

Mr.sc. Domagoj Milun, dipl. ing.  
HEP ODS d.o.o. Elektrodalmacija Split  
[domagoj.milun@hep.hr](mailto:domagoj.milun@hep.hr)

Zdravko Caktaš, dipl.ing.  
HEP ODS d.o.o. Elektrodalmacija Split  
[zdravko.caktas@hep.hr](mailto:zdravko.caktas@hep.hr)

## ISKUSTVA U PRIMJENI LINIJSKIH ODVODNIKA PRENAPONA NA DV 35 kV

### SAŽETAK

Učestali ispadi dalekovoda nazivnog napona 35 kV uslijed atmosferskih pražnjenja potaknuli su ideju o ugradnji linijskih odvodnika prenapona, s ciljem poboljšanja prenaponskih značajki vodova. U nedostatku prethodnih iskustava u primjeni linijskih odvodnika prenapona (LOP) na srednjenaponskim vodovima, naručena je studija za pilot projekt njihove ugradnje na DV 35 kV Trogir – Marina, vod s neuobičajeno velikim brojem ispada, većinom izazvanih atmosferskim pražnjenjima. Navedenom studijom su analizirane preskočne značajke voda za nekoliko konfiguracija ugradnje odvodnika prenapona i različite vrijednosti otpora uzemljenja stupova. Ujedno su izračunata energetska naprezanja odvodnika prenapona. Zbog visoke cijene linijskih odvodnika prenapona te potrebe višekratnih isključenja voda tijekom radova, njihova ugradnja je obavljena u više faza, tijekom nekoliko godina i još nije do kraja završena. U ovom radu su navedene značajke ugrađenih odvodnika, opisana njihova ugradnja te analiziran njihov utjecaj na pouzdanost dalekovoda. Zaključci se mogu primijeniti kao smjernice za daljnju ugradnju LOP na ovom i drugim, sličnim dalekovodima.

**Ključne riječi:** dalekovod, iskrište, linijski odvodnik prenapona, munja, otpor uzemljenja, prekid, prenapon, preskok

## EXPERIENCE IN LINE SURGE ARRESTERS APPLICATION ON 35 kV LINE

### SUMMARY

Frequent outages and failures of 35 kV nominal voltage overhead lines due to lightning prompted the idea of installation of line surge arresters, in order to improve lightning features of lines. Due to the lack of previous experience in the application of line surge arresters (LSA) to the medium-voltage lines, a study was commissioned of a pilot project for their installation on 35 kV line Trogir - Marina, line with unusually large number of outages, mostly caused by atmospheric discharges. The above-mentioned study analyzed the flashover characteristics of the line for several configurations of the surge arrester installation and the different tower earthing resistance values. Energy stresses of surge arresters are also calculated. Due to the high cost of line surge arresters and the need for multiple disconnections of line during the works, their installation has been carried out in several stages, over several years and has not yet been completed. In this paper the characteristics of the installed line surge arresters are listed, their installation is described and their impact on reliability of the line is analyzed. The conclusions can be used as guidelines for further LSA installation on this and other similar lines.

**Key words:** earthing resistance, flashover, gap, lightning, line surge arrester, outage, overhead line, overvoltage

## 1. UVOD

Atmosferski prenaponi su najčešći uzrok kvarova i ispada nadzemnih vodova nazivnog napona 35 kV u distribucijskom području Elektrodalmacije Split. Broj kvarova i prekida izazvanih atmosferskim prenaponima veći je od ukupnog broja prekida i kvarova izazvanih svim drugim uzrocima (opterećenje, posolica, vjetar, snijeg/led, ptice, ljudski utjecaji i slično). Veliki broj grmljavinskih dana u godini, visoka gustoća atmosferskih pražnjenja na područjima kojima prolaze trase dalekovoda te visoki specifični otpor tla, osnovni su uzroci povećanog broja prolaznih smetnji i kvarova na nadzemnim vodovima. Problem je dodatno naglašen činjenicom da veliki broj grmljavinskih nevremena pogađa ovo područje tijekom turističke sezone, kad je opterećenje najveće, ali i korisnici najosjetljiviji na prekide opskrbe. Kad se prekidima opskrbe zbog prolaznih smetnji i otklanjanja kvarova pridodaju još i isključenja dalekovoda zbog radova na preventivnoj zamjeni oštećenih izolatorskih članaka, visina štete zbog neisporučene električne energije upućuje na potrebu poduzimanja mjera za poboljšanje zaštite voda od atmosferskih prenapona.

Jedno od rješenja za smanjenje utjecaja atmosferskih pražnjenja na dalekovode nazivnog napona 35 kV je ugradnja linijskih odvodnika prenapona (LOP), mjera koja se, prema analizama i iskustvima u primjeni u prijenosnoj mreži, pokazala djelotvornom, poglavito na stupovima s visokim otporom uzemljenja. Pri tom postoji više rješenja:

- 1) Ugradnja odvodnika u sve tri faze na svim stupovima – 100% zaštita.
- 2) Ugradnja odvodnika u sve tri faze samo na kritičnim dionicama.
- 3) Ugradnja odvodnika u jednu (donju) ili dvije faze uz eventualno poboljšanje uzemljenja (na DV sa zaštitnim užetom).
- 4) Kombinacija 2.) i 3.) rješenja.

Na području Elektrodalmacije Split do sada su LOP ugrađeni na dva DV 35 kV, s različitim pristupom rješavanju problema i to na:

- DV 35 kV Stari Grad – Hvar
- DV 35 kV Trogir – Marina

DV 35 kV Stari Grad – Hvar je stariji dalekovod (izgrađen 1960. god.) i na njemu je obavljena potpuna obnova u duljini 5,6 km, od ukupno 14,7 km, koja je obuhvatila antikorozivnu zaštitu stupova, zamjenu vodiča, potpunu zamjenu ovjesa, zaštitnih armatura, izolacije te ugradnju linijskih odvodnika prenapona u sve tri faze na 9 reljefno najizloženijih stupova, uz sanaciju uzemljenja na tim stupovima.

