ukupna reaktancija je podužna reaktancija, jer je po dužini kabela i povratnog puta kroz zemlju, izražava se jedinično Ohm/km.[1] Utjecaj armature kabela za IPO vrstu kabela prikazan je reaktancijom  $X_{pl}$ , za kabele XHP i XHE reaktancija prikazuje utjecaj električne zaštite kabela.

$$X_{pl} = 0.75\mu_{Fe} \frac{n \cdot d_T \cdot 10^2}{D_S} \quad (2-3)$$

Reaktancija povratnog puta kroz zemlju  $X_Z$  zamišljena je kao fiktivni vodič promjera  $De$ , računa se po formuli prikazanoj dolje: [1]

$$X_Z = 0.145 \log \frac{2De}{D} + 0.016\mu_{pl} \quad (2-4)$$

$$De = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho_z}{f}} \quad (2-5)$$

**Tab. 2.2.** Fizikalne veličina za izraze  $X_{pl}$  i  $X_Z$ :

|            |   |
|------------|---|
| $D_S$      | Srednji promjer armature plašta IPO kabela.   |
| D          | Vanjski promjer električne zaštite kabela.  |
| $\mu_{Fe}$ | Reaktivna permeabilnost metalnog plašta kabela.                                     |
| $\mu_{pl}$ | Reaktivna permeabilnost električne zaštite kabela.                                  |
| n          | Broj traka armature.  |
| $d_T$      | Promjer fiktivnog vodiča ili ekvivalentna dubina povratnog puta struje kroz zemlju. |
| f          | Frekvencija.  |
| $\rho_z$   | Otpornost tla.  |

Za izračun redukcijskog faktora  $r_K$  problem je izračunavanje reaktancije armature kabela  $X_{pl}$  zbog relativne permeabilnosti plašta kabela. Permeabilnost plašta kabela je nelinearna i ovisi o jačini struje kroz plašt. Porastom struje kroz plašt povećava se reaktancija plašta do točke zasićenja armature te povoljno utječe na smanjenje redukcijskog faktora. [1] Ako struja kroz plašt i dalje raste, reaktancija armature prelazi u zasićenje i ne povećava se, a redukcijski faktor se povećava. Problem kod izračuna redukcijskog faktora je izračun reaktancije armature kabela koji imaju željeznu armaturu, na primjer IPO kabeli [1]. Da bi se izračunala reaktancija armature kabela potrebno je znati iznos struje kvara koja teče kabelom, a da bismo znali iznos struje kvara kroz kabel potreban nam je redukcijski faktor.

Ukupni djelatni otpor metalnog djela plašta kabela koji je od bakrenih vodiča ili spoja bakrenih vodiča i čelične armature je:

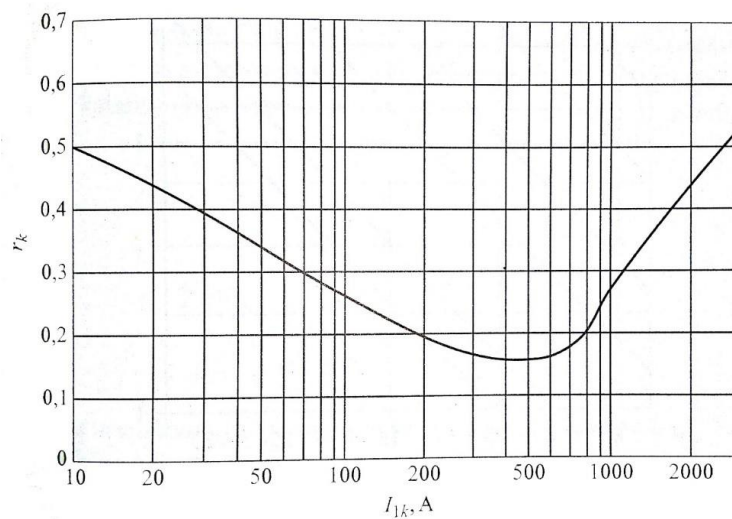
$$R_{pl} = \frac{\rho_{pl}}{S_{pl}} \cdot l \quad (2-6)$$

Ako za izračun otpora  $R_{pl}$  nedostaju podatci za presjek i otpornost armature, onda se uzima iz podataka od proizvođača kabela najnepovoljniju otpornosti vodiča ekrana. Izraz za djelatni otpor plašta kabela nepovoljnom slučaju je:

$$R_{pl} = \frac{\rho_e}{S_e} \cdot l \quad (2-7)$$

**Tab. 2.3.** Fizikalne veličine za izraze  $R_{pl}$ :

|             |   |
|-------------|---|
| $l$         | Duljina kabela.                                     |
| $\rho_{pl}$ | Otpornost plašta kabela.                            |
| $S_{pl}$    | Površina presjeka plašta kabela.                    |
| $\rho_e$    | Otpornost električne zaštite (ekrana) kabela.       |
| $S_e$       | Površina presjeka vodiča električne zaštite kabela. |



**Sl. 2.5.** Graf ovisnosti redukcijskog faktora kabela IPO-13.3x95mm<sup>2</sup> [3].

Iz grafa (sl. 2.5.) vidi se kako je redukcijski faktor nelinearan u odnosu na struju. Na nelinearnost utječe prolazak struje kroz plašt koji sadrži mehaničku zaštitu (čelične trake) koja stvara više harmonike struje što otežava izračunavanje redukcijskog faktora. Za izračun redukcijskog faktora nisu dovoljno koristiti izračune s kompleksnim veličinama, nego se koriste iterativni numerički postupci. Zato se koriste grafovi ovisnosti  $r_K$  o struji kvara radi jednostavnije primjene. Najoptimalniji je redukcijski faktor od 0.15 do 0.2 tj. za struju kvara od 200 do 800 ampera za kabel IPO-13.3x95mm<sup>2</sup>.

Kabli sa sintetičkom izolacijom umjesto čelične armature imaju bakrene vodiče koji su električna zaštita. Vodiči su najčešće presjeka 16, 25 ili 35 mm<sup>2</sup>. Redukcijski faktor za takvu vrstu kabla preporučan je od 0.5 do 0.7. Tipovi kabla srednjeg i visokog napona su XHE i XHP, sadrže sintetičku izolaciju XLPE (umreženi polietilen).

**Tab. 2.4.** Oznake vrsta kabla:

|   |  |
|---|--|
| X | Oznaka posljednjeg sloja izolacije od polietilena. |
| H | Oznaka izolacije vodiča plastikom.                 |
| P | Oznaka za vanjski PVC plašt.                       |
| E | Oznaka za polietilensku izolaciju.                 |

Formulu za redukcijski faktor tri jednožilna kabla koji nemaju čeličnu armaturu je:

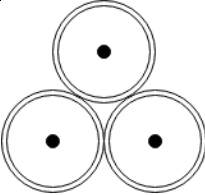
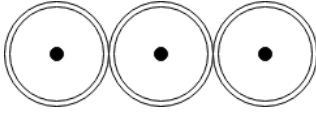
$$r_K = \frac{\frac{R_{pl}}{3} l}{\left(\frac{R_{pl}}{3} + 0.0493\right) l + R_Z + j0.145 \cdot l \cdot \log\left(\frac{658}{r_{pl}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}\right)} \quad (2-8)$$

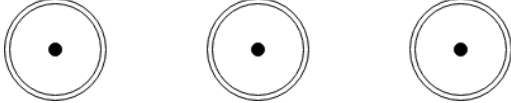
**Tab. 2.5.** Fizikalne veličine iz formule za redukcijski faktor kabela:

|          |   |
|----------|---|
| $R_{pl}$ | Jedinični djelati otpor električne zaštite.       |
| $R_Z$    | Prijelazni otpori uzemljenja na krajevima kabela. |
| $r_{pl}$ | Srednji polumjer električne zaštite kabela.       |
| $\rho$   | Specifična otpornost tla.                         |
| $f$      | Frekvencija.                                      |
| $l$      | Duljina kabela.                                   |

Redukcijski faktor kabela ovisi o nekoliko faktora, najutjecajniji faktor je otpor električne zaštite. Na  $r_K$  utječe način polaganja kabela (Tab. 2.6.), duljina kabela i otpor uzemljenja. Povećanjem duljine kabela povećava se i redukcijski faktor što znači da će manja količina struje poteći kroz električnu zaštitu kabela u slučaju kratkog spoja. Treći faktor je otpor uzemljenja, povećanjem otpora uzemljenja smanjuje se  $r_K$ .

**Tab. 2.6.** Ovisnost redukcijskog faktora o načinu polaganja kabela:

| Način polaganja:      |  | $r_K$ |
|-----------------------|--|-------|
| Trolist               |  | 0.335 |
| U ravninu bez razmaka |  | 0.329 |

|                               |  |       |
|-------------------------------|--|-------|
| U ravninu s razmakom od 10 cm |  | 0.367 |
|-------------------------------|--|-------|

Utjecaj na redukcijski faktor ima i otpornost tla, međutim otpornost tla vrlo malo utječe na promjenu  $r_K$  zato se taj utjecaj može zanemariti.

Iz tablice (2.6.) vidljivo je da redukcijski faktor ovisi o načinu polaganja, ali promjene nisu značajne. Najpogodniji način je polaganje u ravninu bez razmaka jer je redukcijski faktor najmanji i najveća struja prolazi kroz zaštitu kabela.

## 2.2. Redukcijski faktor nadzemnih vodova

Stupovi dalekovoda uz vodiče imaju zaštitno uže na vrhu stupa i uzemljenje stupa. Zaštitno uže dalekovoda spojeno je na uzemljivač trafostanice na koju su spojeni vodovi dalekovoda. Iz tog razloga redukcijski faktor ovisi i o dalekovodu, tj. o zaštitnom užetu i uzemljenju stupova dalekovoda. Uslijed kvara u blizini ili u postrojenju struja kvara teći će kroz uzemljivač trafostanice i preko zaštitnog užeta i stupova u uzemljivač susjedne trafostanice. Redukcijski faktor koristi se kako bi se odredila raspodjela struje kvara koja teče kroz uzemljivač trafostanice, zaštitno uže dalekovoda, uzemljenje stupa dalekovoda, faznim vodičima i električne zaštite kabela (ako postoji kabel). Određivanje redukcijskog faktora je kompleksno zbog utjecaja velikog broja raznih faktora kao što su različiti otpori uzemljenja, presjek vodiča i zaštitne užadi, otpornosti tla, otpor uzemljenja zvjezdišta mreže i drugo. Za izračun struje kvara koja će se zatvoriti kroz uzemljivač u zemlju potrebno je analizirati dva slučaja. Prvi slučaj je kratki spoj unutar trafostanice ili postrojenja, a drugi slučaj je u kratki spoj u neposrednoj blizini trafostanice.

### 2.2.1. Kratki spoj unutar postrojenja

Kratki spoj unutar postrojenja je najčešći slučaj kvara zato je potrebno kvalitetno dimenzionirati uzemljivač postrojenja. Za dimenzioniranje uzemljivača mjerodavna je struja jednopolnog kratkog spoja. Ukupna struja jednopolnog kratkog spoja  $I_{1ks}$  jednaka je zbroju struje jednopolnog kratkog spoja kroz uzemljenje zvjezdišta transformatora  $I_{TR}$  i dijela struje kratkog spoja dalekovoda  $I_{k,i}$ .

$$I_{1ks} = I_{TR} + \sum_i I_{k,i} \quad (2-9)$$

Struja  $I_{TR}$  teče od mjesta kratkog spoja do uzemljenog zvjezdišta transformatora, ne zatvara se kroz uzemljivač postrojenja u zemlju te ne podiže potencijal uzemljivača. Struju  $I_{TR}$  potrebno je uzeti za proračun termičkog napreznja uzemljivača.

