

Načrtovanje polizoliranih nadzemnih vodov za uporabo pri najvišjih napetostih

Žiga Voršič¹, Jože Pihler², Janez Ribič²

1 SODO sistemski operater distribucijskega omrežja z električno energijo, d. o. o.

*2 Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
ziga.vorsic@sodo.si*

Povzetek: Polizolirani nadzemni vodi so namenjeni zamenjavi obstoječih vodov z golimi vodniki, še zlasti v gozdnih predelih, kjer je velika nevarnost padca dreves na vodnike in nevarnost povečane obtežbe zaradi oprijema snega in ledu na vodnik. Predlagani novi polizolirani nadzemni vodi so sestavljeni iz poliuretanskega plašča, aluminijastega vodnika in jedra iz karbonskih vlaken. V nadaljevanju bo uporabljen izraz polizolirani vodnik, saj je vodnik izoliran, vendar njegova izolacija ni enakovredna izolaciji kabla. Razlogi za uporabo polizoliranih vodnikov so večja varnost, ekologija (manjši posegi v prostor, predvsem manjši poseki v gozdnatih predelih), večja obratovalna zanesljivost in nižji obratovalni stroški. Članek obravnava načrtovanje novega polizoliranega vodnika za najvišje napetosti. Snovalci elektroenergetskega sistema Republike Slovenije težijo k zmanjšanju števila napetostnih nivojev in razmišljajo o ohranitvi tras 220 kV daljnovodov in prehod na 400 kV. Članek obravnava tudi izračune povosov izbranega novega polizoliranega vodnika in primerjavo mehanskih karakteristik in povosov z obstoječim vodnikom Al/Fe. Na podlagi analize mehanskega dimenzioniranja bo utemeljena smiselnost nadgradnje obstoječega 220 kV daljnovoda na 400 kV nivo v smislu povosov. Glede na rezultate raziskave je razvidno, da bi lahko polizolirani vodnik omogočil ohranitev tras 220 kV daljnovodov in prehod na 400 kV.

Ključne besede: polizolirani vodnik, poliuretan, aluminij, ogljikova vlakna, mehanske lastnosti vodnikov

Designing covered conductors to be used for the highest voltage levels

A new design of the covered conductor is proposed. It consists of a carbon fiber core instead of the currently used steel core. Thus reduced weight allows for a thickest conductor insulation. To withstand the electric - field strength, the conductor thickness of insulation, i.e. the conductor geometry, were determined and its mechanical properties and warping were checked. Numerical verification was successful. The related data are presented.

The proposed covered is made of two dielectrics, i.e. the insulation cover and air. The covered conductor consists of a conductor which is a metal electrode (a cable) and a covering layer made of a dielectric with a greater dielectric constant and higher breakdown voltage and a dielectric with a lower dielectric constant, i.e. the surrounding air. For safety reasons, there should be no live work performed despite the thickened insulation.

The proposed conductor is named Pu/Al/C 2150/490/65 mm². 2150 mm² stands for the cross section of the polyurethane cover, 490 mm² for the aluminium and 65 mm² for the carbon - fiber core. The thickened insulation assures that the electric - field strength on the edge of the insulation does not exceed

the critical electric - field strength limit of the air. Installed on a typical 220 kV transmission tower, such conductor meets the electric - load specifications. Matching between the results obtained with the simplified analytical calculations of the electric - field strength on the edge of the insulation and those obtained with the finite - element method encourages further research, both theoretical and practical.

1 UVOD

Najbolj razširjena izvedba polizoliranih vodnikov je sestavljena iz trdne kompaktno aluminijaste zlitine vodnika z voodpornim plaščem iz omreženega polietilena (XLPE). Uporaba je dokazala, da je takšen polizolirani vodnik zanesljiv v zelo slabih razmerah in da bo vzdržal, npr. padla drevesa več dni, mehansko in električno.