Na DV 35 kV Trogir – Marina je primijenjen drugačiji pristup. Za razliku od gore navedenog, DV 35 kV Trogir – Marina je noviji vod, u dobrom stanju, osim u pogledu zaštite od atmosferskih prenapona, pa nema potrebe za cjelovitom obnovom. Uz to, vod je radijalan, pa ne dolaze u obzir dugotrajna beznaponska stanja. Stoga je za ovaj vod prvo naručena i izrađena Studija ugradnje linijskih odvodnika prenapona [1], a sama njihova ugradnja odvija se u više faza, tijekom nekoliko godina i još nije završena, uz praćenje stanja odvodnika i utjecaja na osjetljivost voda na atmosferske prenapone.

U ovom radu će se prikazati pristup primijenjen na DV 35 kV Trogir – Marina, te rezultati praćenja utjecaja ugrađenih odvodnika prenapona na statistiku prekida i kvarova.

## 2. PODACI O DV 35 KV TROGIR - MARINA

### 2.1. Opći podaci i stanje voda

Dalekovod DV 35 kV TS 110/35 kV TROGIR – TS 35/10 kV MARINA (u daljnjem tekstu skraćeno: DV 35 kV Trogir-Marina) izgrađen je 1980. godine u svrhu napajanja buduće TS 35/10 kV Marina. TS 35/10 kV Marina je izgrađena u vrijeme izgradnje vikend naselja i povećanja potrošnje električne energije na području koje obuhvaća današnju općinu Marina i otoke Drvenik Veli i Mali.

Napajanje TS 35/10 kV Marina je radijalno, predmetnim dalekovodom iz TS 110/35 kV Trogir. Zbog položaja TS 35/10 kV Marina na zapadnom rubu distribucijskog područja Elektrodalmacije Split te činjenice da je na susjednom području Elektre Šibenik nazivni napon 30 kV, kao i zbog relativno male potrošnje i značaja konzuma, nije bila predviđena izgradnja drugog voda. Tek, nakon što je, potaknuto razvojem turizma, opterećenje prešlo 6,5 MVA, uz porast broja korisnika mreže preko 4.100, započete su

radnje na izgradnji novog podzemnog voda, ali i povećanju pouzdanosti postojećeg, nadzemnog, koji je do završetka izgradnje novog voda, još uvijek jedino napajanje TS 35/10 kV.

Osim u početnom dijelu, gdje vod prelazi preko polja, preostali dio trase prelazi preko brdovitog, tipičnog krškog terena, gdje se izmjenjuju područja kamenitih, šumovitih uzvisina, krških visoravni, s mjestimičnim obrađenim zonama. Do većine stupova je otežan ili nemoguć pristup vozilima i strojevima.

Praćenjem prekida i kvarova te redovitim periodičkim pregledima, uočen je veći broj ispada dalekovoda te iznadprosječno veliki broj oštećenja izolatora, prvenstveno kao posljedica atmosferskih pražnjenja. Ima nekoliko zabilježenih slučajeva stradanja ptica i to najčešće na iskrištima zateznih izolatorskih lanaca.

Općenito, vod je u dobrom stanju, redovito održavan, zadovoljava uvjete najvećeg opterećenja TS 35/10 kV Marina i praktično jedini značajni nedostatak je osjetljivost na atmosferske prenapone.

## 2.2. Osnovni tehnički podaci o vodu

|                                |                                                                                                         |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Naziv voda:</b>             | DV 35 kV TS 110/35 kV Trogir – TS 35/10 kV Marina<br>skraćeno DV 35 kV Trogir-Marina                    |
| <b>Nazivni napon:</b>          | 35 kV                                                                                                   |
| <b>Duljina trase:</b>          | 11,916 km                                                                                               |
| <b>Vrsta i presjek vodiča:</b> | 3 x Al/Fe uže 120/20 mm <sup>2</sup> , zaštitno uže Fe III 50 mm <sup>2</sup>                           |
| <b>Izolacija:</b>              | Izolatorski lanci sa staklenim, kapastim izolatorima KT 120                                             |
| <b>Stupovi:</b>                | Jednosustavni, čelično-rešetkasti, oblika glave <i>jela</i>                                             |
| <b>Broj stupova ukupno:</b>    | 47 kom                                                                                                  |
| • <b>nosnih:</b>               | 39 kom                                                                                                  |
| • <b>zateznih:</b>             | 8 kom                                                                                                   |
| <b>Prosječna visina stupa:</b> | 26,6 m                                                                                                  |
| <b>Prosječni raspon:</b>       | 254 m                                                                                                   |
| <b>Temelji:</b>                | Betonski raščlanjeni                                                                                    |
| <b>Uzemljenje stupova:</b>     | Trakasti uzemljivači od pocinčane trake 25 x 4 mm                                                       |
| <b>Armatura:</b>               | Regulacijska iskrišta podešena na 15 cm                                                                 |
| <b>Priključci na TS:</b>       | TS 110/35 kV Trogir – nadzemno<br>TS 35/10 kV Marina – podzemno, KB XHE 49-A 3x(1x185 mm <sup>2</sup> ) |
| <b>Konfiguracija terena</b>    | Tipični krški teren, pretežno brdovito i kamenito                                                       |

## 2.3. Podaci o relejnoj zaštiti voda

DV 35 kV Trogir – Marina štićen je nadstrujnom i usmjerenom zemljospojnom zaštitom slijedećih udešenja:

- Nadstrujna zaštita  $I > = 240 \text{ A}$ ,  $t > = 2 \text{ s}$ ;
- Zemljospojna zaštita  $I_0 > = 10 \text{ A}$ ,  $t_0 > = 1,5 \text{ s}$ .

Zvezdište 35 kV mreže iz TS 110/35 kV Trogir je uzemljeno preko malog otpora vrijednosti 70  $\Omega$ , čime je najveća struja jednogpolnog kratkog spoja ograničena na 300 A.

Nakon preuzimanja 35 kV postrojenja od HOPS-a, uočeno je da je na VP 35 kV Marina isključen automatski ponovni uklop (APU), navodno zbog lošeg stanja prekidača u vodno polju.

## 2.4. Podaci o prekidima i kvarovima izazvanim atmosferskim prenaponima (prije ugradnje LOP)

U tablici I se navode podaci o prolaznim smetnjama i kvarovima na DV 35 kV Trogir – Marina u razdoblju od 2008. do konca 2014. godine. U podacima su uvršteni i radovi na DV radi naknadnih otklanjanja kvarova (izvanredno održavanje), ali ne i radovi na redovnom održavanju.

