

**UPOREDNI PRIKAZ MODELOVANJA JEDNOFAZNOG KRATKOG SPOJA NA
DALEKOVODU KORIŠĆENJEM SOFTVERSKOG PAKETA ATPDRAW I PRIMENOM IEC
METODOLOGIJE**

**COMPARISON OF SINGLE PHASE SHORT CIRCUIT MODELLING BY USING OF
ATPDRAW SOFTWARE AND IEC PROCEDURES**

Aleksandar TERZIĆ, AD “Elektromreža Srbije”, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Trendovi povećanja potrošnje i nemogućnosti izgradnje novih postrojenja za prenos i distribuciju električne energije povećavaju struje kratkih spojeva na sabirnicama postrojenja i na priključnim vodovima. Nadzemni vodovi su neretko opremljeni zaštitnim užetom sa optičkim vlaknima koje ima svoja ograničenja sa aspekta podnosivog toplotnog impulsa, odnosno toplotne energije koju može absorbovati, a da ne dođe do oštećenja čelične cevčice koja nosi optička vlakna. Telekomunikacioni aspekt vodova postaje sve izraženiji zbog sve češće potrebe za komunikacijom, bilo za potrebe relejne zaštite, ugradnjom uređaja za monitoring vodova ili nekim komercijalnim TK uslugama. Zbog navedenih razloga u projektovanju vodova bitna pažnja poklanja se dimenzionisanju zaštitnog užeta sa optičkim vlaknima. Za veće struje kratkih spojeva, potrebno je odabrati uže većeg poprečnog preseka odnosno uže robusnije konstrukcije. Za ove potrebe formiran je standardni projektanski pristup gde se raspodela struje jednofaznog kratkog spoja računa primenom odgovarajućih IEC standarda. Sa druge strane savremeni softverski paketi pružaju mogućnost modelovanja elektromagnetnih prelaznih procesa na elementima elektroenergetskog sistema (EES). U ovom radu dat je uporedni prikaz metodologije modelovanja jednofaznog kratkog spoja na nadzemnom dalekovodu, raspodela struje kratkog spoja u zavisnosti od tipa stuba, mesta nastanka kvara na dalekovodu i karakteristika nadzemnog dalekovoda. Poseban osvrt dat je na proračun toplotnog impulsa u zaštitnom užetu sa optičkim vlaknima (OPGW) koji nastaje kao posledica kratkog spoja. Prezentovana je metodologija predložena u relevantnim IEC standardima kao i mogućnost obavljanja istih proračuna korišćenjem dostupnih softverskih paketa.

