

Prof. dr. sc. Mislav Majstrovic, dipl. ing.  
*Energetski institut "H. Požar", Zagreb*  
Petar Sarajčev, dipl. ing.  
*Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split*  
Mr. sc. Ivo Šerić, dipl. ing.  
*Veleučilište, Split*

## **NAPON NA SUHOJ ZONI SAMONOSIVOG OPTIČKOG KABELA OVJEŠENOG NA STUPOVE SREDNENAPONSKOG I VISOKONAPONSKOG VODA**

### **SAŽETAK**

Demonopolizacija u elektroenergetskom i telekomunikacijskom sektoru je svjetski proces koji ima svojih pozitivnih i negativnih reperkusija na život čovjeka, kako s tehničkog tako i s ekološkog aspekta. Jedan negativni aspekt je, među ostalim i otežano dobivanje novih ili proširenje postojećih koridora. Zbog toga se sve češće optički kabeli postavljaju na stupove visokonaponskih vodova. Ovi kabeli su samonosive konstrukcije bez metalnih dijelova i nalaze se u jakom električnom polju. U ovom radu se analiziraju naponi na suhim zonama onečišćenog plašta samonosivog optičkog kabela bez metalnih dijelova koji je ovješeno na stupove srednenaponskog i visokonaponskog voda. Ovi naponi mogu oštetiti optički kabel ili prouzročiti neke druge neželjene posljedice.

**Ključne riječi:** dalekovod, optički kabel, napon, suha zona, preskok

## **DRY-BAND VOLTAGE OF SELF-SUPPORTING FIBER OPTIC CABLE INSTALLED ON PYLONS OF MEDIUM AND HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINES**

### **SUMMARY**

Unbundling of vertically integrated company in power and telecommunication sectors is a worldwide process with positive and negative aspects. It is extremely hard to get new line corridors. All-dielectric self-supporting fiber optic cables are often installed on pylons of medium and high voltage overhead lines. The fiber optic cable is in the high voltage environment. Dry-band voltage of the polluted sheath's surface of the all-dielectric self-supporting fiber optic cable is analyzed in this paper. This voltage can cause dry-band arcing. The fiber optic cable can be damaged.

**Key words:** overhead line, fiber optic cable, voltage, dry-band, arc

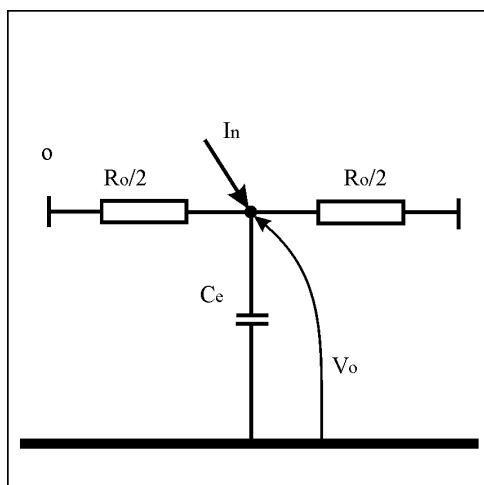
### **1. UVOD**

U novije vrijeme sve više se koriste telekomunikacijski vodovi s optičkim kabelima (bez metalnih dijelova) umjesto klasičnih vodova (vodovi s metalnim vodičima (paricama)). U tom slučaju izostaje poznati elektromagnetski utjecaj elektroenergetskih vodova na vodove telekomunikacija. Zbog toga se često telekomunikacijski vodovi postavljaju relativno blizu visokonaponskih. U nekim zemljama može ih se naći i na stupovima dalekovoda. Očekuje se da će u budućnosti ovakav način polaganja naći sve

veću primjenu zbog ograničenosti prostora i sve težeg dobivanja odgovarajućih koridora. Time će se povećati iskoristivost postojećih koridora, jer se isti koridor koristi za obje namjene. Današnja tehnološka dostignuća omogućavaju izradu optičkih kabela bez metalnih dijelova (engl.: All-Dielectric Self-Supporting - ADSS) koji, ovisno o dodatnom teretu, mogu savladati raspone od 800 do 1000 m. Posebna pozornost treba biti posvećena kod postavljanju ovih kabela na stupove srednjenaponskih i viskonaponskih dalekovoda, naročito u sredinama u kojima se javljaju prirodna i/ili umjetna onečišćenja ([2, 3, 4]). Onečišćenje plašta optičkog kabela nastaje taloženjem čestica nečistoće na njegovoj površini. Pri tom se formira jedna tanka naslaga. Ovisno o njoj strukturi i vremenskim uvjetima (vlažnosti zraka) ona postaje manje ili više vodljiva. Uzduž plašta mogu se pojaviti duži ili kraći segmenti koji nisu vodljivi. Oni se nazivaju suhim zonama. S obzirom da se nalaze u električnom polju viskonaponskog voda na njima će se javiti razlika potencijala. Ona može biti takvog iznosa da uzrokuje preskok preko pripadne suhe zone. Ovisno o lokalnim uvjetima, spomenuti se parcijalni preskoci mogu spontano ugasiti ili mogu prerasti u veći električni luk. U ovom radu će se analizirati elektrostatski utjecaj faznih vodiča srednjenaponskih i viskonaponskih dalekovoda na optički kabel kojem je onečišćen plašt. Fazni vodiči, dozemna užad i optički kabel su ovdješeni na istim stupovima. Prezentirat će se pripadna naponska naprežanja suhih zona uzduž plašta optičkog kabela.

