

# Dodatak K

## Zaštita instalacija u tunelima

Koautor: Tomislav Rajić

### K.1 Cilj analize

U primeru se razmatraju mogući prenaponi u sistemima za elektroenergetskog napajanje automobilskih tunela usled atmosferskih udara u napojnu transformatorsku stanicu.

- Prenaponi mogu da nastanu direktnim atmosferskim pražnjenjem u zgradu pogonske stanice (PS) u kojoj se nalazi energetska transformator 10/0.4 kV, što može da podigne potencijal uzemljivača i izazove atmosferske prenapone koji moraju biti ograničeni. U tu svrhu će biti procenjen broj atmosferskih udara u zgradu PS, a zatim procenjen napon na uzemljivaču u skladu sa zahtevom da gromobranski nivo zaštite bude II, za koji se testiranje zaštite vrši strujom groma od 150 kA. Stepen zaštite II se bira na osnovu [16], po kriterijumu da kvar na opremi tunela predstavlja gubitak servisa. Na osnovu analize će se odlučiti da li su potrebni odvodnici prenapona na strani 10 kV transformatora.
- Prenaponi nastali usled povećanja napona na uzemljivaču utiču na naprezanje izolacije između namotaja 0.4 kV prema masi, odnosno priključaka transformatora na 0.4 kV i kućišta, što se rešava postavljanjem prenaponskih zaštitnih uređaja (SPD-Surge Protective Devices), između faznih priključaka na transformatoru i šine za izjednačenje potencijala koja je najkraćim putem vezana za uzemljivač u razvodnom ormanu [15]. Zadatak je da se proverí da li je potrebno postavljanje dodatnih SPD uređaja u razvodne ormene u PS osim uz priključke transformatora na strani 0.4 kV.

- Uređaji napajani naponom 0.4 kV u tunelu i ostalim objektima koji služe za napajanje tunela i osvetljenje i signalizaciju prilazima tunelu moraju da budu provereni da li postoji opasnost od opasnih prenapona. Zadatak je da se provere karakteristike odabranih SPD uređaja sa uslovima koji vladaju na mestima ugradnje.

## K.2 Gromobranska zaštita pogonske stanice

### K.2.1 Atraktivna zona pogonske stanice

Na slici K.1 prikazana skica Pogonske stanice sa bočne strane sa ucrtanim približnim dimenzijama, a na slici K.2 prikazan je pogled odozgo, sa ucrtanom opremom i glavnim dimenzijama zgrade.

Na osnovu standarda [16], za izdvojeni pravougaoni objekat dužine  $L$ , širine  $W$  i visine  $H$  na ravnom zemljištu, definiše se prihvatna površina objekta prema slici K.3. Da bi pojednostavili procenu prihvatne površine objekta, kosi krov ćemo aprosimirati horizontalnim krovom koji se nalazi na srednjoj visini  $H_{sr} = (4 + 7)/2 = 5.5$  m.

Izračunavanje prihvatne površine objekta oblika pravouglog paralelopipeda se sprovodi primenom sledećeg izraza za izdvojeni objekat:

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H_{sr}) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H_{sr})^2 \quad (\text{K.1})$$

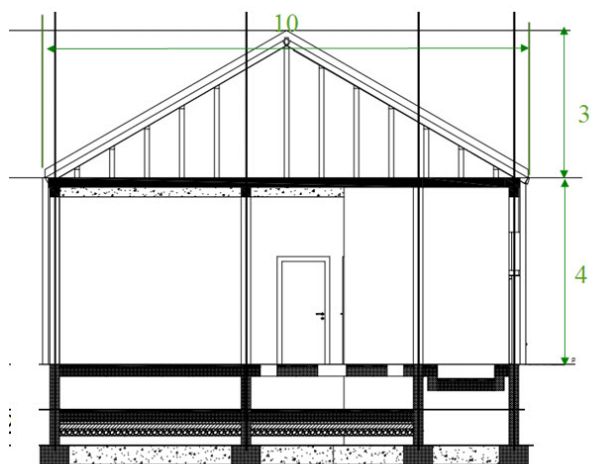
U tabeli K.1 date su dimenzije objekta i izračunata prihvatna površina objekta pogonske stanice.

Tabela K.1: Prihvatna površina objekta oblika pravouglog paralelopipeda

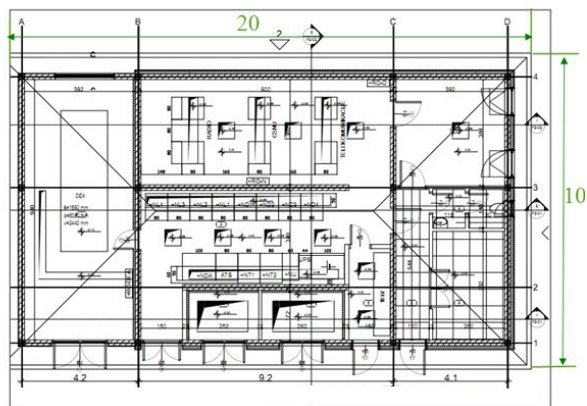
Dužina	$L$ (m)	20
Širina	$W$ (m)	10
Visina	$H$ (m)	5.5
Atraktivna površina	$A_D$ (m <sup>2</sup> )	2045.3

### K.2.2 Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja

Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja dobijena je na osnovu sistema za lokaciju pražnjenja koja pripadaju sistemu EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection),



Slika K.1: Bočni crtež zgrade pogonske stanice sa upisanim dimenzijama



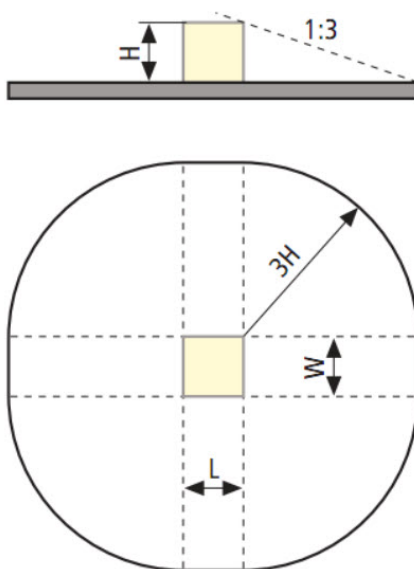
Slika K.2: Crtež zgrade pogonske stanice sa opremom, pogled odozgo

na osnovu sistema koji meri vremensku razliku u prostiranju talasa prema [102]. Na slici K.4 prikazan je uvećani deo slike prosečne godišnje gustine atmosferskih udara u periodu od 2008 do 2012 god za Republiku Srbiju. Zaokruženi deo na slici levo se odnosi se na područje gde se nalazi pogonska stanica, za koje se vrši analiza. Utvrđeno je da je prosečna godišnja gustina atmosferskih pražnjenja između 4 i 4.36 , pa je usvojena gornja granica oblasti 4.36.

### K.2.3 Broj opasnih događaja za objekat

Broj atmosferskih udara  $N_D$  za pogonsku stanicu TS 10/0.4 kV izračunat je na osnovu [16], odnosno:

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} \quad (\text{K.2})$$



Slika K.3: Određivanje prihvatne površine izdvojenog pravougaonog objekta

gde je:

$N_G$  - gustina atmosferskog pražnjenja prema zemlji ( $1/\text{km}^2$  god),

$A_D$  - prihvatna površina objekta ( $\text{m}^2$ ),

$C_D$  - faktor lokacije za objekat.

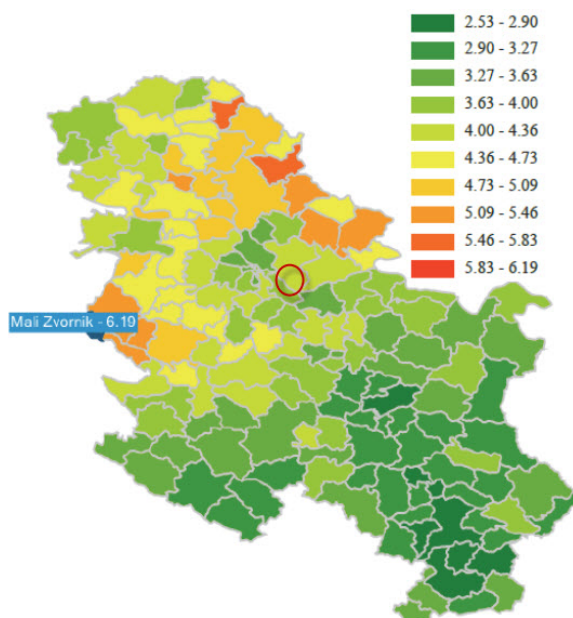
Usvaja se faktor lokacije za objekat  $C_D = 1$  za izdvojeni objekat bez drugih objekata u blizini. Usvojeno je da je objekat usamljen smatrajući da u okolini od 30 m nema nikakvih objekata veće visine od analiziranog.

Kada se izračuna, dobija se broj atmosferskih udara za zgradu pogonske stanice:

$$N_D = 0.891 \times 10^{-2}(\text{udara/god}) \quad (\text{K.3})$$

#### K.2.4 Usvajanje nivoa zaštite od atmosferskog pražnjenja objekta

Na osnovu [15] i [16], usvojen je nivo zaštite od atmosferskog pražnjenja (LPL-Lightning Protection Level) svih objekata za napajanja tunela na  $\text{LPL}=\text{II}$ . Nivo zaštite  $\text{LPL}=\text{II}$  je usvojen na osnovu činjenice da kvarovi usled atmosferskih pražnjenja mogu prouzrokovati gubitak servisa (signalizacija, osvetljenje), ali ne mogu prouzrokovati opasnost po život i zdravlje ljudi, kao i veliku materijalnu štetu. Na osnovu usvojenog LPL određuje



Slika K.4: Prosečne godišnje gustine atmosferskih udara u periodu od 2008 do 2012 god za Republiku Srbiju

se kritična struja atmosferskog pražnjenja. Prema [15] za usvojen je nivo zaštite od atmosferskog pražnjenja LPL II, koristi se fiksirana temena vrednost struje atmosferskog pražnjenja za procenu ugroženosti 150 kA. Najveće vrednosti parametara struje atmosferskog pražnjenja za nivo LPL II ne smeju da budu prekoračene, sa verovatnoćom 98 % prema [15]. Odabrana je struja talasnog oblika 10/350 s.