Ključne reči: dalekovod, kratak spoj, zaštitno uže

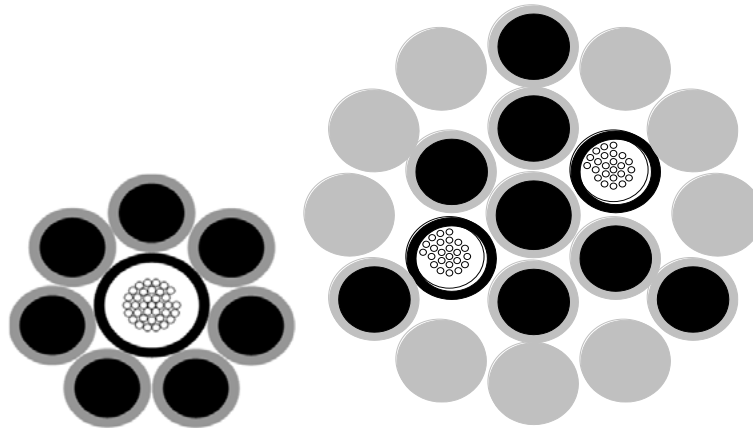
ABSTRACT

Increasing trends of energy consumption and urban constraints in construction of new transmission/distribution substations are indications of bigger short circuit currents on busbars and overhead lines (OHL). OHLs are commonly equipped with Optical Power Ground Wire (OPGW), which has its limitations based on short circuit withstand heat impulse—heat energy that can be absorbed by OPGW and prevent damage to steel tubes with optical wires. This telecommunication characteristic of OHLs is becoming increasingly important, mainly for communication needs to be ensured to relay protection, for monitoring of OHL performance, or provision of commercial services. Due to the above-mentioned reasons, during the design process, special care should be addressed to the selection of OPGW type. For bigger short-circuit currents, OPGW with a bigger cross-section diameter is needed, i.e. more robust design should be selected. In order to select appropriate OPGW, a special standards-based design procedure is developed that can be implemented in the OHL main design phase by using IEC standards for calculation of fault current propagation / distribution in a single-phase short circuit. On the other hand, modern software packages provide the possibility of modelling of electromagnetic transient processes on arbitrary elements of a power network. In this paper, we addressed IEC methodology for modelling single-phase short circuits on overhead lines (OHL), distribution of short-circuit current depending on tower type, location of fault, and general characteristics of OHL. Calculation of Short Circuit Current Capacity (short circuit withstand heat impulse—heat energy) in Optical Power Ground Wire (OPGW) which is a consequence of a short circuit is also adequately addressed. The IEC methodology for such calculations is presented, as well as the possibility of performing these calculations using available software packages.

Keywords: earthwire, overhead line, short-circuit

1. UVOD

U okviru projekata visokonaponskih vodova neophodna je provera termičke opteretljivosti zaštitnog užeta, odnosno ukupnog toplotnog impulsa u užetu. Kao komponenta struje kratkog spoja za proračun toplotnog impulsa relevantna je subtranzijentna struja kratkog spoja koja prolazi kroz zaštitno uže dalekovoda. Ova struja generiše toplotni impuls koji zagreva zaštitno uže. Zaštitno uže sa optičkim vlaknima (OPGW) ima dve osnovne funkcije. Pored zaštite od udara groma u fazne provodnike, sve je izraženija i funkcija prenosa telekomunikacionih (TK) signala. Prenos TK signala se obavlja preko optičkih vlakana koja se nalaze u čeličnoj cevčici koja je konstruktivno sastavni deo pouzdenog zaštitnog užeta. Primeri konstrukcije OPGW užeta prikazani su na slici 1.



Slika 1 - Primeri konstrukcije OPGW užeta; Izvor – katalog proizvođača OPGW užeta

Pored mehaničkih parametara, jedan od bitnih podataka za dimenzionisanje zaštitnog užeta je podnosivi toplotni impuls. U slučaju prekoračenja vrednosti toplotnog impulsa dolazi do mehaničkog oštećenja čelične cevčice u kojoj se nalaze optička vlakna, što po pravilu dovodi do oštećenja optičkih vlakana i prekida telekomunikacionog saobraćaja. Trendovi povećanja potrošnje i nemogućnosti izgradnje novih postrojenja za prenos i distribuciju električne energije povećavaju struje kratkih spojeva na sabirnicama postrojenja i na priključnim vodovima i smanjuju pouzdanost prenosa signala. Nadzemni vodovi su uglavnom opremljeni zaštitnim užetom sa optičkim vlaknima koje ima svoja ograničenja sa aspekta podnosivog toplotnog impulsa, odnosno toplotne energije koju može apsorbovati, a da ne dođe do oštećenja čelične cevčice koja nosi optička vlakna. Telekomunikacioni aspekt vodova postaje sve izraženiji zbog sve češće potrebe za komunikacijom, bilo za potrebe relejne zaštite, ugradnjom uređaja za monitoring vodova ili nekim komercijalnim telekomunikacionim uslugama. Zbog navedenih razloga u projektovanju vodova bitna pažnja poklanja se dimenzionisanju zaštitnog užeta sa optičkim vlaknima. Za veće struje kratkih spojeva, potrebno je odabrati uže većeg poprečnog preseka odnosno uže većeg podnosivog toplotnog impulsa. Za ove potrebe formiran je standardni projektantski pristup gde se raspodela struje jednofaznog kratkog spoja računa primenom odgovarajućih IEC standarda. Sa druge strane, savremeni softverski paketi [1] pružaju mogućnost modelovanja elektromagnetnih prelaznih procesa na elementima EES-a.