Zaradi zunanega plašča polizolirani vodniki niso tako ranljivi pri medsebojnem dotiku ali ob dotiku z vejevjem dreves. To omogoča, da se razmik med fazami polizoliranega vodnika zmanjša na samo tretjino razmika med fazami neizoliranega nadzemnega voda. Trasa nadzemnega voda v gozdnatem območju je lahko manjša kot v območju z neizoliranimi nadzemnimi vodi.

Najprej so začeli nadomeščati gole vodnike s polizoliranimi vodniki v Združenih državah Amerike. V

zgodnjih šestdesetih letih so jih uporabili pri gradnji daljnovoda v Pensilvaniji. Zdaj ima Pensilvanija več kot 10.000 km SN omrežij s polizoliranimi vodniki [1].

V Evropi so polizolirane vodnike (PIV) začeli uporabljati leta 1976 v Skandinaviji, kjer je njihova uporaba tudi najbolj razširjena. Imajo namreč zgrajenih že več tisoč kilometrov daljnovodov z različnimi tipi PIV.

Na Finskem se je razvoj sistemov polizoliranih vodnikov začel razvijati v zgodnjih sedemdesetih. Gonilna sila razvoja je bila možnost izboljšanja zanesljivosti in varnosti neizoliranih nadzemnih žic z uporabo izolacijskega plašča prek neizoliranega vodnika. Končni izdelek so sistemi polizoliranih vodnikov, ki se danes uporabljajo v številnih evropskih državah, kot so Finska, Velika Britanija, Italija, Poljska, Češka, baltske države idr. [2], [3].

Skoraj sočasno so polizolirane vodnike začeli uvajati v elektrogospodarstvu Avstralije. Leta 1980 so jih prepovedali zaradi korozije, ki je nastala na mestu vpetja vodnika na izolator. Njihov sistem je namreč predvideval snemanje izolacije na mestu vpetja na izolator. Pozneje so zaradi velikih požarov leta 1983 zopet začeli uporabljati PIV, s to razliko, da izolacije niso snemali.

Za začetek uporabe polizoliranih vodnikov v Sloveniji štejemo leto 1992 (Elektro Gorenjska), leto pozneje, leta 1993, je Elektro Ljubljana na podlagi finskih izkušenj zgradil 20 kV daljnovod Rob–Purkače. V drugem poglavju bomo obravnavali izbiro izolacije vodnika na podlagi analitičnega izračuna električnega polja in podanih električnih zahtev za izolacijo polizoliranega vodnika. Tretje poglavje zajema izračun povesa izbranega polizoliranega vodnika in primerjavo mehanskih lastnosti in izračunanih povesov z obstoječim Al/Fe vodnikom. V sklepu se potrди smiselnost nadgradnje 220 kV daljnovoda na 400 kV nivo z novim polizoliranim vodnikom.

2 OBLIKOVANJE POLIZOLIRANEGA VODNIKA

Snovalci elektroenergetskega sistema republike Slovenije težijo k zmanjšanju števila napetostnih nivojev. V prihodnosti bi naj imeli samo štiri: 0,4; 20; 110 in 400 kV. Na srednji napetosti je napetostni nivo 10 kV prisoten samo še v večjih mestih, večji problem je opustitev 220 kV napetostnega nivoja v prenosnem omrežju. Snovalci razmišljajo o ohranitvi tras 220 kV daljnovodov in prehod na 400 kV [4]. Na videz najpreprostejša rešitev je postavitve novih nadzemnih vodov, kar pa zahteva veliko denarja in nova soglasja. Uporaba predlaganega novega polizoliranega vodnika je finančno ugodnejša od postavitve novih nadzemnih vodov.

Kot osnovo za oblikovanje novega polizoliranega vodnika za najvišje napetosti smo uporabili izračun električne poljske jakosti, ki na robu izolacije ne sme preseči dielektrične trdnosti zraka (korona), dodatna omejitev pa je bila zračna razdalja do sosednjih kovinskih delov [5].

V električnih poljih v homogenih dielektrikih s konstantno dielektričnostjo ϵ in specifično (svojsko) prevodnostjo γ obe snovni lastnosti vplivata na obliko polja.

