



Broj rada: xxx

DOI broj: xxx

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*, Akcionarsko društvo "Elektromreža Srbije", Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

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 softverskog paketa ATPDraw [1].

Ključne reči: dalekovod, zaštitno uže, kratak spoj

ABSTRACT

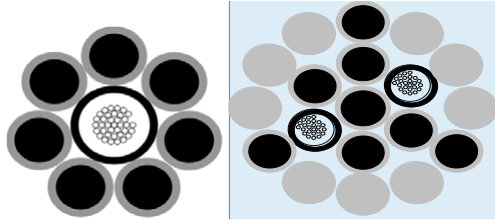
In this paper, IEC methodology for modelling single phase short circuit on Overhead Line (OHL), distribution of short-circuit current depending on tower type, location of fault and general characteristics of OHL. Short Time Current Capacity in Optical Power Ground Wire (OPGW) is also addressed which is a consequence of short circuit. IEC methodology for such calculations is presented, as well as possibility of performing these calculations with usage of ATPDraw Software.

Keywords: Overhead line, earthwire, short-circuit

*aleksandar.terzic@ems.rs

1. UVOD

U okviru projekata visokonaponskih vodova neophodna je provera termičke opterećenosti 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 pouzdanog zaštitnog užeta. Primeri konstrukcije OPGW užeta prikazani su na slici 1.



Slika 1 – Primeri konstrukcije 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 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 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 projekatanski 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 elektroenergetskog sistema (EES).

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

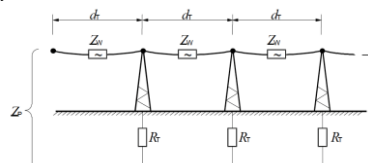
Da bi se razgraničili slučajevi nastanka kvara u blizini i na trasi dalekovoda, neophodno je sračunati udaljenost od postrojenja ispod kojog smatra da je kvar nastao u blizini postrojenja, a iznad koje se smatra da kvar nije u blizini postrojenja, sve u skladu sa postupkom opisanim u [5]. Nezavisno od 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:

$$Z_p = 0.5 \times Z_w + \sqrt{(0.5 \times Z_w)^2 + Z_w \times R_T}$$

gde je:

Z_w – Ekvivalentna impedansa zaštitnog užeta

R_T – Otpornost uzemljivača stuba



Slika 2 - Ekvivalentna impedansa dela dalekovoda

Commented [A1]: Ova slika je spljoštena – popraviti.

Commented [A2]: Navesti izvor slike (za sve slike) ukoliko su preuzete iz neke literature, saglasno Uputstvu " Obavezno navesti izvor ispod slike/dijagrama (Npr. Slika 1 – Naziv slike; Izvor – Navesti izvor slike)."

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Deleted: 1

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Deleted: E

Deleted: E

Deleted: 1

Deleted: g

Commented [A3]: Povećati sliku

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 prажnjenja 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 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:

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

gde je:

Z'_{WL} - Međusobna jedinična impedansa između provodnika i zaštitne užadi

Z'_W - Jedinična impedansa zaštitnog užeta

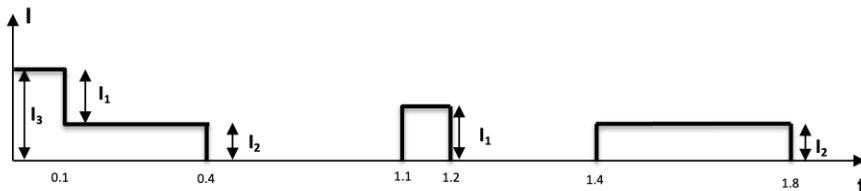
Detaljan postupak proračuna svih neophodnih parametara dat je u [5]. Definisanjem redukcionog faktora na osnovu navedenih postupaka jednostavno se može sračunati struja kroz zaštitno uže:

$$I_{W\Delta} = (1 - \underline{r}) \times I_{1fks}$$

gde je:

I_{1fks} - 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 isti 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 $f = 50$ i t sa dijagrama struje kvara. Koeficijent n ima vrednost 1.