Tablica I. Godišnja statistika ispada DV 35 kV u razdoblju od 2008. – 2014. god.

| Godina                  | 2008. | 2009. | 2010. | 2011. | 2012. | 2013. | 2014. |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Prolazne smetnje        | 8     | 18    | 12    | 5     | 10    | 6     | 19    |
| Kvar                    | 2     | 3     | 5     | 3     | 2     | 3     | 4     |
| <b>Ukupno ispada DV</b> | 10    | 21    | 17    | 8     | 12    | 9     | 23    |
| Trajanje (h:min)        | 4:58  | 20:46 | 40:07 | 14:26 | 12:22 | 12:10 | 30:32 |
| Neisp. en. (MWh)        | 8,62  | 35,27 | 71,55 | 28,35 | 27,49 | 23,85 | 67,19 |

Dakle, ukupan broj prekida zbog atmosferskih prenapona varira od 8 do 23 godišnje, odnosno u prosjeku 14,3 prekida/godišnje. Od toga, najveći broj su prolazne smetnje (PSM), s trajanjem prekida od nekoliko minuta. Ukupna neisporučena energija u promatranom razdoblju iznosila je: 262,32 MWh, odnosno u prosjeku: 37,5 MWh/god.

### 3. ANALIZA PRENAPONSKIH ZNAČAJKI VODA

#### 3.1. Djelovanje atmosferskih pražnjenja na nadzemne vodove

Atmosferski prenaponi (druge vrste prenapona se ne razmatraju) koji se pojavljuju na nadzemnim vodovima nazivnog napona 35 kV na čelično-rešetkastim stupovima sa zaštitnim užetom, mogu se podijeliti u tri vrste:

- Prenaponi uslijed udara groma u fazne vodiče,
- Prenaponi uslijed udara groma u vrh stupa ili zaštitno uže,
- Prenaponi uslijed udara groma u tlo u blizini voda – inducirani prenaponi.

Iako sve tri vrste prenapona, ovisno o njihovoj visini i izolacijskoj čvrstoći voda, mogu izazvati preskoke na vodu, inducirani prenaponi u pravilu izazivaju manje naprezanje izolacije nego ostale dvije vrste, pa se u ovom slučaju ne razmatraju.

Kad grom udari izravno u fazni vodič, struja groma  $i$  se podijeli na dva dijela koji putuju vodom u obliku vala strmog čela, na jednu i drugu stranu od mjesta udara, stvarajući na valnoj impedanciji voda putujuće prenaponske valove sličnog oblika [1], [2]. Amplituda takvog prenaponskog vala (kV) iznosi:

$$U_0 = Z \frac{I_0}{2} \quad (1)$$

gdje su:

$I_0$  – amplituda struje groma (kA),

$Z$  – valna impedancija faznog vodiča ( $\Omega$ ).

Obzirom da vrijednosti valne impedancije nadzemnih vodova iznose od 300 do 500  $\Omega$  [2], već će i pri manjim strujama groma reda 10 kA nastati naponski val dovoljno visoke tjemene vrijednosti da izazove preskok kad naiđe na izolator na prvom slijedećem stupu. Najčešća posljedica takvog preskoka je pojava zemljospoja, odnosno jednopolnog kratkog spoja, koji traje dok zaštita ne isključi vod. U slučaju preskoka na više faznih vodiča, nastaje višepolni kratki spoj, koji često za posljedicu, osim samog prekida, može imati i oštećenje pogođenih izolatora.

Stoga se na vodovima nazivnog napona iznad 30 kV u pravilu postavlja uzemljeno zaštitno uže iznad vodiča i na taj način u najvećoj mjeri smanjuje vjerojatnost izravnog udara groma u fazne vodiče. Funkcija zaštitnog užeta je da svojim položajem zakloni fazne vodiče od izravnog udara groma u njih, ali i da prihvaćenu struju groma što efikasnije odvede u zemlju. Upravo o učinkovitosti odvođenja struje groma u zemlju, kroz same stupove i njihove uzemljivače, ovisi da li će tom prilikom doći do preskoka na fazne vodiče, tzv. *povratnog preskoka*, eng. *back flashover*.

Najnepovoljnija situacija nastupa prilikom udara groma u vrh stupa. Struja groma se u tom slučaju dijeli na valove koji putuju zaštitnim užetom i val kojim se struja kroz stup odvodi u zemlju. Valovi koji putuju zaštitnim užetom, pri nailasku na slijedeći stup se ponovno dijele na dio koji prolazi dalje zaštitnim užetom, dio struje koja se kroz susjedni stup odvodi kroz zemlju te dio koji se reflektira. Slično se i val koji putuje stupom, pri nailasku na uzemljivač dijelom reflektira od uzemljivača stupa. Kao posljedica toga, pojavljuje se povišeni napon na izolaciji, kao razlika potencijala konzole stupa i potencijala faznog vodiča.

U samom početku pojave, zbog velike strmine čela vala ( $di/dt$ ), dominantni utjecaj ima induktivitet stupa, a otpor uzemljenja gotovo da i ne dolazi do izražaja. No, nakon što prođe strmi dio vala, napon na stupu je u najvećoj mjeri funkcija struje koja se zatvara kroz uzemljenje i vrijednosti otpora uzemljenja.

Napon koji napreže izolaciju je jednak razlici potencijala stupa na mjestu zavješanja i potencijala faznog vodiča. Potencijal faznog vodiča jednak je zbroju trenutne vrijednosti pogonskog faznog napona, napona induciranog u faznom vodiču uslijed struje groma te napona induciranog uslijed struje kroz zaštitno uže, pa je napon na izolaciji jednak:

$$U_{iz} = U_{ind} + U_s + U_p - U_{indzu} \quad (2)$$

$U_{iz}$  – napon na izolaciji

$U_{ind}$  - ukupni inducirani napon uslijed struje groma

$U_s = I_s R_s$  – pad napona na udarnom otporu uzemljenja stupa  $R_s$

$U_p$  – fazni napon mrežne frekvencije

$U_{indzu}$  - inducirani napon u vodiču uslijed sprege sa zaštitnim užetom

Napon induciran na faznom vodiču uslijed električne i magnetske sprege sa zaštitnim užetom je uzet sa negativnim predznakom, jer djeluje na smanjenje napona na izolaciji. Faktor sprege je to manji što je vodič udaljeniji od zaštitnog užeta. Zato se može zaključiti da je vjerojatnost preskoka veća na udaljenijim (donjim) vodičima.