Pri podani električni poljski jakosti \vec{E} sta gostota električnega pretoka

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (1)$$

in gostota električnega toka

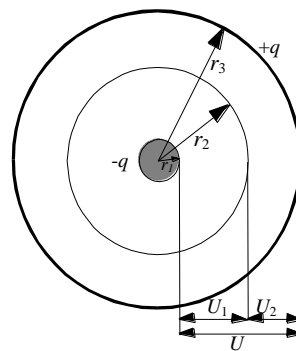
$$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (2)$$

odvisni od obeh snovnih lastnosti.

Sliki električnega polja in porazdelitev potencialov v električnem polju z nehomogenimi ali slojnimi dielektriki se močno razlikujeta od električnih polj v homogenih dielektrikih. V ravninskih radialnih poljih električna poljska jakost od notranje elektrode navzven pada. Zato je smiselno uporabiti slojne dielektrike različnih dielektričnosti in električnih prebojnih trdnosti. Debeline posameznih slojev projektiramo tako, da je električna obremenitev posameznih slojev optimalna.

V nehomogenih elektrostaticnih poljih uporabimo zaporedno namestitve dielektrikov zato, da območja velikih električnih poljskih jakosti razbremenimo in električno polje izrinemo v območja manjših električnih poljskih jakosti.

Dvoslojni enožilni kabel (slika 2.1) je tipičen primer uporabe dvoslojnih dielektrikov. Napetost med žilo in plaščem se razdeli na obe plasti dielektrika:

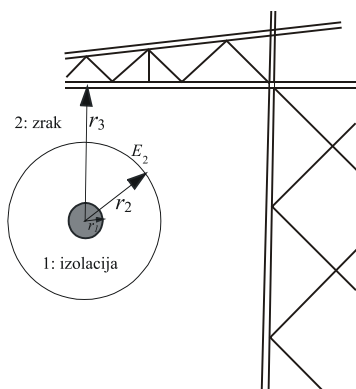


Slika 2.1: Dvoslojni enožilni kabel

Če poznamo razliko potencialov med vodnikom in plaščem, izračunamo napetosti na obeh plasteh ter naboj. Največjo električno poljsko jakost v snovi dobimo na najmanjšem polmeru.

Polizolirani vodniki [6] in električna poljska jakost

Kot dvoslojni izolirani vodnik lahko obravnavamo tudi polizolirani vodnik (slika 2.2).



Slika 2.2: Koaksialna valjna razporeditev delne izolacije

Oznake na sliki pomenijo:

- r_1 – polmer jedra
- r_2 – polmer plašča
- r_3 – polmer izolacije
- E_2 – električna poljska jakost v zraku

V tem primeru je notranja elektroda izolirana, prostor do zunanje elektrode pa je zrak. Izolacija ima bistveno višjo prebojno trdnost kot zrak, zato ni pomembno, da je električna poljska jakost majhna na notranji elektrodi. Pomembnejše je, da je poljska jakost v zraku najmanjša: $E_{zr} = E_2(r_2)$.

Ob upoštevanju $\epsilon_{r1} = \epsilon_r$ in $\epsilon_{r2} = 1$, dobimo:

$$E_2 = \frac{U}{r_2 \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\epsilon_r} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{1} \right)} \quad (3)$$

Najmanjšo poljsko jakost E_2 v odvisnosti od r_2 dobimo, ko je imenovalac v enačbi (3) največji. [7] Poiščemo največjo vrednost imenovalca in dobimo optimalni polmer,

$$r_{2opt} = r_1 \cdot \frac{1}{e} \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1}}, \quad (4)$$

pri katerem je električna poljska jakost v zraku najmanjša

$$E_2 = E_{2min} = \frac{U \cdot e}{r_1 \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)} \quad (5)$$