## 2. MATEMATIČKI MODEL

Usljed kapacitivne sprege između faznih vodiča i optičkog kabela javlja se potencijal na onečišćenom plaštu optičkog kabela. Ovi kapaciteti se određuju po jedinici dužine voda pomoću pripadne matrice potencijalnih koeficijenata  $\mathbf{P}^{abcopq}$ . Dimenzija ove kvadratne matrice jednaka je ukupnom broju vodiča koji utječu na električno polje u prostoru dalekovoda (fazni vodiči (a,b,c), dozemna užad (p,q) i ADSS optički kabel s onečišćenim plaštem (o)). Iz ove matrice slijedi matrica potencijalnih koeficijenata ekvivalentnih faznih vodiča i optičkog kabela  $\mathbf{P}^{abco}$  dobivena metodom blok transformacije U ovoj matrici ne egzistiraju retci i stupci koji se odnose na dozemnu užad, ali je njihov utjecaj uključen. Invertiranjem ove matrice dobije se matrica kapacitivnih koeficijenata  $\mathbf{K}^{abco}$  iz koje slijede parcijalni kapaciteti. (međusobni i dozemni). U skladu s Millman-ovim teoremom utjecaj faznih vodiča na optički kabel s onečišćenim plaštem može se prikazati pomoću Thevenin-ovog ekvivalenta. Nadomjesna shema dionice optičkog kabela jedinične duljine prikazana je na slici 1. Pri tom je Thevenin-ov ekvivalent prikazan pomoću Norton-ovog ekvivalenta.



Slika 1. Nadomjesna shema jedinične duljine optičkog kabela s onečišćenim plaštem

Nepoznate veličine na slici određuju se pomoću slijedećih izraza:

$$I_n = j 2 \pi f C_{th} V_{th} \quad (1)$$

i

2

$$C_e = C_{th} + C_{oz} \quad (2)$$

Pri tom je:

$$V_{th} = \frac{V_a C_{ao} + V_b C_{bo} + V_c C_{co}}{C_{ao} + C_{bo} + C_{co}} \quad (3)$$

Odnosno:

$$C_{th} = C_{ao} + C_{bo} + C_{co} \quad (4)$$

gdje su:

- $V_a, V_b, V_c$  - fazni naponi (faza a, b i c), (V),
- $C_{ao}, C_{bo}, C_{co}$  - međusobni kapaciteti faza i optičkog kabela, (F/m),
- $C_{oz}$  - dozemni kapacitet optičkog kabela (F/m),
- $R_o$  - uzdužni radni otpor onečišćenog plašta optičkog kabela po jedinici duljine, ( $\Omega/m$ ).

Da bi dobili što vjerniju sliku o naponskom i strujnom stanju na onečišćenom plaštu optičkog kabela duž jednog raspona isti će se podijeliti na  $n$  dionica. Na plaštu optičkog kabela može postojati jedna ili više suhih zona. Na tim mjestima dolazi do porasta uzdužnog otpora (teoretski do beskonačne vrijednosti). Na slici 2. prikazana je nadomjesna shema optičkog kabela s onečišćenim plaštem duž jednog raspona s jednom suhom zonom. Pri tom je:

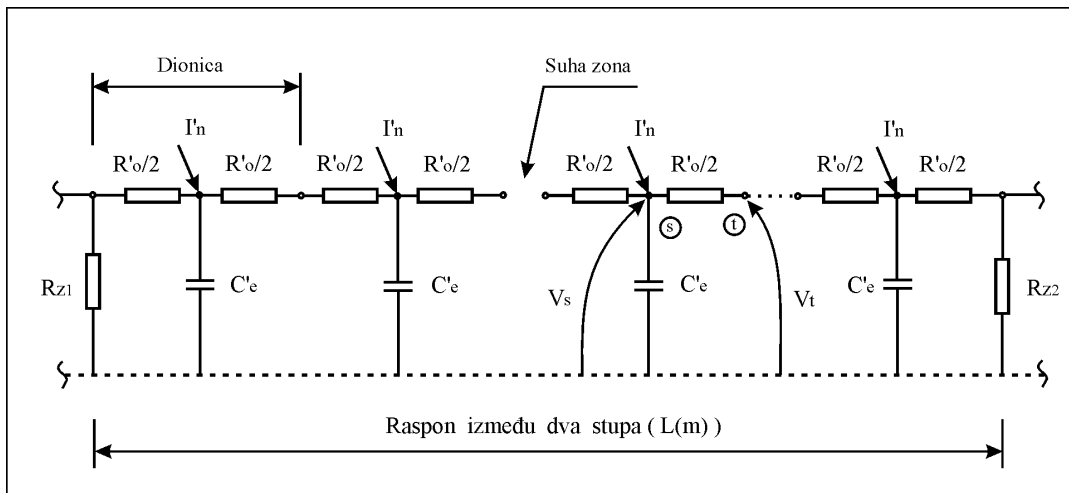
$$R'_o = R_o \cdot \ell_d \quad (5)$$

$$C'_e = C_e \cdot \ell_d \quad (6)$$

$$I'_n = I_n \cdot \ell_d \quad (7)$$

gdje je:

- $\ell_d$  - duljina dionice, (m),
- $R_{z1}$  - otpor između onečišćenog plašta optičkog kabela i referentne osi na lijevoj strani raspona, ( $\Omega$ ),
- $R_{z2}$  - otpor između onečišćenog plašta optičkog kabela i referentne osi na desnoj strani raspona, ( $\Omega$ ).



Slika 2. Nadomjesna shema jednog raspona

Raspodjela napona duž optičkog kabela određuje se slijedećom matričnom jednadžbom:

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{Y}_c^{-1} \cdot \mathbf{I}_c \quad (8)$$

gdje je:

$\mathbf{V}_c$  - vektor napona čvorova, (V),

$\mathbf{Y}_c$  - matrica vlastitih i međusobnih admitancija čvorova, (S),

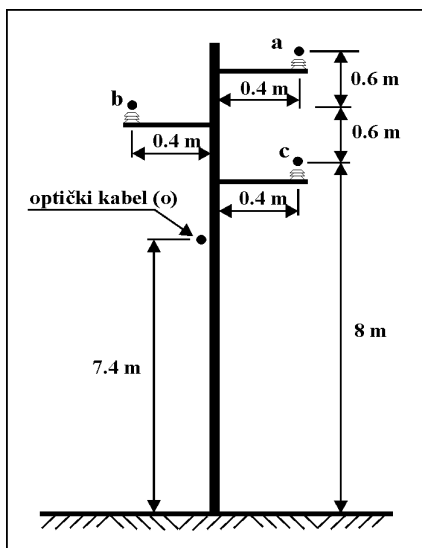
$\mathbf{I}_c$  - vektor struja čvorova, (A).

### 3. NAPON NA SUHIM ZONAMA SAMONOSIVOG OPTIČKOG KABELA

Analizirane su naponske prilike na suhim zonama koje se mogu pojaviti na onečišćenim plaštevima optičkih kabela bez metalnih djelova ovješeni na stupove dalekovoda srednjeg i visokog napona uzduž jednog raspona. Razmatrani su vodovi 10 kV, 35 kV, 110 kV, 220 kV i 400 kV.