### K.2.5 Određivanje otpornosti uzemljenja objekta TS 10/0.4 kV

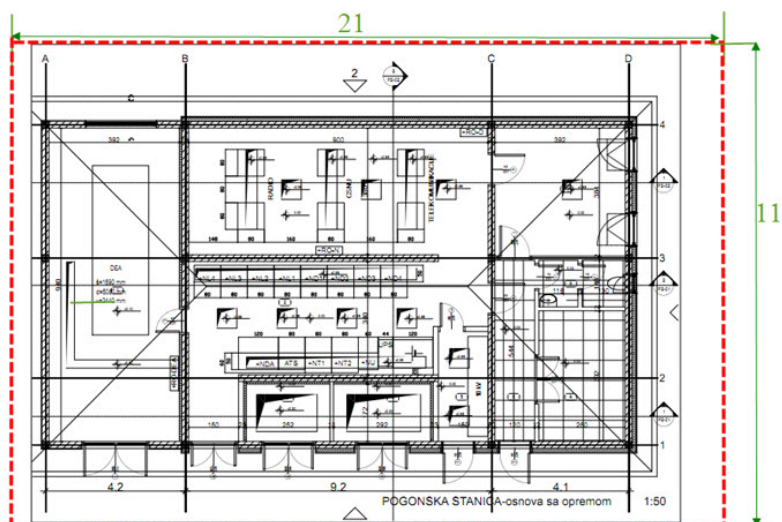
Uzemljenje objekta TS 10/0.4 kV potrebno je uraditi u skladu sa [47]. Postavljen je prsten oko objekta, na udaljenosti 0.5 m od zidova objekta, kao na slici K.5 označen crvenom isprekidanom linijom.

Otpornost rasprostiranja uzemljivača u obliku prstena određuje se na osnovu sledećeg izraza, prema [47]:

$$R_u = \frac{2}{3} \frac{\rho_z}{D_{ekv}} \text{ gde je } D_{ekv} = 1.13\sqrt{A} \quad (\text{K.4})$$

$$R_u = \frac{2}{3} \frac{\rho_z}{D_{ekv}} \quad (\text{K.5})$$

$$A = a \times b \quad (\text{K.6})$$



Slika K.5: Skica prstenastog uzemljivača oko objekta na rastojanju 0.5 m od zidova  
gde su:  $a=21$  m dužina i  $b=11$  m širina pravougaonog prstena oko zgrade.

Specifična otpornost zemlje se može odrediti iz tabele K.2.

Tabela K.2: Specifična otpornost za različit sastav zemlje

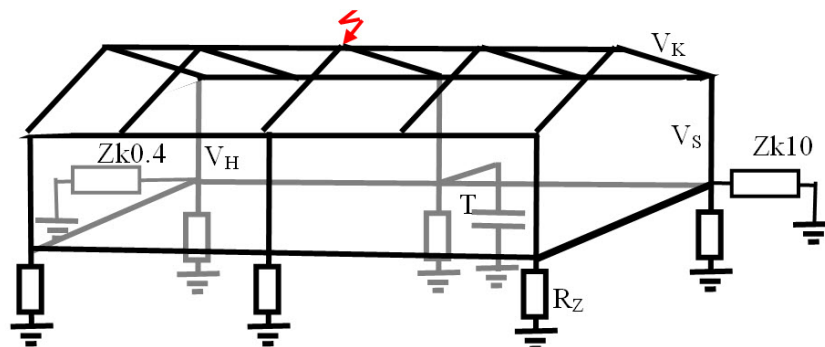
Vrsta tla	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
treset ili humus	20
bažtenska zemlja ili ilovača	40
glinasta zemlja	100
peskulja	300
Pesak	500

Ako se za specifičnu otpornost zemljišta usvoji vrednost od  $\rho_z = 300 \Omega \text{ m}$ , otpornost prstenastog uzemljivača iznosi  $R_u = 11.6 \Omega$ .

### K.2.6 Ekvivalentna šema spoljašnjeg gromobranskog sistema

Na slici K.6 nacrtana je ekvivalentna šema sistema koja se sastoji od vodova VH koji simuliraju horizontalne trake prihvatnog sistema, VS koji simuliraju vertikalne trake spusnog sistema, VK koji simuliraju krovne kose trake prihvatnog sistema i Vz koji simuliraju provodnika ispod zemlje. Rz označavaju skoncentrisane otpore rasprostiranja na mestu spoja spusnog provodnika sa uzemljivačkim sistemom.

Ukoliko ima ukupno  $n$  spusnih provodnika, tada je otpornost svakog pojedinačnog

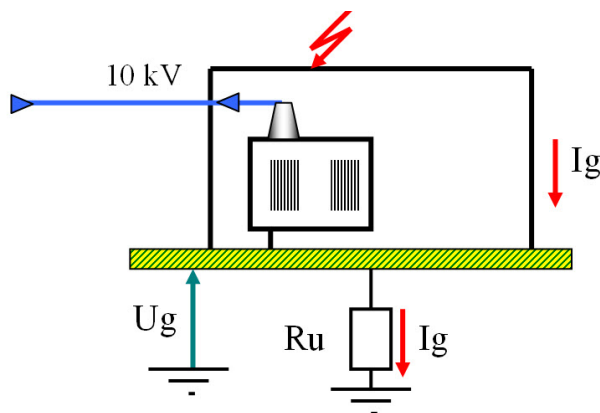


Slika K.6: Skica spoljašnje gromobranske instalacije na zgradi TS

skoncentrisanog otpornika koji simulira konvencionalnu impedansu  $R_z = nR_u$ . U ovom slučaju to je:

$$R_z = 6 \times 11.6 = 69.6 \approx 70 \, \Omega \quad (\text{K.7})$$

Predpostavljeno je najkritičnije mesto atmosferskog pražnjenja u sleme krova najbliže mestu uzemljenja transformatora. U šemi je transformator predstavljen ekvivalentnim kapacitetom namotaja visokog napona prema zemlji. Naprezanje visokonaponskog namotaja transformatora objašnjeno na slici K.7.



Slika K.7: Naprezanje visokonaponskog namotaja transformatora zbog porasta potencijala uzemljivača

Zbog proticanja struje atmosferskog pražnjenja kroz uzemljivač otpora rasprostiranja  $R_u$ , potencijal uzemljivača u odnosu na referentnu zemlju raste na napon  $U_g$ . Fazni pogonski napon napajanja sa strane 10 kV osciluje oko nulte vrednosti sa temenom vrednošću od  $U_{fm} = 9.8 \, \text{kV}$  koja odgovara najvišoj efektivnoj vrednosti pogonskog napona od 12 kV. Radni napon se može zanemariti u odnosu na porast napona na uzemljivaču, koji se prenosi na sud transformatora i napreže izolaciju namotaja.

U tabeli K.3 date su usvojene vrednosti karakterističnih impedansi provodnika i ekvi-

valentne vrednosti konvencionalnih impedansi uzemljivača na mestu priključka spusnog provodnika, kao i ekvivalentna kapacitivnost namotaja transformatora sa strane 10 kV. Takođe su date ekvivalentne karakteristične impedanse kablova 10 kV i 0.4 kV.

Tabela K.3: Usvojene vrednosti karakterističnih impedansi provodnika, ekvivalentne vrednosti otpora uzemljenja na mestu priključka spusnog provodnika, kao i ekvivalentna kapacitivnost namotaja transformatora sa strane 10 kV

Naziv elementa elementa	oznaka veliĉine	Oznaka grane	Vrednost	DuŹina (m) (m)
$Z_c$ Horizontalnih traka	$Z_H(\Omega)$	$V_H$	255	5
$Z_c$ Vertikalna traka	$Z_S(\Omega)$	$V_s$	255	4
$Z_c$ Ekvivalentna impedansa provodnika uzemljivaĉkog prstena	$Z_E$	$V_E(\Omega)$	255	5.8
Ekvivalentna otpornost uzemljenja	$R_u(\Omega)$	$R_u$	70	-
Udarna kapacitivnost transformatora	$C_t$ (nF)	$C_t$	3	-
$Z_c$ kablova 10 kV	$Z_k(\Omega)$	$Z_{k10}$	30	-

**Napomena:**  $Z_c$  oznaĉava karakteristiĉnu impedansu. Karakteristiĉna impedansa dolaznog kabla 10 kV se ekvivalentira omskim otpornikom vrednosti otpora koja je jednaka karakteristiĉnoj impedansi da bi se spreĉile refleksije talasa.

