

ZAŠTITA OD ELEKTRIČNOG LUKA U POSTROJENJIMA NISKO I SREDNJEG NAPONA I METODE ZA SMANJENJE ENERGIJE LUKA

ARC FLASH PROTECTION IN LOW AND MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEARS AND METHODS TO REDUCE ARC FLASH ENERGY

Mladen OSTOJIC, Elektromreža Srbije AD, Novi Sad, Srbija
Jana TOHOLJ, Elektromreža Srbije AD, Novi Sad, Srbija
Goran MAMLIĆ, Elektromreža Srbije AD, Novi Sad, Srbija
Sreten LEŽAJA, Elektromreža Srbije AD, Novi Sad, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Zaštita od električnog luka u postrojenjima niskog i srednjeg napona postaje sve aktuelnija tema poslednjih godina. U radu je razmatrana pojava nastanka električnog luka u glavnim razvodima niskog i srednjeg napona. Na osnovu sprovedene analize uočeni su ključni elementi koji utiču na vrednost energije koja se oslobađa pri pojavi električnog luka. Takođe, sagledani su rizici i opasnosti kojima je izloženo radno osoblje pri radu u postrojenjima niskog i srednjeg napona. Prikazan je pregled važeće tehničke regulative koja se bavi ovom problematikom. Posebna pažnja posvećena je optimalnom podešenju sistema relejne zaštite. Da bi se opasnost po radno osoblje svela na minimum, predložene su metode za smanjenje energije luka.

Ključne reči: električni luk, relejna zaštita, srednji napon, niski napon

ABSTRACT

Arc flash protection in low and medium voltage switchyards has become an increasingly popular topic in recent years. The paper discusses the occurrence of arc flash in low and medium voltage switchyards. On the basis of the conducted analysis, the key elements that influence the value of the energy released during the occurrence of an arc flash were observed. Also, the risks and hazards to which the working staff are exposed while working in low and medium voltage switchyards were considered. An overview of the current technical regulations dealing with this issue is presented. Special attention was paid to the optimal setting of the relay protection. In order to minimize the hazard to working staff, methods have been proposed to reduce the arc flash energy.

Key words: arc flash, relay protection, medium voltage, low voltage

Mladen Ostojic, mladen.ostojic@ems.rs
Jana Toholj, jana.toholj@ems.rs
Goran Mamlic, goran.mamlic@ems.rs
Sreten Lezaja, sreten.lezaja@ems.rs

1. UVOD

Električni luk predstavlja pražnjenje između dve elektrode koje su na različitom potencijalu. Do pražnjenja dolazi kada napon između elektroda dostigne vrednost koja je veća od dielektrične čvrstoće između elektroda. U zavisnosti od namene električni luk se može podeliti na poželjan i nepoželjan. Poželjan električni luk koristiti se u industriji za zavarivanje, rezanje, osvetljenje, itd. U ovom radu razmatrana je pojava nepoželjnog električnog luka i njegov uticaj na opremu i radno osoblje.

Pri pojavi električnog luka oslobađa se velika količina energije koja je praćena visokom temperaturom i veoma značajnim zvučnim, svetlosnim i mehaničkim efektom. Vrednost energije koja se oslobađa zavisi od niza faktora kao što su vrednost struje luka, dužina trajanja luka, naponski nivo, karakteristike postrojenja i opreme, itd.

Kao najčešći uzroci nastanka električnog luka u postrojenjima niskog i srednjeg napona mogu se navesti degradacija ili oštećenje izolacije na opremi pod naponom, loš kontakt na spojevima, ljudske greške, prisustvo

životinja, uticaj radnih uslova okoline, prenaponi i atmosferska pražnjenja, itd. Pri pojavi električnog luka može doći do oštećenja dela opreme ili havarije celog postrojenja. Mnogo veća opasnost pretil radnom osoblju koje se zatekne u blizini mesta sa izvorom električnog luka. Ova opasnost za posledicu može imati teške telesne povrede, a nisu retki ni slučajevi sa smrtnim ishodom.

Po svom karakteru električni luk je slučajna pojava koju je teško predvideti. Različite studije i analize pokazale su da je rizik od pojave električnog luka u proseku veći u postrojenjima niskog i srednjeg napona, nego u postrojenjima visokog napona. Bezbednost i zdravlje lica koja se zateknu u neposrednoj blizini izvora luka, jedna je od najvažnijih obaveza poslodavca. Zbog toga se, u postrojenjima gde postoji mogućnost nastanka električnog luka sprovode preventivne i zaštitne mere koje imaju za cilj da opasnost od navedene pojave svedu na minimalnu vrednost.