2. IEC METODOLOGIJA

Set standarda (IEC 60909-0 [2], IEC 60909-1 [3], IEC 60909-2 [4], IEC 60909-3 [5], IEC TR 60865-2 [6]) koji uređuje postupak proračuna raspodele struja kratkog spoja definiše postupke za proračun koji se mogu podeliti u dva karakteristična slučaja i to:

- kratki spoj u blizini postrojenja;
- kratki spoj na trasi dalekovoda.

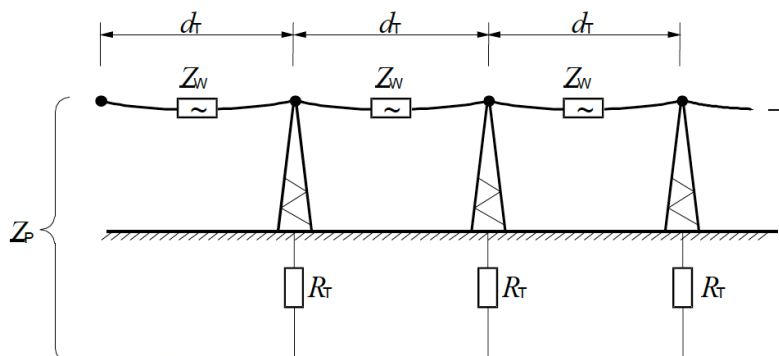
Da bi se razgraničili slučajevi nastanka kvara u blizini i na trasi dalekovoda, neophodno je sračunati udaljenost od postrojenja ispod koje se smatra da je kvar nastao u blizini postrojenja, a iznad koje se smatra da kvar nije u blizini postrojenja, sve u skladu sa postupkom opisanim u [5]. Nezavisno od lokacije nastanka kvara, neophodno je formirati ekvivalentnu šemu odnosno izračunati parametre koji ekvivalentiraju delove dalekovoda, gde se ekvivalentna impedansa dela dalekovoda računa se prema formuli:

$$\underline{Z}_p = 0,5 \times \underline{Z}_W + \sqrt{(0,5 \times \underline{Z}_W)^2 + \underline{Z}_W \times R_T}$$

gde je:

\underline{Z}_W – ekvivalentna impedansa zaštitnog užeta

R_T – otpornost uzemljivača stuba



Slika 2 - Ekvivalentna impedansa dela dalekovoda; Izvor: [5]

Zaštitno uže je na svakom stubu povezano sa konstrukcijom stuba koja je dalje povezana sa sistemom uzemljenja stuba. Ovo za posledicu ima da se sva pražnjenja u zaštitno uže mogu sa aspekta vrednosti struja kratkog spoja posmatrati kroz režim kratkog spoja sa zemljom. U trenutku nastanka kratkog spoja, dolazi do raspodele struja u lancu provodnik – izolatorski lanac – konstrukcija stuba – zaštitno uže – sistem uzemljenja. U cilju računanja raspodele struje, odnosno proračuna vrednosti struja kroz uzemljivač i zaštitno uže, standard IEC 60909-3 [5] definiše proceduru proračuna redukcionih faktora koji, pomnoženi sa ukupnom strujom kvara, daju vrednost struje koja prolazi kroz elemente koji su deo kola kratkog spoja. Vrednost korekcionog faktora zavisi od geometrije stuba kao i tehničkih karakteristika provodnika, zaštitne užadi i karakteristika zemljišta oko uzemljivača. Korekcioni faktor se računa prema sledećoj formuli:

$$\underline{r} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{WL}}{\underline{Z}'_W}$$

gde je:

\underline{Z}'_{WL} - međusobna jedinična impedansa između provodnika i zaštitne užadi;

\underline{Z}'_W - jedinična impedansa zaštitnog užeta.

