

Ante Žižak, dipl.ing.
Dalekovod d.d., Zagreb
ante.zizak@dalekovod.hr

Prof. dr. sc. Ante Marušić
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
ante.marusic@fer.hr

Dubravko Poljak, dipl.ing.
Dalekovod d.d., Zagreb
dubravko.poljak@dalekovod.hr

SELEKTIVNOST ZAŠTITE STRUJNIH KRUGOVA BESPREKIDNOG NAPAJANJA TUNELA MALA KAPELA

SAŽETAK

Projektom rezervnog napajanja tunela za II (konačnu) fazu izgradnje tunela Mala Kapela – konačna faza pokazano je da postrojenje rezervnog napajanja UPS1 i UPS8 ne zadovoljavaju uvjete konačne faze te je postojeći UPS1 i UPS8 snage 30 kVA zamijenjen novim snage 40 kVA iste autonomije (3 sata). Iako projektom predviđeni stupanj iskoristivosti (η) iznosi 70%, za vrijeme toplijih dana zbog manjeg opterećenja glavnih potrošača stupanj iskoristivosti se u pogonu spustio i ispod granice od 50%. U tom području rada ovi uređaji imaju nelinearne karakteristike unutarnje impedancije što je uzrokovalo i određene probleme kod selektivnosti zaštite krugova rezervnog napajanja.

U području opterećenja ispod 30 % nazivne snage UPS uređaja, naglo raste unutarnja impedancija UPS uređaja stvarajući time brojne probleme u pogonu. Jedan od najznačajnijih je problem selektivnosti zaštite strujnih krugova samog UPS uređaja. U slučaju podopterećenja UPS uređaja, njegova unutarnja impedancija raste, izravno utječući na iznos impedancije Z2s koja se višestruko povećava. Na taj način, u ekstremnim slučajevima, čak i struja kratkog spoja može biti manja od nazivne struje u normalnom pogonu projektiranog zaštitnog uređaja na istoj razini, čime se ne postiže selektivnost zaštite strujnih krugova. U tom slučaju zaštita u prvom stupnju ne reagira na kratki spoj pa postoji opasnost od uništavanja. U ovom članku opisani su ovi problemi te načini njihova rješavanja.

Ključne riječi: besprekidno napajanje, zaštita, selektivnost

SELECTIVITY OF UPS DEVICE CIRCUIT PROTECTION IN MALA KAPELA TUNNEL

SUMMARY

Design of back-up power supply for second (final) phase of Mala Kapela tunnel equip showed that UPS 1 & UPS 8 power station do not fulfill demands. For that reason existing UPS 1 & UPS 8 (30kVA) are replaced with new (40 kVA) with same period of autonomy (3 hours). Detailed design has foreseen level of effectiveness (η) of 70 %, during period of warm days due to lower load of main consumer effective level decrease below 50 %. In that working area those device have non-linear impedance characteristic which caused problems with selectivity of back-up power supply protection.

In working area below 30 % of UPS device load capacity UPS impedance is rapidly increased which produces a lot of problems in operation. One of the biggest problems is connected to protection selectivity of UPS devices. In low-load cases, UPS device impedance grows rapidly and influences Z2S impedance which grows multiple times. In extreme case, short circuit current can be lower than currents in normal operation and protection selectivity of current circuit is not achieved. In that case, first degree

protection does not response on short circuit what can bring destruction of installations. In this paper those problems are described as well as subject problem solving.

Key words: Uninterrupted power supply, protection, selectivity

1. UVOD

1.1. Rezervno napajanje tunela Mala Kapela

Projekt rezervnog napajanja tunela za II (konačnu) fazu izgradnje tunela Mala Kapela-konačna faza rađen je na temelju važećih zakona i propisa RH, posebnim uvjetima i pravilima struke, važećih kriterija i recentnih ocjena sigurnosti tunela u RH, direktive transeuropskog parlamenta i vijeća o minimalnim uvjetima sigurnosti u tunelima (204/54/CE), austrijskim smjernicama za projektiranje tunela RVS te pozitivnim iskustvima projektiranja tunela u RH.