Struja koja prolazi kroz uzemljivač postrojenja i zatvara se u zemlju  $I_{ks,z}$  je razlika sume struja kratkog spoja u faznim vodičima pojedinih dalekovoda  $I_{k,i}$  i sume struja u zaštitnom užetu i-tog dalekovoda  $I_{zu,i}$ .

$$I_{ks,z} = \sum_i I_{k,i} - \sum_i I_{zu,i} \quad (2-10)$$

Dio struje kratkog spoja teče kroz zaštitnu užad  $I_{zu,i}$  spojenih na uzemljenje postrojenja, čime se smanjuje udio struje koja se zatvara u zemlju  $I_{ks,z}$ . Faktor koji utječe na raspodjelu struje je redukcijski faktor zaštitnog užeta i-tog dalekovoda  $k_i$ . Veličina struje u zaštitnom užetu n-tog stupa i-tog dalekovoda je prikazana izrazom (2-11).

$$(I_{zu,i})_n = (1 - k_i) I_{k,i} + \beta_i I_{k,zu} e^{n\gamma} \quad (2-11)$$

**Tab. 2.7.** Veličine iz formule za struje u zaštitnom užetu n-tog stupa i-tog dalekovoda (2-11).

|            |   |
|------------|---|
| $k_i$      | Redukcijski faktor zaštitnog užeta i-tog dalekovoda.                        |
| $\beta_i$  | Faktor odvoda i-tog dalekovoda.   |
| $I_{k,zu}$ | Struja kratkog spoja pri uzimanju u obzir jedino redukcijski faktor $k_i$ . |
| $\gamma$   | Konstanta odvoda dalekovoda.  |
| $n$        | Broj stupova dalekovoda.  |

Struja kratkog spoja  $I_{k,zu}$  uzimajući u obzir samo redukcijski faktor zaštitnog užeta  $k_i$  računa se sumom pojedinih struja kratkog spoja dalekovoda i pripadajućih redukcijskih faktora zaštitnog užeta.

$$I_{k,zu} = \sum_i^1 k_i I_{k,i} \quad (2-12)$$

Izraz za struju koja teče kroz zaštitnu užad dalekovoda n-tog stupa i-tog dalekovoda (2-11) izdvajaju se dva utjecajna elementa. Prvi element je struja u zaštitnom užetu dalekovoda koja se zatvara u zemlju preko uzemljivača susjedne transformatorske stanice, definirana je ukupnom strujom kratkog spoja u vodičima dalekovoda i redukcijskim faktorom  $k$  zaštitnog užeta koji se računa prema izrazu (2-13).

$$k = 1 - \left( \frac{Z_{v,zu}}{Z_{zu,z}} \right) \quad (2-13)$$

Impedancije  $Z_{v,zu}$  i  $Z_{zu,z}$  su nulte impedancije zamki između vodiča i zaštitnog užeta te zaštitnog užeta i zemlje. Nulte impedancije zamki nastaju zbog međusobnog djelovanja faznih vodiča i zaštitnog užeta kojima teče struja kvara.



Drugi element je struja koju svaki stup dalekovoda odvodi iz zaštitnog užeta u zemlju (2-14), a eksponencijalno ovisi o broju stupova odnosno udaljenosti stupova od postrojenja. Stupovi povezuju zaštitno uže i zemlju te čine paralelan spoj, povećanjem udaljenosti smanjuje se struja odvoda, sukladno tome najveća struja odvoda je kod postrojenja i putem zaštitnog užeta zatvara se preko stupova dalekovoda u zemlju. Struja odvoda ovisi o faktoru odvoda  $\beta$  i konstanti odvoda  $\gamma$ .

$$I_{st,n} = \beta_i I_{k,zu} e^{n\gamma} \quad (2-14)$$

$$\beta = \frac{\frac{1}{Z_v} - \frac{1}{2 R_{st}}}{\frac{1}{R_z} + \left( \frac{1}{Z_{v,i}} - \frac{1}{2 R_{st,i}} \right)} \quad (2-15)$$

$$\gamma = \operatorname{arch} \left( 1 + \frac{Z_{uz}}{2 R_{st}} \right) \quad (2-16)$$

**Tab. 2.8.** Veličine iz formula za faktor odvoda  $\beta$  i konstante odvoda  $\gamma$  [1].

|            |  |
|------------|--|
| $Z_v$      | Valna impedancija dalekovoda.              |
| $R_{st}$   | Otpor uzemljenja stupa dalekovoda.         |
| $R_{st,i}$ | Otpor uzemljenja stupa i-tog dalekovoda.   |
| $R_z$      | Otpor uzemljenja uzemljivača postrojenja.  |
| $Z_{uz}$   | Impedancija uzemljenja postrojenja.        |
| $\beta$    | Ekvivalent vodljivosti uzemljenja sustava. |
| $\gamma$   | Konstanta odvoda dalekovoda.               |

Valna impedancija dalekovoda dana je izrazom (2-17).

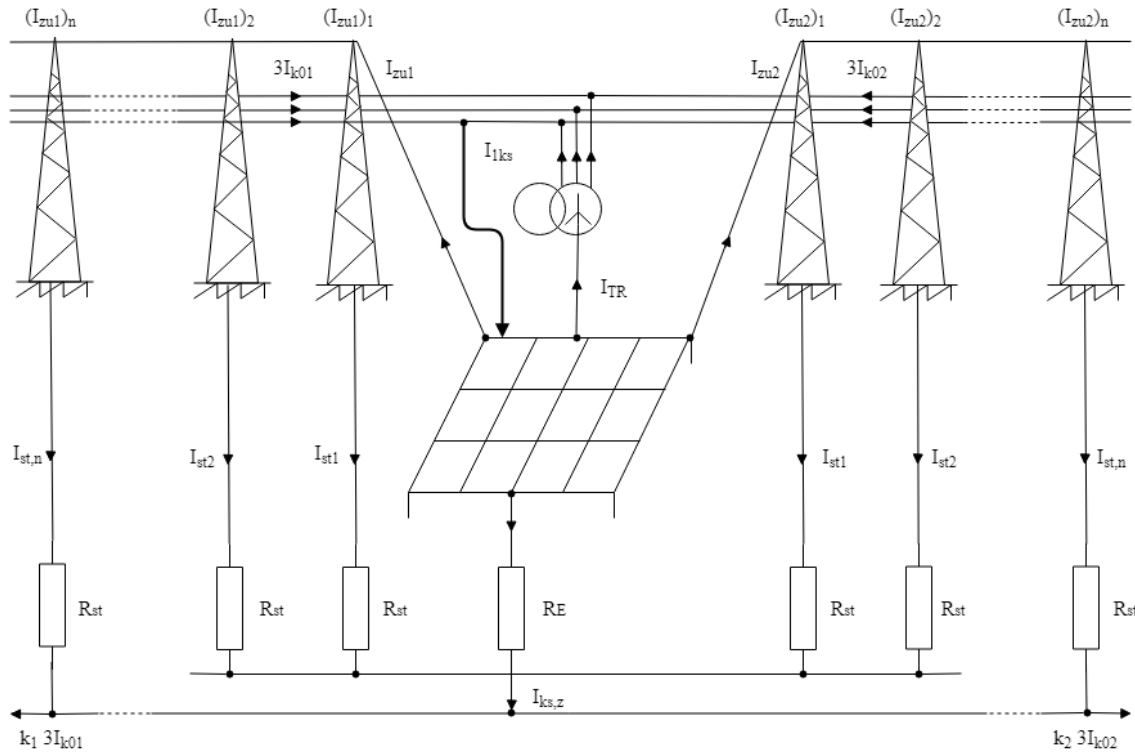
$$Z_v = 2 R_{st} \frac{Z_{uz}}{Z_{uz} + 4 R_{st}} \quad (2-17)$$

Zbog kompleksnosti računanja struje odvoda i zbog korištenja većeg broja pretpostavljenih podataka prema CIGRE-u (Međunarodno vijeće za velike elektroenergetske sustave) struja odvoda se zanemaruje, u obzir se uzima samo inducirana komponenta [3]. Prema tome, kod kratkog spoja u postrojenju dobiva se određena pogreška koja doprinosi sigurnosti jer je dobivena struja veća od stvarne vrijednosti struje [1]. Kod kratkog spoja u postrojenju kroz uzemljivač postrojenja poteći će struja koja je vektorski zbroj umnoška trostrukih nulnih struja u vodičima i pripadajućih redukcijskih faktora zaštitnih užeta [1].

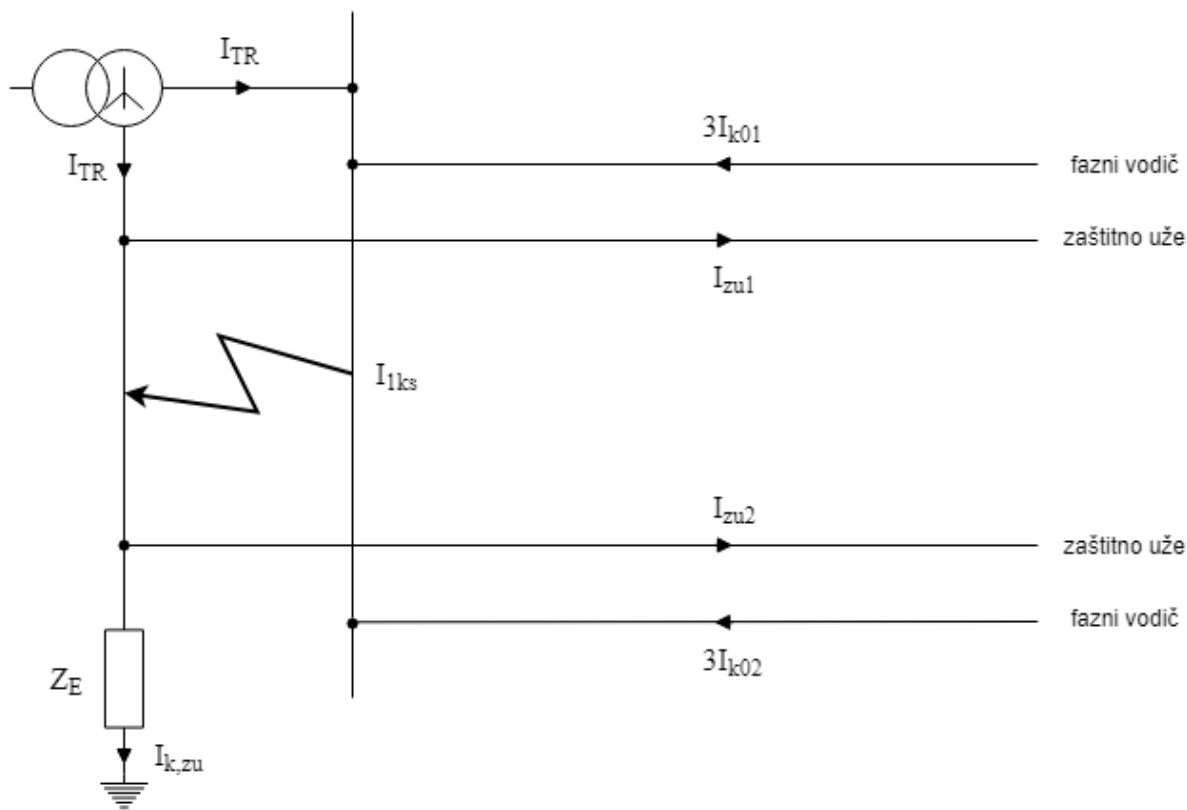
Izraz za struju kratkog spoja kroz uzemljivač:

$$I_{ks,z} = I_{k,zu} = \sum_i k_i I_{k,i} \quad (2-18)$$

Slika (2.6.) prikazuje primjer raspodjele struje jednopolnog kratkog spoja  $I_{1ks}$  unutar postrojenja transformatorske stanice i dva priključena voda, a slika (2.7.) prikazuje nadomjesnu shemu postrojenja prikazanog na slici (2.6.)



Sl. 2.6. Primjer raspodjele struje kratkog spoja unutar transformatorske stanice.