### K.2.7 Proraĉun prenapona na kućištu transformatora bez prenaponske zaštite

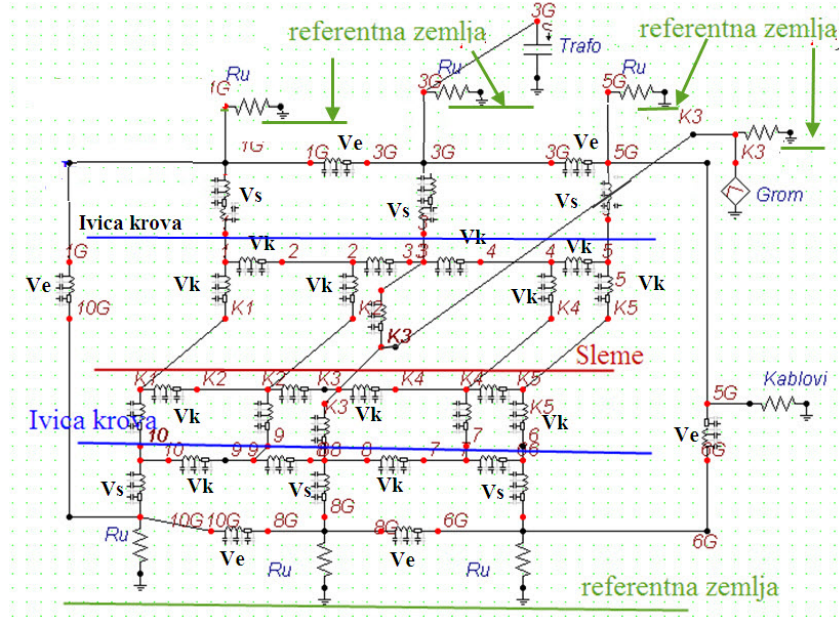
Na slici K.8 dat je ekranski prikaz zamenske šeme sistema spoljašnje gromobranske zaštite pogonske stanice, sa 6 spusteva. Na slici su dodate oznake gde se nalaze uzemljivaĉi prema referentnoj zemlji, kao i oznake vodova za ivicu krova i sleme. Usvojen je za struju atmosferskog udara talasni oblik struje  $10/300 \mu s$ , amplituda 150 kA, koja odgovara stepenu zaštite LPL II. Da bi se ispitala potreba za odvodnikom prenapona, u ovom primeru se transformator ne štiti odvodnikom prenapona.

U šemi na slici K.8 transformator je zamenjen ulaznom kapacitivnošću. Proraĉunom je dobijen talasni oblik napona na transformatoru kao na slici K.9.

Određena je struja atmosferskog pražnjenja koja je graniĉna za kvar izolacije transformatora sa strane 10 kV, odnosno struja koja izaziva prenapon koji je jednak podnosivom naponu izolacije od 75 kV. Amplituda kritiĉne struje je  $I_{krit} = 17.4$  kA.

Izraĉunavanje verovatnoće pojave struje koja je veća od kritiĉne struje  $I_{krit}$  moŹe se izvršiti na osnovu kumulativne krive logaritamsko-normalne raspodele verovatnoće pre-





Slika K.8: Ekvivalentna šema za proračun napona na transformatoru pri delovanju atmosferske udarne struje, bez zaštite odvodnikom prenapona

mašenja srtruje, koja je data izrazom

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (\text{K.8})$$

gde je:  $x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}}$

$I_{sr}$  -srednja vrednost amplitude struje pražnjenja,  $I_{sr} = 30$  kA,

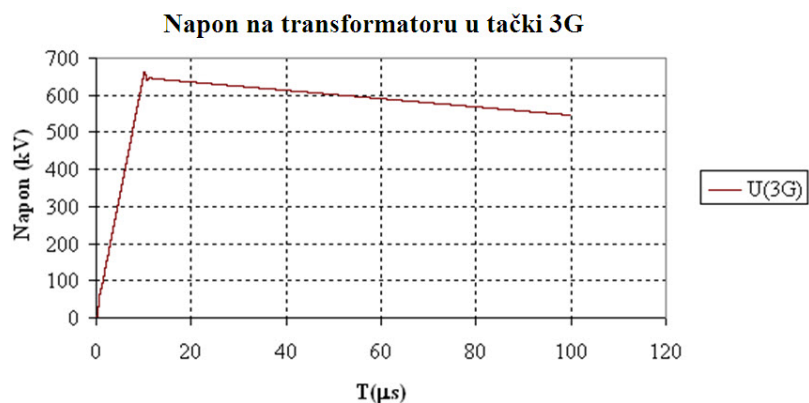
$\sigma_{\ln I}$  -srednje kvadratno odstupanje logaritma struje kod logaritamsko normalne raspodele,  $\sigma_{\ln I} = 0.68$ .

Posle izračunavanja dobija se da struje koje dostižu struju  $I_{krit}$  koja izaziva preskok imaju verovatnoću premašenja:

$$P(I > I_{krit} = 17.4 \text{ kA}) = 0.7908 \quad (\text{K.9})$$

Na osnovu gustine pražnjenja  $N_G$  i atraktivne površine objekta  $A$  dobija se godišnji broj udara koji mogu da ugroze transformator. aproračuna se zaključuje da je rizik kvara transformatora:

$$R = P(I > I_{krit}) \times N_D \quad (\text{K.10})$$



Slika K.9: Talasni oblik napona na transformatoru bez zaštite odvodnikom prenapona

Odnosno kad se izračuna, dobija se  $R=0.007$  (1/god)

Prema [16], dozvoljeni rizik gubitka servisa je  $R_S = 0.001$  godišnje.

Prema [12], za elektroenergetske objekte se toleriše rizik kvara elemenata postrojenja u dijapazonu od  $R_t = 0.001$  do  $R_t = .004$  kvarova godišnje. Srednji broj godina između dva kvara  $MTBF = 1/R_t$  se kreće u opsegu 1000 god do 250 god. Zbog toga se mora koristiti prenaponska zaštita za stranu 10 kV i za stranu 0.4 kV.

### K.2.8 Zaštita visokonaponske strane energetskog transformatora od prenapona

Zahvaljujući primeni metal-oksidnih odvodnika prenapona u silikonskom kućištu moguće je postaviti odvodnike prenapona direktno na transformatorski sud. Na slici K.10 prikazan je primer instalacije metal-oksidnog (MO) odvodnika sa mrežnim odvajanjem ugrađen je pomoću izolovanog držača direktno na transformatorski sud. Fleksibilni priključak za uzemljenje povezan je sa transformatrskim sudom što je moguće kraćom vezom. Visokonaponska veza se vodi od kabloške završnice direktno do odvodnika prenapon i odatle najkraćim putem do prolaznog izolatora transformatora.

**Važno:** Prilikom naručivanja transformatora se mora naglasiti da se odvodnici postavljaju direktno na transformator



Slika K.10: Primer instalacije odvodnika prenapona sa mrežnim odvajanjem direktno na transformatorski sud

### K.2.9 Karakteristike izabranog odvodnika prenapona

Karakteristike izabranog odvodnika prenapona prema proceduri opisanoj u poglavlju 7.6.7 prikazane su u sledećoj listi:

KL - Klasa odvodnika DH

$I_n$  - Nominalna struja pražnjenja oblika 8/20  $\mu s$   $I_n = 10$  kA (temena vrednost)

$Q_{th40}$  - Termička sposobnost višestrukog transfera električnih opterećenja kroz odvodnik pri temperaturi 40 °C  $Q_{th}=1.1$  C.

$Q_{th55}$  - Termička sposobnost višestrukog transfera električnih opterećenja kroz odvodnik pri temperaturi 55 °C  $Q_{th}=0.94$  C.

$I_m$  - Amplituda kratkotrajnog atmosferskog udarnog strujnog talasa oblika 4/10  $\mu s$  100 kA.

$I_m$  - talas dugog trajanja amplitude 250 A i trajanja 2000  $\mu s$ , za ispitivanje sposobnosti podnošenja naprežanja pri rasterećenju vodova pri sklopnim prenaponima.

$I_{ks}$  - Struja kratkog spoja 20 kAef u trajanju od 0.2 s.

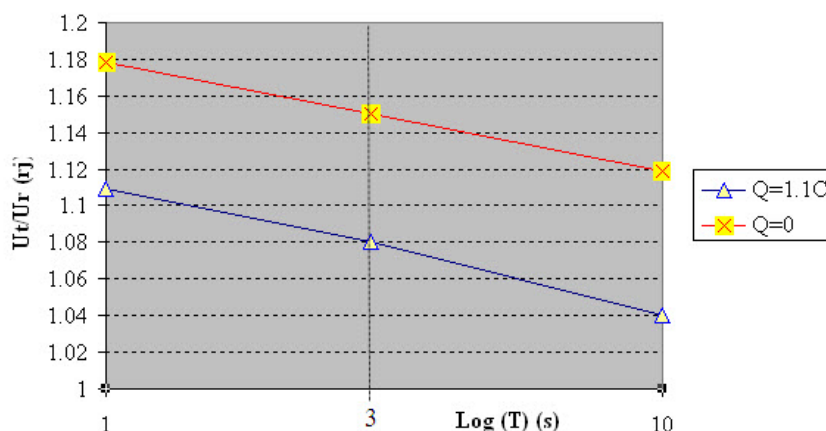
Karakteristika podnošenja privremenih prenapona u funkciji njihovog trajanja data je u tabeli K.4 za odabranu seriju odvodnika.

Podnosivi napon industrijske frekvencije pri privremenim prenaponima ( $U_{tov}$ ) dat je na slici K.11 za slučaj bez predhodnog termičkog opterećenja i sa predhodnim termičkim

Tabela K.4: Karakteristika podnosivog privremenog prenapona u funkciji trajanja kvara za odabranu seriju odvodnika

Trajanje kvara	Podnosivi TOV
Bez predopterećenja	
1 sec	$1.178 \times U_r = 1.473 \times U_c$
3 sec	$1.150 \times U_r = 1.438 \times U_c$
10 sec	$1.119 \times U_r = 1.398 \times U_c$
Sa predopterećenjem Q=1.1 C	
1 sec	$1.109 \times U_r = 1.385 \times U_c$
3 sec	$1.080 \times U_r = 1.350 \times U_c$
10 sec	$1.040 \times U_r = 1.300 \times U_c$

### Podnosivi TOV u funkciji trajanja



Slika K.11: Privremeni prenapon  $U_{tov}$  za slučaj bez predhodnog termičkog opterećenja i sa predhodnim termičkim opterećenjem od Q=1.1 As

opterećenjem od Q=1.1 As (C), kada se napon izražava u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon  $U_r$ .