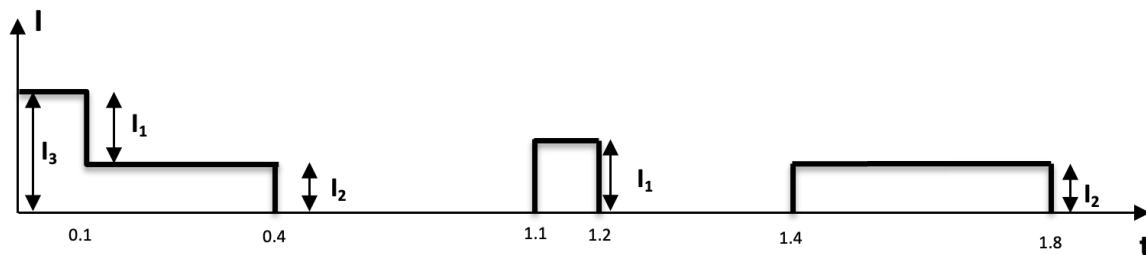
Detaljan postupak proračuna svih neophodnih parametara dat je u [5]. Definisanjem redukcionog faktora na osnovu navedenih postupaka jednostavno se može sračunati struja kroz zaštitno uže:

$$\underline{I}_W = (1 - \underline{r}) \times \underline{I}_{fks}$$

gde je:

\underline{I}_{fks} – jednofazna struja kratkog spoja.

Trajanje struje kvara određeno je načinom podešavanja relejne zaštite. Ukoliko se dalekovod štiti i diferencijalnom zaštitom, toplotni impuls će biti manji nego za slučaj kada se on štiti distantnom zaštitom, jer je vreme isključenja kvara daleko manje nego kod distantne zaštite, pa je i toplotni impuls manji. U elektroenergetskom sistemu Srbije, uobičajena konfiguracija distantne zaštite isključuje kvar u I stepenu za 100 ms, u II stepenu za 400 ms. Nakon isključenja kvara (u I ili II stepenu) sledi beznaponska pauza od 1000 ms, zatim pokušaj automatskog ponovnog uključivanja i ako kvar nije prolazan sledi definitivno isključenje nakon 100 ms ili 400 ms. Prvim stepenom se štiti 85% dužine dalekovoda od TS u kojoj je distantna zaštita, a ostalih 15% u drugom stepenu. Opisani proces prorade distantne zaštite, odnosno dijagram struje kvara za ranije opisan slučaj reagovanja distantne zaštite sa jednim APU dat je na sledećem grafiku:



Slika 3 - Dijagram struje kvara

gde je:

I_1 - komponenta struje kvara iz prvog stepena (kvar se napaja sa bližeg kraja dalekovoda);