Sl. 2.7. Nadomjesna shema struje kratkog spoja unutar postrojenja.

Ukupna struja jednopolnog kratkog spoja unutar postrojenja prikazanog na slici (2.6.) je izvedena iz izraza (2-9).

$$I_{1ks} = I_{TR} + 3I_{k01} + 3I_{k02} \quad (2-19)$$

Struje  $3I_{k01}$  i  $3I_{k02}$  trostruke nulte struje u vodičima spojenih dalekovoda, a  $I_{TR}$  je struja jednopolnog kratkog spoja kroz uzemljenje zvjezdišta transformatora.  $I_{TR}$  ne zatvara se kroz zemlju nego prolazi od mjesta kvara do uzemljenja zvjezdišta transformatora te ne podiže potencijal uzemljivača. Struja koja prolazi kroz uzemljivač i zatvara se u zemlju je  $I_{ks,z}$  dobije se iz izraza (2-10). Dio struje zatvara se u zemlju, a dio prolazi kroz zaštitnu užad i zatvara se preko uzemljenja stupova dalekovoda i smanjuje opterećenje na sam uzemljivač.

$$I_{ks,z} = (3I_{k01} + 3I_{k02}) - (I_{zu,1} + I_{zu,2}) \quad (2-20)$$

Struja kroz zaštitno uže dalekovoda računa se prema izrazu (2-11) za svaki stup i dalekovod. Izrazi (2-21) su za prva dva stupa prvog dalekovoda, a (2-22) za prva dva stupa drugog dalekovoda.

$$\begin{aligned} (I_{zu,1})_1 &= (1 - k_1) 3I_{k01} + \beta_1 I_{k,zu} e^\gamma \\ (I_{zu,1})_2 &= (1 - k_1) 3I_{k01} + \beta_1 I_{k,zu} e^{2\gamma} \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\begin{aligned} (I_{zu,2})_1 &= (1 - k_2) 3I_{k02} + \beta_2 I_{k,zu} e^\gamma \\ (I_{zu,2})_2 &= (1 - k_1) 3I_{k02} + \beta_2 I_{k,zu} e^{2\gamma} \end{aligned} \quad (2-22)$$

Struja kratkog spoja dalekovoda s uračunatim redukcijским faktorom zaštitnog užeta je iz izraza (2-12), ujedno predstavlja struju kratkog spoja koja uslijed kvara poteče kroz uzemljivač.

$$\begin{aligned} I_{k,zu} &= (k_1 3I_{k01}) + (k_2 3I_{k02}) \\ I_{k,zu} &= I_{ks,z} \end{aligned} \quad (2-23)$$

### 2.2.2. Kratki spoj u blizini postrojenja

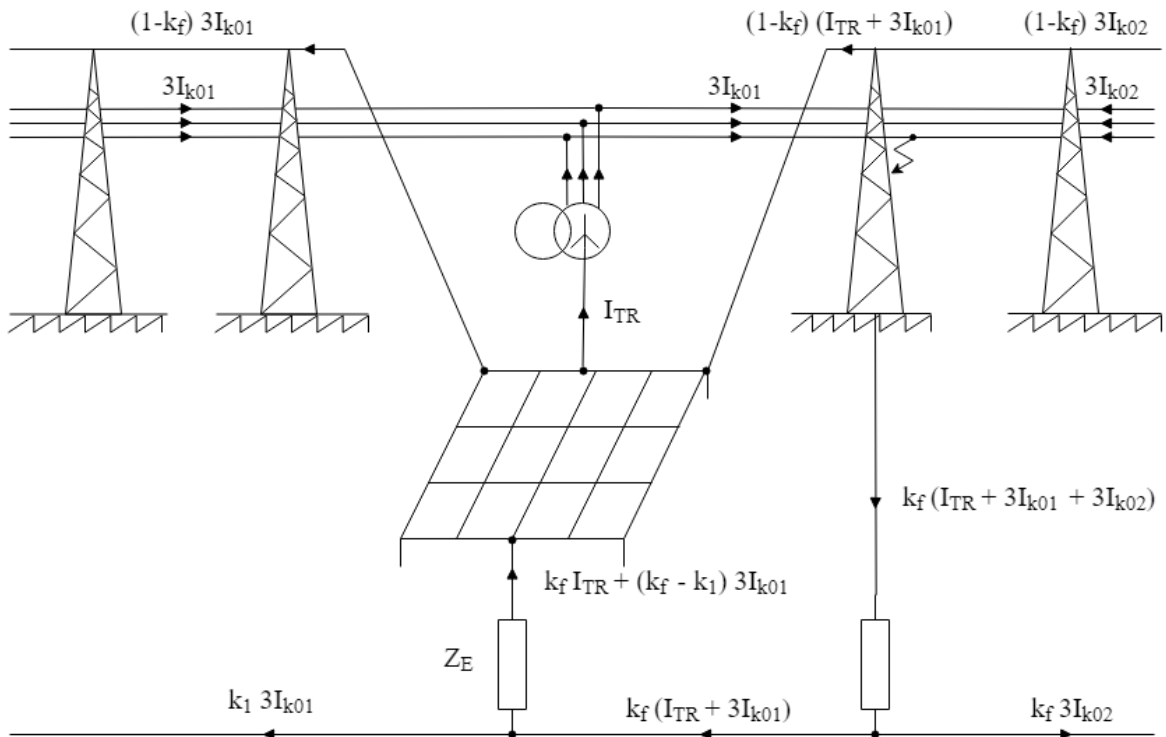
Kod jednopolnog kratkog spoja u blizini postrojenja struja kroz uzemljivač postrojenja određuje se uz zanemarivanje nadomjesnih impedancija voda između (bliskog) bolesnog čvora i zamišljenog mjesta kvara [1]. Izraz struje kvara koja se zatvara u zemlju kroz uzemljivač je:

$$I_{ks,z} = k_{max} I_{TR} + \sum_i (k_{max} - k_i) I_{k,i} \quad (2-24)$$

**Tab. 2.9.** Veličine iz izraza za struju kroz uzemljivač (2-24).

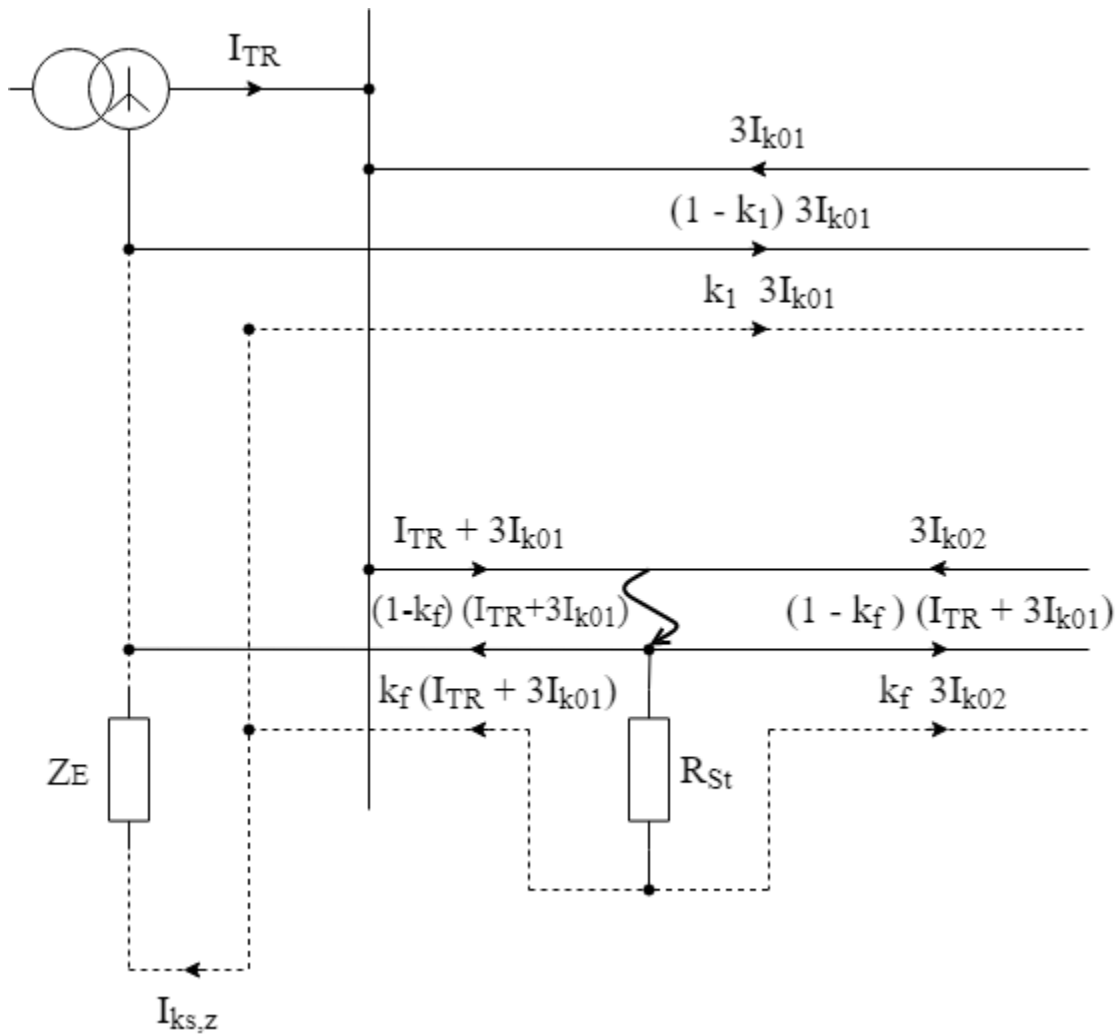
|            |   |
|------------|---|
| $k_i$      | Redukcijski faktor zaštitnog užeta i-tog dalekovoda.  |
| $k_{max}$  | Najveći redukcijski faktor zaštitne užadi svih dalekovoda neposredno priključenih na postrojenje. |
| $I_{TR}$   | Struja kratkog spoja iz spojenog transformatora.  |
| $I_{KS,z}$ | Struja kvara koja teče kroz uzemljivač.   |
| $I_{k,i}$  | Struja kratkog spoja u vodičima i-tog dalekovoda.   |

Slika (2.8.) prikazuje primjer jednopolnog kratkog spoja u blizini postrojenja transformatorske stanice, napajanu sa dva dalekovoda, slično primjeru na slici (2.6.). Kvar je na mjestu između prvog i drugog stupa dalekovoda.



**Sl. 2.8.** Primjer struje jednopolnog kratkog spoja u blizini postrojenja.

Struja kratkog spoja zatvara preko uzemljenja stupa dalekovoda u zemlju i preko zaštitnog užeta u uzemljivač postrojenja. Raspodjela struje određuje se preko redukcijskog faktora zaštitnog užeta  $k_f$ . Struja faznih vodiča dalekovoda dijeli se na mjestu kvara prema redukcijskom faktoru i zatvara se u zemlju, a dio teče zaštitnom užadi dalekovoda. Struja koja prolazi kroz uzemljivač postrojenja je suma dijela struje iz vodiča dalekovoda i struje kratkog spoja iz priključenog transformatora. Primjer sa slike (2.8.) prikazan je nadomjesnom shemom na slici (2.9.).