2. PREGLED VAŽEĆE TEHNIČKE REGULATIVE

U ovom delu prikazan je pregled važećih međunarodnih standarda koji se primenjuju u oblasti vezanoj za zaštitu od električnog luka. Prethodnih decenija ovom problematikom naročito su se bavile vodeće međunarodne organizacije u SAD kao što su IEEE (the Institute of Electrical and Electronics Engineers), NFPA (the National Fire Protection Association) i OSHA (the Occupational Safety and Health Administration). Kao rezultat njihovog rada nastali su međunarodni standardi IEEE 1584-2018 [1] i NFPA 70E-2021 [2]. U Evropi se Nemačka specifikacija DGUV 203-077 [3] unutar Nemačkog standarda BGI/GUV-I 5188-E smatra referencom za Evropsku Uniju. Razvijena je sa idejom da odredi klasu lične zaštitne opreme prema standardu IEC 61482 1-2. Međutim, standardi IEEE 1584-2018 i NFPA 70E-2021 su ipak postali najzastupljeniji u praksi.

Međunarodni standard IEEE 1584-2018 predstavlja novo izdanje istog standarda iz 2002. godine koje je značajno izmenjeno. Navedeno izdanje standarda zasnovano je na eksperimentalnim rezultatima koji su sprovedeni na više od 1800 slučajeva sa pojavom električnog luka u različitim laboratorijama i ispitnim centrima. Na osnovu dobijenih rezultata razvijene su empirijske jednačine i metodologija na kojoj je zasnovan navedeni standard. Primenom razvijene metodologije i poznatih vrednosti struje kvara, napona postrojenja, vremena trajanja kvara, vrste opreme i radne udaljenosti procenjuje se vrednost energije koja se oslobađa pri pojavi luka. Na osnovu izračunate vrednosti energije luka definiše se sigurnosna udaljenost i nivo opasnosti po radno osoblje. Standard IEEE 1584-2018 primenjuje se za naponske nivoe do 15 kV.

Standardom NFPA 70E-2021 definisane su aktivnosti koje poslodavci moraju preduzeti kako bi opasnost od pojave električnog luka po radno osoblje bila svedena na minimum. Ove aktivnosti uključuju sledeće:

- sigurnosni program sa definisanim odgovornostima,
- proračune kojima će se definisati nivo opasnosti od luka,
- postavljanje jasno vidljivih nalepnica na opremu koja predstavlja potencijalnu opasnost po radno osoblje,
- primena odgovarajuće lične zaštitne opreme i sredstva za rad i
- osposobljavanje radnika.

Na osnovu izračunate energije luka navedenim standardom definisani su nivoi rizika po radno osoblje i predložena je primena odgovarajuće lične zaštitne opreme. U tabeli 1 prikazani su nivoi rizika po radno osoblje pri boravku u blizini mogućeg izvora luka.

Tabela 1 – Nivoi rizika po radno osoblje [2]

Nivo rizika	Energija luka E	
	cal/cm ²	J/cm ²
A	2	8,4
B	4	16,7
C	8	33,5
D	25	104,7
E	40	167,5
F	100	418,7
G	120	502,4

3. IZRAČUNAVANJE ENERGIJE LUKA

Empirijske jednačine za izračunavanje energije koja se oslobađa pri pojavi električnog luka definisane su međunarodnim standardom IEEE 1584-2018 [1]. Prvi korak u izračunavanju energije luka je izračunavanje struje luka. Navedenim standardom definisano je izračunavanje struje luka za dva naponska opsega: $600 V < U_n \leq 15000 V$ i $208 V < U_n \leq 600 V$. U radu je razmatrana pojava luka na naponskom nivou 400 V, pa se može koristiti opseg napona $208 V < U_n \leq 600 V$. Generalno, za oba naponska opsega jednačine imaju isti oblik, ali se razlikuju vrednosti koeficijenta k . Opšta jednačina za izračunavanje struje luka ima sledeći oblik:

$$I_{a_600} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_f + k_3 \log G)} (\sum_{i=1}^6 k_{(i+3)} I_f^{(7-i)} + k_{10}) \quad (1)$$

gde su: I_f - efektivna vrednost struje trolnog kratkog spoja (kA), G – razmak između sabirnica (mm), k_i do k_{10} – koeficijenti koji zavise od naponskog nivoa i položaja sabirnica.