Zbog promjena vezanih uz II fazu odnosno konačnu fazu izgradnje i uporabe došlo je i do promjena u potrebnoj snazi besprekidnog napajanja. Kako postrojenje rezervnog napajanja nije zadovoljavalo uvjete konačne faze, bilo je potrebno zamijeniti postojeće UPS uređaje snage 30 kVA novima ukupne snage 40 kVA, iste autonomije (3 sata).

Statički izmjenjivač namijenjen je napajanju trošila iz autonomnog izvora napajanja (akumulatorskih baterija) za vrijeme nestanka mrežnog napona. Prebacivanje napajanja trošila iz autonomnog izvora na mrežni napon i obrnuto izvodi se bez prekida u napajanju. Automatsko prebacivanje izvodi brza tiristorska sklopka (statička sklopka) tijekom jedne poluperiode sinusnog napona mreže. U energetskom smislu, postrojenje predstavlja rezervno napajanje trošila koji su kritični obzirom na sigurnost.

Postrojenje rezervnog napajanja sastavljeno je iz:

- Pretvaračkih modula + P3 nazivne/vršne snage 24 kW (40kVA) u prostoriji rezervnog napajanja u postojećim trafostanicama TS1 i TS8 odnosno 19,5 kW (40kVA) u prostorijama rezervnog napajanja u zaustavnim nišama lijeve tunelske cijevi (UPS-2L-UPS-7L), nazivnog napona 3x400/230 V, 50 Hz opremljenog ispravljačem, statičkom sklopkom, prekidačem za ručno prebacivanje napajanja, te sklopkom za interni servis i održavanje. Statička sklopka u slučaju prekoračenja opterećenja za 25%, ili kvara na izmjenjivaču, automatski i bez prekida u napajanju prebacuje trošila na mrežni napon. Povratak na napajanje iz izmjenjivača odvija se također automatski i bez prekida u napajanju. Servisni prekidač bitan je element za kompletno odvajanje pretvaračkih modula od mrežnog napona tijekom održavanja.
- Razdjelnika trošila + RP-1 - +RP-8 opremljenog automatikom za prebacivanje na pojni vod iz druge transformatorske stanice i instalacijskim osiguračima za zaštitu strujnih krugova trošila. Izveden je kao posebna cjelina na prednjoj strani pretvaračkog modula ili kao zaseban ormar.
- Baterijskog modula + B3 opremljenog suhim i hermetički zatvorenim akumulatorima, te baterijskog prekidača za odvajanje akumulatora od ispravljača tijekom održavanja. Akumulatori ne razvijaju opasne plinove prilikom rada, niti zahtijevaju održavanje.