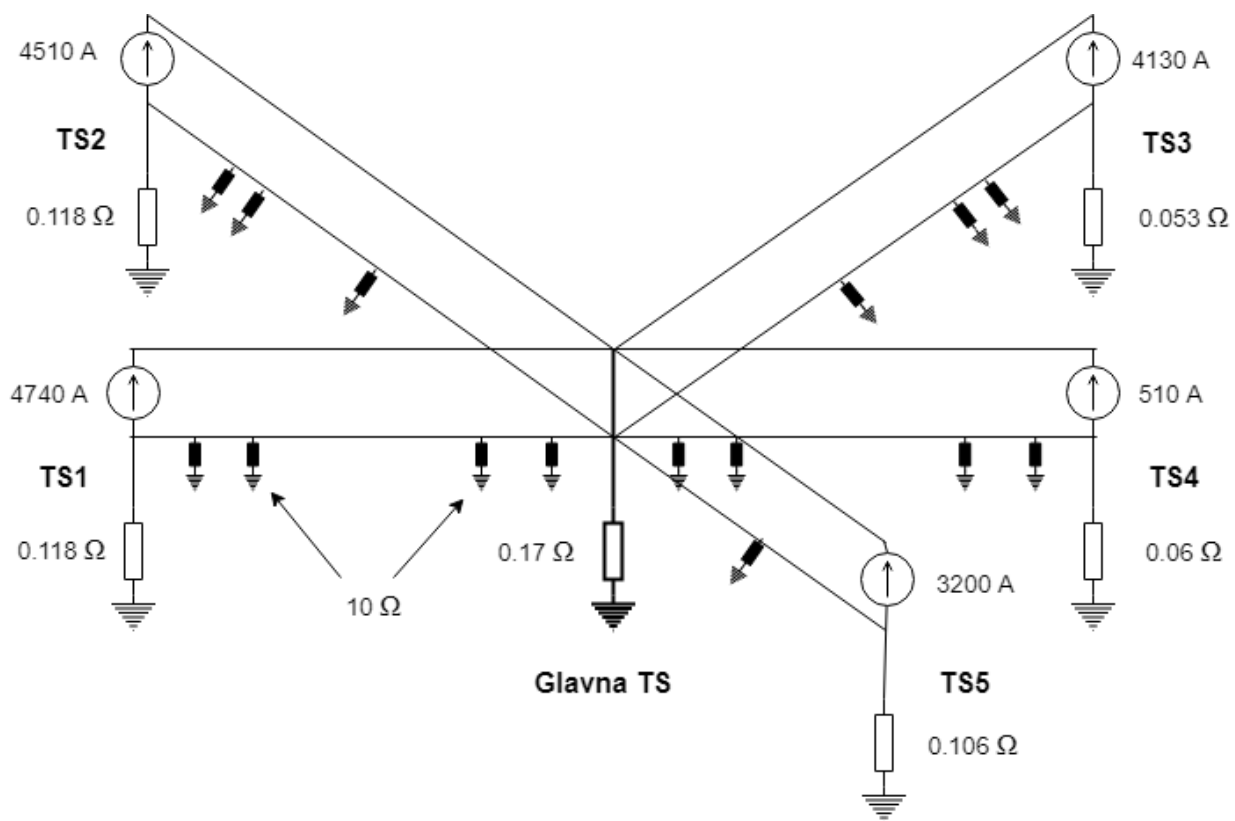
Sl. 2.9. Nadomjesna shema postrojenja sa izrazima za struje.

**Tab. 2.10.** Objašnjenje izraza za struje sa slike 2.8. i 2.9.

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $I_{ks,z}$                     | Struja kvara koja teče kroz uzemljivač postrojenja.  |
| $I_{TR} + 3I_{k01}$            | Struja kroz fazni vodič prvog (lijevog) dalekovoda.  |
| $3I_{k02}$                     | Struja kroz fazni vodič drugog (desnog) dalekovoda.  |
| $(1 - k_f)(I_{TR} + 3I_{k01})$ | Struja kvara kroz zaštitno uže prvog dalekovoda koja se zatvara kroz uzemljivač glavne transformatorske stanice. |
| $(1 - k_f)(3I_{k02})$          | Struja kvara kroz zaštitno uže drugog dalekovoda.  |
| $k_f(I_{TR} + 3I_{k01})$       | Struja kvara prvog dalekovoda i transformatora koja se zatvara preko stupa dalekovoda na uzemljenje postrojenja. |
| $k_f(3I_{k02})$                | Struja kvara drugog dalekovoda koja se zatvara preko stupa dalekovoda u zemlju.                                  |
| $(1 - k_f)(3I_{k01})$          | Struja kvara kroz zaštitno uže prvog dalekovoda koja se zatvara u uzemljivač susjedne transformatorske stanice.  |

### 3. MODEL ZA SIMULACIJE

Simulacija u ovom radu napravljena je na modelu koji se sastoji od jedne glavne transformatorske stanice i četiri susjedne koje su spojene na glavnu transformatorsku stanicu putem dalekovoda. Pomoću ovog modela transformatorskih stanica izračunati će se redukcijski faktor glavne transformatorske stanice u slučaju jednofaznog kratkog spoja. Zbog velike kompleksnosti izračuna redukcijskog faktora za provedbu simulacije koristi se programski paket CDEGS.



*Slika 3.1. Skica modela korištenog u simulaciji.*

Na slici 3.1. prikazana je skica modela. Glavni element je ujedno i glavna transformatorska stanica, a ostale su poredane rednim brojevima kako je prikazano u tablici 3.1. Susjedne transformatorske stanice povezane su s glavnim postrojenjem s dalekovodom. Duljine svakog dalekovoda su različite pa je različit broj i stupova dalekovoda.

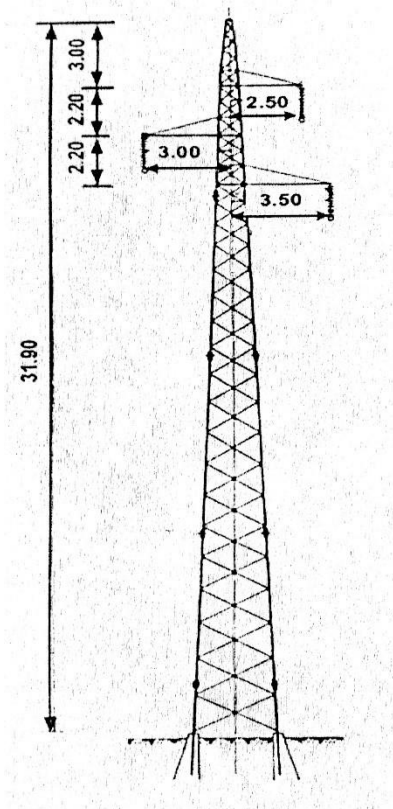


**Tab. 3.1.** Popis transformatorskih stanica i njihove potrebne specifikacije za model.

| Transformatorske stanice | Otpor uzemljenja TS | Doprinos struji kvara | Naponska razina |
|--------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| Glavna TS                | 0.17 $\Omega$       | -                     | 110 kV          |
| Susjedna TS1             | 0.118 $\Omega$      | 4740 A                |                 |
| Susjedna TS2             | 0.118 $\Omega$      | 4510 A                |                 |
| Susjedna TS3             | 0.053 $\Omega$      | 4130 A                |                 |
| Susjedna TS4             | 0.06 $\Omega$       | 510 A                 |                 |
| Susjedna TS5             | 0.106 $\Omega$      | 3200 A                |                 |

U modelu jednofazni kratki spoj se simulira u glavnoj transformatorskoj stanici kako bi se odredio redukcijski faktor postrojenja. Potrebno je odrediti udio struje koja će teći kroz uzemljivač i ostali dio struje koja će teći kroz spojene dalekovode i zatvarati se preko uzemljivača susjednih transformatorskih stanica u zemlju. Dio struje će se zatvarati i preko stupova dalekovoda u zemlju. Udio struje koji će poteći kroz uzemljivač ovisi o otporu uzemljivača glavne stanice i otporu uzemljenja te udaljenosti ostalih susjednih transformatorskih stanica. Struja kvara teče do susjednih transformatorskih stanica kroz zaštitno uže dalekovoda zato i vrsta zaštitnog užeta utječe na udio struje kvara koja će poteći do spojne susjedne stanice. Ukupna struja kratkog spoja glavne transformatorske stanice iznosi 17.09 kA.

Dalekovodi koji povezuju susjedne TS sa glavnom su oblika „jela“ (slika 3.2.), a specifikacije su prikazane u tablici 3.2. Zaštitno uže je od čelika u svim dalekovodima osim dalekovoda D2, na tom dalekovodu nalazi se uže sa integriranim optičkim vlaknima OPGW (Optical power ground wire). Optička vlakna u zaštitnom užetu mogu koristiti za komunikaciju između transformatorskih stanica ili za telekomunikacijske svrhe.



Sl. 3.2. Stup oblika „jela“ [2].

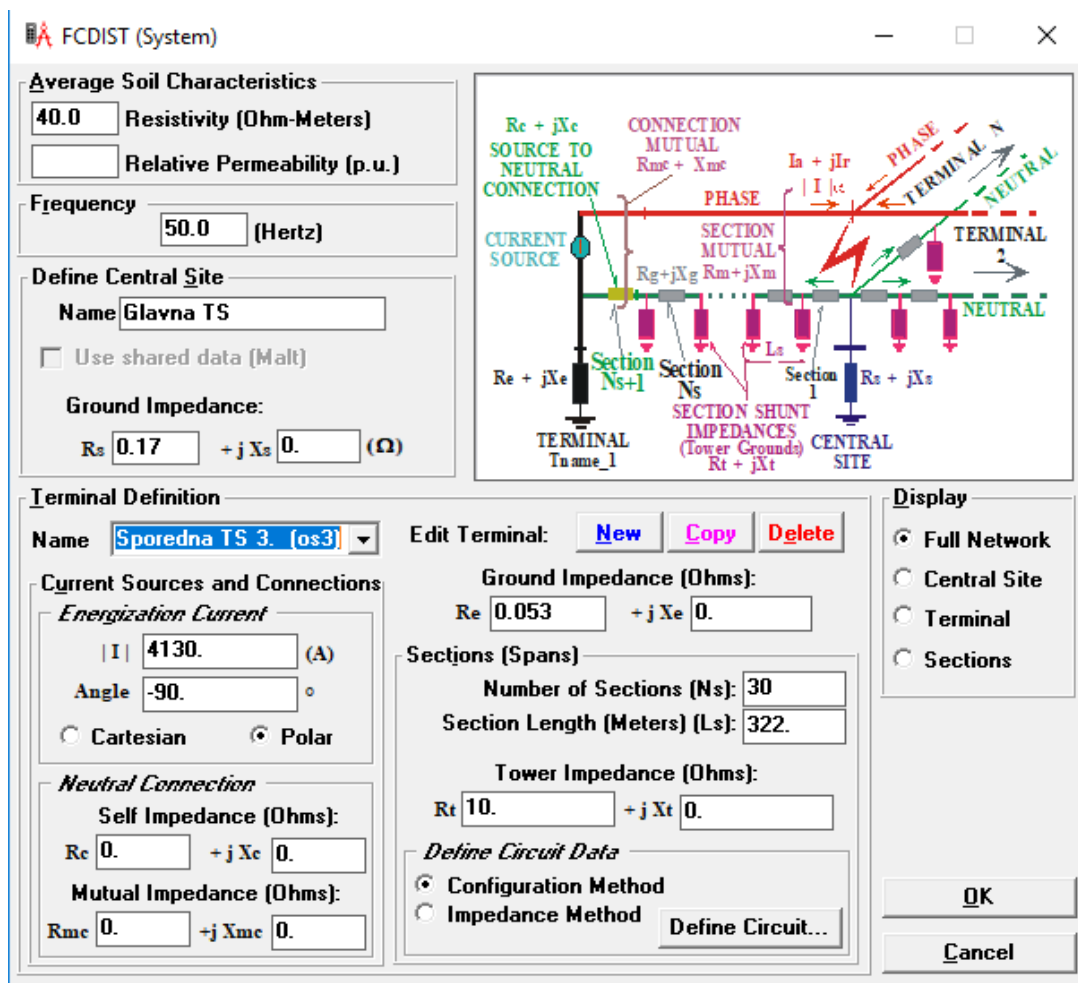
Tab. 3.2. Popis dalekovoda i njihove specifikacije [4].

| Dalekovod | Spojna TS | Duljina [km] | Broj stupova | Vrsta zaštitnog užeta                             |
|-----------|-----------|--------------|--------------|---|
| D1        | TS 1      | 10.48        | 31           | ČIII $r = 3 \Omega/\text{km}$ ( $50\text{mm}^2$ ) |
| D2        | TS 2      | 11.02        | 34           | OPGW $r = 0.225 \Omega/\text{km}$                 |
| D3        | TS 3      | 9.66         | 30           | ČIII $r = 3 \Omega/\text{km}$ ( $50\text{mm}^2$ ) |
| D4        | TS 4      | 26.80        | 87           | ČIII $r = 3 \Omega/\text{km}$ ( $50\text{mm}^2$ ) |
| D5        | TS 5      | 0.5          | 1            | ČIII $r = 3 \Omega/\text{km}$ ( $50\text{mm}^2$ ) |

### 3.1. Programski paket CDEGS

Programski paket u kojemu se provodi simulacija je CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis) [5]. Programski paket sastoji se od više programskih alata za analizu uzemljivačkih sustava, otpornosti tla, elektromagnetska polja za normalno pogonsko stanje, stanje kvara uzrokovano strujom kvara, udare munje itd. Modul iz programskog paketa koji se koristi u ovoj simulaciji je FCDIST [5]. Prednost modula FCDIST je što je potreban mali broj podataka da se dobije izračun struje kvara u postrojenjima i dalekovodima. Program je koristan za procjenu struje kvara te njezinu raspodjelu kako bi se napravio uzemljivački sustav koji nije predimenzioniran što dovodi do značajne financijske uštede.