Za izračunavanje struje luka mora biti poznata struja trolnog kratkog spoja u tački od interesa.

Struja luka koja je izračunata u jednačini (1) je primenjiva za naponski nivo 600 V. Na osnovu jednačine (1) može se izračunati struja luka koja odgovara naponu 400 V:

$$I_a = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{U_n}\right)^2 \cdot \left[\frac{1}{I_{a_600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - U_n^2}{0,6^2 \cdot I_f^2}\right)\right]}} \quad (2)$$

gde je U_n – nominalni napon postrojenja, u razmatranom slučaju 400V.

Na osnovu izračunate vrednosti korigovane struje luka, sa krive delovanja zaštite može se odrediti vreme trajanja luka t_a . Kod niskonaponskih prekidača zaštita i prekidač imaju zbirno vreme delovanja. Međutim, kod sredjenaponskih postrojenja vremenu delovanja zaštite potrebno je dodati i vreme isključenja prekidača.

Struja luka opisana jednačinom (2) podložna je promeni. Zbog toga je uveden koeficijent promene struje. Na taj način izračunava se minimalna struja luka:

$$I_{a_min} = I_a [1 - 0,5 (\sum_{i=1}^6 k_i U_n^{(7-i)} + k_7)] \quad (3)$$

Za minimalnu struju luka takođe se određuje vreme trajanja kvara sa krive delovanja zaštite. Energija luka izračunava se za oba vremena trajanja luka. Veća vrednost energije luka usvaja se kao konačna vrednost.

Jednačina za izračunavanje energije luka takođe zavisi od naponskog nivoa. Naredna jednačina može se primeniti za naponski nivo 400 V:

$$E = \frac{12,552}{50} \cdot t_a \cdot 10^{C_1} \quad (4)$$

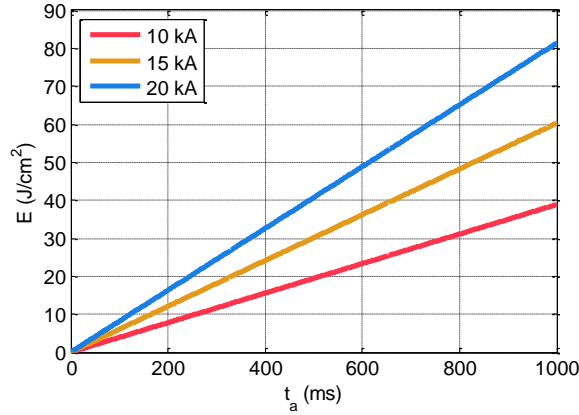
$$C_1 = k_1 + k_2 \log G \frac{k_3 I_{a_600}}{\sum_{i=1}^6 k_{(i+3)} I_f^{(8-i)} + k_{10} I_f} + k_{11} \log I_f + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{a_min} + \log \frac{1}{CF} \quad (5)$$

gde je t_a – vreme trajanja luka (ms), D – radna udaljenost (mm), CF – korekcionni faktor vezan za veličinu postrojenja.

Iz prethodne jednačine može se videti da je energija luka pri datoj udaljenosti i naponu proporcionalna struji kvara i vremenu trajanja luka. Dakle, struja kvara i vreme trajanja kvara su ključne veličine preko kojih se može direktno uticati na smanjenje energije luka. Kao ilustracija, na slici 1 prikazana je zavisnost energije luka od dužine trajanja luka u niskonaponskom postrojenju naponskog nivoa 400 V za različite vrednosti struja trolnog kratkog spoja. Sa slike 1 može se videti da sa povećanjem dužine trajanja luka dolazi do značajnog povećanja energije luka.

Kao što je prethodno naglašeno primena standarda IEEE 1584-2018 ograničena je na naponski nivo do 15 kV. Za naponske nivoe iznad 15 kV preporučuje se primena Lee metode [4]. Jedan od nedostataka Lee metode je taj što ne obuhvata izračunavanje struje luka. Ovo je naročito bitno za naponske nivoe ispod 1000 V. Jednačina za izračunavanje energije luka primenom Lee metode je znatno jednostavnija i ima sledeći oblik:

$$E = 2,142 \cdot 10^6 U_n I_f \left(\frac{t_a}{D^2}\right) \quad (6)$$



Slika 1 – Zavisnost energije luka od dužine trajanja luka

4. PODEŠENJE RELEJNE ZAŠTITE

Podešenje relejne zaštite ima značajan uticaj na vrednost energije koja se oslobađa pri pojavi električnog luka. Kao što je prethodno naglašeno, vreme trajanja kvara i struja trolnog kratkog spoja su veličine na koje se može uticati preko podešenja relejne zaštite. Da bi vrednost energije luka bila svedena na najmanju moguću vrednost teži se minimalnom podešenju vremena trajanja kvara. Međutim, postoji ograničavajući faktor koji je vezan za selektivnost zaštite. Dakle, relejnu zaštitu je potrebno podesiti tako da energija luka bude svedena na minimalnu vrednost i da istovremeno bude zadovoljena selektivnost zaštite.

U nastavku je prikazan postupak za optimalno podešenje prekostrujne zaštite sa inverznom krivom sa ciljem da se dobije minimalna energija luka. Optimizacija je izvršena za energiju luka koja se izračunava primenom jednačine (6) po Lee metodi.

Opšta jednačina za izračunavanje vremena reagovanja prekostrujne zaštite sa inverznom krivom ima sledeći oblik:

$$t_r = \tau \left(\frac{A}{\left(\frac{I_f}{I_p}\right)^\alpha - 1} + B \right) \quad (7)$$

gde su: I_p – podešena vrednost struje, τ – vremenski koeficijent, A , B , i α – koeficijenti koji zavise od izabrane inverzne krive reagovanja.

Imajući u vidu da su prekidač i zaštitni relej dva odvojena elementa, vreme trajanja luka predstavlja njihovo zbirno vreme isključenja:

$$t_a = t_p + t_r = \tau \left(\frac{A}{\left(\frac{I_f}{I_p}\right)^\alpha - 1} + B + C \right) \quad (8)$$

gde je t_p – vreme isključenja prekidača, t_r – vreme isključenja releja, a $C = t_p/\tau$.

Ako se jednačina (8) zameni u (6), dobija se jednačina za energiju iz koje se može izračunati optimalna struja kvara. Optimalna struja kvara pri kojoj će energija luka imati minimalnu vrednost izračunava se nalaženjem parcijalnog izvoda energije po struji kvara:

$$\frac{\partial E}{\partial I_f} = \frac{\partial \left(K \left(\frac{(A-B-C)I_f I_p^\alpha + (B+C)I_f^{\alpha+1}}{I_f^\alpha - I_p^\alpha} \right) \right)}{\partial I_f} = 0 \quad (9)$$

Nalaženjem parcijalnog izvoda jednačina za izračunavanje optimalne struje kvara dobija konačan oblik:

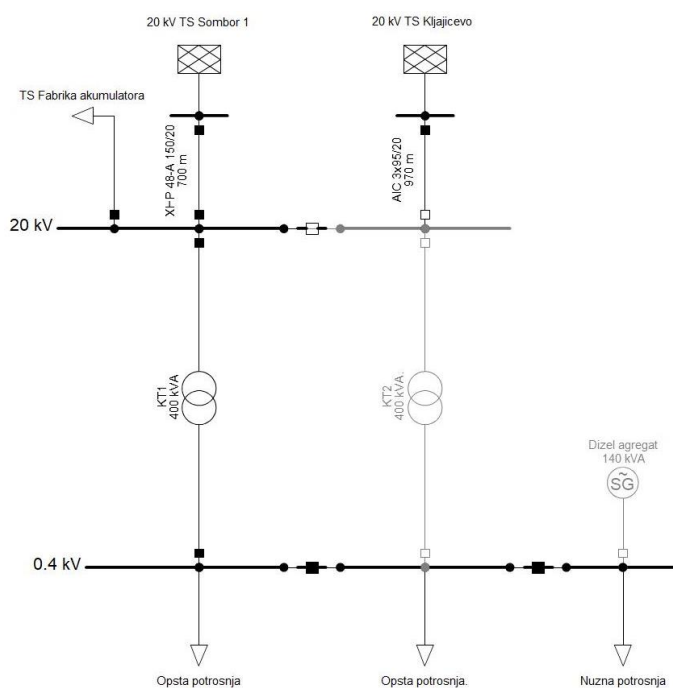
$$(B + C)I_f^{2\alpha} + [(1 - \alpha)A - 2(B + C)]I_f^\alpha I_p^\alpha + (A - B - C)I_p^{2\alpha} = 0 \quad (10)$$

Izračunavanje parcijalnog izvoda jednačine (4) nije razmatrano u ovom radu zbog složenosti same jednačine.