#### - DV 10 kV

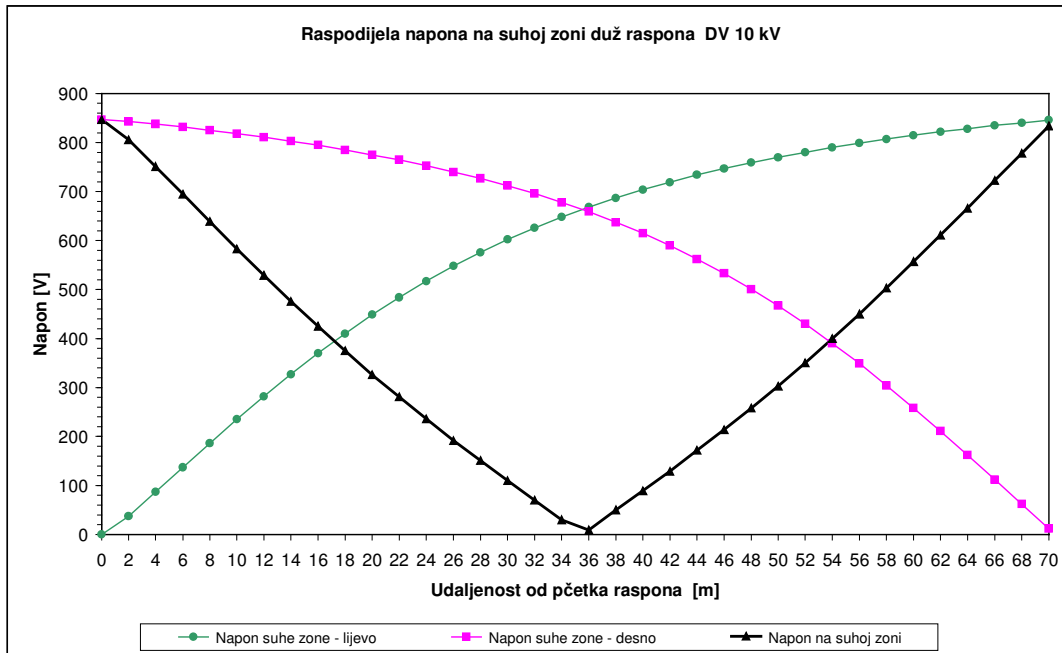
Geometrija drvenog stupa dana je na slici 3. Fazni vodiči su Al/Č 50/8 mm<sup>2</sup>. Polumjer faznog vodiča je 4.8 mm. Maksimalni provjes vodiča pri temperaturi okoline +40 °C je 0.72 m. Optički kabel je tipa mini-span ® 610 tvrtke AFL Telecommunication u izvedbi sa suhom jezgrom (eng.: dry core design) sa 144 optička vlakna. Vanjski polumjer kabela je 7.75 mm. Provjes mu je 0.69 m. Analizira se raspon duljine 70 m. Korak proračuna (dionica) je 0.5 m.



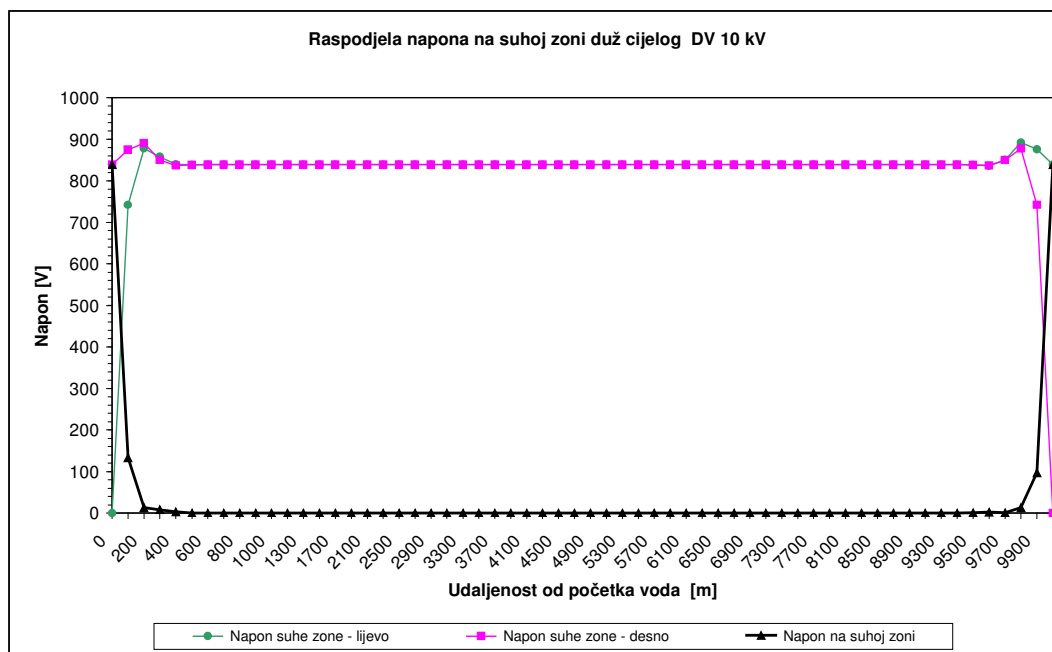
Slika 3. Prosječni stup DV 10 kV

Analiza napona na suhim zonama duž raspona je rađena s korakom 2 m, tj. pretpostavka je da suha zona nastaje na udaljenosti od početka raspona koja je jednaka multiplikatoru broja 2. Širina suhe zone može biti teoretski od desetinke milimetra pa na više. Pretpostavka je da plašt optičkog kabela ima razinu teškog onečišćenja. U skladu s tim radni otpor plašta je 100 k Ω/m.