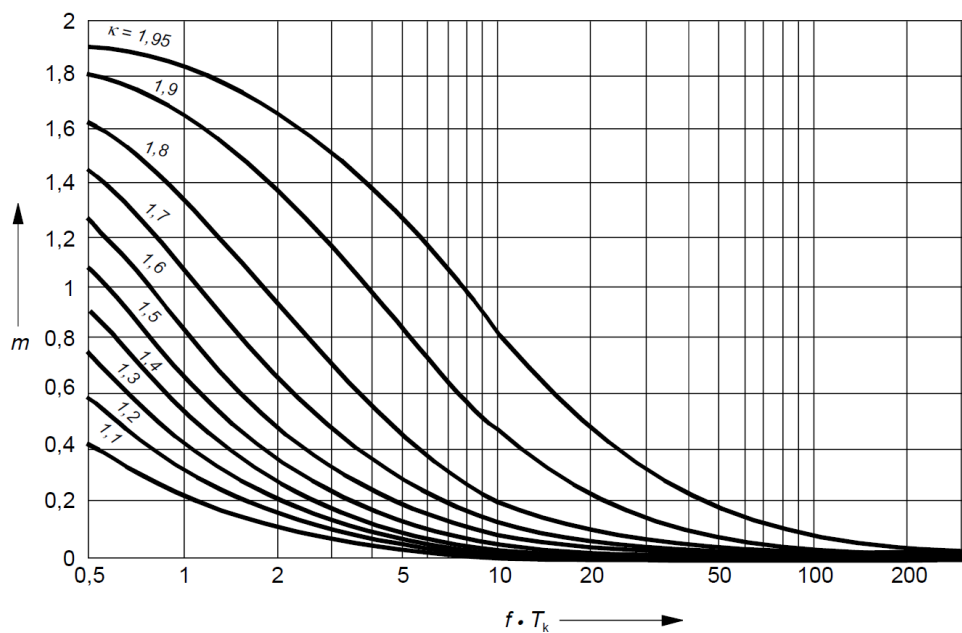
I_2 - komponenta struje kvara iz drugog stepena (kvar se napaja sa daljeg kraja dalekovoda);

I_3 - komponenta struje kvara iz oba stepena (kvar se napaja sa oba kraja dalekovoda).

Ekvivalentna termička struja je fiktivna vrednost čiji kvadrat vrednosti pomnožen sa vremenom trajanja kvara daje ukupni toplotni impuls koji zagreva uže. Termička struja (po IEC standardu [2]) računa se kao:

$$I_{ti} = \sqrt{m_i + n} \times I_i$$

Temperatura se u zaštitnom užetu podiže usled prolaska dela struje kratkog spoja strujnim kolom: mesto kvara - zaštitno uže - stub - zemlja. Koeficijenti m i n predstavljaju doprinos jednosmerne i naizmenične komponente struje kvara ukupnoj termičkoj struji. Koeficijent m se očitava za vrednost udarnog koeficijenta od 1,8 uzimajući vrednost učestanosti od 50 Hz i t sa dijagrama struje kvara. Koeficijent n ima vrednost 1.



Slika 4 - Grafik za očitavanje koeficijenta "m"; Izvor: [2]

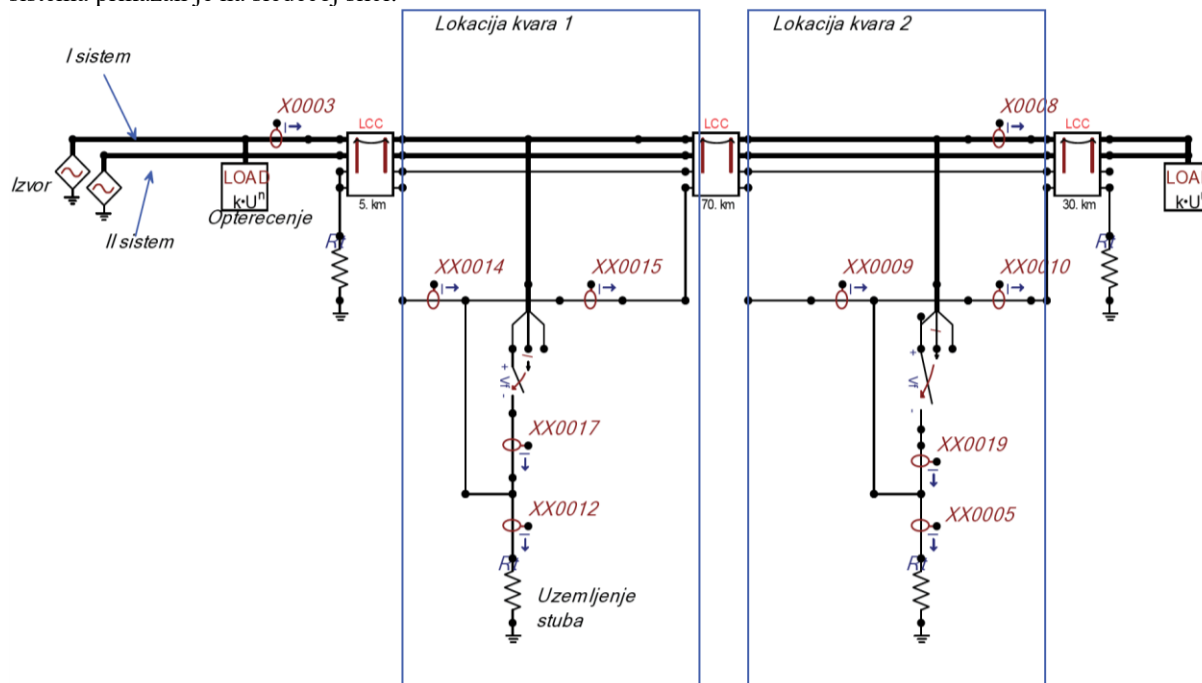
Vrednost toplotnog impulsa dobija se sumiranjem proizvoda svih komponenta kvadrata termičkih struja i vremena trajanja komponenta kvara, prema sledećoj formuli:

$$A_{tot} = \sum_{i=1}^4 I_{ti}^2 \times t_i$$

gde je t_i dužina trajanja komponente kvara sa Slike 3.

3. METODOLOGIJA PRORAČUNA POMOĆU DOSTUPNOG SOFTVERSKOG PAKETA

Softverski paket [1] razvijen je za potrebe modelovanja tranzijentnih prelaznih procesa u elektroenergetici. Za softver je razvijen grafički interfejs koji omogućava korisniku interaktivan rad sa funkcijama programa. Softver je besplatan za korišćenje. Za potrebe ovog rada, modelovan je jednofazni kratak spoj na dvostrukom dalekovodu 400 kV, dužine 100 km sa realnim parametrima dalekovoda. Korišćeni su realni parametri geometrije dalekovoda, provodnika, zaštitne užadi, sistema uzemljenja stuba kao i parametri opterećenja dalekovoda. Pregled modela sistema prikazan je na sledećoj slici:



Slika 5 - Analizirani model jednofaznog kratkog spoja; Izvor – grafički interfejs softvera [1]

Dalekovod je modelovan korišćenjem "Bergeron" modela, gde je kreiran objekat "LCC template" dalekovoda sa stvarnim parametrima, dok su za potrebe modela generisani elementi LCC na osnovu "LCC template" sa potrebnim dužinama dalekovoda. Na ovaj način mogu se kreirati proizvoljne dužine dalekovoda za potrebe proračuna. Detalj kartice kreiranja LCC template prikazan je na sledećoj slici.