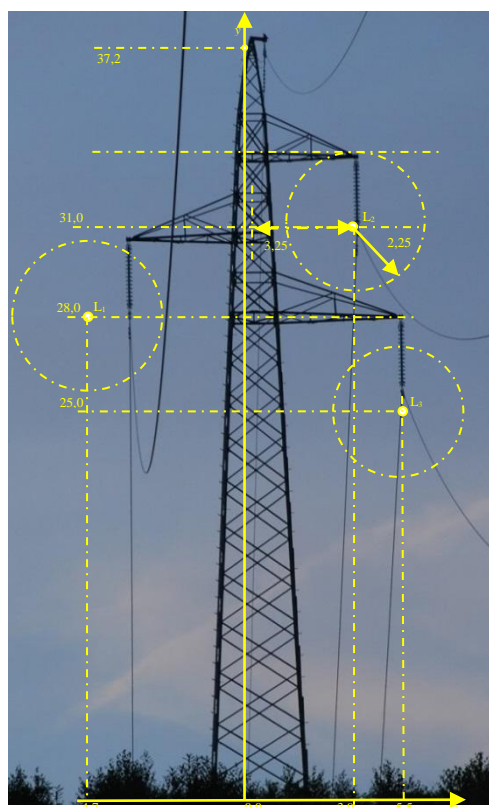
S stebrom, verigo kapastih izolatorjev ($l = 2,25$ m) in vodnikom (490/65 Al/Fe, $r = 15,3$ mm) obstoječega 220 kV nadzemnega voda (slika 2.3) je določena geometrija, tako je edina spremenljivka relativna dielektričnost. Če naredimo račun za relativno dielektričnost poliuretana ($\epsilon_r = 3,4$), dobimo optimalni polmer, pri katerem je električna poljska jakost v zraku najmanjša:

$$r_{2opt} = r_1 \cdot \frac{1}{e} \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1}} = 0,0153 \cdot \frac{1}{2,71828} \cdot \left(\frac{2,25}{0,0153} \right)^{\frac{3,4}{3,4 - 1}} = 6,62 \text{ m},$$

kar je nerealno. Na sliki 2.4 je podana električna poljska jakost skladno z enačbo 5 v odvisnosti od debeline izolacije.

Če vstavimo za polmer vodnika polmer trenutno uporabljanega vodnika pri 220 kV nadzemnih vodih (15,3 mm), za relativno dielektrično konstanto $\epsilon_r = 3,4$, vrednost, ki je običajna pri polizoliranih vodnikih na 110 kV nivojih in debelino izolacije 15 mm ter napetost 400 kV, dobimo:

$$E_{zrak} = \frac{U}{r_2 \cdot \epsilon_{r2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} = 2,39 \text{ MV/m}$$

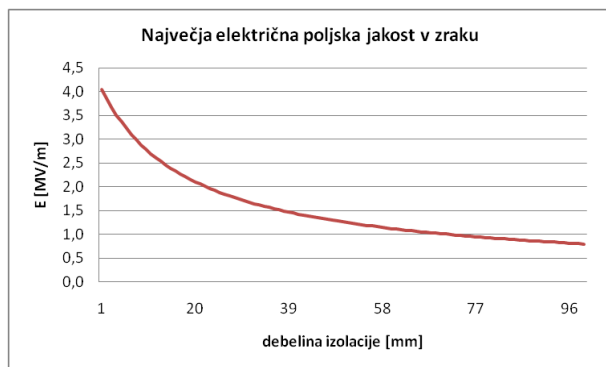


Slika 2.3: Skica tipičnega stebra 220 kV nadzemnega voda

Vrednost je manjša kot prebojna trdnost za zrak pri normalnih pogojih (3 MV/m).

Glede na rezultate raziskave ugotavljamo, da bi lahko polizolirani vodnik omogočil ohranitev tras 220 kV daljnovodov in prehod na 400 kV, še več, da ne bi preveč povečali teže polizoliranega vodnika, se odločimo za najmanjšo debelino izolacije, ki še izpolnjuje vse pogoje – to je 15 mm.