5. PRORAČUN ENERGIJE LUKA U POSTROJENJU SOPSTVENE POTROŠNJE

Proračun energije luka analiziran je na sabirnicama niskog i srednjeg napona u glavnom razvodu sopstvene potrošnje u TS Sombor 3. Glavni razvod srednjeg napona čine sabirnice 20 kV sa pripadajućim ćelijama, tri distributivna izvoda i dva kućna transformatora KT1 (J03) i KT2 (J06), snage 400 kVA. Za zaštitu kućnih transformatora (KT) i 20 kV izvoda koriste se mikroprocesorski uređaji zaštite SIEMENS 7SJ622 i 7SJ612. Kućni transformatori napajaju niskonaponske sabirnice 0,4 kV na koje su povezani nužna i opšta potrošnja. Na sekundarnoj strani kućnih transformatora nalaze se pripadajući prekidači SIEMENS WL11 800A, unutar kojih se koriste zaštitni blokovi ETU25B. Napajanje sopstvene potrošnje obezbeđeno je iz 20 kV distributivne mreže iz dva nezavisna pravca: TS Sombor 1 (J01) i TS Kljajićevo (J07). U normalnim radnim uslovima u pogonu je jedan kućni transformator koji napaja nužnu i opštu potrošnju. Pri prekidu napajanja, pokreće se dizel agregat koji preuzima napajanje nužne potrošnje sve do normalizovanja napajanja iz distributivne mreže.

Modelovanje postrojenja i simulacija kvarova izvršeni su u programskom paketu DIGSILENT Power Factory. Na slici 2 prikazan je model analiziranog postrojenja. Pri modelovanju postrojenja korišćeni su dostupni parametri kućnih transformatora, distributivnih vodova i ekvivalentnih mreža, podaci o prekidačima i podešenjima zaštite, podaci o dimenzijama ćelija i rastojanjima između sabirnica.



Slika 2 – Model postrojenja sopstvene potrošnje

Imajući u vidu da KT1 i KT2 imaju iste karakteristike, proračun energije luka izvršen je samo za KT1, za sledeće slučajeve:

- Slučaj 1: Napajanje iz pravca TS Sombor 1 i kvar sa lukom na sabirnicama 0,4 kV,
- Slučaj 2: Napajanje iz pravca TS Kljajićevo i kvar sa lukom na sabirnicama 0,4 kV,
- Slučaj 3: Napajanje iz pravca TS Sombor 1 i kvar sa lukom na sabirnicama 20 kV,
- Slučaj 4: Napajanje iz pravca TS Kljajićevo i kvar sa lukom na sabirnicama 20 kV.

Pri proračunu energije luka korišćeno je postojeće podešenje zaštite. Izračunate vrednosti energije luka i vreme trajanja luka za razmatrane slučajeve prikazani su na slici 4 (staro pod.). Na osnovu tabele 1 i izračunatih vrednosti energije luka prva dva razmatrana slučaja odgovaraju nivou rizika B (energija luka iznosi 11,4 i 11,3 J/cm²), treći slučaj odgovara nivou rizika C (energija luka iznosi 25,4 J/cm²), dok četvrti slučaj odgovara nivou rizika A (energija luka iznosi 6,1 J/cm²).

Prilikom analize podešenja zaštite u glavnom razvodu sopstvene potrošnje uočeni su određeni nedostaci:

- Kratkospojna zaštita na sekundarnoj strani KT1 i KT2 nalazi se unutar zaštitnog bloka ETU25B. Njena fiksna vrednost strujnog podešenja iznosi $20I_n=16$ kA, sa isključenjem bez vremenskog kašnjenja. Simulacijom kvarova na sabirnicama 0,4 kV primećeno je da struja tropskog kratkog spoja dostiže maksimalnu vrednost 14,4 kA. Samim tim može se zaključiti da navedena zaštita nikada neće detektovati kvar.

- U istom zaštitnom bloku ETU25B vremensko podešenje drugog stepena prekostrujne zaštite iznosilo je 0,4 s, a vremensko podešenje prekostrujne zaštite na primarnoj strani KT1 i KT2 iznosilo je 0,2 s. Simulacijom kvarova na sabirnicama 0,4 kV kvar je uvek prvo detektovala prekostrujna zaštita na primarnoj strani KT.