Rezultati proračuna iznosa napona na suhim zonama dani su na slici 4. za jedan raspon (vod se sastoji od samo jednog raspona) i na slici 5. za cijelu duljinu voda koja je pretpostavljena da iznosi 10 km (vod ima 143 raspona). Dakle, suha zona je definirana lijevim i desnim krajem. U skladu s tim su naponi na tim krajevima nazvani "napon suhe zone - lijevo" i "napon suhe zone - desno". Iznos napona na suhoj zoni je jednak apsolutnoj razlici ovih dvaju napona. Analizirajući ove dvije slike uočava se da se najveći napon javlja na suhim zonama kada se one nalaze na početku ili kraju voda. U konkretnom slučaju on iznosi 847 V. To znači da su to potencijalna mjesta parcijalnih preskoka, ako je širina suhe zone dovoljno malena. Odnosno ova mjesta mogu biti potencijalno opasna po ljudski život, ako bi čovjek dirao plašt optičkog kabela s uvjerenjem da je on bezopasan, budući da je isti izveden bez metalnih djelova i nije galvanski vezan s vodičima pod naponom.



Slika 4. Napon na suhoj zoni duž DV 10 kV s jednim rasponom

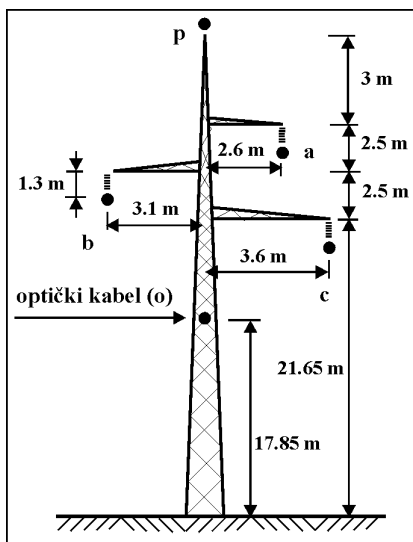


Slika 5. Napon na suhoj zoni duž DV 10 kV duljine 10 km

- **DV 35 kV**

Čelično rešetkasti stup DV 35 kV prikazan je na slici 6. Fazni vodiči su Al/Č 120/20 mm<sup>2</sup> polumjera 7.85 mm. Maksimalni provjes vodiča pri temperaturi okoline +40 °C je 3.87 m. Zaštitno užje je izvedeno s vodičem Č 50 mm<sup>2</sup> polumjera 4.5 mm. Njegov je maksimalni provjes pri temperaturi +40 °C 2.83 m. Otpor uzemljenja stupa je 10 Ω. Optički kabel je tipa ADSS medium design tvrtke AFL



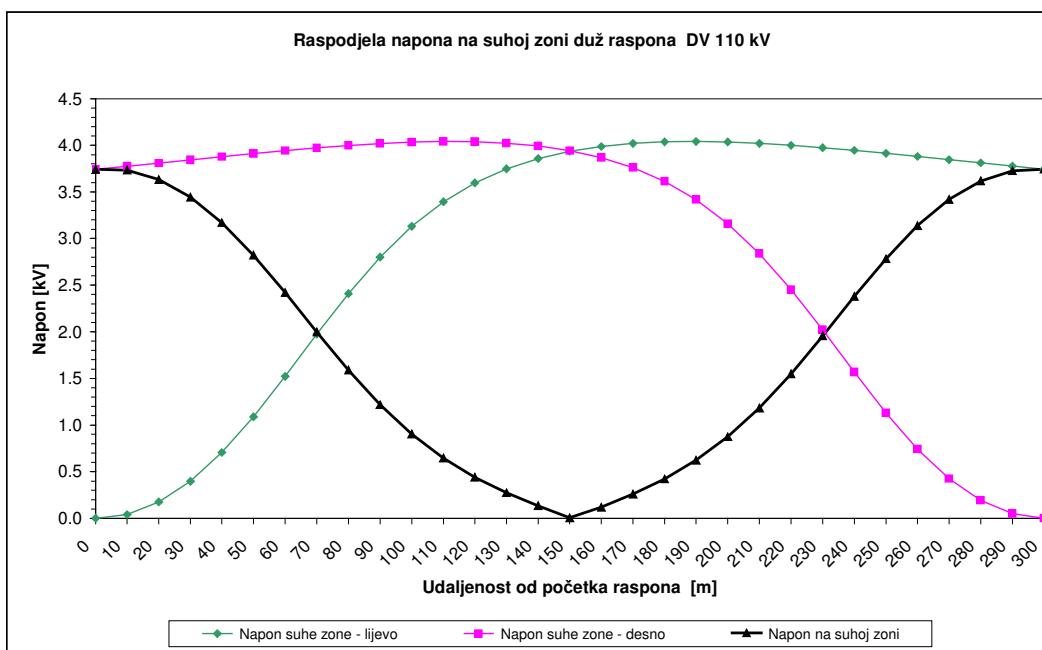


Slika 8. Stup DV 110 kV

AFL Telecommunication u izvedbi sa suhom jezgrom i dvostrukim plaštem iz polietilena. Ukupno ima 144 optička vlakna. Vanjski polumjer kabela je 11.3 mm. Maksimalni provjes mu je 3.05 m. U proračun je uzet raspon duljine 300 m. Korak proračuna (dionica) je 0.5 m.