Transformator u pogonskoj stanici radi sa strane 10 kV sa zvezdištem uzemljenim preko otpornika za ograničavanje struje na 300 A, koja se isključuje posle 1 s. U tom slučaju napon na neoštećenoj fazi raste na približnu vrednost  $\sqrt{3} \cdot U_f$ , gde je  $U_f$  efektivna vrednost maksimalnog trajnog radnog napona  $U_m$ . Predpostavljena je kritična opcija da zaštita ne isključuje kvar u 1. stepenu, tako da je izbor odvodnika urađen za trajanje kvara produženo na 3 s.

Zavisnost preostalog napona odvodnika prenapona u funkciji atmosferske udarne struje standardnog oblika koja je najvažnija za procenu ugroženosti transformatora, data

je u tabeli K.5

Tabela K.5: Zavisnost preostalog napona odvodnika prenapona u funkciji atmosferske udarne struje standardnog oblika 8/20  $\mu$ s

		Amplituda struje				
U <sub>c</sub>	U <sub>r</sub>	1	2.5	5	10	20
12	15	34.9	37	39.1	42	47.8

Postupak izbora odvodnika prenapona je dat u tabeli K.6.

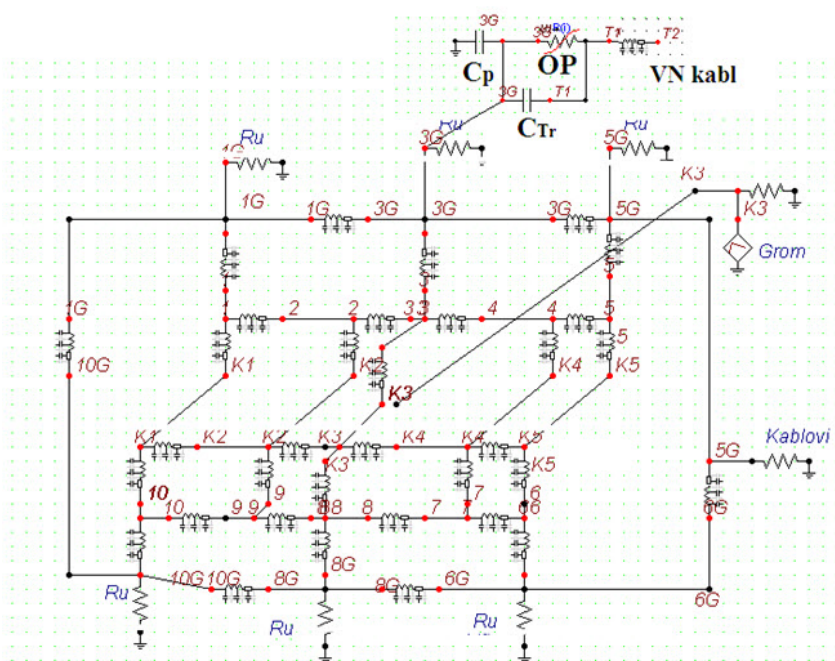
Tabela K.6: Postupak izbora minimalnog naznačenog napona odvodnika prenapona

Br.	Naziv	Oznaka	Vrednost
Parametri mreže			
1	Nazivni napon mreže	U <sub>n</sub> (kV)	10
2	Najviši radni napon mreže	U <sub>m</sub> (kV)	12
3	Faktor uzemljenja mreže	K <sub>z</sub> (rj)	1.732
4	Trajanje zemljospoja T <sub>z</sub> (s)	3	
5	Faktor sigurnosti pri proračunu zemljospoja	K <sub>s</sub> (rj)	1.1
6	Maksimalni prenaponi pri zemljospoju $U_{tz} = K_z K_s U_m / 1.73$	U <sub>tz</sub> (kV)	12.3
Izbor odvodnika			
7	Tip odvodnika: MO u kompozitnom kućištu		
8	Trajni radni napon $U_c = U_m / 1.73$	U <sub>c</sub> (kV)	6.9
9	Faktor proizvođača	K <sub>o</sub> (rj)	0.8
10	Minimalni naznačeni napon odvodnika baziran na trajnom radnom naponu $U_{rc} = U_c / K_o$	U <sub>rc</sub> (kV)	8.7
11	Predhodno energetske opterećenje odvodnika	Q <sub>th</sub> (C)	1.1
13	Dozvoljeni porast napona na odvodniku usled zemljospoja u odnosu na naznačeni radni napon odvodnika	T <sub>pr</sub> (rj)	1.08
15	Minimalni naznačeni napon odvodnika baziran na privremenom prenaponu pri zemljospoju $U_{rz} = U_{tz} / T_{pr}$	U <sub>rz</sub> (kV)	12.3
16	Minimalni naznačeni napon odvodnika kao maksimalna vrednost između predhodnih vrednosti	U <sub>r</sub> (kV)	12.3

Izabran je odvodnik prenapona naznačenog napona  $U_r = 15$  kV trajnog radnog napona  $U_c = 12$  kV. Odvodnik je direktno priključen na transformator, tako da je na transformatoru maksimalno mogući atmosferski prenapon neznatno viši od preostalog napona odvodnika. Odvodnik koji bi izdržao naprezanja pri zemljospoju čak i ako bi zemljospoj trajao više od 3 sec.

### K.2.10 Proračun prenapona na transformatoru sa ugrađenim odvodnikom prenapona na 10 kV strani

Proračun prenapona na strani 10 kV transformatora je izvršen sa ugrađenim odvodnikom prenapona, prema šemi na slici K.12. Usvojena je dužina spojnih provodnika između odvodnika i prolaznog izolatora i priključka za uzemljenje na kuštu transformatora 1 m. Transformator sa strane 10 kV je priključen na kabl dugačak 2 km, koji je na drugom kraju otvoren.



Slika K.12: Zamenska šema gromobranskr instalacije pogonske stanice sa ugrađenim odvodnikom naznačenog napona  $U_r=15$  kV

Oznake na slici K.12 imaju sledeće značenje:

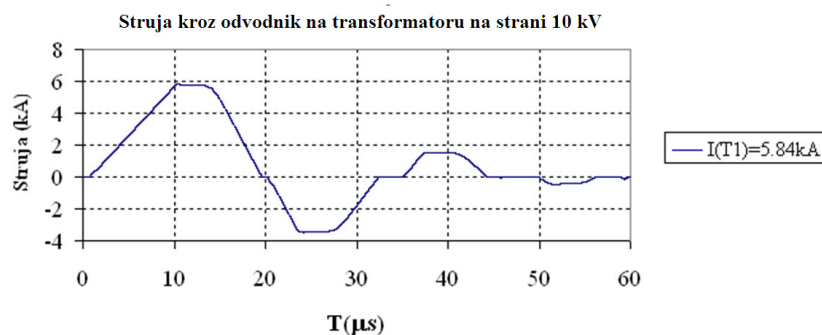
$C_{TR}$  - kapacitet namotaja visokonaponskog namotaja prema masi.

OP - odvodnik prenapona.

VN -visokonaponski kabl dugačak 2 km.

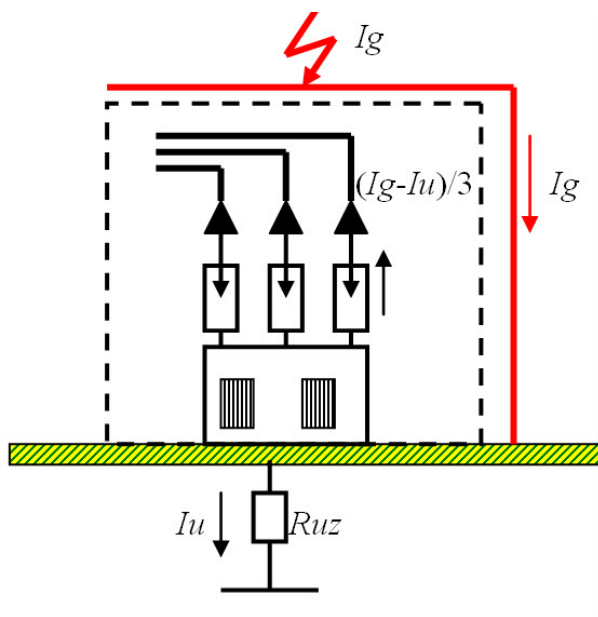
Na slici K.13 prikazana je struja kroz odvodnik na strani 10 kV transformatora, usled atmosferskog udara čija je amplituda struje 150 kV.

Prilikom računanja struja koje opterećuju odvodnik prenapona, mora se voditi računa da je izvor prenapona porast napona na uzemljivaču, pa se ukupna struja deli na 3



Slika K.13: Vremenski tok struje kroz odvodnik na strani 10 kV ispred transformatora

struje kroz tri odvodnika prenapon, prema slici K.14. To je uzeto u obzir kod prikazivanja rezultata na slici K.13.



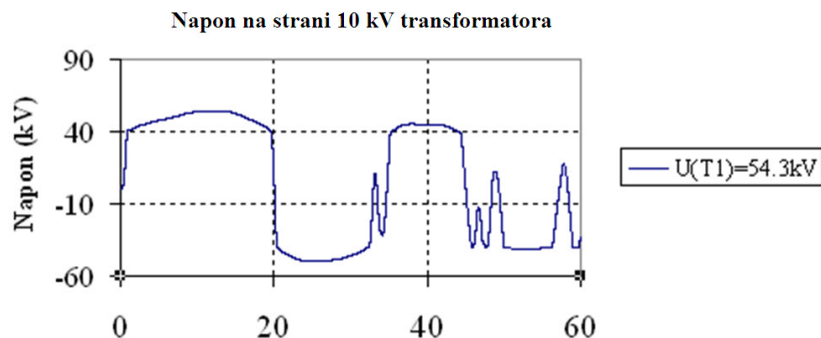
Slika K.14: Opterećivanje odvodnika trećinom struje pražnjenja

Smanjivanjem otpora uzemljenja  $R_{uz}$  se povećava struja koja se preko uzemljivača prazni ka referentnoj zemlji  $I_u$ , a smanjuje struja kroz odvodnike prenapona prema izrazu:

$$I_{od} = (I_g - I_u)/3 \quad (K.11)$$

Na slici K.15 prikazana je vremenska promena napona na transformatoru

Maksimalni prenapon je niži od 75 kV, koliko iznosi podnosivi napon transformatora. Mora se naglasiti da je proračun rađen pesimistički, sa većom dužinom spojnih



Slika K.15: Vremenski tok napona na VN strani transformatora

provodnika između donjeg dela odvodnika i kućišta transformatora, koja je prilagođena koraku proračuna (dužina 2 m), tako da bi se realno pojavili još niži prenaponi.