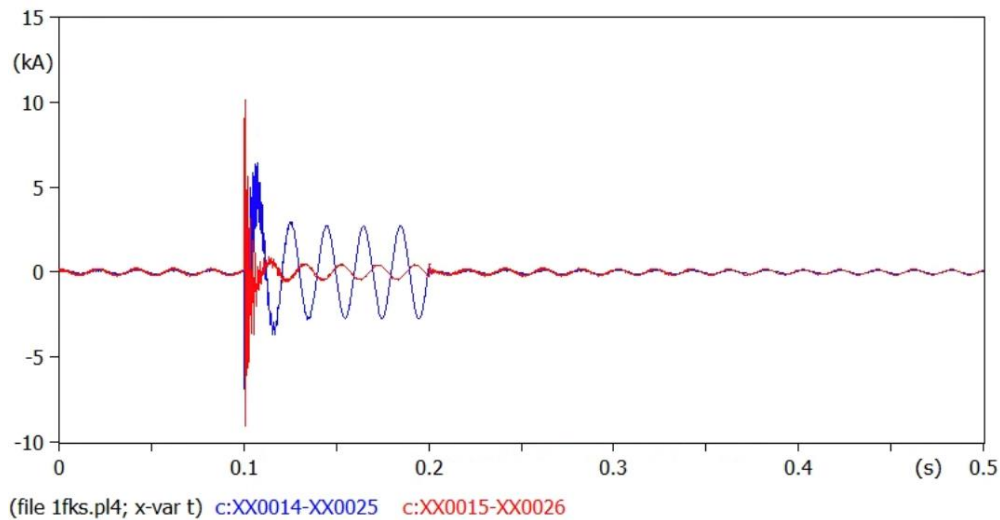
#	Ph.no	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.01	3	0.05	-6.8	40	20	40	0	2
2	2	0.01	3	0.05	-9.85	48	28	40	0	2
3	3	0.01	3	0.05	-6.25	56	36	40	0	2
4	4	0.2	1	0.358	-3	61	45	1	0	1
5	5	0.2	1	0.358	3	61	45	1	0	1
6	6	0.01	3	0.05	6.8	40	20	40	0	2
7	7	0.01	3	0.05	9.85	48	28	40	0	2
8	8	0.01	3	0.05	6.25	56	36	40	0	2

Slika 6 - Kreiranje elementa dalekovoda "LCC template"; Izvor– grafički interfejs softvera [1]

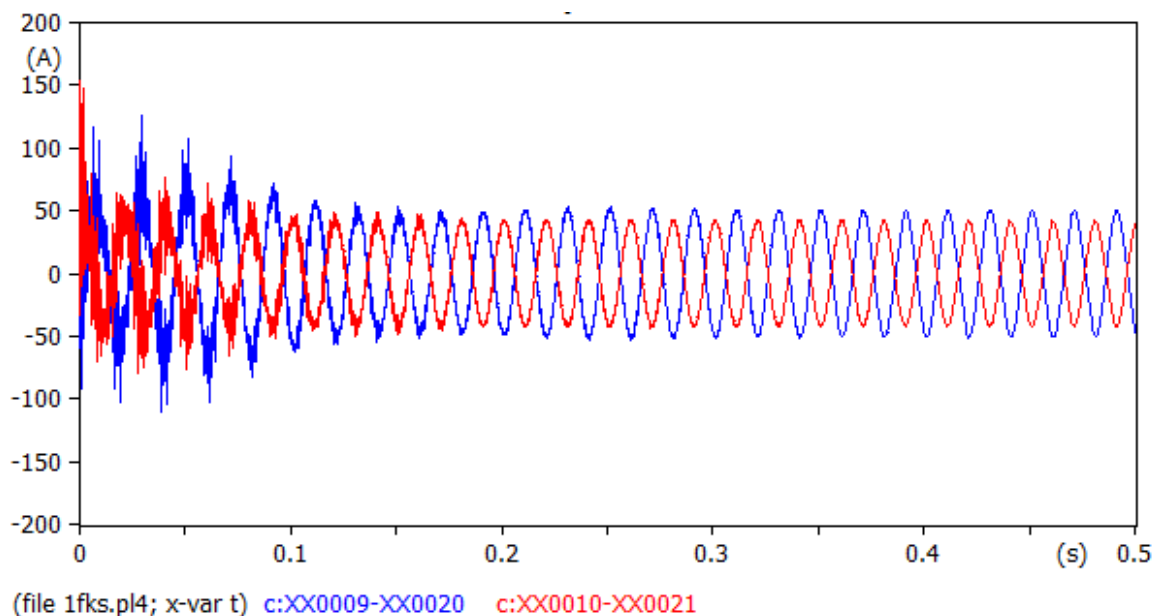
Da bi se simulirao realan slučaj eksploatacije dalekovoda, pored izvora napajanja na model je povezano i mrežno opterećenje koje direktno utiče na snagu kratkog spoja, što u realnim slučajevima značajno utiče na vrednost struje kratkog spoja koja teče kroz uže. Na slici 5 ovaj element prikazan je simbolom "LOAD" i dodat je na oba kraja dalekovoda. Kratak spoj je simuliran jednostavnim uključanjem prekidača u $t=0,1$ s i njegovim isključenjem u $t=0,2$ s. U otvorenom stanju, na jednom kraju prekidača je napon mrežne učestanosti, a na drugom sistem uzemljenja odnosno zaštitno uže. Zatvaranjem prekidača simulira se kratak spoj, dok se otvaranjem prekidača simulira delovanje sistema relejne zaštite voda. Za potrebe analize zavisnosti struje kratkog spoja od lokacije kvara, modelovana su dva mesta nastanka kvara ("Lokacija kvara 1" na 5 km od TS i "Lokacija kvara 2" na 75 km od TS).