Ovakvo razmatranje se značajno razlikuje od kriterija za visinu otpora uzemljenja iz članka 83. Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova od 1 kV do 400 kV [3], u kojem se navodi da povratni preskok nije vjerojatan ako otpor uzemljenja stupa zadovoljava uvjet:

$$R_{uz} \leq \frac{U_i}{I_u} \quad (3)$$

$U_i$  – podnosivi udarni napon izolacije u suhom

$I_u$  – vršna vrijednost udarne struje

Dakle, u izrazu (3) nisu uzeti u obzir inducirani naponi ni elektromagnetska sprema faznih i zaštitnog vodiča, a koji nisu zanemarivi. No, iako gornja tvrdnja nije sasvim točna zbog spomenutih zanemarenja, ipak veličina otpora rasprostiranja uzemljivača u velikoj mjeri ima utjecaj na vjerojatnost pojave povratnog preskoka.

### 3.2. Proračun preskočnih značajki voda

S ciljem određivanja prenaponskih značajki DV 35 kV Trogir – Marina i analize potencijalnih rješenja za smanjenje osjetljivosti DV na atmosferske prenapone, izrađena je Studija ugradnje linijskih odvodnika prenapona [1].

Primjenom trodimenzionalnog, elektrogeometrijskog modela i Monte Carlo statističke metode simulirani su udari groma u vod, da bi se odredila mjesta udara groma i vrijednost struja groma. Ti podaci se onda koriste pri proračunu elektromagnetskih prijelaznih pojava i određivanju preskočnih značajki. Svi statistički podaci dobiveni proračunom su svedeni na 100 km duljine voda, godišnje.

Proračuni su rađeni na temelju geometrije i tehničkih podataka o vodu, navedenim u poglavlju 2.2. te parametrima danim u nastavku.

#### 3.2.1. Preskočni parametri izolacije

Preskočni parametri izolacije određeni su uz prosječno električno polje  $E_0 = 530 \text{ kV/m}$ .

- Kritični preskočni napon izolatorskih lanaca sa zaštitnim iskrištem, koje ima razmak  $d_i = 150$  mm iznosi:

$$U_{iskr} = d_i E_0 = 0,15 \cdot 530 = 79,5 \quad (\text{kV}) \quad (4)$$

- Kritični preskočni napon izolatorskog lanca bez iskrišta, uz usvojenu preskočnu udaljenost  $l_i = 437$  mm iznosi:

$$U_{izol} = l_i E_0 = 0,437 \cdot 530 = 232 \quad (\text{kV}) \quad (5)$$

### 3.2.2. Parametri linijskih odvodnika prenapona – bez vanjskog iskrišta

- Nazivni napon  $U_r$ : 40 kV
- IEC class: 1
- Nazivna struja odvođenja (8/20  $\mu$ s)  $I_n$ : 10 kA
- Kratkotrajna podnosiva struja (4/10  $\mu$ s): 100 kA
- Preostali napon pri nazivnoj struji (10 kA): 128 kV

### 3.2.3. Gustoća atmosferskih pražnjenja

Gustoća atmosferskih pražnjenja  $N_g$ , iskazana kao broj udara munje po  $\text{km}^2$  površine, tijekom jedne godine, je polazni podatak za provedbu daljnjih proračuna. Podatak o gustoći atmosferskih pražnjenja se može izračunati prema [4] kao:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (6)$$

$N_g$  - gustoća atmosferskih pražnjenja (broj udara /  $\text{km}^2$  god)

$T_d$  – broj grmljavinskih dana u godini.

Uz  $T_d = 50$  grmljavinskih dana u godini, gustoća pražnjenja iznosi  $N_g = 5,32$  udara/ $\text{km}^2$ god.

### 3.2.4. Rezultati proračuna preskočnih značajki voda i energetskog naprežanja odvodnika

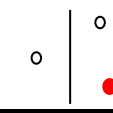
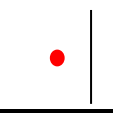
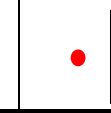
Proračun preskočnih značajki voda je napravljen simulacijom na modelu, za prethodno navedene parametre te značajke atmosferskih pražnjenja prema smjernicama datim u [1], [4].

Polazni podatak koji je izračunat primjenom elektrogeometrijskog modela je broj udara groma u vod, na 100 km duljine voda, godišnje:

$$N_L = 72,4 \text{ (udara groma/100 km god)}$$

U Tablici II su prikazani rezultati simulacija udara groma u vod, za pet različitih konfiguracija: dvije konfiguracije bez ugrađenih LOP (sa i bez zaštitnih iskrišta), te tri konfiguracije sa uklonjenim iskrištima i LOP ugrađenim na jednoj (donjoj) fazi, dvije faze i sve tri faze. Prikazani podaci predstavljaju broj preskoka u jednoj godini na ekvivalentnom vodu duljine 100 km, a parametar proračuna je otpor rasprostiranja uzemljivača, u rasponu između 10 i 100  $\Omega$  [1].

Tablica II. Preskočne značajke voda za razne konfiguracije izolacije - rezultati simulacije

| $R_s$<br>( $\Omega$ ) | $\rho$<br>( $\Omega\text{m}$ ) | Broj preskoka / 100 km godišnje              |                                              |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |                                | Bez LOP<br>s iskrištem<br>$U_{pr} = 79,5$ kV | Bez LOP<br>bez iskrišta<br>$U_{pr} = 232$ kV |  |  |  |
| 10                    | 300                            | 64,49                                        | 18,79                                        | 10,73                                                                               | 4,12                                                                                  | 0                                                                                     |
| 20                    | 600                            | 72,02                                        | 42,71                                        | 29,08                                                                               | 15,08                                                                                 | 0                                                                                     |
| 30                    | 900                            | 73,25                                        | 57,83                                        | 43,20                                                                               | 26,59                                                                                 | 0                                                                                     |
| 40                    | 1200                           | 73,80                                        | 65,33                                        | 54,34                                                                               | 36,10                                                                                 | 0                                                                                     |
| 50                    | 1500                           | 73,95                                        | 67,71                                        | 60,80                                                                               | 44,94                                                                                 | 0                                                                                     |
| 60                    | 1800                           | 73,99                                        | 68,64                                        | 64,52                                                                               | 51,26                                                                                 | 0                                                                                     |
| 70                    | 2100                           | 74,10                                        | 69,94                                        | 66,30                                                                               | 56,23                                                                                 | 0                                                                                     |
| 80                    | 2400                           | 74,14                                        | 70,83                                        | 67,41                                                                               | 59,73                                                                                 | 0                                                                                     |
| 90                    | 2700                           | 74,17                                        | 71,24                                        | 68,16                                                                               | 61,92                                                                                 | 0                                                                                     |
| 100                   | 3000                           | 74,21                                        | 71,54                                        | 68,79                                                                               | 63,29                                                                                 | 0                                                                                     |