Količina elektriciteta  $Q$  koja energetski opterećuje odvodnik se izračunava iz izraza:

$$Q = \int I_{od} dt \quad (K.12)$$

Integraljenje se obavlja u periodu trajanja strujnog talasa, koja je za posmatrani talas oblika  $10/350 \mu s$  iznosi  $2 \cdot 350 = 700 \mu s$ .  $i_{od}$  je trenutna vrednost struje kroz odvodnik.

Proračuni prenapona na transformatoru  $U_{max}$ , maksimalne struje kroz odvodnik  $I_{max}$  i električno opterećenje koje energetski opterećuje odvodnik  $Q$  su rađeni za 3 vrednosti karakterističnih impedansi kabla 10 kV i rezultati su dati u tabeli K.7.

Tabela K.7: Vrednosti maksimalnih napona na transformatoru, struja kroz odvodnik prenapona i transfera količine naelektrisanja u zavisnosti od karakteristične impedanse napojnog kabla

$Z_c (\Omega)$	$U_{max} (kV)$	$3 \times I_{max} (kA)$	$I_{max} (kA)$	$Q (C)$
30	54.3	17.44	5.84	0.11
20	58.2	24.1	8.03	0.22
10	65.8	40.5	13.50	0.30

Može se videti da je maksimalni napon na transformatoru  $U_{max} < 75 \text{ kV}$ , koliko je podnosivi napon. Udarne struja kroz odvodnik  $I_{max} < 20 \text{ kA}$ , koliko je atmosferska udarna struja kojom se određuje preostali napon. Ove struje se ne mogu porediti sa kratkotrajnom podnosivom udarnom strujom odvodnika oblika  $4/10 \text{ s}$ , koja iznosi  $100 \text{ kA}$ , jer su ove struje dužeg trajanja. Podnosivi transfer naelektrisanja  $Q < 1.1 \text{ C}$ , koliko je



deklarisana podnosiva vrednost, dokazuje energetska sposobnost odvodnika koja je veća od izračunate.

Proračun pokazuje da pri struji atmosferskog pražnjenja od 150 kA svi parametri odvodnika zadovoljavaju.

## K.3 Prenaponska zaštita niskog napona transformatora

### K.3.1 Postavljanje niskonaponskog odvodnika prenapona

Niskonaponski namotaj transformatora je na isti način ugrožen od atmosferskih prenapona kao visokonaponski namotaj, usled podizanja potencijala uzemljivača i transformatorskog suda u odnosu na niskonaponski razvod. Zbog toga je neophodno sprovesti zaštitu niskonaponskih izvoda odvodnicima prenapona niskog napona. Na slici K.16 predstavljen je način fiksiranja niskonaponskog odvodnika prenapona na transformatorski sud.



Slika K.16: Način fiksiranja odvodnika na transformatorski sud

Na slici K.16 oznake imaju sledeće značenje:

1. niskonaponski odvodnik prenapona,
2. metalni nosač odvodnika fiksiran na prolazni izolator transformatora,

3. provodnik za vezu za sa priključkom za uzemljenje na kućištu transformatora,
4. prolazni izolator transformatora.

### K.3.2 Karakteristike niskonaponskog odvodnika prenapona za transformator sa strane 0.4 kV

U tabeli 4.2.1 date su osnovne karakteristike niskonaponskog odvodnika prenapona proizvođača Tyco-Electronic/Raychem naznačenog napona 280 V.

Tabela K.8: Osnovne karakteristike niskonaponskog odvodnika prenapona proizvođača Tyco-Electronic/Raychem

Prema IEC 61643 od 2005	Klasa II
Fazni napon sistema $U_s$ (V)	230
Trajni radni napon $U_c$ (V)	280
Mrežni odvajač	Interni
Nominalna struja pražnjenja $I_n$ (kA) temena vrednost	10
Maksimalna struja pražnjenja (8/20 $\mu$ s) $I_{max}$ (kA) temena vrednost	40
Podnosiva struja pražnjenja (4/10 $\mu$ s) $I_{max}$ (kA) temena vrednost	100
Energetska apsorpciona moć (J/V) od $U_c$	4

Može se uočiti da je podnosiva struja pražnjenja oblika 4/10  $\mu$ s kojs služi za proveru odvodnika na razaranje 100 kA, što daleko prevazilazi očekivanu struju.

U tabeli K.9 data je karakteristika preostalog napona u funkciji struje pražnjenja standardnog oblika 8/20  $\mu$ s.

Tabela K.9: Karakteristika preostalog napona u funkciji struje pražnjenja standardnog oblika 8/20  $\mu$ s

$I$ (kA)	1	2	5	10	20
$U_p$ (kV)	0.76	0.82	0.96	1.2	1.58

U tabeli K.9 vrednosti preostalog napona su date zajedno sa padom napona na provodniku dužine 15 cm za povezivanje sa kućištem. U slučaju primene veće dužine provodnika, za struju od 10 kA se može očekivati porast preostalog napona za oko 0.8 kV za povećanje dužine veze sa 15 cm na 60 cm.

### K.3.3 Karakteristike prenaponskih zaštitnih uređaja (SPD) u razvodu 0.4 kV

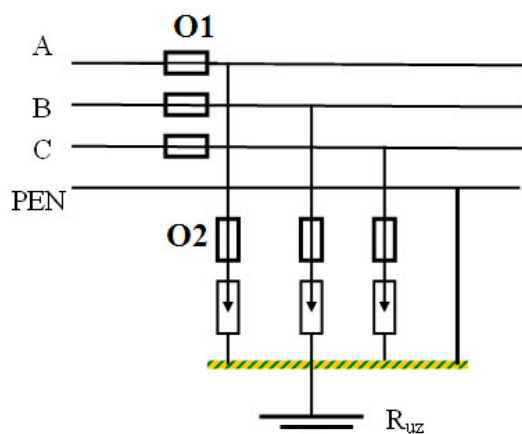
Za ograničavanje prenapona na strani 0.4 kV na mestima gde je potrebno odvesti veliku struju pražnjenja koriste se uređaji koji se zovu strujni odvodnici (current arresters), koji se deklariraju da su klase 1 ili tip 1. Izabrani su SPD u kompletu od 3 jedinice koje se vezuju između faza i PEN provodnika. Glavne karakteristike su date u tabeli K.10.

Tabela K.10: : Karakteristike odvodnika za 0.4 kV tipa 1

Opis	Karakteristike
Nazivni napon $U_n$ (V)	230
Najviši rafni napon $U_c$ (V)	255
SPD prema EN 61643-11	Tip 1
Za zonu zaštite od groma (LPZ)	0-1
Udarne struja pražnjenja (10/350 $\mu$ s) $I_{ud}$ (kA)	50
Zaštitni nivo $V_p$ (V)	2
Vreme odziva	<100 ns
Prekidanje propratne struje $I_{ks}$ (kA) eff	25 kA
Maksimalni preventivni osigurač (A)	500
Radna temperatura	-40°C do +80°C
Optička indikacija stanja odvodnika na licu mesta	Da

Označavanje SPD uređaja karakteritika sličnih kao u tabeli K.10 u daljem tekstu će biti SPD 1 jer se deklariraju kao odvodnici struje pražnjenja.

Sva tri SPD uređaja su postavljena između faza i PEN provodnika (zaštitna zemlja i neutralni provodnik zajedno). Na slici K.17 prikazan je spoj SPD.



Slika K.17: šema sprege SPD uređaja u TN-C sistemu

Za ograničavanje prenapona na strani 0.4 kV na mestima gde je potrebno limitirati napon koriste se uređaji koji se zovu odvodnici prenapona (voltage arresters) klase 2 ili tip 2. Izabrani su SPD u kompletu od 3 jedinice koje se vezuju između faza i PEN provodnika naznačenog napona 280 V sa daljinskim očitavanjem stanja. Glavne karakteristike su date u tabeli K.11, za maksimalnu podnosivu atmosfersku udarnu struju od 20 kA, koja će se u daljem tekstu obeležavati kao SPD 2.

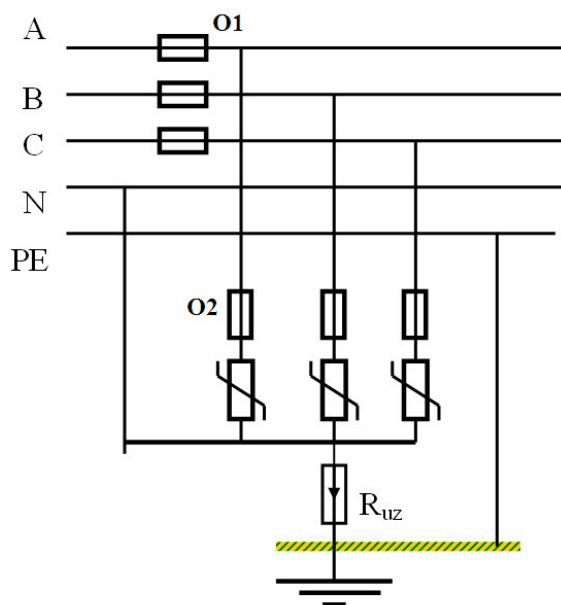
Tabela K.11: Karakteristike odvodnika tip 1 za niski napon

Opis	Karakteristike
Nazivni napon $U_n$ (V)	230
Najviši rafni napon $U_c$ (V)	280
SPD prema EN 61643-11	Tip 2
Nominalna struja odvođenja $(8/20)\mu s$ $I_{ud}$ (kA)	20
Udar na struju pražnjenja $(10/350 \mu s)$ $I_{ud}$ (kA) (L-N)	40
Udar na struju pražnjenja $(10/350 \mu s)$ $I_{ud}$ (kA) (N-G)	120
Zaštitni nivo $V_p$ (V)	1.3
Preostali napon za 1 kA $U_p$ (kV)	0.8
Preostali napon za 5 kA $U_p$ (kV)	1
Vreme odziva	<100 ns
Podnosiva struja KS u mreži $I_{ks}$ (kA)	50
Radna temperatura	-40 °C do +80°C
Optička indikacija stanja odvodnika na licu mesta	Da

U ovom slučaju tri SPD uređaja su postavljena između faza i neutralnog provodnika N i jedan između N i zaštitne zemlje PE. Na slici K.18 prikazan je spoj SPD.