Deleted: G

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Deleted: G

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Deleted: 3

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Deleted: G

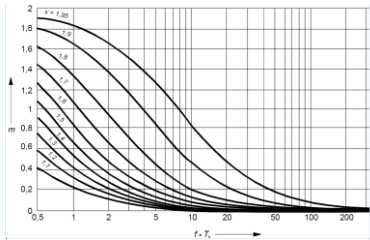
Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Deleted: r

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)



Slika 4 - Grafik za očitavanje koeficijenta "m"

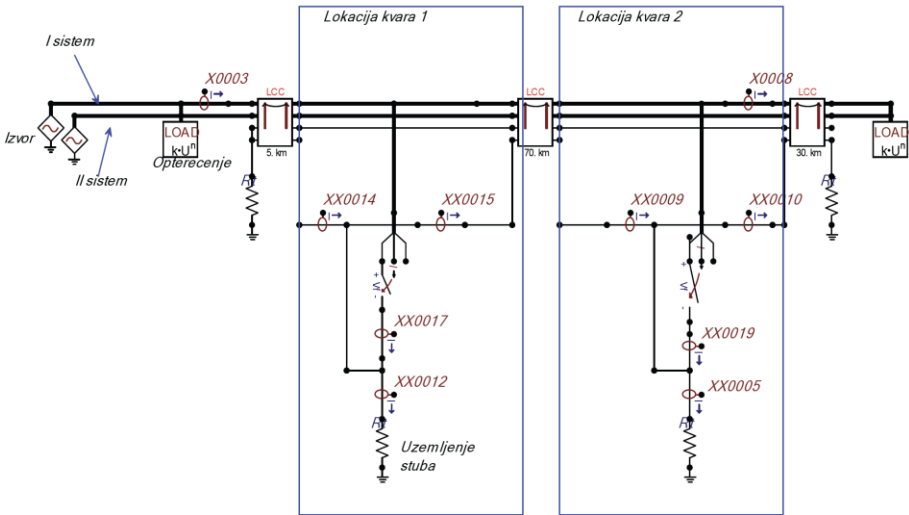
Vrednost toplotnog impulsa dobija se sumiranjem proizvoda svih komponenata kvadrata termičkih struja i vremena trajanja komponenata kvara, prema sledećoj formuli:

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

gde je t_i dužina trajanja komponente kvara sa Slike 3

3. ATPDraw Metodologija

Softverski paket ATPdraw [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 2x400kV dalekovodu 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

Commented [A4]: Povećati sliku

Deleted: G

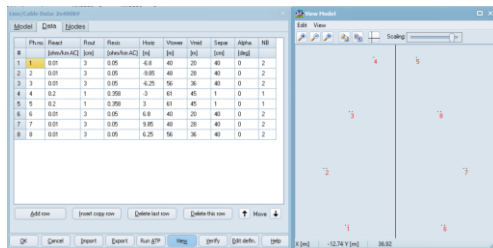
Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Deleted: 5

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

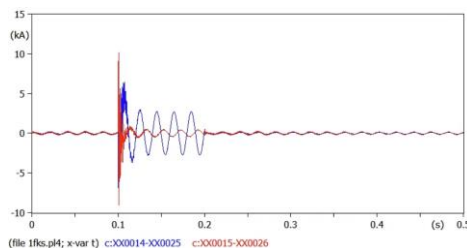
Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

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.

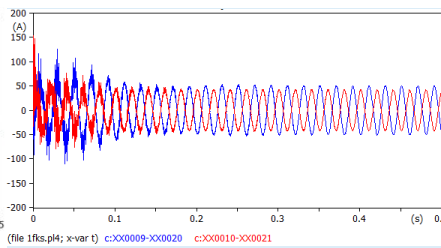


Slika 6 - Kreiranje elementa dalekovoda "LCC template"

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 simuliran je jednostavnim uključenjem prekidača u $t=0.1s$ i njegovim isključenjem u $t=0.2s$. 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). 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 50MW, 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 priklom 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 ATPDraw [1] pristupa konfiguracija elektroenergetske mreže mora biti poznata i uvažena u modelu da bi pristup imao praktičnu primenu. Osnovna prednost ATPDraw pristupa ogleda se u tome da je proračune moguće automatizovati ako 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, ATPdraw omogućava jednostavno merenje bilo koje električne veličina, odnosno može se direktno bez proračuna doći do željenih podataka direktno iz modela.

Commented [A5]: Povečati sliku

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Commented [A6]: Povečati slike

Formatted: Serbian (Latin, Serbia)

Commented [A7]: Pre zaključka dodati poglavlje

Deleted: 0

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.

Commented [A8]: Uskladiti veličinuslova sa ostatkom dokumenta.