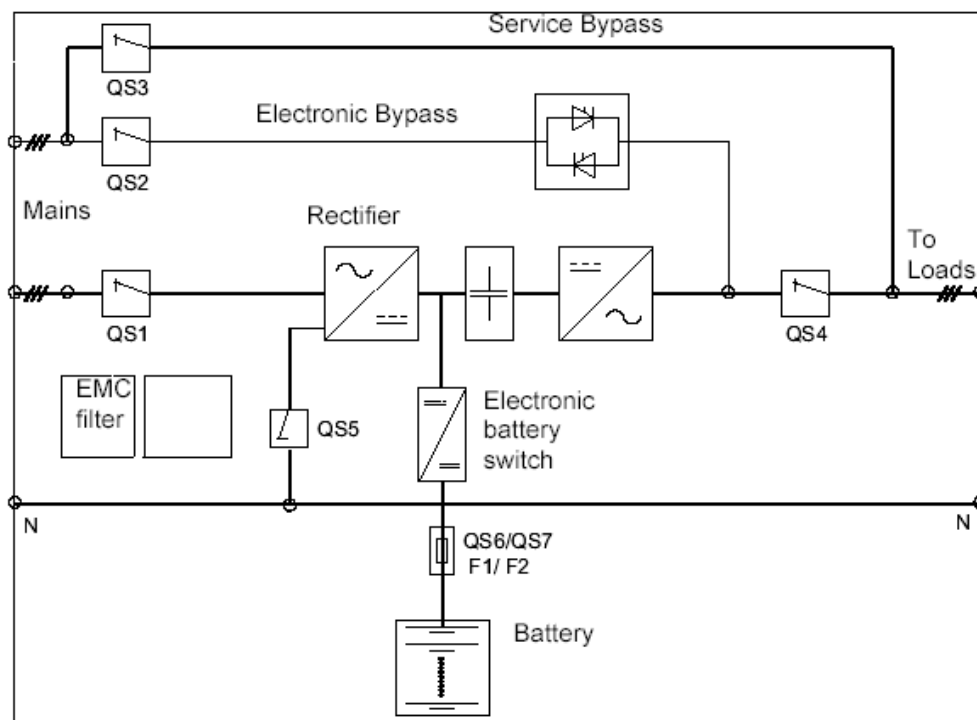
Postrojenje rezervnog napajanja izvan tunela (UPS1, UPS8) smješteno je u zasebnu prostoriju u sklopu postojeće transformatorske kućice TS1, TS8 (tipsko rješenje), dok se postrojenja rezervnog napajanja u tunelu (UPS-2L-7L) nalazi u zasebnim nišama u ugibalištima lijeve tunelske cijevi. U svakom slučaju, vatrootpornost pregradnih zidova i bravarije prostorije rezervnog napajanja mora iznositi T90/F90.

Na postrojenje rezervnog napajanja priključena su slijedeća trošila:

- rasvjeta tunelskih niša,
- mjerni uređaji ventilacije,
- sigurnosna rasvjeta tunela,
- protupanična rasvjeta,
- svjetleći SOS uređaji i SOS razdjelnici,
- promjenljivi prometni znakovi,
- upravljački i signalni uređaji prometne signalizacije rasvjete te sustava daljinskog vođenja.
- vatrodojavni sustav i
- rasvjeta evakuacijskog izlaza/pješačkih prolaza.

Podaci UPS uređaja su sljedeći:

- a) Nazivna snaga kod 40°C : 40 kVA(32kW),
- b) Nazivna snaga kod 25°C : 44 kVA,
- c) trofazni ulaz – trofazni izlaz,
- d) Mogućnost proširenja: do 8 uređaja u paraleli,
- e) Autonomija rada na baterije : 6 minuta pri punom opterećenju,
- f) Tehnologija ON-LINE, dvostruka konverzija, mikroprocesorski nadzor i upravljanje,
- g) Uređaj se sastoji od sljedećih osnovnih komponenti:
 - o ispravljač sa korektorom ulaznog faktora snage($\cos \varphi$)
 - o IGBT izmjenjivač kontroliran DSP-om (digital signal procesor)
 - o punjač baterija
 - o ulazni / izlazni prekidači
 - o ručna bypass sklopka za servisno održavanje
 - o elektronička statička sklopka
 - o akumulatorske baterije
- h) Ulazni napon: trofazni , 400V / 230V(3 f + N),
- i) Tolerancija ulaznog napona kod 100 % opterećenja: - 25 %/+15 %
- j) Tolerancija ulaznog napona kod 75 % opterećenja: - 30 %/ +15 %
- k) Ulazne strujne distorzije:< 8 %
- l) Ulazni nominalni $\cos \varphi > 0.95$
- m) Nominalna frekvencija:50 Hz
- n) Tolerancija frekvencije: 10%
- o) Izlazni napon: trofazni 400/230 V (po izboru 380V, 415 V)
- p) sinusni, 3f + N
- q) Statička stabilnost izlaznog napona: $\pm 1\%$
- r) Dozvoljeno preopterećenje invertora: 150 % 30 sec, a 300 % 10 ms



Slika 1. Blok shema UPS uređaja

1.2. Prometna oprema tunela Mala Kapela

Prometna oprema u tunelima može se podijeliti na:

- a) prometna oprema tunela (vertikalna i horizontalna signalizacija, promjenjiva signalizacija, prometna svjetla, oprema za označavanje ruba kolnika, rasvjeta tunela).
- b) informacijski sustavi i uređaji u tunelima (Daljinske stanice ugrađene u tunnelske niše, brojlara prometa, video nadzor sustavi, sustavi rasvjete tunela, softverski paketa (rješenja) za centre za daljinski nadzor i gospodarenje tunelima, radio sustavi, TPS sustavi).