Energetsko naprezanje odvodnika prenapona izračunato je za dva krajnja slučaja:

- Pri izravnom udaru groma u fazni vodič  $I = 12,1 \text{ kA}$ ,  $E = 23,8 \text{ kJ}$
- Pri udaru groma u vrh stupa:  $I = 105 \text{ A}$ ;  $E = 92,1 \text{ kJ}$

Energetska sposobnost odabranih LOP treba biti veća od gore navedenih energ. naprezanja.

#### 4. IZBOR I UGRADNJA LINIJSKIH ODVODNIKA PRENAPONA

##### 4.1. Izbor odvodnika prenapona

Vodeći se smjernicama danim u [1], [5] i [6], odabran je tip metaloksidnog (ZnO) odvodnika u polimernom kućištu, bez serijskog iskrišta, predviđen za ugradnju na vodič, paralelno izolatoru, opremljen ovjesnom stezaljkom i napravom za odvajanje odvodnika u kvaru, slijedećih tehničkih značajki:

|                                                                          |         |       |
|--------------------------------------------------------------------------|---------|-------|
| • Nazivni napon $U_r$ :                                                  | 39,0    | kV    |
| • Trajni radni napon $U_c$ :                                             | 31,2    | kV    |
| • Nazivna odvodna struja (8/20 $\mu\text{s}$ ) $I_n$ :                   | 10      | kA    |
| • Udar na struja visokog inteziteta (4/10 $\mu\text{s}$ ):               | 100     | kA    |
| • Energetski razred:                                                     | 2       |       |
| • Preostali napon za nazivnu odvodnu struju 10 kA (8/20 $\mu\text{s}$ ): | 106     | kV    |
| • Energetska podnosivost:                                                | 4,5     | kJ/kV |
| • Materijal kućišta:                                                     | polimer |       |
| • Duljina klizne staze:                                                  | 1325    | mm    |

Naprava za odvajanje služi za brzo odvajanje odvodnika u slučaju njegovog kvara. Obzirom da je odvodnik preko ovjesne stezaljke neposredno obješen i spojen na fazni vodič, naprava za odvajanje se ugrađuje između drugog pola odvodnika i zemljovoda.

##### 4.2. Ugradnja linijskih odvodnika prenapona

Zbog relativno visoke nabavne cijene odvodnika prenapona, troškova ugradnje i potrebnih višekratnih, poludnevniških isključenja dalekovoda za ugradnju odvodnika na cijelom vodu, donesena je odluka o ugradnji odvodnika i demontaži iskrišta u više faza rada, u nekoliko godina i to u vlastitoj izvedbi. Zbog posebnih uvjeta konzuma glede isključenja, te meteoroloških ograničenja, razdoblja mogućih radova na dalekovodu su svedena na dva proljetna i jedan jesenski mjesec u godini. Obzirom da je situacija slična na većem dijelu distribucijskog područja, to su razdoblja u kojima se obavljaju najintenzivniji radovi na održavanju elektroenergetskih postrojenja, pa se vrijeme raspoloživo za ugradnju odvodnika prenapona svodi na nekoliko dana u godini.

U prvoj fazi, u proljeće 2014. godine, ugrađeno je 24 kompleta odvodnika (odvodnik s napravom za odvajanje i opremom za spajanje na vodič i uzemljenje) na osam stupova, u sve tri faze. Stupna mjesta su odabrana uzimajući u obzir pristupačnost i druge lokalne posebnosti, uz nastojanje ravnomjerne raspodjele duž cijelog voda. U drugom dijelu godine, napravljen je remont uzemljivača tih stupova.

U drugoj fazi, u proljeće i ljeto 2016. je ugrađeno još 27 kompleta odvodnika na devet stupova, u sve tri faze, kako je navedeno u tablici III. Uz to je obavljen i remont uzemljivača tih stupova. I ovaj put je izbor stupova napravljen prema kriteriju ravnomjerne raspodjele odvodnika duž voda, osim u slučaju stupova br. 30 i 42, koji su susjedni stupovima na kojima su već prethodno ugrađeni odvodnici. Za stup br. 30 razlog je uočeno oštećenje izolatorskih članaka tijekom prethodne godine, a stup br. 42 je odabran umjesto stupa br. 43, na kojem je u tom trenutku bilo otežano izvođenje radova.

Odluka o ugradnji LOP na sve tri faze je donesena temeljem rezultata simulacija iz Studije ugradnje linijskih odvodnika prenapona [1], prema kojima se, na stupovima koji imaju otpor uzemljenja veći od  $30 \Omega$ , zadovoljavajuća razina zaštite postiže samo ugradnjom LOP na sve tri faze.

Na svim izolatorskim lancima, kojima su paralelno ugrađeni LOP, su demontirana regulacijska iskrišta. Odvodnici su na fazni vodič pričvršćeni pomoću gibljive nosne stezaljke, na udaljenosti približno

1 metar od izolatorskog lanca. Vodič kojim se odvodnik priključuje na konstrukciju stupa mora imati dovoljnu elastičnost i duljinu da omogućava slobodno njihanje odvodnika. Duljina vodiča i mjesto pričvršćenja na stup trebaju biti određeni tako da ne mogu, prilikom prekida, odnosno otpuštanja naprave za odvajanje u slučaju kvara odvodnika, nikako izazvati kontakt ili preskok prema donjoj fazi.