U slučaju prikazanom na slici K.18 tri SPD priključena između faza i N su naponski limiteri predviđeni za manje naprezanje, a SPD između N i PE je strujni odvodnik koji provodi 3 puta veću struju.

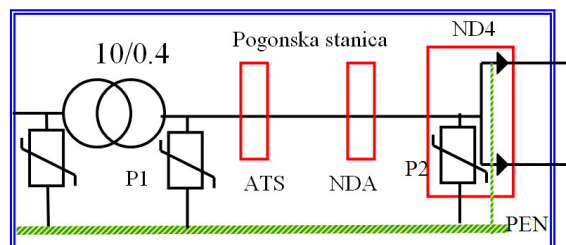
U obe sprege se mogu postaviti osigurači O2 koji u slučaju kvara SPD, kada oni počinju da provode veliku struju industrijske učestanosti, osigurači isključuju granu sa SPD. Kvar se dešava u slučaju iskrišta sa aktivnim gašenjem luka ako iskrište ne može da prekine luk, dok u slučaju varistora u slučaju kada varistor izgubi nelinearnu karakteristiku. U tom slučaju osigurač O2 isključuje kvar, a potrošači ne ostaju bez napajanja. Tada je potrebno zameniti SPD i resetovati osigurač O2 ukoliko je automatski. Poželjna je signalizacija da je SPD u kvaru, bilo daljinska ili direktno na uređaju. Ponekad se osigurači O2 izostavljaju, kada glavni osigurači O1 isključuju potrošače, pa je u tom slučaju potrebno hitno zameniti SPD koji je u kvaru i resetovati osigurač O2.



Slika K.18: Sprega tri SPD, koja su postavljena između faza i neutralnog provodnika N i jedan između N i zaštitne zemlje PE

## K.4 Proračun prenapona u NN mreži

Blok šema Pogonske stanice sa oznakama razvodnih ormana na strani 0.4 kV prikazana je na slici K.19.



Slika K.19: Blok šema pogonske stanice

Oznake na slici K.19 imaju sledeće značenje:

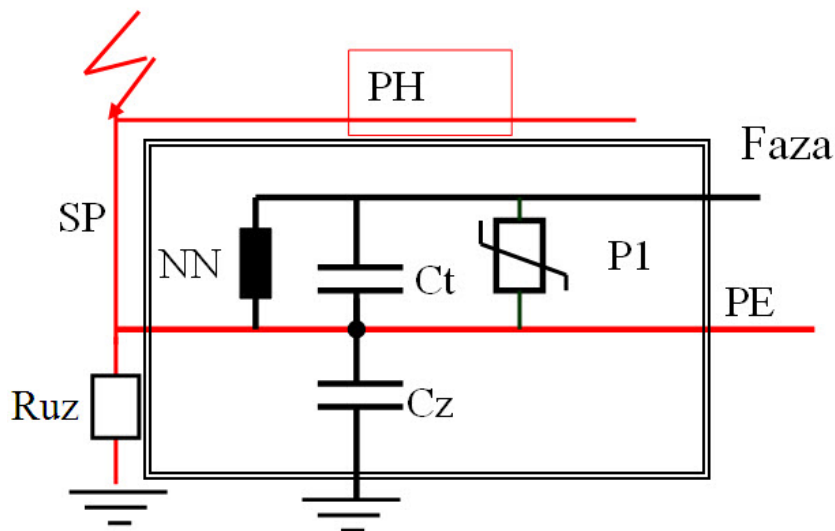
P1-prenaponska zaštita na strani 0.4 kV uz transformator,

ATS, NDA i ND4 pojedini razvodni ormani unutar Pogonske stanice,

P2 - prenaponska zaštita u ormanu ND4.

Unutar transformatorske stanice primenjen je TN-C sistem, a u ormanu ND4 razdvajaju se N i PE i napajanje se na dalje vodi u tunnel petožilnim kablom 3F+N+PE.

Na slici K.20 prikazano je modelovanje transformatora 10/0.4 kV u transformatorskoj stanici.



Slika K.20: Modelovanje transformatora 10/0.4 kV u transformatorskoj stanici

Oznake na slici K.20 imaju sledeće značenje:

PH-prihvatni sistem na krovu,

SP-spusni provodnici,

$R_{uz}$ -ekvivalentna otpornost kompletnog uzemljivača,

NN -namotaj niskog npona transformatora koji se zamenjuje kapacitivnošću  $C_t$ ,

$C_t$  -uzdužna kapacitivnost namotaja niskog napona (usvojeno 3 nF),

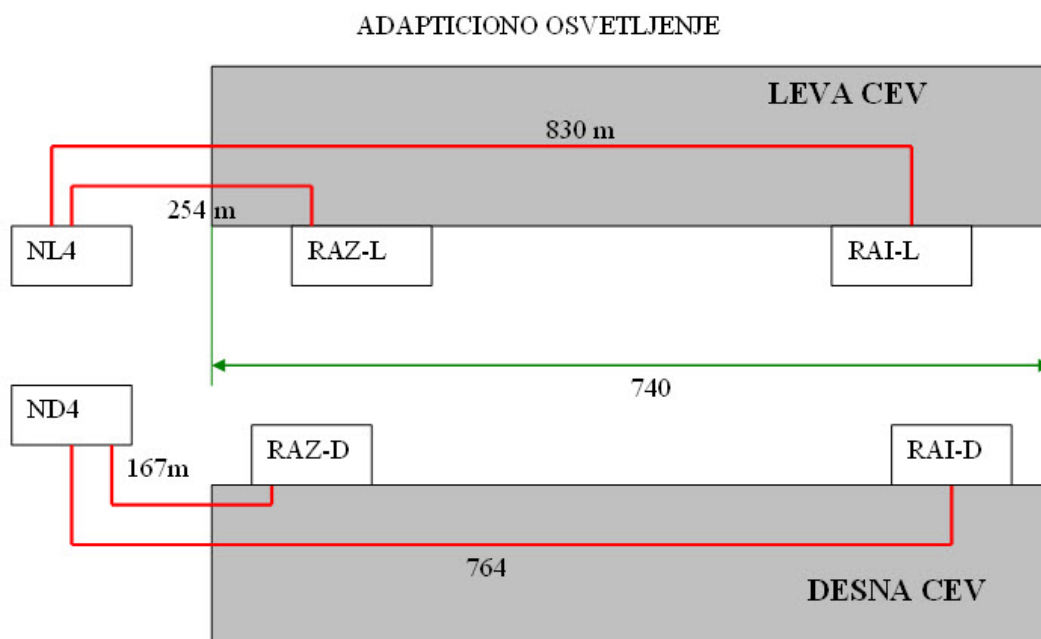
$C_z$  -kapacitivnost namotaja niskog napona prema zemlji (usvojena 1 nF, ali nema uticaja na rezultate jer je premošćena otporom uzemljenja),

PE -zaštitna zemlja koja je na povišenom potencijalu zbog proticanja struje kroz otpor uzemljenja,

$R_{uz}$  -otpor uzemljenja.

Po ovom modelu se predpostavlja da fazni provodnik preko potrošača na potencijalu udaljene zemlje, ako se zanemari radni napon, dok neutralni provodnik i PE su na povišenom potencijalu usled atmosferskog pražnjenja.

U primeru se analizira ugroženost napajanja adaptacionog svetla na početku i kraju tunela. Na slici K.21 prikazana je skica napajanja adapticionim svetlom leve i desne tunelske cevi. Biće prikazana samo analiza ugroženosti desne tunelske cevi, a u analiziranoj cevi orman za napajanje početka tunela RAZ-D i orman za napajanje kraja tunela RAI-D.