Sučelje FCDIST modula prikazano je slikom 3.3.



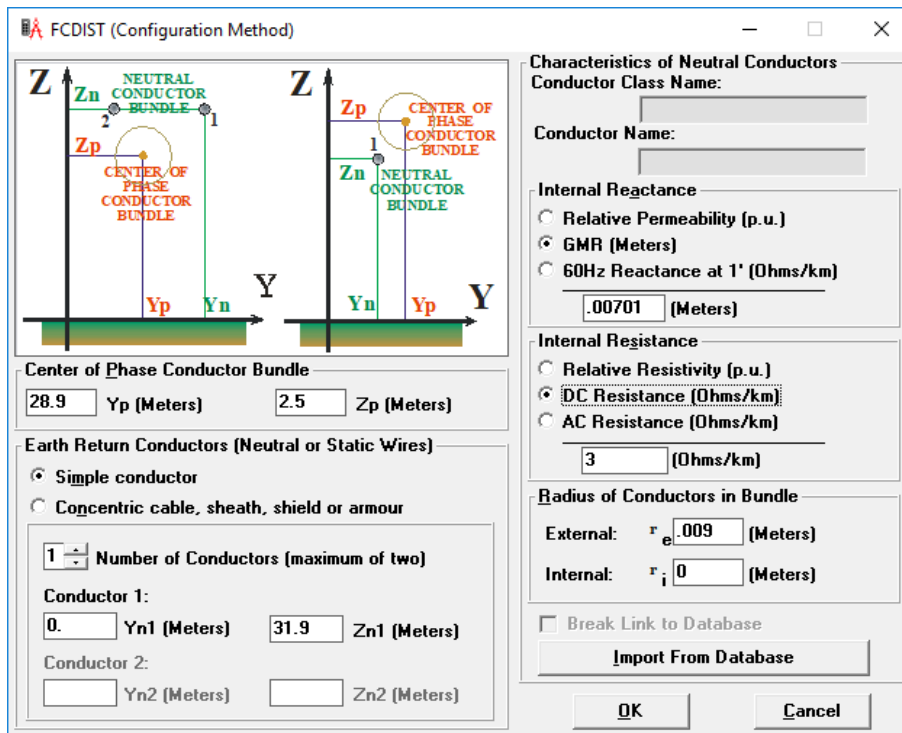
Sl. 3.3. Sučelje modula FCDIST programskog paketa CDEGS.

Sučelje prikazano na slici iznad podijeljeno je u četiri seta potrebnih podataka za simulaciju. Prvi set su podatci glavnog postrojenja, a to je prosječna otpornost tla, frekvencija mreže i otpor uzemljenja glavne TS na kojoj nastaje struja kvara.

Drugi set podataka vezan je za susjedna postrojenja. Prvi podatak je doprinos struje kvara susjedne transformatorske stanice (engl. *Energization current*). Drugo je otpor (impedancija) uzemljenja susjedne postrojenja.

Treći set su sekcije (engl. *Sections*), tu je potrebno upisati broj stupova i udaljenost između dva stupa dalekovoda koji spaja susjedno postrojenje sa glavnim. U praksi udaljenosti između stupova dalekovoda nisu jednake, ovise o konfiguraciji trase na kojoj je dalekovod, zato u simulaciji je potrebno odrediti prosječnu udaljenost dva stupa dalekovoda. Prosječna udaljenost dobije se dijeljenjem ukupne duljine dalekovoda s brojem stupova. Uz to, preko stupova dalekovoda zatvara se struja kvara u zemlju pa je potrebno unijeti i prosječni otpor (impedanciju) stupa sa njegovim uzemljivačem. Prosječan otpor stupa iznosi 10 ohma.

Četvrti set podataka odnosi se na definiranje zaštitnog užeta i faznog vodiča (engl. *Define circuit*) i nalazi se u prozoru prikazanom na slici 3.4.



Sl. 3.4. Sučelje za definiranje zaštitnog užeta i faznog vodiča

Na slici 3.4. grafički je prikazano geometrijski razmještaj faznog vodiča i zaštitnog užeta. Potrebno je upisati koordinate položaja faznog vodiča na kojemu se promatra jednofazni kratko spoj (kvar u postrojenju) u ovisnosti o položaju zaštitnog užeta. Koordinate su vertikalne i horizontalne. Vertikalna koordinata predstavlja visinu, a horizontalna koordinata vodoravnu udaljenost između zaštitnog užeta u promatranog faznog vodiča.

Na desnoj strani prozora (slika 3.4.) su podatci zaštitnog vodiča. Potrebno je unijeti reducirani promjer (GMR) zaštitnog užeta koji se računa prema izrazu (3-1).

$$GMR = r_e \cdot 0.7788 \quad (3-1)$$

$r_e$  – vanjski promjer zaštitnog užeta

$r_i$  – unutarnji promjer zaštitnog užeta

Nakon toga potrebno je unijeti specifični otpor zaštitnog užeta (engl. *DC resistance*, ohm/km), za čelično zaštitno uže ono iznosi 3 ohm/km [4].

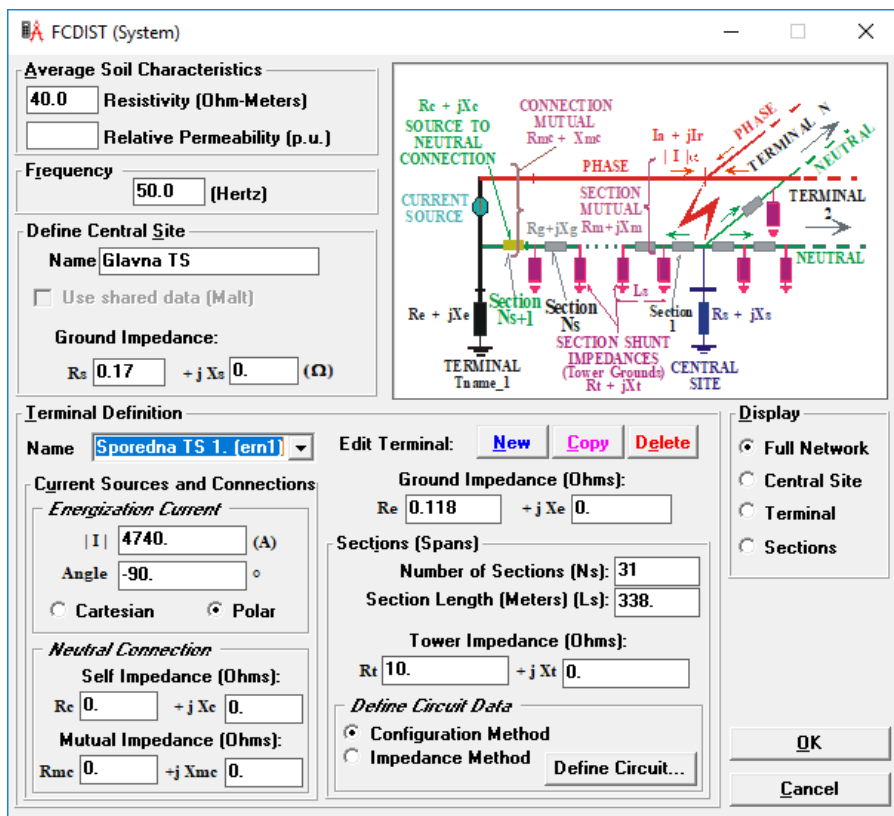
I posljednje se unose promjeri unutarnji i vanjski zaštitnog užeta. Program sadrži i svoju bazu podataka zaštitnih vodiča iz koje se mogu preuzeti svi potrebni podatci (engl. *import from database*).

## 3.2. Unos podataka

Podaci svih pet susjednih postrojenja uneseni su u pet različitih prozora. Za prvo susjedno postrojenje TS1 uneseni podatci su prikazani slikom 3.5. Podatci glavnog postrojenja su jednaki u svim sučeljima. Otpornost tla na području gdje se nalazi glavno postrojenje iznosi 40 ohm/m, a otpor uzemljivačkog sustava iznosi 0.17 ohm-a.

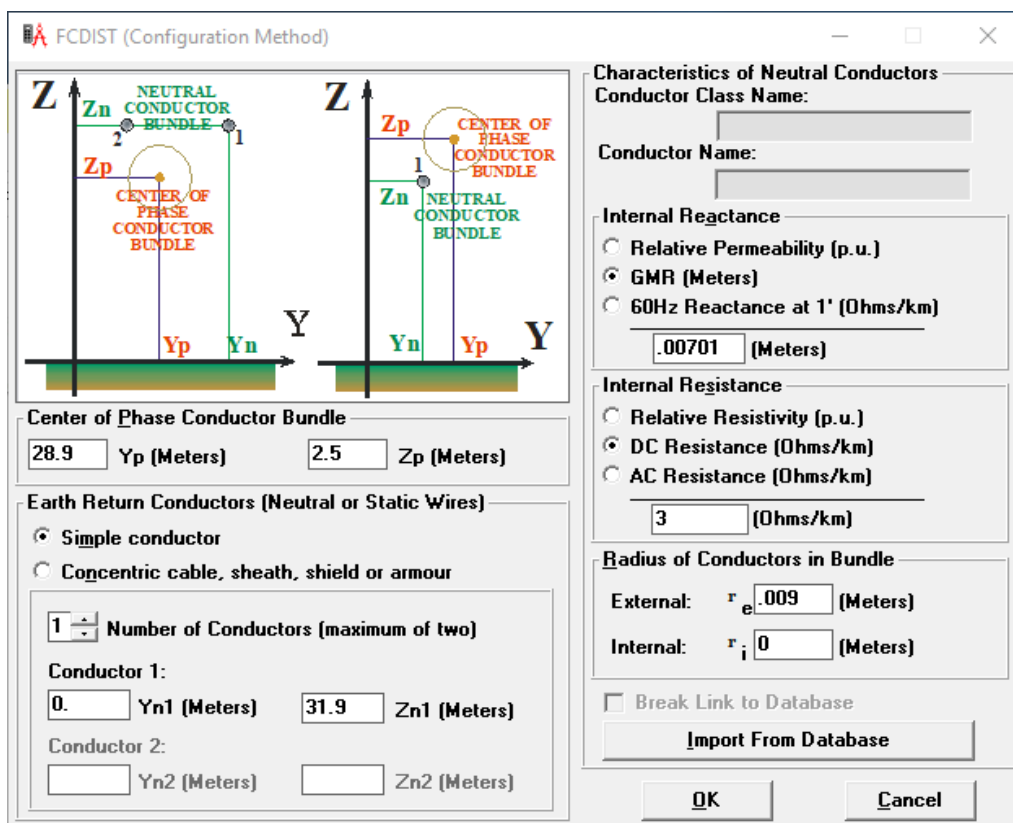
Susjedno postrojenje TS1 ima otpor uzemljenja 0.118 ohm-a. Otpor uzemljenja bi trebao biti što manji kako bi se što veći udio struje kvara zatvorio preko uzemljivačkog sustava u zemlju, a potencijal uzemljivača ne bi prerastao granice opasnosti po čovjeka. Struja jednofaznog kratkog spoja TS1 doprinosi ukupnoj struji jednofaznog kratkog spoja na glavnoj TS, a iznosi 4740 A.