Upotreba promjenjivih prometnih znakova u tunelima i galerijama ili neposredno prije njih je pogodna stoga što pruža mogućnost prikazivanja različitih znakova ovisno o stanju i okolnostima prije i/ili u tunelu (galeriji). Najčešći prometni znakovi koji se upotrebljavaju kao tunnelska izmjenjiva signalizacija (neposredno prije ili poslije tunela, galerije) su znakovi koji su direktno vezani uz:

- a) Ograničenja brzine na određenom djelu prije ili poslije, unutar tunela, galerije.
- b) Znakovi opasnosti, obavijesti i izričitih naredbi vezani uz stvarne vremenske i prometne uvjete prije/poslije ili unutar tunela : kolona vozila, magla, vjetar, poledica i snijeg...

Prometna svjetla u tunelu obuhvaćaju svjetlosne znakove za upravljanje prometom (ZUR) odnosno prometnu signalizaciju (znakovi SOS, EXIT...).

1.3. Zaštita instalacija UPS-a

Sukladno svim važećim zakonima i propisima na predmetnom objektu su predviđene sve potrebne mjere tehničke zaštite. Na predmetnom objektu predviđen je sistem zaštite TN-C-S. Kao dopunska mjera zaštite izvesti će se izjednačenje potencijala povezivanjem metalnih kućišta razdjelnika na uzemljenje. Za spojne vodove koristiti će se željezna pocinčana traka 30×4 mm. Vijčani materijal mora biti galvaniziran cinkom. Zaštita od korozije izvedena je antikorozivnim premazom u dva sloja i dekorativnim premazom u jednom sloju. Sav vijčani materijal mora biti galvaniziran cinkom. Stupanj mehaničke zaštite razdjelnika je IP 54. Na dnu razdjelnika nalaze se kabelski uvodi za energetske kabele. Zaštita od slučajnog dodira opreme pod naponom predviđena je izolacijskim pločama iz pertinaksa. Zaštita od slučajnog dodira opreme koja je spojena na rezervni izvor napajanja provedena je vizualnim upozorenjem i pregradama. Svi nosači opreme koja je spojena na rezervni izvor napajanja obojeni su crvenom bojom. Zaštita uređaja za rezervno napajanje je provedena zaštitom prostorije u kojoj se nalazi, na način da izdrži u funkciji 90 minuta (T90). Zaštita kabela spojenih na izvor rezervnog napajanja od požara u betonskom kabelskom kanalu provedena je primjenom teško gorive bezhalogene izolacije prema normama IEC60092-353, IEC60332, IEC60754. U tunnelski kanal nasipan je pijesak duž cijele duljine kanala.

Zaštita od indirektnog dodira dijelova električne instalacije postignuta je automatskim isključivanjem napajanja. Za automatsko isključivanje napajanja koriste se zaštitni uređaji nadstruje:

- a) visokoučinski osigurači u strujnim krugovima pojmih kabela i
- b) automatski instalacijski osigurači u strujnim krugovima priključnih kabela.

Karakteristike zaštitnih uređaja nadstruje odabrane su na temelju proračuna impedancije petlje kratko spojenog strujnog kruga, dopuštenog napona dodira te dopuštenog vremena trajanja napona dodira sukladno važećim propisima. Na cijeloj instalaciji provedeno je lokalno izjednačenje potencijala spajanjem zaštitnog vodiča na združeno uzemljenje. Primijenjen je sustav zaštite TN-C-S (neutralna i zaštitna funkcija objedinjuje se u jednom vodiču samo u jednom dijelu instalacije).