Slika K.21: šema napajanja adapticionim svetlom leve i desne tunelske cevi

Zamenska šema za proračun prenapona na niskonaponskoj strani transformatora sa modelovanim delom niskonaponske mreže za napajanje osvetljenja desne tunelske cevi iz ormana ND4 prikazama je na slici K.22. Šema je data kao ekranski prikaz iz programa EMTP-atp. Na šemi je uklonjen deo šeme koji se odnosi na model gromobranske zaštite objekta pogonske stanice. Grana u šemi od ND4 do RAI-D je kabl dužine 764 m, a od ND4 do RAZ-D je kabl dužine 167 m

Oznake na slici K.22 imaju sledeće značenje:

P1-prenaponska zaštita 0.4 strane transformatora, odvodnik prenapona na transformatoru,

P2 - SPD klase 2 u ormanu ND4 za ograničavanje prenapona između L-PEN,

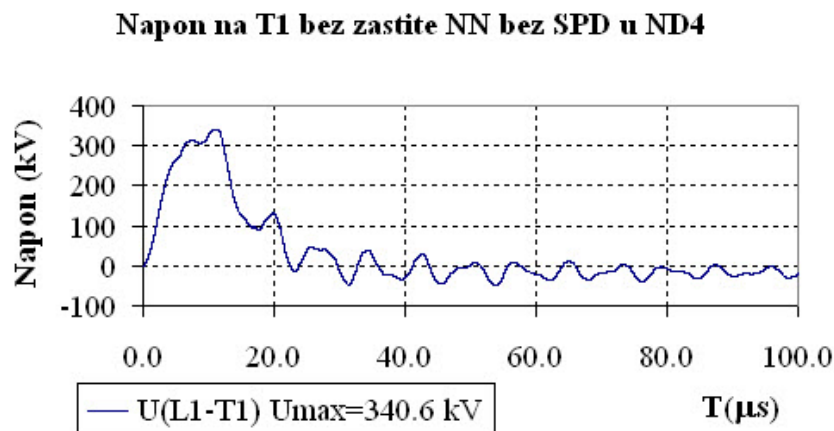
P3 - SPD klase 2 u ormanu Raz-D za ograničavanje prenapona između L-N,

P4 - SPD klase 1 u ormanu Raz-D za ograničavanje prenapona između N-PE,

P5 - SPD klase 2 u ormanu Rai-D za ograničavanje prenapona između L-N,



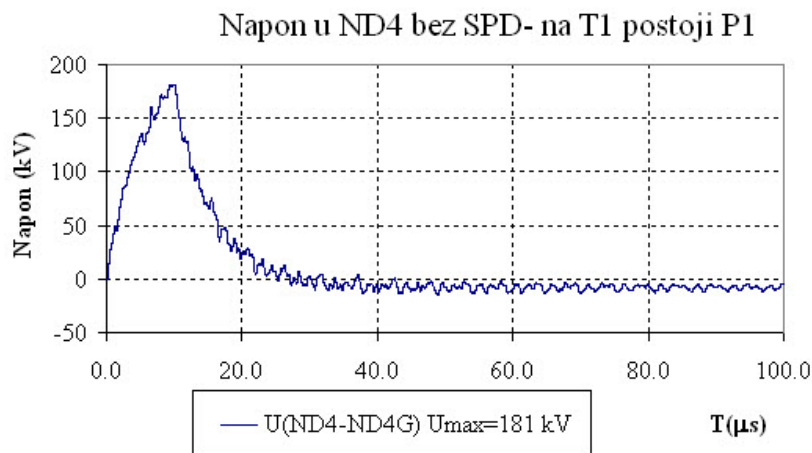




Slika K.23: Napon na transformatoru T1 kada zaštita P1 na transformatoru i u PS u ormanu ND4 ne postoji

#### Analiza prenapona u ormanu ND4 kada sve ostale zaštite postoje

Proračun je ponovljen kada je transformator T1 zaštićen sa P1, a u ormanu ND4 ne postoji P2, dok u tunelu zaštite postoje. Talasni oblik napona dat je na slici K.24.

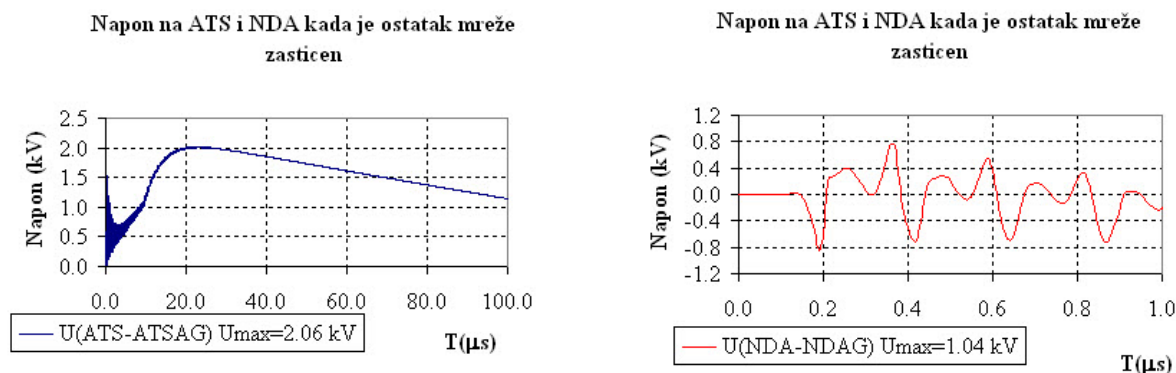


Slika K.24: Napon na niskonaponskom izvodu kada transformator nije zaštićen odvodnikom prenapona

Odvodnik prenapona P1 mora biti primenjen i na transformatoru na strani 0.4 kV i SPD P2 u ormanu ND4 jer inače napon prevazilazi dozvoljenih 6 kV jer iznosi 181 kV u ND4.

### Analiza prenapona u ormanu ATS i NDA u pogonskoj stanici kada sve ostale zaštite postoje

Izvršena je provera visine prenapona u ormanima ATS i NDA u kojima nije primenjena zaštita. Transformator T1 je zaštićen odvodnikom P1 i orman ND4 je zaštićen SPD P2. Razvodni ormani u tunelskim cevima su takođe zaštićeni od prenapona odgovarajućim SPD. Talasni oblici napona prikazani su na slici K.25.



Slika K.25: Talasni oblici napona u ormanima ATS i NDA

Vidi se da su prenaponi niži od maksimalno dozvoljenih prenapon od 6 kV.

### Provera talasnih oblika i amplituda struja kroz P1 i P2

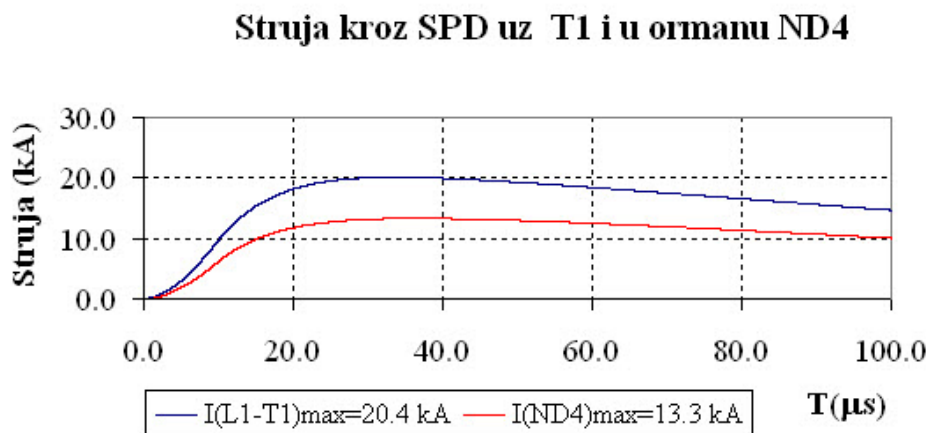
Izvršena je provera talasnog oblika i amplitude struje kroz odvodnik prenapona P1 na transformatoru T1 i na SPD u ormanu ND4. Rezultati su prikazani na slici K.26.

Struje kroz odvodnike P1 i P2 su daleko manje od maksimalno dozvoljenih. To se može tumačiti odvođenjem struja kablovima u tunele i podela struje sa ostalim prenaponskim zaštitnim uređajima. Mora se voditi računa da se struja deli na 3 komponente koje od N teku prema fazama.

#### K.4.2 Zaštita razvodnih ormana u tunelckim cevima koji se napajaju iz ormana ND4, odnosno direktno iz mreže 0.4 kV

U tunelskim cevima postoje sledeći razvodni ormani koji se napajaju iz mreže 0.4 kV:

- Ormani adaptivnog svetla desne tunelske cevi



Slika K.26: Talasni oblik i amplitude struje kroz odvodnik prenapona P1 na transformatoru T1 i na SPD u ormanu ND4

- Ormani adaptivnog svetla leve tunelske cevi
- Ormani osvetljenja desne tunelske cevi
- Ormani osvetljenja leve tunelske cevi
- Ormani za napajanje ventilatora

Analiziraće se samo potreba za zaštitom u ormanima RAZD i RAID, kada su u pogonskoj stanici primenjeni odvodnici P1 i P2. U tunelskim cevima N i PE je razdvojeno, a provodnik PE je spojen sa lokalnom zemljom na mestu ormana preko otpora uzemljenja koji je usvojen da iznosi  $R_t = 1 \Omega$ .

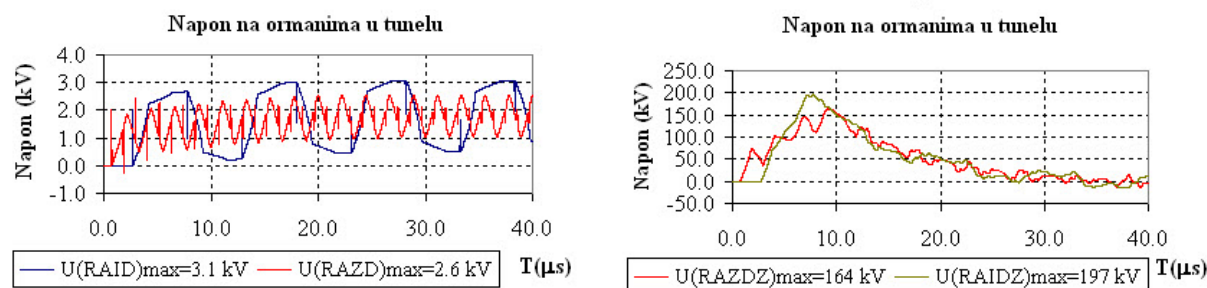
#### Slučaj kada se na ne primenjuje zaštita u ormanima u tunelu

Prvo je analiziran slučaj kada se u ormanima RAID i RAIL ne primenjuje prenaponska zaštita, a sve ostale zaštite postoje. Talasni oblik napona prikazan je na slici K.27. Oznake imaju sledeće oznake:

RAID i RAZD -naponi u ormanu RAID i RAZD između F (faza) i N,

RAIDZ i RAZDZ -naponi u ormanima RAID i RAZD između N i PE.