Dalekovod D1 koji spaja glavnu TS i susjednu TS1, sadrži 31 stup, a prosječna udaljenost između stupova iznosi 338 metara. Struja kvara koja prolazi kroz zaštitno uže zatvara se i preko stupova u zemlju, stupovi čine paralelan spoj, a otpor svakog stupa je 10 ohm-a.



Sl. 3.5. Uneseni podatci za glavnu TS i ST1.

Nakon unosa podataka za glavnu TS, susjednu TS1 i dalekovod D1, potrebno je unijeti konfiguraciju faznog vodiča i zaštitnog užeta (slika 3.6). Promatrani fazni vodič nalazi se na položaju koordinata visine od 28,9 metara i horizontalne razmaka 2,5 metara, a zaštitno uže nalazi se na položaju koordinate visine 31,9 metara i ishodišta horizontalne koordinate  $Y_{n1} = 0$ .



### Sl. 3.6. Uneseni podatci zaštitnog užeta za dalekovod D1.

Zaštitno uže dalekovoda D1 je čelično, presjek je  $50 \text{ mm}^2$ , istosmjerna otpornost iznosi 3 ohm/km. Vanjski promjer iznosi 9 mm [4].

GMR izračuna se iz izraza (3-1);

$$\begin{aligned}
 \text{GMR} &= r_e \cdot 0.7788 \\
 &= 9 \cdot 10^{-3} \cdot 0.7788 \\
 &= 0.00701 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{3-2}$$

Ovakav unos podataka primijenjen je i na ostala četiri susjedna postrojenja. Podatci koji su jednaki u svim susjednim postrojenjima su: koordinate položaja zaštitnog užeta i faznog vodiča, otpor

stupa dalekovoda i podatci glavne transformatorske stanice. Zaštitno uže je čelično na svim dalekovodima osim na dalekovodu D2, na D2 nalazi se zaštitno uže s integriranim optičkim vlaknima. Specifikacije OPGW zaštitnog užeta prikazane su na slici 3.7.

The screenshot shows the 'FCDIST (Configuration Method)' software window. On the left, there are two diagrams illustrating the geometry of a phase conductor bundle and a neutral conductor bundle. The phase bundle diagram shows a center of phase conductor bundle at height  $Z_p$  and horizontal distance  $Y_p$  from the Z-axis. The neutral bundle diagram shows a center of phase conductor bundle at height  $Z_n$  and horizontal distance  $Y_n$  from the Z-axis. The configuration panel on the right is titled 'Characteristics of Neutral Conductors' and contains the following settings:

- Conductor Class Name:** (Empty text box)
- Conductor Name:** (Empty text box)
- Internal Reactance:**
  - Relative Permeability (p.u.)
  - GMR (Meters)
  - 60Hz Reactance at 1' (Ohms/km)
- Internal Resistance:**
  - Relative Resistivity (p.u.)
  - DC Resistance (Ohms/km)
  - AC Resistance (Ohms/km)
- Radius of Conductors in Bundle:**
  - External:  $r_e$  .00157 (Meters)
  - Internal:  $r_i$  0 (Meters)
- Break Link to Database
- 
- 

Below the diagrams, the 'Center of Phase Conductor Bundle' section has input fields for  $Y_p$  (Meters) set to 28.9 and  $Z_p$  (Meters) set to 2.5. The 'Earth Return Conductors (Neutral or Static Wires)' section has the 'Simple conductor' option selected, and the 'Number of Conductors' set to 1. The 'Conductor 1' section has  $Y_{n1}$  (Meters) set to 0 and  $Z_{n1}$  (Meters) set to 31.9. The 'Conductor 2' section has empty input fields for  $Y_{n2}$  and  $Z_{n2}$ .

Sl. 3.7. Specifikacije zaštitnog užeta OPGW.

OPGW zaštitno uže ima istosmjernu otpornost 0,2235 ohm/km, što je značajno manje od otpornosti čeličnog užeta 3 ohm/km. Analogno tome veća struja će poteći kroz dalekovod D2 zbog manjeg otpora.



#### 4. REZULTATI SIMULACIJE

U ovom poglavlju su prikazani i interpretirani rezultati simulacije jednofaznog kratkog spoja unutar glavnog postrojenja i njegovo djelovanje na susjedne transformatorske stanice i spojne dalekovode. Rezultati su dobiveni iz pismenog izvješća programskog paketa CDEGS.

Ukupna struja kvara iznosi:

$$I_{1ks} = 17\,090\text{ A} \quad (3-3)$$

Dio ukupne struje kvara koja se u glavnom postrojenju zatvara preko uzemljivača u zemlju. Iznos struje kroz uzemljivač glavne TS iznosi:

$$I_{ks,z} = 8566\text{ A} \quad (3-4)$$

Iz izraza za redukcijски faktor (2-1) dobiven je redukcijски faktor glavnog postrojenja.

$$r = \frac{I_{ks,z}}{I_{1ks}} = \frac{8566}{17090} = 0,4998 = 0,5 \quad (3-5)$$

Redukcijski faktor glavnog postrojenja iznosi 0,4998, znači da će oko 50% struje kvara zatvoriti se u zemlju preko uzemljivača glavne transformatorske stanice, a 50 % struje kvara raspodijeliti će se preko spojenih dalekovoda u susjedna postrojenja.

Iz izraza za struju koja prolazi kroz uzemljivač (2-10) izračuna se suma struje u zaštitnim užima spojenih dalekovoda.

$$\begin{aligned} \sum_i I_{zu,i} &= I_{1ks} - I_{ks,z} \\ \sum_i I_{zu,i} &= 17090 - 8542.2 \\ \sum_i I_{zu,i} &= 8547.8 \text{ A} \end{aligned} \tag{2-10}$$

Ukupna suma struje kvara koja će se rasporediti po susjednim postrojenjima i zaštitnim užadima dalekovoda iznosi 8,548 kA. Tablica 4.1. prikazuje raspodjelu struje kvara prema susjednim postrojenjima.

**Tab. 4.1.** *Raspodjela struje kvara prema susjednim postrojenjima.*

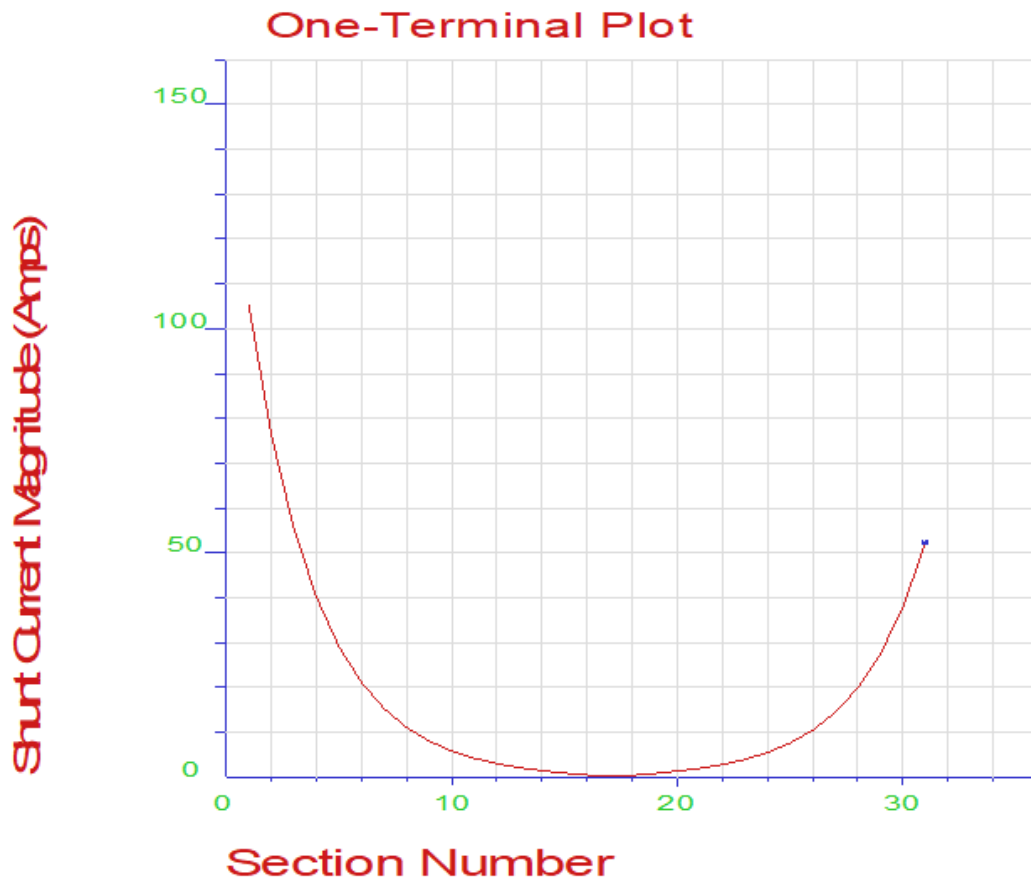
| TS1      | TS2    | TS3       | TS4      | TS5       |
|----------|--------|-----------|----------|-----------|
| 2564.4 A | 1966 A | 2222.48 A | 256.44 A | 1538.64 A |

Transformator ne doprinosi struji kvara te se zanemaruje u proračunu. Prema HRN EN 50522:2012 potrebno je uzeti u obzir da zbog čvrsto uzemljene nultočke visokonaponske strane transformatora, doprinos transformatora jednopolnoj struji kvara se zanemaruje, pošto se struja jednopolnog kvara zatvara kroz nultočku transformatora (ne ulazi u zemlju) [6].

GPR (engl. *ground potential rise*) je potencijal uzemljivača u glavnoj transformatorskoj stanici te za vrijeme kvara iznosi 1452.2 V.