2. PROBLEM SELEKTIVNOSTI ZAŠTITE

2.1. Opis potrošača priključenih na UPS uređaj

LED rasvjeta koja je instalirana u tunelima u sklopu ZUR opreme ima radno opterećenje u prosjeku oko 9W – 12 W po jednom rasvjetnom tijelu. Međutim, ova ista rasvjeta opremljena je posebnim grijačima koji se uključuju u slučaju niske temperature ambijenta. Ukoliko je temperatura ambijenta niska te ukoliko se uključe predmetni grijači, radno opterećenje ZUR opreme naraste na 32 W po jednom rasvjetnom tijelu.

2.2. Zaštita strujnih krugova UPS uređaja

Dimenzioniranje napojnih kabela iz UPS uređaja provedeno je sukladno normi HRN N.B2-743 odnosno prema sljedećoj formuli:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \quad (1)$$

gdje je:

P – ukupno opterećenje svih potrošača vezanih na kabel

U – napon kabela

$\cos \varphi$ – faktor opterećenja svih potrošača

Također, radna karakteristika uređaja koji štiti el. kabel od preopterećenja mora udovoljiti sljedećim uvjetima:

$$I_B \leq I_n \leq I_z \quad (2)$$

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I_z \quad (3)$$

gdje je:

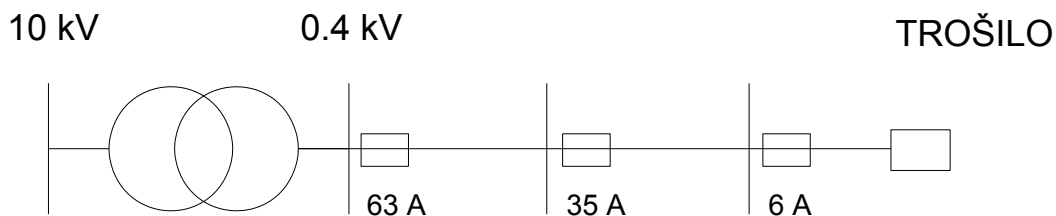
I_B – struja za koju je strujni krug projektiran

I_z – trajno podnosiva struja kabela i vodiča

I_n – nazivna struja zaštitnog uređaja

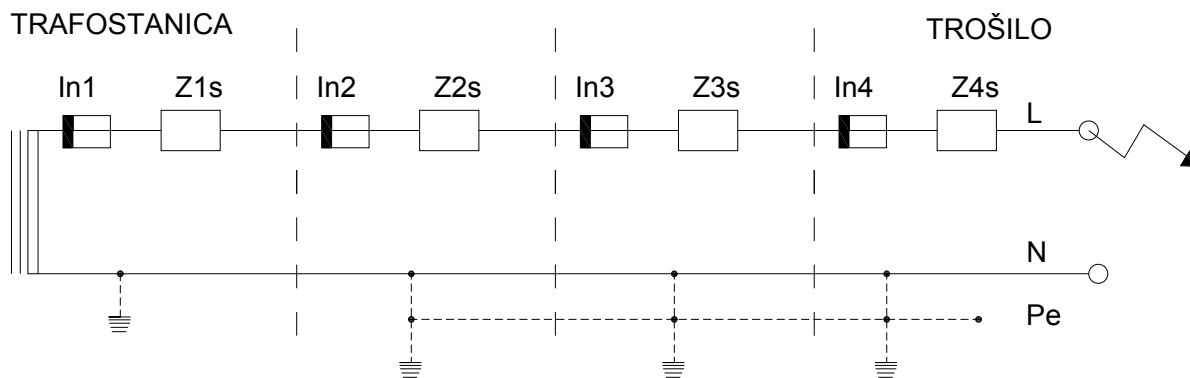
I_2 – struja kod koje zaštitni uređaj pouzdano djeluje

Struja kratkog spoja proračunava se sukladno sljedećoj shemi strujnog kruga na kojoj su prikazani i dimenzionirani osigurači:



Slika 2. Shema strujnog kruga za proračun struje kratkog spoja i dimenzioniranja osigurača

Na prethodnoj slici prikazane su i dimenzije osigurača predviđenih glavnim projektom čime se postiže potrebna selektivnost strujnih krugova zaštite. Provjera zaštite isklapanjem napajanja pojedinih dijelova strujnog kruga obavlja se kratkim spajanjem dijelova strujnog kruga, a sukladno sljedećoj nadomjesnoj shemi:

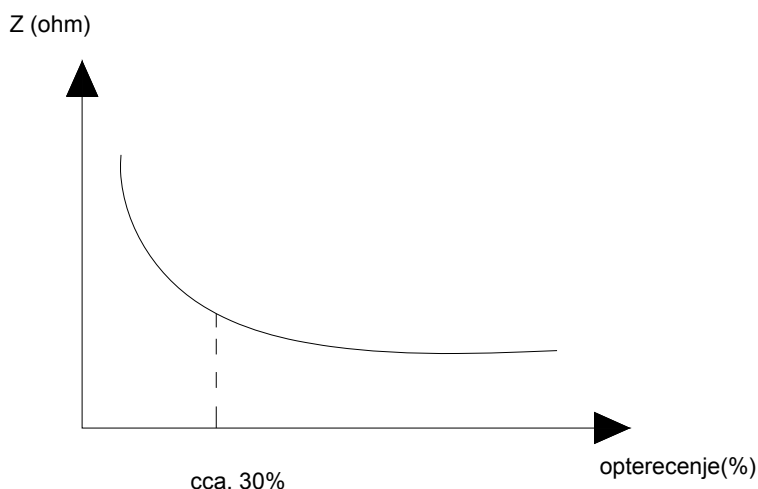


Slika 3. Nadomjesna shema za proračun i provjeru zaštite strujnog kruga UPS uređaja

Impedanciju petlje kratko spojenog strujnog kruga Z_s čini izvor, fazni vodič (L), zaštitni vodič (PE) ili zajednički nulti i zaštitni vodič (PEN).

2.3. Problem unutarnje impedancije UPS uređaja

Kad je temperatura ambijenta visoka, prethodno opisani grijači rasvjete u tunelu se ne pale te opterećenje UPS uređaja pada otprilike ispod 30% nazivnog opterećenja. U tom području radna točka UPS uređaja pada u nelinearno radno područje što se može kvalitativno prikazati sljedećim grafom.



Slika 4. Ovisnost unutarnje impedancije UPS uređaja o opterećenju (kvalitativno)

Kako je prikazano na ovom grafu, u području opterećenja ispod 30% nazivne snage UPS uređaja, naglo raste unutarnja impedancija UPS uređaja (Z) stvarajući time brojne probleme u pogonu. Jedan od najznačajnijih je problem selektivnosti zaštite strujnih krugova samog UPS uređaja. U slučaju podopterećenja UPS uređaja, njegova unutarnja impedancija raste, izravno utječući na iznos impedancije Z_{2s} koja se višestruko povećava.

Na taj način, u ekstremnim slučajevima, čak i struja kratkog spoja može biti manja od nazivne struje u normalnom pogonu projektiranog zaštitnog uređaja na istoj razini (In_2), čime se ne postiže selektivnost zaštite strujnih krugova. U tom slučaju zaštita u prvom stupnju ne reagira na kratki spoj pa postoji opasnost od uništavanja.

3. OPIS RJEŠENJA PROBLEMA

Rješenje ovog problema može se postići na dva načina:

- a) zamjenom osigurača i
- b) umjetnom potrošnjom.