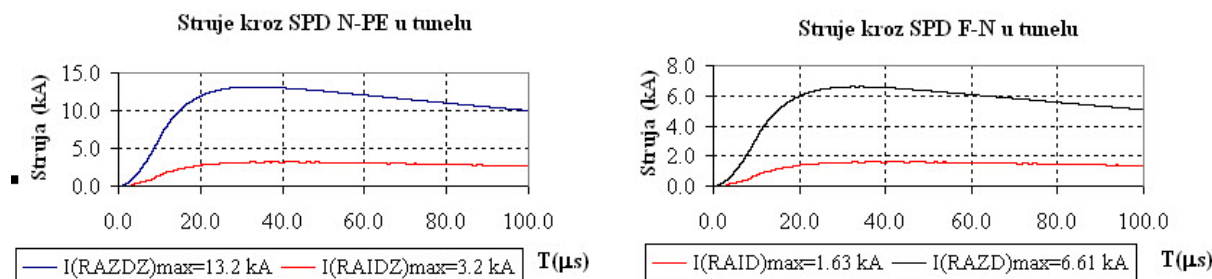
Može se videti da je prenaponska zaštita neophodna između N-PE zbog izuzetno opasnih prenapona ukoliko se prenaponska zaštita ne primenjuje.



Slika K.27: Vremenski tok prenapona u ormanu RAID i RAZD kada se ne bi primenjivala prenaponska zaštita (levo napon između F-N, desno između N-PE)

### Slučaj kada se primenjuje zaštita u ormanima u tunelu

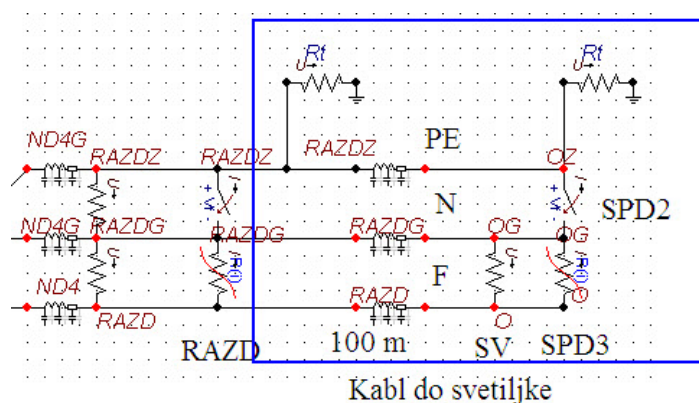
Pokazuje se da je neophodno ugraditi u prenaposke zaštite u ormanima između N i PE. Iz razloga sigurnosti ugrađene su zaštite i između F i N i između N i PE. Izvršena je provera struja kroz sve SPD uređaje u razvodnim ormanima RAZD i RAID. Rezultati su prikazani na slici



Slika K.28: Talasni oblici struja u ormanima RAID i RAZD između N-P (levo) i F-N (desno)

Izvršena je provera da li se može pojaviti opasan prenapon kada se iz ormana adaptacionog osvetljenja RAZD vodi trožilni kabl dužine 100 m do svetiljke. Kabl se sastoji od F, N i PE provodnika. U ormanu je PE provodnik povezan za lokalno uzemljenje. Predpostavljeno je da je ulazna impedansa svetiljke veoma velika ( $1 \Omega$ ), što čini rezultate kritičnijim.

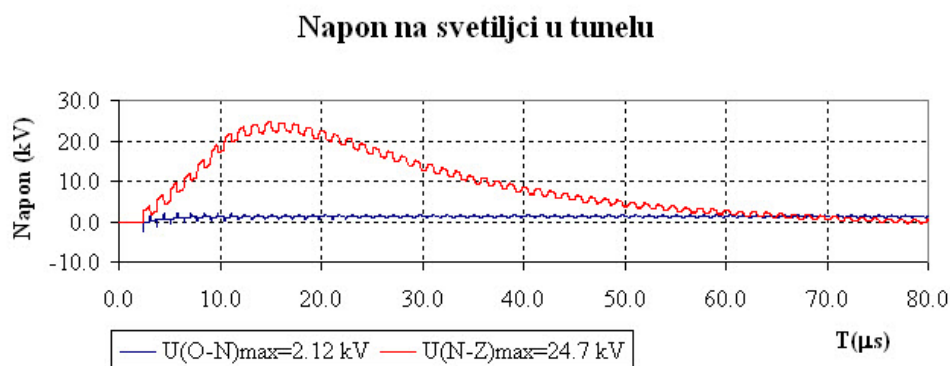
Zamenska šema dela kola od značaja data je na slici K.29 i odnosi se na desnu tunelsku cev.



Slika K.29: Deo kola koji se sastoji od dvožilnog kabla od ormara RAZD koji je dugačak 100 m i napaja svetiljku dugačak 100 m

Prvo je pretpostavljeno da nije primenjeno

U tom slučaju talasni oblik napona na svetiljci izgleda kao na slici K.30.



Slika K.30: Talasni oblik napona na svetiljci napajanog iz ormana RAIL dvožilnim kablom F-PEN dužine 100 m

Može se videti da u ovom slučaju napon između F i N ne prelazi 2.5 kV, ali između N i PE iznosi skoro 25 kV, što znači da treba primeniti prenaponsku zaštitu. Prenaponska zaštita se mora primeniti ispred svetiljke u ormanu. U tabeli K.12 date su karakteristike prenaponskog zaštitnog uređaja.

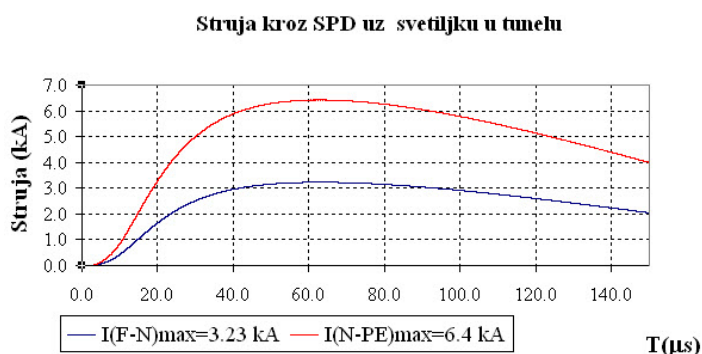
Posle ugradnje struja kroz SPD ima oblik kao na slici K.31.

Može se zaključiti da struja pri pražnjenju kroz SPD između F-N je 3.23 kA, a između N i PE 6.4 kA.

Struja zadovoljava u pogledu dozvoljenih udarnih struja iz tabele K.12.

Tabela K.12: Karakteristike odvodnika tip 3 za niski napon

Opis	Karakteristike
Nazivni napon $U_n$ (V)	230
Maksimalnatrajna radna struja $I_m$ (A)	20
Najviši rafni napon $U_c$ (V)	255
SPD prema EN 61643-11	Tip 3
Nominalna struja odvođenja F-N (8/20) $\mu$ s Iud(kA)	5
Nominalna struja odvođenja N-PE (8/20) $\mu$ s Iud(kA)	20
Zaštitni nivo $V_p$ (V) F-N	1000
Zaštitni nivo $V_p$ (V) N-PE	1500
Vreme odziva	<25 ns
Optička indikacija stanja odvodnika na licu mesta	Da



Slika K.31: Struja na SPD između F-N i između N-PE

## K.5 Zaključak

Izvršena je provera prenaponske zaštite sistema napajanja tunela i prilaza tunelu na bazi 3 kriterijuma:

- Naprežanje energetskog transformatora sa strane 10 kV i 0.4 kV usled atmosferskog pražnjenja u prihvatni sistem gromobranske zaštite Pogonske stanice.
- Naponsko naprežanje razvodnih ormana u Pogonskoj stanici i tunelima.
- Strujno naprežanje SPD u razvodnim ormanima u Pogonskoj stanici i tunelima.

Proračuni su uvek rađeni za slučaj da nije primenjena zaštita na nekom razvodnom ormanu pa se računa naponskom naprežanje i kada je primenjena zaštita proverava se da li je struja manja od dozvoljene.

Na osnovu analiza donete su sledeće preporuke:

- 1 Svaki transformatora 10/0.4 kV, potrebno je zaštititi sa visokonaponske strane odvodnikom prenapona. U slučaju da je zvezdište uzemljeno preko otpornika, a vreme isključenja je 3 s, preporučuje se odvodnik prenapona izabran prema proizvođačkoj proceduri, u primeru je izabran odbodnik naznačenog napona 15 kV.
- 2 Svaki transformatora 10/0.4 kV, potrebno je zaštititi sa niskonaponske strane odvodnikom prenapona. Preporučuje se odvonik prenapona naznačenog napona 275 V ili više nominalne struje  $I_n = 10$  kA ili više, podnosive kratkotrajne udarne struje oblika 4/10  $\mu$ s temene vrednosti 100 kA.
- 3 Kod naručivanja transformatora se mora naglasiti proizvođaču da je potrebno postaviti nosače za odvodnike prenapona na kućište transformatora sa strane 10 kV i sa strane 0.4 kV.
- 4 U Pogonskoj stanici potrebno je primeniti prenaponsku zaštitu u ormanima prime-nom prenaponskih zaštitnih uređaja klase 1 (SPD 1) sa podnosivom atmosferskom udarnom strujom oblika 8/20  $\mu$ s ne manjom od 20 kA. Svaki komplet se sastoji od trolnog spoja između faza i PEN.
- 5 Svetiljke u tunelu se moraju napajati monofazno sa 3 žile F, N i PE. Zaštira treba da se sprovodi između F-N klasom SPD 3 sa udarnom strujom 5 kA i između N i PE SPD klase 2 sa udarnom strujom 10 kA.

## Zahvalnica

Zahvaljujemo projektantskoj firmi Elektrovat DOO iz Čačka koja je radila na projektu elektro-napajanja na Koridoru 10 na finansiranje studije prenaponske zaštite 2018 god.