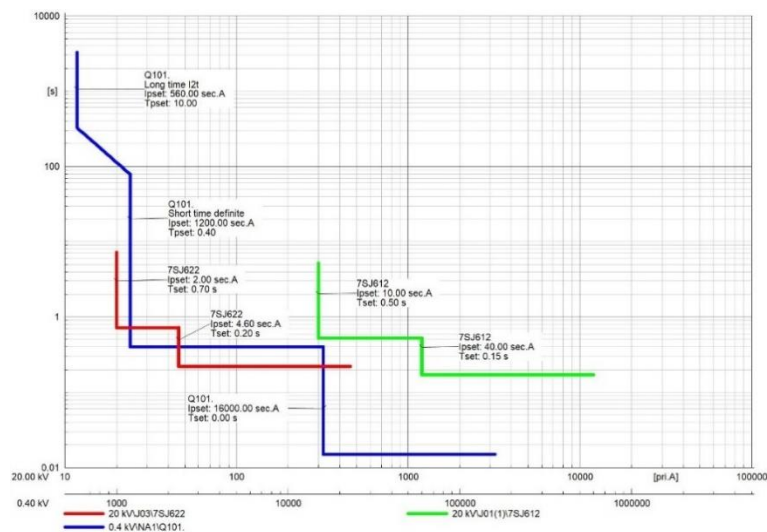
Da bi se otklonili navedeni nedostaci i postigla selektivnost prekostrujnih zaštita na primarnoj i sekundarnoj strani KT izvršena je promena podešenja.

Vremensko kašnjenje drugog stepena prekostrujne zaštite na 0,4 kV strani prepodešeno je sa 0,4 s na novu vrednost 0,1 s. Pri pojavi kvara na 0,4 kV sabirnicama, kvar će najbrže detektovati prekostrujna zaštita na sekundarnoj strani KT. Na taj način smanjeno je i vreme trajanja luka za kvarove na sabirnicama 0,4 kV.

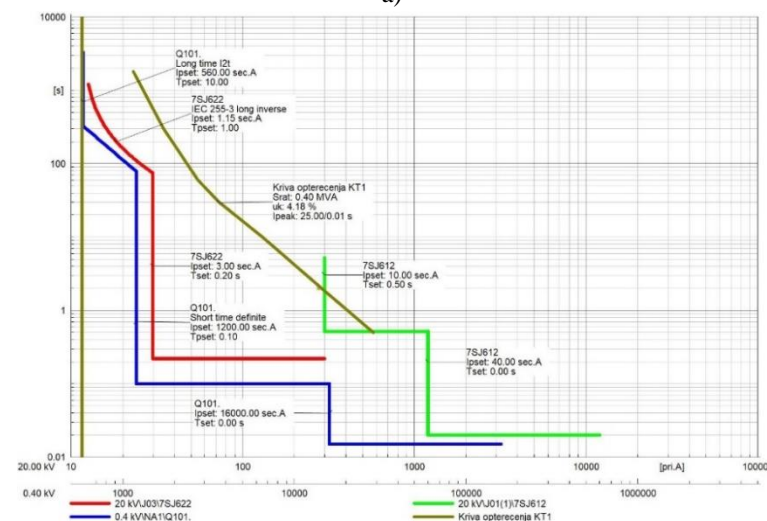
Da bi se postigla selektivnost prekostrujne zaštite na primarnoj i sekundarnoj strani KT, izvršeno je prepodešenje oba stepena prekostrujne zaštite na primarnoj strani KT.

Takođe, na izvodu prema TS Sombor 1 promenjeno je vremensko kašnjenje drugog stepena prekostrujne zaštite, tako da navedena zaštitna funkcija šalje nalog za isključenje prekidača trenutno, bez vremenskog kašnjenja. Isto podešenje već je bilo aktivno na izvodu prema TS Kljajićevo. Na taj način značajno je smanjeno vreme trajanja luka, bez narušavanja selektivnosti zaštite.