#### 4.1. Rezultati na susjednim transformatorskim stanicama

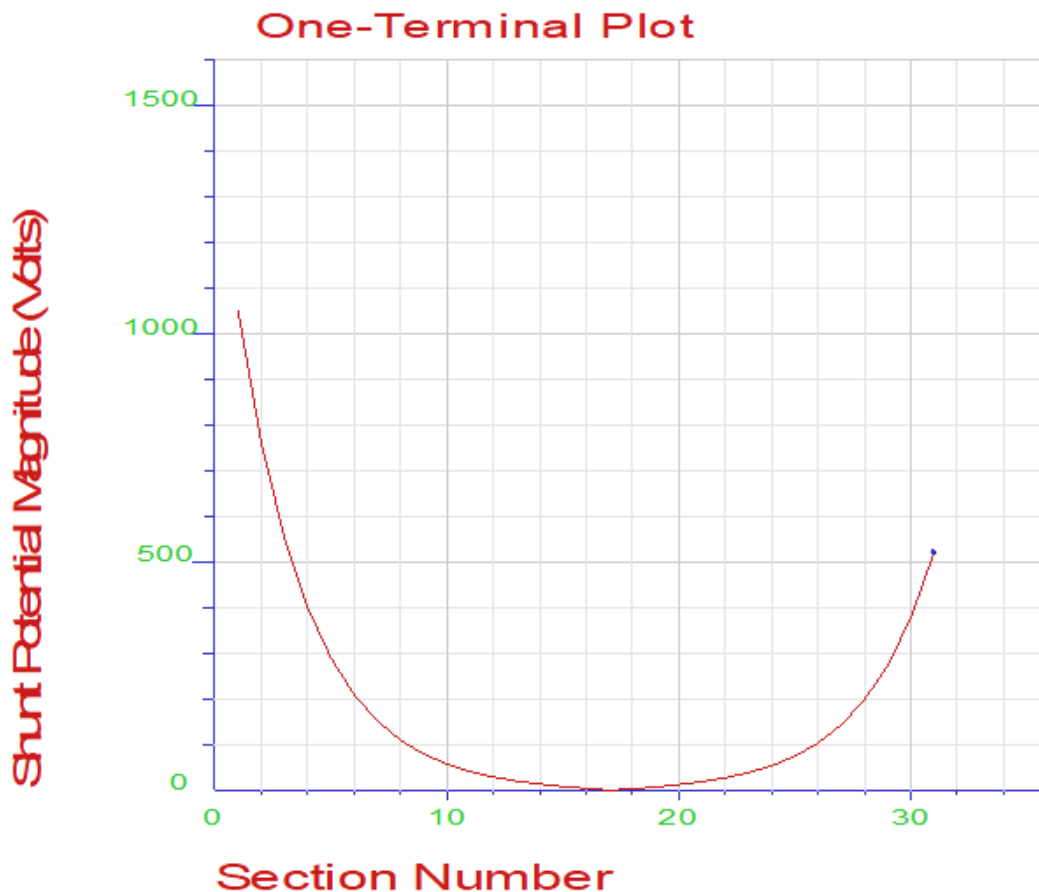
Rezultati simulacije djelovanja jednopolnog kratkog spoja u glavnom postrojenju na ostala susjedna postrojenja. Slika 4.1. prikazuje graf paralelnih struja odvoda dalekovoda D1 i postrojenja TS1.



Sl. 4.1. Paralelne struje odvoda na trasi dalekovoda D1 i postrojenja TS1.

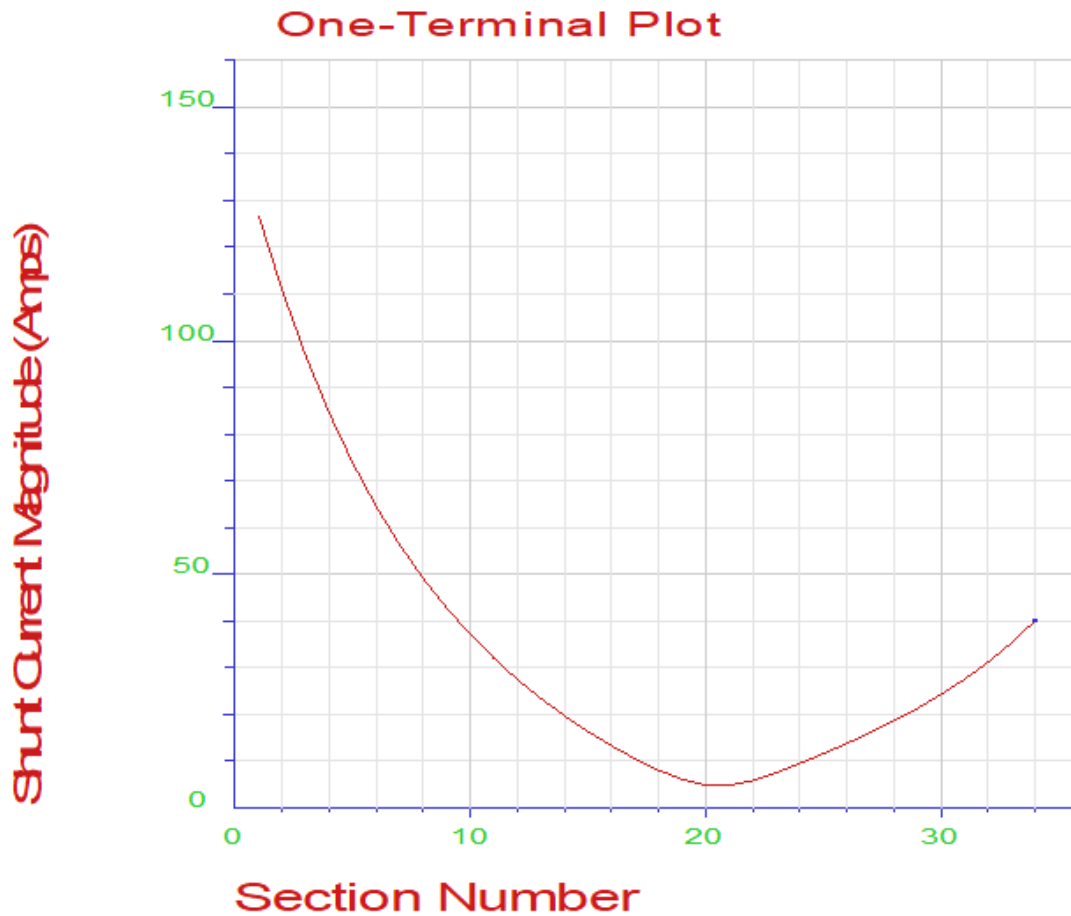
Struja odvoda (sl. 4.1.) je struja koja se zatvara preko stupova dalekovoda u zemlju. Struja je najveća na prvom stupu dalekovoda i iznosi 104 A, zatim eksponencijalno opada do 16. stupa gdje iščezava. Struja iščezava između 16. i 18. stupa, zatim eksponencijalno raste do zadnjeg 31. stupa gdje iznosi 52 A. Razlog ponovnog rasta struje je doprinos struje kvara preko zaštitnog užeta

dalekovoda D1. Struja kvara iz zaštitnog užeta se zatvara preko uzemljivača postrojenja TS1 te završava u uzemljenju pojedinih stupova.



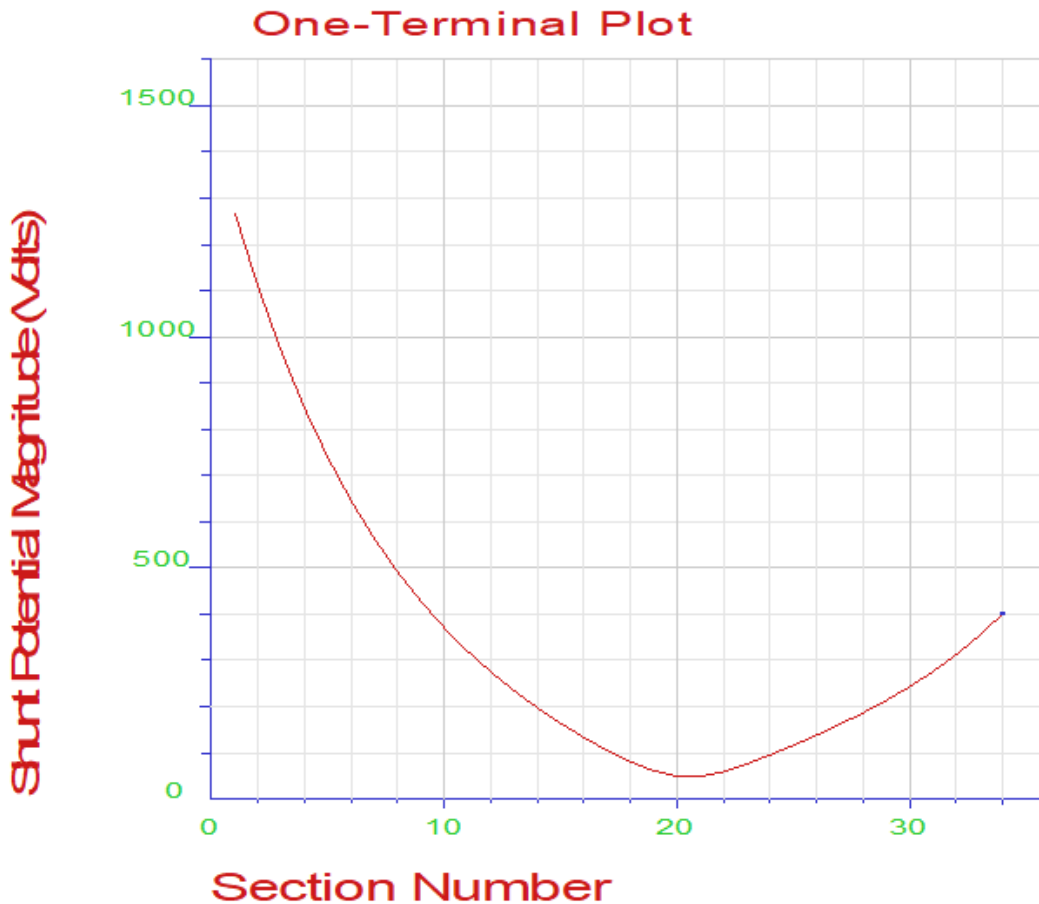
Sl. 4.2. Potencijal uzemljivača stupova na trasi dalekovoda D1 i postrojenja TS1.

Potencijal uzemljivača stupova (sl. 4.2.) slijedi ponašanje struje odvoda stupa. Potencijal je najviši na prvom stupu dalekovoda 1050 V, zatim eksponencijalno pada do stupa 16. gdje iščezava kao i struja odvoda. Ponovni eksponencijalni rast potencijala je na stupu 18. do zadnjeg stupa. Kao i kod struje odvoda (sl. 4.1.) potencijal uzemljivača stupa raste približavanjem susjednom postrojenju TS1, zbog potencijala koji se kroz zaštitno uže prenio na uzemljenje postrojenja TS1. Potencijal na 31. stupu iznosi 515 V.



*Slika 4.3. Paralelne struje odvoda na dalekovodu D2.*

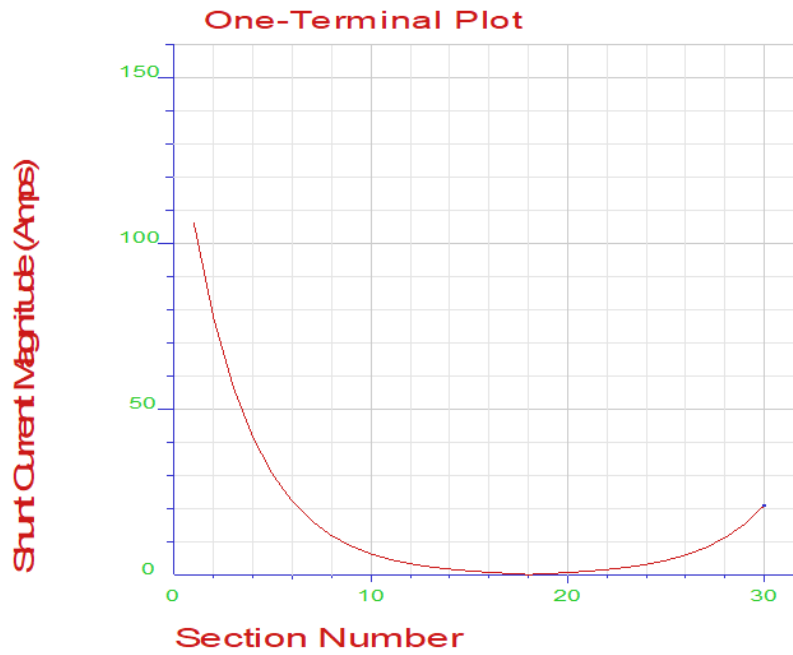
Slika 4.3. prikazuje raspodjelu paralelnih struja odvoda na dalekovodu D2 koji spaja glavno postrojenje sa postrojenjem TS2. Struja odvoda na prvom stupu dalekovoda iznosi 125 A, najmanja struja je između stupova 20. i 21., a iznosi 5 A. Struja u ovom slučaju ne iščezava za razliku od prethodnog slučaja (sl. 4.2.) premda je dalekovod D2 veće duljine od D1 i ima veći broj stupova. Glavni razlog veće struje odvoda i ne iščezavanja je zaštitno uže na dalekovodu D2. Zaštitno uže je OPGW, a nije čelično kao kod ostalih dalekovoda. OPGW zaštitno uže ima znatno manju otpornost i veći presjek što rezultira većom odvodnjom struje kvara. Pozitivna karakteristika je smanjenje opterećenja na uzemljivač glavne transformatorske stanice, ali treba pripaziti na količinu iznesenog potencijala (sl. 4.4.).