Tablica III. Popis stupova s podacima o otporima uzemljenja i ugrađenim LOP

| Broj stupa                    | 1  | 2  | 3  | 4          | 5          | 6   | 7          | 8         | 9  | 10 | 11         | 12          |
|-------------------------------|----|----|----|------------|------------|-----|------------|-----------|----|----|------------|-------------|
| Vrsta stupa                   | Z  | N  | N  | N          | N          | KZ  | N          | N         | N  | N  | N          | N           |
| Sastav tla                    | Z  | Z  | Z  | Z          | Z          | Z   | Z          | K         | K  | K  | K          | K           |
| Otpor uzemljenja ( $\Omega$ ) | 2  | 2  | 3  | 2          | 3<br>(3)   | 4   | 12         | 21        | 33 | 24 | 39<br>(16) | 36          |
| LOP – I faza                  |    |    |    |            | 3          |     |            |           |    |    | 3          |             |
| LOP – II faza                 |    |    | 3  |            |            |     |            | 3         | 3  |    |            |             |
| Broj stupa                    | 13 | 14 | 15 | 16         | 17         | 18  | 19         | 20        | 21 | 22 | 23         | 24          |
| Vrsta stupa                   | Z  | N  | N  | N          | N          | N   | N          | N         | N  | N  | N          | Z           |
| Sastav tla                    | K  | K  | K  | K          | K          | K   | K          | Z         | Z  | Z  | Z          | K           |
| Otpor uzemljenja ( $\Omega$ ) | 42 | 37 | 44 | 52<br>(13) | 43         | 109 | 77         | 13<br>(9) | 22 | 19 | 27         | 46          |
| LOP – I faza                  |    |    |    | 3          |            |     |            | 3         |    |    |            |             |
| LOP – II faza                 |    |    |    |            |            | 3   |            |           |    |    |            |             |
| Broj stupa                    | 25 | 26 | 27 | 28         | 29         | 30  | 31         | 32        | 33 | 34 | 35         | 36          |
| Vrsta stupa                   | N  | N  | Z  | N          | N          | N   | N          | N         | N  | Z  | N          | N           |
| Sastav tla                    | K  | K  | K  | K          | K          | K   | K          | K         | K  | K  | K          | K           |
| Otpor uzemljenja ( $\Omega$ ) | 31 | 23 | 42 | 63<br>(50) | 58         | 67  | 71<br>(11) | 69        | 85 | 64 | 51<br>(17) | 89          |
| LOP – I faza                  |    |    |    | 3          |            |     | 3          |           |    |    | 3          |             |
| LOP – II faza                 | 3  |    |    |            |            | 3   |            |           |    |    |            |             |
| Broj stupa                    | 37 | 38 | 39 | 40         | 41         | 42  | 43         | 44        | 45 | 46 | 47         |             |
| Vrsta stupa                   | N  | N  | N  | N          | KZ         | N   | N          | N         | N  | N  | Z-K        |             |
| Sastav tla                    | K  | K  | K  | K          | K          | K   | Z          | Z         | Z  | K  | Z          |             |
| Otpor uzemljenja ( $\Omega$ ) | 36 | 44 | 21 | 70         | 53<br>(21) | 254 | 8          | 9         | 12 | 39 | 11         |             |
| LOP – I faza                  |    |    |    |            | 3          |     |            |           |    |    | 3*         | $\Sigma 24$ |
| LOP – II faza                 |    |    | 3  |            |            | 3   |            |           | 3  |    |            | $\Sigma 27$ |

Oznake:

Vrsta stupa: Z – zatezni, N – nosni, KZ – kutno-zatezni, Z-K – zatezni s prelaskom u kabel

Sastav tla: Z – zemljano, K – kamenito

\* - na stupu br. 47 je prijelaz na podzemni kabel, na kojem su već bili ugrađeni odvodnici prenapona



Slika 1. LOP s ovjesnom stezaljkom i odvojnjom napravom



Slika 2. Prikaz postavljenih odvodnika na nosnom stupu

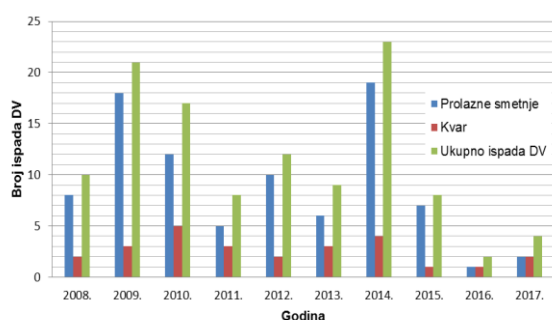
## 5. PRAĆENJE STANJA DALEKOVODA NAKON UGRADNJE LOP

Nekoliko je pokazatelja opravdanosti ugradnje LOP na nadzemne vodove, a osnovni su:

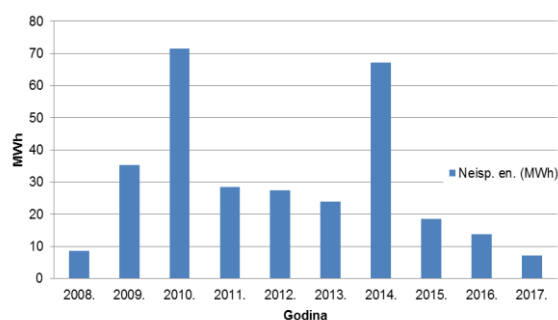
- Statistika prekida i kvarova (broj, trajanje i neisporučena el. energija)
- Oštećenja izolacije ili samih LOP, kao posljedica atmosferskih prenapona

### 5.1. Statistika prekida i kvarova

Iz ukupne evidencije ispada dalekovoda, izdvojeni su samo oni događaji koji se, temeljem zabilježenih podataka i komentara dispečera, mogu povezati s atmosferskim prenaponima. Podijeljeni su, ovisno o trajanju i načinu otklanjanja zastoja, u dvije skupine: prolazne smetnje i kvarove. Obuhvaćeno je razdoblje prije i nakon ugradnje LOP, u trajanju deset godina: 2008. – 2017. godine.