Zamjenom osigurača odnosno postavljanjem osigurača s nižom nazivnom vrijednosti struje u normalnom pogonu (I_{n2}) postigla bi se željena selektivnost, ali samo u slučajevima stalnog opterećenja istog smanjenog iznosa. Ovakva se situacija pojavljuje samo u slučajevima sniženog opterećenja odnosno u slučajevima kad nisu uključeni grijači potrebni za pogon ZUR rasvjete pri sniženim temperaturama. To se pogonsko stanje događa isključivo pri višim temperaturama ambijenta što podrazumijeva proljetni i ljetni period. Ukoliko bi se zamijenili osigurači na ovaj način, problem bi se dogodio u jesenskim i zimskim periodima kad bi se povećala nazivna struja u normalnom pogonu. U krajnjim situacijama struja u normalnom pogonu bila bi veća od nazivne struje zaštitnog uređaja te sukladno tome, ne bi bio ispoštovan uvjet iz (2), odnosno osigurači bi proradili čak i u normalnom pogonu te isključili iz pogona "zdravu" mrežu.

Umjetnom potrošnjom stvara se dodatno opterećenje uključanjem dodatnih potrošača umjesto grijača u vrijeme toplijih dana da bi se na taj način umjetno podiglo opterećenje UPS uređaja. Ovo dodatno opterećenje nije potrebno za normalno odvijanje pogona i napajanje svih potrošača, ali se na ovaj način povećava opterećenje UPS uređaja te se radna točka na krivulji na slici 4 pomiče udesno, a samim tim se i unutarnja impedancija UPS uređaja drži u granicama u kojima ne izaziva probleme sa selektivnošću zaštite.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je koncept zaštite strujnih krugova besprekidnog napajanja tunela Mala Kapela na autocesti Zagreb – Split. Također, opisani su problemi nastali u području selektivnosti zaštite nastali zbog velikih razlika u opterećenju UPS uređaja za vrijeme ljetnih i zimskih mjeseci te nepovoljnih karakteristika samog UPS uređaja. U vrijeme toplijih dana odnosno u proljetnom i posebice u ljetnom periodu, opterećenje UPS uređaja u tunelu je bitno smanjeno budući da grijači, koje posjeduju određeni rasvjetni uređaji, ne rade u toplijem ambijentu. Međutim, u vrijeme hladnijih dana, odnosno u zimskom periodu, predmetni grijači su u pogonu, stvarajući dodatno opterećenje na UPS uređaj koji na ovaj način biva opterećen snagom prema kojoj je i projektiran. Budući da se opterećenje UPS-a u ljetnom periodu može spustiti i ispod 30% nazivne projektirane snage uređaja, uslijed nepovoljnih karakteristika samih uređaja, unutarnja impedancija UPS-a naglo raste. Zbog toga se bitno smanjuje struja kratkog spoja, čak i ispod vrijednosti prekidne struje osigurača te zaštita kao takva "ne vidi" kratki spoj u ovom slučaju.

Rješenje ovog problema je u umjetnom podizanju potrošnje UPS uređaja za vrijeme toplijih dana kojim bi se barem u određenom postotku ujednačila potrošnja u ljetnim i zimskim periodima, odnosno da bi se koliko toliko izjednačilo opterećenje kad su prethodno opisani grijači u pogonu ili van njega. Opterećenje za vrijeme ljetnih mjeseci se ne može održati na tako visokoj razini kao u zimskim periodima, ali je najbitnije opterećenje održavati na razini na kojoj karakteristike UPS uređaja, odnosno unutarnje impedancije UPS uređaja ostaju u određenim granicama i time ne utječu na iznose struja kratkog spoja. Na taj način rješava se nastali problem selektivnosti zaštite uređaja besprekidnog napajanja unutar tunela Mala Kapela, a samim tim i povećava sigurnost prometa unutar tunela.

LITERATURA

- [1] S. Skok: Besprekidni izvori napajanja, Kigen d.o.o., Zagreb, 2002.
- [2] MBM TERMOPROJEKT d.o.o.: Elektrotehnički projekt rezervnog napajanja tunela Mala Kapela, Zagreb 2008.
- [3] Dalekovod d.d. – Zagreb: Protokol o obavljenom mjerenju otpora izolacije kabela; Rasvjeta tunela "Mala Kapela" – lijeva cijev, Zagreb, 2009.