Analiza napona na suhim zonama duž raspona je rađena s korakom 10 m, tj. pretpostavka je da suha zona nastaje na udaljenosti od početka raspona koja je jednaka multiplikatoru broja 10. Širina suhe zone je ista kao i u prethodnom primjeru. Plašt optičkog kabela ima razinu teškog onečišćenja, pa je uzeto da je radni otpor plašta jednak  $100 \text{ k } \Omega/\text{m}$ .

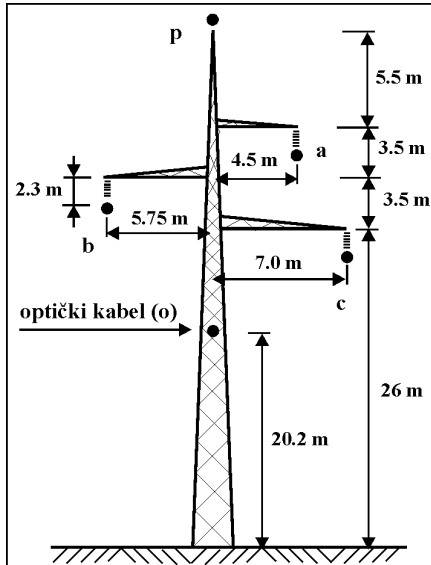
Za razmatrani raspon rezultati proračuna iznosa napona na suhim zonama dani su na slici 9. Analizirajući dobivene vrijednosti izračunatih napona uočava se da se najveći napon javlja na suhim zonama koje su locirane na početku ili kraju raspona. U konkretnom slučaju on iznosi 3.744 kV. To znači da su to potencijalna mjesta parcijalnih preskoka, ako je širina suhe zone dovoljno malena. Odnosno ova mjesta mogu biti potencijalno opasna po ljudski život.



Slika 9. Napon na suhoj zoni duž raspona DV 110 kV

#### - DV 220 kV

Čelično rešetkasti stup DV 220 kV prikazan je na slici 10. Fazni vodiči su Al/Č 360/57 mm<sup>2</sup>. Njihov polumjer je 13.3 mm. Maksimalni provjes vodiča pri temperaturi okoline +40 °C je 13.58 m. Zaštitno užje je izvedeno s vodičem AlMg1-E/Č 120/70 mm<sup>2</sup> polumjera 9.0 mm. Njegov je maksimalni provjes pri temperaturi +40 °C 12.49 m. Otpor uzemljenja stupa je 10 Ω. Optički kabel je tipa ADSS