Slika 3. Pregled ispada DV zbog atmosferskih prenapona, po godinama



Slika 4. Pregled neisporučene el. energije zbog ispada DV, po godinama

Karakteristična su tri razdoblja: razdoblje do I faze ugradnje LOP (svibanj 2014.), razdoblje između I i II faze ugradnje LOP (svibanj 2014. – svibanj 2016.) te razdoblje nakon svibnja 2016. god. Tek je nakon druge faze uočljivo smanjenje broja ispada, što se i očekivalo, jer su u prvoj fazi ugrađeni odvodnici na 8 stupova, što je tek 17% ukupnog broja stupova. Uz to, 2014. godina je bila ekstremna po broju grmljavinskih nevremena koja su zahvatila to područje, što je uzrok iznimno velikog broja ispada dalekovoda. Treba napomenuti i da je, zbog problema prekidačem, bio onemogućen APU.

No, potrebno je naglasiti da u razdoblju nakon ugradnje LOP nije zabilježen niti jedan dugotrajni ispad izazvan kvarom na izolaciji, pa čak ni 2014. godine, u kojoj je zabilježen izuzetno visok broj prolaznih smetnji. Zabilježen je jedan kvar na zaštitnom užetu te dva kvara prekidača, koja se povezuju s grmljavinskim nevremenom, no nije utvrđeno da je uzrok prenapon.

Evidencija prorade zaštite pokazuje podjednaku zastupljenost prorade zemljospojnog i nadstrujnog releja, što ukazuje na značajan udio višestrukih preskoka na izolaciji različitih faza, koji su izazvali dvopolne, odnosno tropolne kratke spojeve.

### 5.2. Statistika oštećenja izolatora

U tablici IV su prikazani podaci o oštećenim izolatorskim člancima, uočeni pri godišnjim pregledima dalekovoda. Obzirom da se pregledi obavljaju početkom godine, može se uzeti da su navedeni izolatorski članci oštećeni tijekom prethodne godine. Osim ukupnog broja oštećenih članaka, za analizu je bitna i pozicija (broj stupa i faza) oštećenih članaka i to apsolutna, kao i relativna u odnosu na pozicije na kojima su ugrađeni LOP.

Iz tablice IV, kao i iz dijagrama na slici 5., uočljivo je smanjenje broja oštećenih izolatora nakon ugradnje linijskih odvodnika prenapona. Iako statistička anomalija 2014. godine ne ide u prilog prethodnoj tvrdnji, veliki broj oštećenja te godine se može objasniti iznimno velikim brojem udara munja u vod te činjenicom da su u prvoj fazi ugrađeni odvodnici na samo 17% stupova. Može se opravdano pretpostaviti da bi inače, bez odvodnika prenapona, broj oštećenih izolatora i stupova s oštećenjima bio još veći. Na to navode i lokacije oštećenih izolatora, velikim dijelom na stupovima susjednim onima na kojima su ugrađeni odvodnici. Za pretpostaviti je, da bi i na tim stupovima bilo oštećenja da nema odvodnika prenapona. Nadalje, bitno je naglasiti da, od početka ugradnje odvodnika prenapona nije zabilježen niti jedan proboj cijelog izolatorskog lanca niti drugi kvar na izolaciji, koji bi izazvao trajni prekid.

Tablica IV. Pregled oštećenja izolatorskih članaka uočenih pri godišnjim pregledima dalekovoda

| Datum pregleda:                       | 15.01.2014. – prije ugradnje LOP |              |      |              |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------------|--------------|------|--------------|------|------|
| Broj stupa                            | 6                                | 13           | 20   | 22           | 33   | 35   |
| Broj ošt. izolatora i pozicija (faza) | 1 SF                             | 1 GF<br>1 DF | 1 SF | 1 SF<br>1 DF | 1 SF | 1 SF |
| Ukupno                                | 1                                | 2            | 1    | 2            | 1    | 1    |

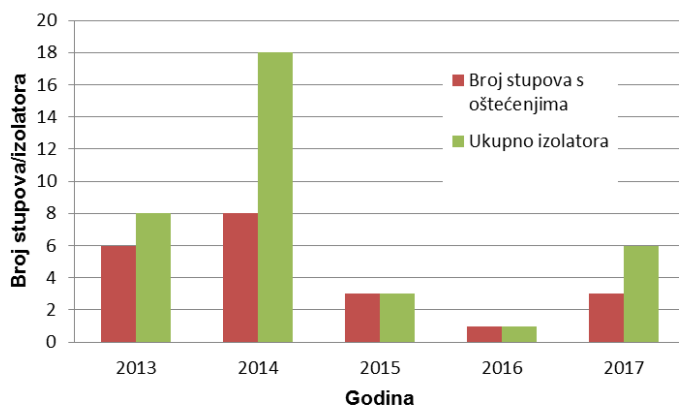
  

| Datum pregleda:                       | 16.02.2015.  |              |      |              |                      |      |                      |              |
|---------------------------------------|--------------|--------------|------|--------------|----------------------|------|----------------------|--------------|
| Broj stupa                            | 8            | 21*          | 22   | 27*          | 30*                  | 32*  | 34*                  | 39           |
| Broj ošt. izolatora i pozicija (faza) | 1 DF<br>1 SF | 1 GF<br>1 SF | 1 DF | 1 GF<br>1 SF | 1 GF<br>1 SF<br>1 DF | 1 SF | 2 GF<br>2 SF<br>1 DF | 1 DF<br>1 SF |
| Ukupno                                | 2            | 2            | 1    | 2            | 3                    | 1    | 5                    | 2            |

| Datum pregleda:                       | 15.02.2016. |      |      | 13.02.17. | 29.01.2018.  |              |      |
|---------------------------------------|-------------|------|------|-----------|--------------|--------------|------|
| Broj stupa                            | 1           | 32*  | 34*  | 24        | 33*          | 34*          | 47   |
| Broj ošt. izolatora i pozicija (faza) | 1 DF        | 1 DF | 1 DF | 1 DF      | 1 SF<br>1 DF | 1 GF<br>2 SF | 1 GF |
| Ukupno                                | 1           | 1    | 1    | 1         | 2            | 3            | 1    |

\* - susjedni stupovi onima na kojima su ugrađeni odvodnici



Slika 5. Statistika oštećenja izolatora po godinama

Nisu uočena oštećenja izolatora na stupovima na kojima su ugrađeni odvodnici i skinuta iskrišta. Izuzetak je stup br. 47 koji je krajnji zatezni stup na kojem je izveden prijelaz u podzemni kabel na priključku TS 35/10 kV Marina. Na tom stupu su već prethodno bili ugrađeni odvodnici prenapona na prijelazu iz nadzemnog voda u podzemni kabel, ali tom prilikom nisu skinuta iskrišta. Obzirom da je preskočni napon iskrišta (79,5 kV) niži od preostalog napona odvodnika pri nazivnoj struji (106 kV), na tim iskrištima može nastati preskok i oštećenje izolatora, bez obzira na ugrađene odvodnike.