Na slici 3 prikazane su krive reagovanja i podešenja zaštite izvoda TS Sombor 1 i KT1 za stanje pre i nakon promene podešenja. Na sva tri izvoda i primarnoj strani KT1 i KT2 aktivna je i zemljospojna zaštita. Međutim navedena zaštitna funkcija nije razmatrana u ovom radu.



a)

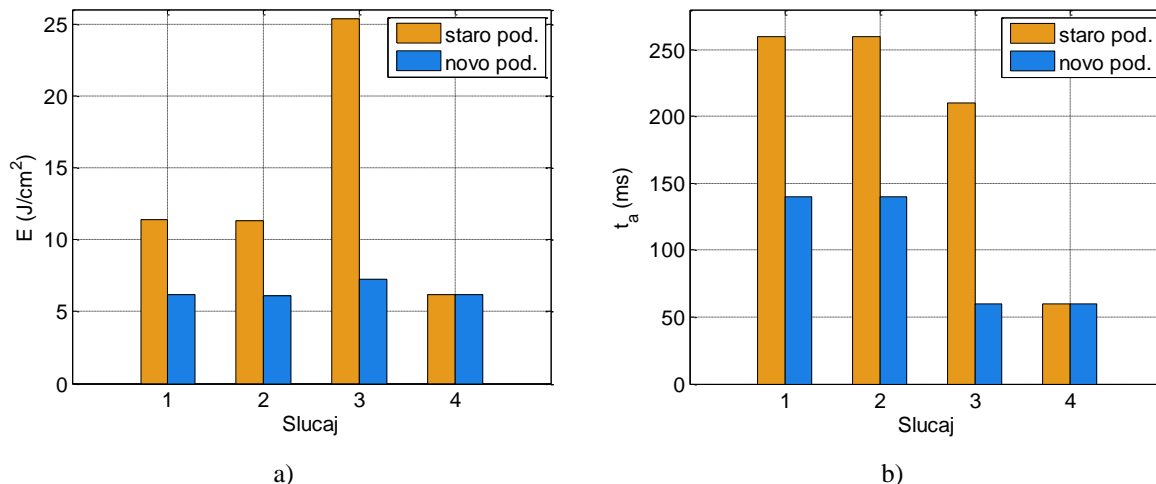


b)

Slika 3 – Podešenje zaštite KT1 a) staro podešenje i b) novo podešenje

Nakon promene podešenja zaštite, za razmatrane slučajeve izvršen je novi proračun energije luka. Na slici 4 prikazano je poređenje izračunate energije luka i vremena trajanja luka za razmatrane slučajeve kvarova sa lukom,

pre i nakon promene podešenja zaštite. Na osnovu dobijenih rezultata može se videti da je za sva četiri razmatrana slučaja nivo energije luka značajno smanjen. Ako se dobijeni rezultati izračunate energije za novo podešenje zaštite uporede sa graničnim vrednostima iz tabele 1 može se videti da se dobijeni rezultati za sva četiri razmatrana slučaja mogu svrstati u nivo rizika A (energija luka iznosi 6,1, 6,1, 7,2 i 6,1 J/cm²), što je sasvim prihvatljivo za bezbednost radnog osoblja. Na ovaj način pokazano je da se bez dodatnih finansijskih ulaganja energija luka može smanjiti na prihvatljivu vrednost, a da istovremeno ne bude narušena selektivnost zaštite.



Slika 4 – Poređenje rezultata proračuna a) energija luka i b) vreme trajanja luka

6. MERE ZA SMANJENJE ENERGIJE LUKA

U praksi se mogu pronaći različita rešenja koja su usmerena ka smanjenju energije koja se oslobađa pri pojavi električnog luka. Neka rešenja su trajna, dok su neka samo privremena, aktivna obično tokom boravka radnog osoblja u neposrednoj blizini mogućeg izvora luka. U ovom delu razmatrana su privremena i trajna rešenja koja su vezana za sistem relejne zaštite.

Jedna od privremenih mera za smanjene energije luka je prelazak u režim održavanja. Ako je procenjeno da je energija luka opasna po radno osoblje, pri izvođenju radova u blizini mogućeg izvora luka može se aktivirati režim održavanja. Kod niskonaponskih prekidača sa implementiranom zaštitom unutar prekidača kao dodatak može se ugraditi poseban ERMS (Energy Reduction Maintenance Settings) blok koji se aktivira pomoću dodatne preklopke. Kod mikroprocesorskih uređaja zaštite, režim održavanja može se realizovati pomoću druge grupe podešenja koja se aktivira preko odgovarajućeg binarnog ulaza. Prelaskom u režim održavanja aktivira se drugi skup podešenja zaštite koji šalje isključenje na prekidač bez vremenskog zatezanja. Na taj način smanjuje se vreme trajanja luka, a samim tim i energija koja se oslobađa. Vreme eliminisanja kvara jednako je zbirnom vremenu isključenja prekidača i prorade releja. Jedan od nedostataka navedenog pristupa je mogućnost da radno osoblje nakon završetka radova zaboravi da izvrši prebacivanje zaštite u normalan režim, a to bi za posledicu imalo gubitak selektivnosti zaštite.