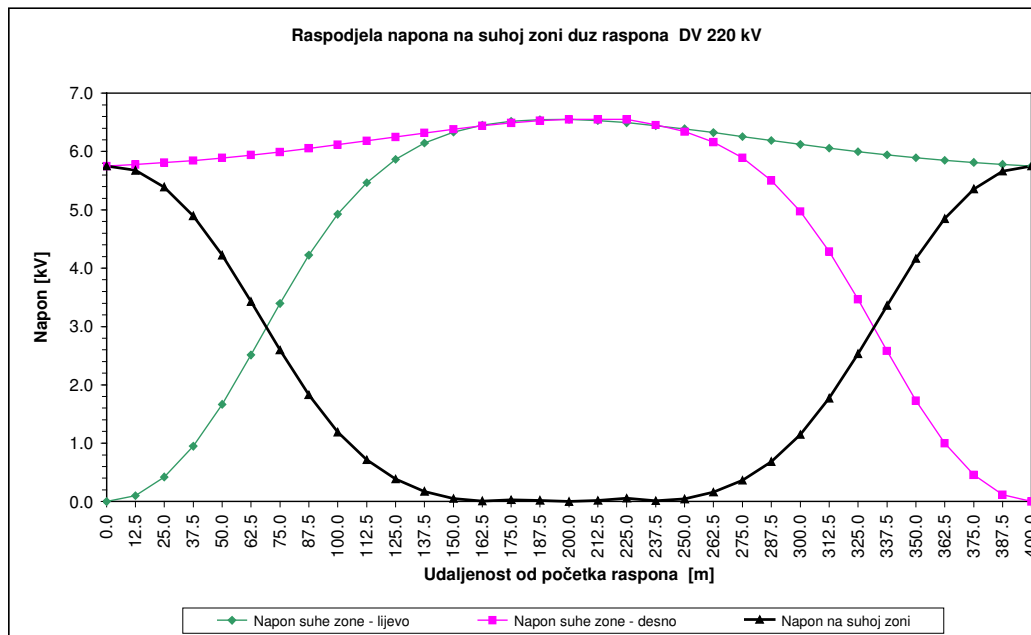


Slika 8. Stup DV 220 kV

transmission design tvrtke AFL Telecommunication u izvedbi sa suhom jezgrom i srednjim nosećim elementom (engl. central strength member) s dva plašta iz polietilena. Ukupno ima 144 optička vlakna. Vanjski polumjer kabela je 11.3 mm. Maksimalni provjes mu je 4.0 m (1.0 % raspona). Razmatran je raspon duljine 400 m. Korak proračuna (dionica) je 0.5 m.

Analiza napona na suhim zonama duž raspona je rađena s korakom 12.5 m, tj. pretpostavka je da suha zona nastaje na udaljenosti od početka raspona koja je jednaka multiplikatoru broja 12.5. Širina suhe zone je ista kao i u prethodnim primjerima. Plašt optičkog kabela ima razinu teškog onečišćenja, pa je uzeto da je radni otpor plašta jednak  $100 \text{ k } \Omega/\text{m}$ .

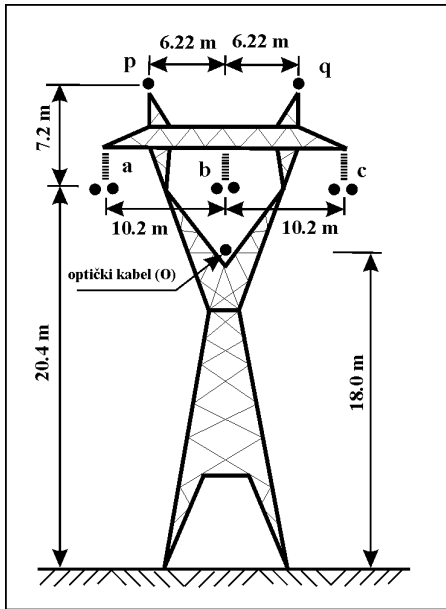
Rezultati proračuna iznosa napona na suhim zonama dani su na slici 11. za razmatrani raspon. Analizirajući dobivene rezultate izračunatih napona uočava se da se najveći napon javlja na suhim zonama koje su locirane na početku ili kraju raspona. U konkretnom slučaju on iznosi 5.753 kV. To znači da su to potencijalna mjesta parcijalnih preskoka, ako je širina suhe zone dovoljno malena. Odnosno ova mjesta mogu biti potencijalno opasna po ljudski život, ako bi čovjek dirao plašt optičkog kabela s uvjerenjem da je on bezopasan, budući da je isti izveden bez metalnih djelova i nije galvanski vezan s vodičima pod naponom.



Slika 11. Napon na suhoj zoni duž raspona DV 220 kV

#### - DV 400 kV

Na slici 12. prikazan je čelično rešetkasti stup DV 400 kV. Svaka faza ima dva vodiča u snopu. Fazni vodiči su  $\text{Al/C } 490/65 \text{ mm}^2$ . Ekvivalentni polumjer faznih vodiča je 78.23 mm. Provjes vodiča pri temperaturi okoline  $+40 \text{ }^\circ\text{C}$  je 11.8 m. Zaštitna užad su izvedena s vodičem  $\text{AWG } 126.1 \text{ mm}^2$