No, zato je uočen značajan broj oštećenja izolatorskih članaka na susjednim stupovima (21 od ukupno 28). Može se uočiti da je učestalost oštećenja na nekim stupovima povećana i to na stupovima br.: 22, 32, 33 i 34. Povećani broj i učestalost oštećenja izolatora na tri uzastopna stupa br.: 32, 33 i 34, u promatranom razdoblju, ali i prije toga, ukazuju da im je potrebno posvetiti posebnu pozornost.

Navedeni stupovi se nalaze na vrhu brda između zaljeva Marina i naselja Vrsine, na tipičnom krškom terenu. Učestalo oštećenje izolatora i kvarovi na ovim i njima susjednim stupovima, uočeni višegodišnjim praćenjem i pregledima, ukazuju na veću učestalost udara munje u vod upravo na ovom području. S druge strane, visoke vrijednosti otpora uzemljenja stupova, kao posljedica visokog specifičnog otpora tla na ovom području, a koje iznose između 65 i 90  $\Omega$ , pridonose značajnom pogoršanju preskočnih značajki voda. Pri udaru munje u zaštitno uže ili vrh stupa, uslijed visokog otpora uzemljenja najčešće nastaje povratni preskok, a nakon njega luk na zaštitnom iskrištu. Uloga iskrišta u otklanjanju luka od izolatorskog lanca je u ovom slučaju samo djelomično ispunjena, jer iako nije oštećen cijeli izolatorski lanac, što bi možda bio u slučaju da se luk zatvorio preko njega, ipak su oštećeni pojedini izolatorski članci.

Ugradnjom linijskih odvodnika prenapona na stupovima br. 30, 31, 35 i 37, uz remont uzemljenja stupova, stanje zaštite dalekovoda na tom dijelu se samo dijelom popravilo. Pokazuje se da je zaštita izolacije linijskim odvodnicima prenapona djelotvorna, ali samo na onim stupovima na kojima su odvodnici ugrađeni, a da su susjedni stupovi izvan zone šticećenja. Čak što više, u slučaju prorade odvodnika prenapona povratni prenapon se proslijedi do susjednih stupova, gdje može izazvati preskok, ako na susjednom stupu nije ugrađen odvodnik na toj fazi.

## 6. ZAKLJUČAK

Iz višegodišnjeg pogonskog iskustva, kao i rezultata Studije [1], proizlazi zaključak da zaštita od atmosferskih prenapona primjenom zaštitnih regulacijskih iskrišta nije dobro rješenje. Zbog sniženog preskočnog napona, povećava se broj preskoka, a time i kratkotrajnih prekida, a oštećenja izolatorskih članaka pokazuju da otklon električnog luka od izolatora nije dovoljno učinkovit.

Iskustva nakon ugradnje linijskih odvodnika prenapona pokazuju da LOP učinkovito štite izolaciju na stupu na kojem su postavljeni, neovisno o vrijednosti otpora uzemljenja, ali nemaju značajniji utjecaj na zaštitu izolacije na susjednim stupovima. Parcijalna ugradnja LOP na pojedinim, ugroženijim stupovima može imati pozitivan učinak na pokazatelje pouzdanosti, kao i troškove održavanja, ali samo ako se mjesta ugradnje određuju temeljem:

- iskustvenog praćenja ugroženosti stupova (izolacije) od atmosferskih prenapona,
- izmjerenih otpora uzemljenja stupova,

uz uvjet povećanja kritičnog preskočnog napona na izolaciji ostalih stupova demontažom zaštitnih iskrišta, odnosno njihovom zamjenom zaštitnim rogovima, koji imaju viši kritični preskočni napon.

Dosadašnja ugradnja odvodnika na DV 35 kV Trogir – Marina pokazala je pozitivne rezultate pa se zaključuje da nastavak njihove ugradnje ima opravdanja na stupovima s visokim otporom uzemljenja, a poglavito onima na kojima su uočena oštećenja izolatora. Na preostalim stupovima treba demontirati zaštitna regulacijska iskrišta i umjesto njih ugraditi zaštitne rove. Obzirom da na pozicijama stupova s otporom uzemljenja većim od 30  $\Omega$  jedino konfiguracija s ugrađenim odvodnicima u sve tri faze daje zadovoljavajuće rezultate, druge konfiguracije (jedan ili dva odvodnika) nema smisla primjenjivati. Osim utjecaja na samu izolaciju dalekovoda i pokazatelje pouzdanosti, smanjenje broja preskoka pozitivno će djelovati i na vijek trajanja prekidača u VP 35 kV Marina, na kojem je u proteklom razdoblju zabilježeno više kvarova.

Predlaže se proširenje daljnjeg praćenja utjecaja LOP na prenaponske značajke voda ugradnjom brojača prorada odvodnika te uključivanjem raspoloživih podataka iz sustava za lociranje munja.

## LITERATURA

- [1] S. Sadović, M. Puharić, "Studija ugradnje linijskih odvodnika prenapona - Pilot projekt", Enedis d.o.o. Zagreb, siječanj 2004.
- [2] M. Padelin, "Zaštita od groma", Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [3] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV, Službeni list br. 65/88
- [4] CIGRE SC 33 WG 01: "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines", CIGRE Technical brochure no 63, October 1991.
- [5] CIGRE WG C4.301: "Use of surge arresters for lightning protection of transmission lines", CIGRE Technical brochure no 440, December 2010.
- [6] D. Mišković, D. Gambaletta, D. Jakovčić, "Smanjenje utjecaja atmosferskih prenapona na sredjenaponskim nadzemnim vodovima ugradnjom linijskih odvodnika prenapona", 1. savjetovanje HO CIRED, Šibenik, 18. - 21. svibnja 2008., referat SO1-22
- [7] Tyco Electronics, "Bowthorpe EMP Transmission Line Arrester", tehnička brošura