U poslednje vreme aktuelna je i zaštita od električnog luka zasnovana na primeni optičkih senzora. Navedeno rešenje zahteva novu infrastrukturu koju čine optički senzori ugrađeni unutar postrojenja koji su povezani optičkom vezom sa centralnim mikroprocesorskim uređajem. Pri pojavi luka, optički senzori najbliži izvoru luka će detektovati poremećaj i informaciju proslediti u centralni uređaj. Da bi se povećala selektivnost, optički senzori se obično koriste u kombinaciji sa brzom prekostrukturnom zaštitom. Rešenje sa optičkim sensorima značajno smanjuje vreme trajanja luka koje je uglavnom jednako vremenu isključenja prekidača.

Primena međusobnog blokiranja susednih zaštitnih releja tradicionalno se primenjuje za smanjenje vremena trajanja kvara. Navedenom metodom može se značajno smanjiti vreme trajanja luka, a time i energija luka. Ideja je zasnovana na sledećem principu: Ako npr. relej R1 detektuje kvar nizvodno od svog mesta ugradnje, a pri tome ne primi informaciju da je kvar detektovao relej R2 koji se nalazi na istom izvodu iza mesta kvara, relej R1 će dati nalog za isključenje pripadajućeg prekidača, bez vremenskog zatezanja. Međutim, pri pojavi kvara nizvodno od releja R2, relej R2 će detektovati kvar i poslati informaciju o kvaru releju R1, uslediće blokiranje releja R1, a relej R2 će poslati nalog za trenutno isključenje pripadajućeg prekidača.

Diferencijalna zaštita sabirnica takođe može da bude jedno od mogućih rešenja za brzo isključenje kvara sa električnim lukom. Pri pojavi kvara sa lukom diferencijalna zaštita isključuje prekidače svih izvoda i na taj način se eliminiše napajanje mesta kvara.

Prikazana rešenja za smanjenje energije luka zahtevaju dodatne radove i izvesna finansijska ulaganja. Izbor adekvatne metode za smanjenje energije luka zavisi pre svega od značaja postrojenja i tehnno-ekonomske opravdanosti ulaganja.

7. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana pojava električnog luka u postrojenjima niskog i srednjeg napona. Analizirani su uzroci nastanka i ključni elementi koji utiču na vrednost energije luka. Takođe, prikazan je pregled važećih međunarodnih standarda koji tretiraju navedenu problematiku.

Na primeru glavnog razvoda sopstvene potrošnje u TS Sombor 3 izvršeno je izračunavanje energije luka i procena nivoa rizika po opremu i radno osoblje. Kao mera za smanjenje energije luka izvršeno je prepodešenje zaštite. Na taj način pokazano je kako se bez dodatnih finansijskih ulaganja energija luka može smanjiti na prihvatljivu vrednost.

Domaća tehnička regulativa ne obavezuje investitore da prilikom izgradnje novih i rekonstrukcije postojećih postrojenja preduzimaju mere koje su usmerene na procenu rizika i opasnosti od pojave električnog luka. Zbog toga se pri proračunu podešenja i koordinaciji zaštite u postrojenjima niskog i srednjeg napona uglavnom akcenat stavlja samo na selektivnost rada zaštite. Jedna od mera za smanjenje energije luka može biti proračun podešenja zaštite uz uvažavanje minimalne energije luka.

Pri izgradnji novih i rekonstrukciji postojećih postrojenja svakako treba razmisliti o zaštiti od električnog luka kao jednoj od mera kojom bi se smanjili obim havarije u postrojenju i opasnost po radno osoblje.

8. LITERATURA

- [1] IEEE 1584-2018, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, New York, NY, 2018
- [2] NFPA 70E-2021, Standard for Electrical Safety in the Workplace, Quincy, MA: NFPA, USA, 2021.
- [3] DGUV Information 203-077, Thermal Hazards Due to Electric Fault Arcing - Guide for the Selecting Personal Protective Equipment, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, Germany, 2021.
- [4] R. Lee, The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns, IEEE Transaction on industry applications, Vol: IA-18, No:3, pp. 246-251, 1982