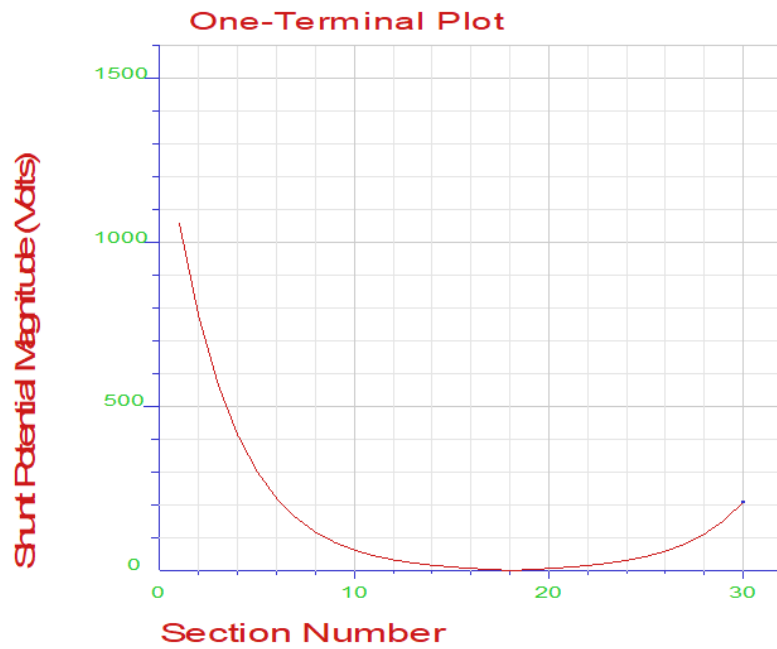
*Sl. 4.4. Potencijal uzemljenja stupova dalekovoda D2.*

Potencijal stupova dalekovoda prema postrojenju TS2 prikazan je slikom 4.4. Potencijal kod prvog stupa iznosi blizu 1300 V. Potencijal kao i struja odvoda eksponencijalno opada do 20. stupa ali ne iščezava. Potencijal uzemljivača stupa je važan u proračunu napona koraka i dodirnog napona, velike razlike potencijala na kratkoj udaljenosti mogu stvoriti dodirne napone ili napone koraka opasne po zdravlje. Ako napon koraka prelazi granice dozvoljenog jedno od jednostavnijih rješenja je nasipavanje površine tla materijalom veće izolacijske moći poput usitnjenog kamena ili asfalta.

Paralelna struja odvoda dalekovoda D3 je slična struji odvoda D1 (sl. 4.5.), struja iščezava od 15. do 17. stupa, najveća vrijednost iznosi 106 A kod prvog stupa.

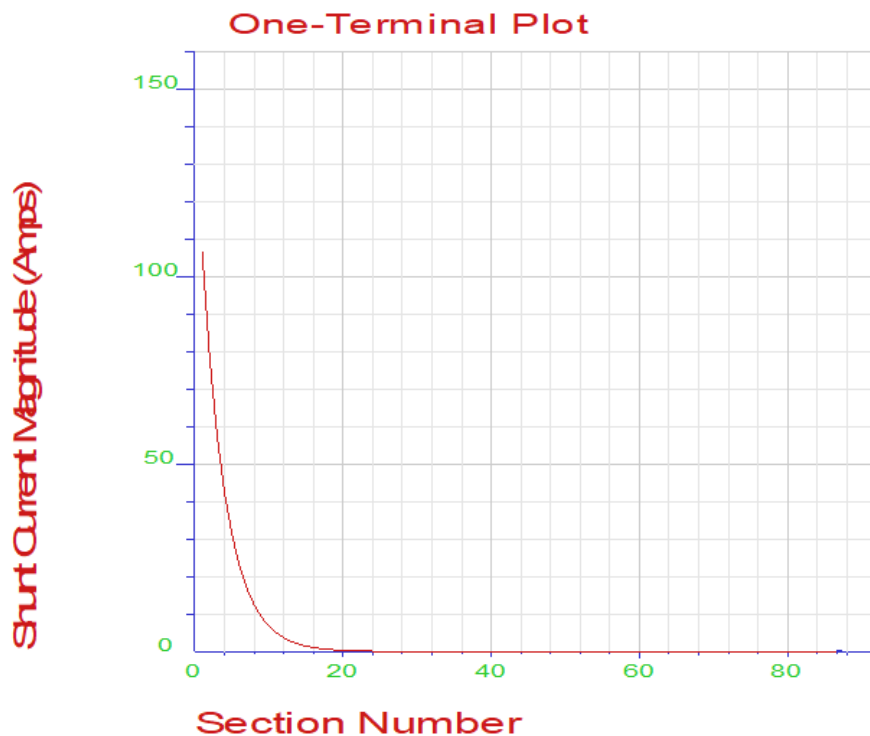


*Sl. 4.5. Paralelne struje odvoda dalekovoda D3.*



*Sl. 4.6. Potencijal stupova dalekovod D3*

Struja odvoda najbrže iščezava kod dalekovoda D4 koji spaja glavno postrojenje i TS4. Razlog iščezavanja je znatno veća duljina voda od ostalih postrojenja.



*Sl. 4.7. Paralelne struje odvoda dalekovoda D4*

Razina struja odvoda na dalekovodu D4 (sl. 4.7.) naglo opada te iščezava kod stupa broj 20, zbog velike udaljenosti i velikog broja stupova, a male struje doprinosa struji kratkog spoja. Doprinos struje kvara susjednog postrojenja TS 4 iznosi 510 A što je znatno manje od drugih postrojenja. Uz manji iznos struje tu je problem i velika udaljenost tako da se u postrojenju TS 4 nema doprinosa struje kvara preko zaštitnog užeta. Analogno tome i potencijal uzemljivača je zanemarivog rasta.



## 5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu opisana je raspodjela struje jednofaznog kratkog spoja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju. Opisan je način raspodjele struje kvara na glavnom elektroenergetskom postrojenju te utjecaj te iste struje kvara u susjednim postrojenjima. Faktor koji prikazuje raspodjelu je redukcijski faktor. Pomoću redukcijskog faktora određuje se udio struje kvara koji će se zatvoriti kroz uzemljivački sustav glavnog postrojenja u zemlju. Važno je znati koliko iznosi struja kvara koja teče kroz uzemljivač kako bi se mogao pravilno dimenzionirati sustav uzemljenja. Sustav uzemljenja mora zadovoljavati norme za napon koraka i dodirni napona.

Izračun za redukcijski faktor kabela i nadzemnih vodova teorijski je objašnjen uz predočene izraze potrebne za izračun. Zbog kompleksnosti izračuna redukcijskog faktora, izračun struje kvara kroz sustav uzemljenja prikazan je na pojednostavljenom primjeru elektroenergetskog postrojenja (transformatorske stanice) i dva spojena dalekovoda. Struja kvara u nadzemnim vodovima distribuira se putem zaštitnog užeta i zatvara se kroz stupove dalekovoda i uzemljivački sustav susjedne transformatorske stanice u zemlju. Kompleksnost izračuna raspodjele struje kvara uzrokovana je velikim brojem podataka o kojima ovisi raspodjela zbog tog razloga za simulaciju koristi se programski paket CDEGS.

U simulaciji simuliran je jednofazni kratki spoj unutar elektroenergetskog postrojenja. Model simulacije je glavno postrojenje i pet susjednih postrojenja povezanih s pet dalekovoda. Nakon unosa podataka i provedene simulacije izračunat je redukcijski faktor za glavno postrojenja.

Redukcijski faktor glavnog postrojenja iznosi 0,4998, zaokruženo 0,5, to znači da se od ukupne struje kvara 50% zatvara kroz uzemljivač glavnog postrojenja u zemlju, a 50% se distribuira prema ostalim susjednim postrojenjima. Postrojenje TS 4 apsorbira najmanji udio, zanemarivi udio struje kvara, a najveći dio struje kvara se distribuira prema TS1.

## LITERATURA

- [1] F. Majdandžić, Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Graphis, Zagreb, 2004.
- [2] Mirošević, G., Vidaković, F. (2008) Projektiranje, građenje i održavanje dalekovoda, Zagreb
- [3] J. Kučak, Uzemljenje zvjezdišta mreža 30 kV napajanih iz TS 110/30/10 kV Resnik i TE-TO, Elaborat Instituta za elektroprivredu, Zagreb, 1986.
- [4] ELKA katalog nadzemnih Al/Če vodova, dostupno na:  
<http://www.elka2.hr>, pristup ostvaren: 12.09.2019.
- [5] Službene web stranice CDEGS programskog paketa, dostupno na :  
<http://www.sestech.com> , posljednji pristup ostvaren: 10.09.2019.
- [6] Službena web stranica Hrvatskog zavoda za norme, dostupno na:  
<https://www.hzn.hr/>, posljednji pristup ostvaren: 08.09.2019.

## SAŽETAK

U ovom radu definiran je redukcijski faktor i opisana je raspodjela struje jednofaznog kratkog spoja unutar glavnog postrojenja i susjednih postrojenja. Prvo poglavlje je uvod u rad s opisom zadatka diplomskog rada. U drugom poglavlju definiran je dodirni napon, napon koraka, redukcijski faktor za kabele i nadzemne vodove. Treće poglavlje je simulacija raspodjele struje kvara između glavnog i pet susjednih postrojenja. Opisan je programski paket u kojem je napravljena simulacija i prikazan je unos potrebnih ulaznih podataka. U četvrtom poglavlju prikazani su grafički rezultati simulacije uz dodatno objašnjenje svakoga rezultata. Iz dobivenih grafičkih rezultata i pismenog izvješća programskog paketa CDEGS izračunat je redukcijski faktor glavnog postrojenja i raspodjela struje kvara.

Ključne riječi: dodirni napon, napon koraka, programski paket CDEGS, raspodjela struje kvara, redukcijski faktor, uzemljivački sustav.

## **ABSTRACT**

### **SHORT CIRCUIT CURRENT DISTRIBUTION OF THE HIGH VOLTAGE ELECTRIC POWER INSTALLATION**

In this paper, the reduction factor is defined and the distribution of single-phase short-circuit current within the main high voltage power installation and adjacent high voltage power installation is described. In the first chapter the thesis is introduced and described. The second section defines the touch voltage, step voltage, reduction factor for cables and overhead lines. The third chapter is a simulation of the distribution of the fault current between the main and the five adjacent power installations. The software package in which the simulation was made is described and the input of the required input data is shown. Chapter 4 presents the graphical results of the simulation with an additional explanation of each result. From the obtained graphical results and the written report of the CDEGS software package, the reduction factor of the main high voltage power installation and the distribution of the fault current were calculated.

Key words: touch voltage, step voltage, fault current distribution, CDEGS software package, reduction factor.

## ŽIVOTOPIS

Matija Hudek rođen je u Virovitici 25.05.1995. godine. Od 2002. do 2010. pohađao je OŠ Vladimira Nazora u Virovitici. Nakon završene osnovne škole upisao je srednju školu, gimnaziju Petra Preradovića u Virovitici koju završava 2014. godine. Iste godine upisuje redovni preddiplomski studij elektrotehnike na FERIT-u (Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologije). Godine 2017. završava preddiplomski studij sa završnim radom na temu „*Modeliranje autonomnog sustava za opskrbu električnom energijom kuće za odmor*“, iste godine upisuje diplomski studij, smjer DEA (elektroenergetski sustavi). Trenutno je na drugoj godini diplomskog studija.

Matija Hudek