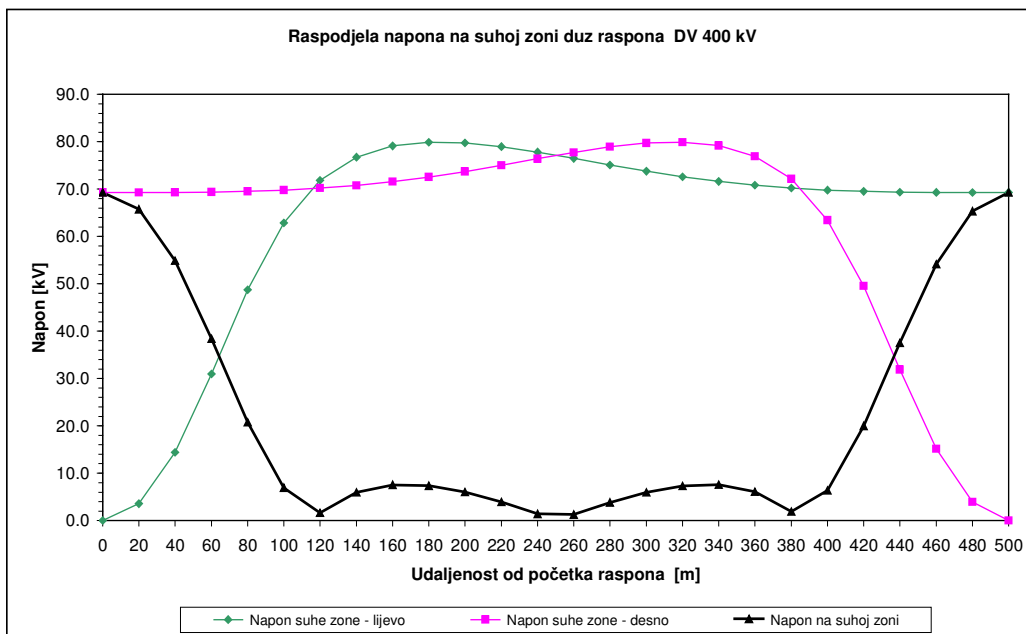


Slika 10. Stup DV 400 kV

polumjera 14.5 mm. Maksimalni provjes pri temperaturi +40 °C je 11.0 m. Otpor uzemljenja stupa je 10 Ω. Optički kabel je tipa ADSS transmission design tvrtke AFL Telecommunication u izvedbi sa suhom jezgrom i srednjim nosećim elementom (engl. central strenght member) s dva plašta iz polietilena. Ukupno ima 144 optička vlakna. Vanjski polumjer kabela je 11.3 mm. Maksimalni provjes mu je 5.0 m (1.0 % raspona). Razmatran je raspon duljine 500 m. Korak proračuna (dionica) je 0.5 m.

Analiza napona na suhim zonama duž raspona je rađena s korakom 20 m, tj. pretpostavka je da suha zona nastaje na udaljenosti od početka raspona koja je jednaka multiplikatoru broja 20. Širina suhe zone je ista kao i u prethodnom primjeru. Plašt optičkog kabela ima razinu teškog onečišćenja, pa je uzeto da je radni otpor plašta jednak 100 k Ω/m.

Iznosa napona na suhim zonama, dobiveni proračunom, prikazani su na slici 13. za razmatrani raspon. Analizirajući dobivene rezultate izračunatih napona uočava se da se najveći napon javlja na suhim zonama koje su locirane na početku ili kraju raspona. U konkretnom slučaju on iznosi 69.306 kV. Kako je već prije rečeno to su potencijalna mjesta parcijalnih preskoka, ako je širina suhe zone dovoljno malena. Odnosno ova mjesta mogu biti potencijalno opasna po ljudski život.



Slika 13. Napon na suhoj zoni duž raspona DV 400 kV

#### 4. ZAKLJUČAK

Najveće vrijednosti napona na suhim zonama, koje se mogu pojaviti na onečišćenoj površini optičkog kabela, javljaju se onda kada su suhe zone na početku ili kraju raspona. Ako je dobivena vrijednost napona na suhoj zoni veća od vrijednosti koja odgovara probojnoj čvrstoći zraka, doći će do njegovog proboja, odnosno do preskoka. Ovisno o lokalnim uvjetima, spomenuti se parcijalni preskoci mogu spontano ugasiti ili mogu prerasti u veći električni luk. Što u konačnici dovodi do smanjenja životnog vijeka optičkog kabela. Ova mjesta mogu biti potencijalno opasna po ljudski život, ako bi čovjek dirao plašt optičkog kabela s uvjerenjem da je on bezopasan, budući da je isti izveden bez metalnih dijelova i nije galvanski vezan s vodičima pod naponom.

#### LITERATURA

- [1] IEC T. C. 33: Guide for the section of insulators in respect of polluted condition, Geneve, 1983.
- [2] Karady G., Devarajan S., Tuominen M.: Novel Technique to Predict Dry-Band Arcing Failure of Fiber-Optic Cables Installed on High Voltage Lines, IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, 1999.
- [3] George G. Karady, Gyula Besztercey, Monty W. Tuominen: Corona Caused Deterioration of ADSS Fiber-optic Cables on High Voltage Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.4, October 1999.
- [4] DeWitt W., Neogi S., Risch B. G., Coat P., Ammons D., Karady G. and Madrid J.: High Voltage ADSS Reliability Modeling: Environmental and Climatological Effects on Advanced Jacket Material Selection, Proceedings of the 49<sup>th</sup> IEEE International Wire and Cable Symposium.
- [5] Ožegović M., Ožegović K.: Električne energetske mreže I, Sveučilište u Splitu, ISBN: 953-6114-09-7, Split, 1996.
- [6] Ožegović M., Ožegović K.: Električne energetske mreže II, Sveučilište u Splitu, ISBN: 953-6114-11-9, Split, 1997.
- [7] Das, J. C.: Power System Analysis, Marcel Dekker, ISBN: 0-8247-0737-0, New York, 2002