3.1 Komentar dobijenih rezultata

Rezultati simulacije uporedno na oba mesta kvara dati su na sledećim graficima.



Slika 7- Struja kratkog spoja - lokacija 5 km od TS



Slika 8 – Struja kratkog spoja na 75 km od TS

Na slici 7 prikazane su komponente struje levo (XX0014) i desno (XX0015) na 5 km od postrojenja. Amplituda struje kvara je oko 12 kA, sa time da se već nakon jedne periode značajno smanjuje, što odgovara prelaznim procesima koji se dešavaju. Slično, na slici 8 prikazan je oblik struje u zaštitnom užetu levo (XX0009) i desno (XX0010) na 75 km od postrojenja. Pošto je model "LOAD" na levoj strani modela snage 400 MW, a na desnoj

snage 50 MW, pomeranjem mesta kvara ka manjoj snazi potrošnje smanjuje se i struja kratkog spoja. Dobijeni rezultati se mogu dalje koristiti za proračune toplotnog impulsa slično kako je opisano u prethodnom poglavlju.

4. ZAKLJUČAK

Primena IEC postupka omogućava jednostavan proračun koji daje zadovoljavajuće rezultate za praktičnu primenu prilikom dimenzionisanja zaštitnog OPGW užeta. IEC pristup zahteva prethodno poznatu raspodelu struje kratkog spoja duž trase dalekovoda da bi se primenom opisanog postupka izračunala raspodela struje u zaštitnom užetu. S obzirom da vrednost struje kratkog spoja direktno zavisi od snage kratkog spoja, koja zavisi od konfiguracije mreže, u slučaju primene softverskog pristupa [1], konfiguracija elektroenergetske mreže mora biti poznata i uvažena u modelu da bi pristup imao praktičnu primenu. Osnovna prednost softverskog pristupa [1] ogleda se u tome da je proračune moguće automatizovati ukoliko su poznati svi parametri mreže. Zbog velikog broja dostupnih elemenata, softver omogućava detaljnu razradu (geometrija stubova, raspored i broj provodnika i zaštitne užadi) modela. Takođe, softver [1] omogućava jednostavno merenje bilo koje električne veličine, odnosno može se bez proračuna doći do željenih podataka, direktno iz modela.

LITERATURA

- [1] EMTP-ATP, "ATPDraw," 20 04 2024. [Online]. Available: <https://www.atpdraw.net>.
- [2] IEC, IEC 60909-0:2016 - Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents, 2016.
- [3] IEC, IEC 60909-1:1998 Short-circuit current calculation in three-phase a.c.systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three-phase a.c.systems according to IEC 60909, IEC, 1998.
- [4] IEC, IEC 60909-2:1997 Electrical equipment - Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 909(1988), IEC, 1997.
- [5] IEC, EN 60909-3:2011 Short-circuit currents in three-phase a.c systems - Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short-circuits and partial short-circuit currents flowing through earth, IEC, 2011.
- [6] IEC, IEC TR 60865-2:2015 Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation, IEC, 2015.