Predlagamo vodnik z jedrom iz karbona (slika 2.5), prevodno plast iz aluminija in izolacijo iz poliuretana. Glede na običajno označevanje vodnikov s prerezi poimenujemo predlagani vodnik Pu/Al/C 2150/495/65 mm². Pri tem je 2150 mm² prerez poliuretanskega plašča, 495 mm² prerez aluminija in 65 mm² prerez jedra iz karbonskih vlaken (slika 2.6).

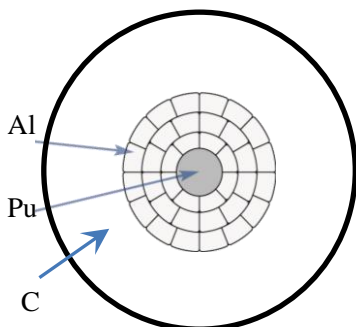


Slika 2.4: Največja električna poljska jakost v zraku



Slika 2.5: Klasični Al/Fe vodnik in moderni s karbonskim jedrom

V nadaljevanju bomo obravnavali mehanske lastnosti na novo izbranega vodnika in preverjali, ali ta vodnik ustreza zahtevam po maksimalnem povesu na znanem daljnovodu.



Slika 2.6: Prerez predlaganega polizoliranega vodnika

3 IZRAČUN POVESA ZA Pu/Al/C 2150/490/65

Obravnavani novi vodnik je bil izbran na podlagi izračuna električne poljske jakosti. Želimo vedeti še, ali ustreza vsem mehanskim zahtevam. V tem poglavju bomo obravnavali mehanske lastnosti vodnika Pu/Al/C izbranega prereza in jih primerjali z vodnikom Al/Fe. Na podlagi projektne dokumentacije že zgrajenega daljnovoda bomo izračunali povese za novi vodnik Pu/Al/C. Te izračunane povese bomo potem primerjali z izračunanimi povesi za vodnik Al/Fe pri različnih dolžinah in naklonih razpetin. Na podlagi te analize bomo dokazali, da novi vodnik ustreza danim zahtevam po maksimalnih povasih po [8]. Na podlagi teh ugotovitev bo mogoče trditi, da je omogočen prehod daljnovoda 220 kV na napetost 400 kV le z zamenjavo obstoječih vodnikov vrste Al/Fe s prerezom 490/65 mm² z novimi vodniki Pu/Al/C izbranega prereza.

3.1 Vhodni podatki

Na podlagi znanih podatkov o Al/Fe vodnikih prereza 490/65 mm² iz standarda [13] in postopka za izračun mehanskih spremenljivk v [12] smo izbrali in izračunali mehanske spremenljivke za vodnike obstoječega 220 kV daljnovoda. Na podoben način smo določili tudi spremenljivke za novi vodnik Pu/Al/C. Kot osnovo smo vzeli mehanske lastnosti znanega vodnika Al/C (slika 2.5). Izolacija Pu nima nosilnih mehanskih lastnosti, zato je lahko osnova jedro Al/C. Vsi osnovni mehanski podatki za obstoječi daljnovodni vodnik Al/Fe in novo vrsto vodnika Pu/Al/C so prikazani v preglednici 3.1.

Tabela 3.1: Prikaz osnovnih mehanskih lastnosti obravnavanih obeh vrst daljnovodnih vodnikov

Razlaga	Al/Fe 490/65 mm ²	Pu/Al/Fe 2160/490/65 mm ²
gostota vodnika	$\rho = 3360 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1624,9 \text{ kg/m}^3$
modul elast.	$E = 70 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$	$E = 74,72 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$
lin. temp. raz.	$\alpha = 19,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$	$\alpha = 16,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
spec. teža vod.	$p = 32,96 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} \cdot \text{mm}^2$	$p = 15,94 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} \cdot \text{mm}^2$
skup. prerez vod.	$A_{sk} = 553,9 \text{ mm}^2$	$A_{sk} = 2710 \text{ mm}^2$
teža vod. na m	$g = p \cdot A_{sk} = 18,26 \text{ N/m}$	$g = 43,20 \text{ N/m}$
premer vod.	$d_v = 30,6 \text{ mm}$	$d_v = 60,6 \text{ mm}$
dod. zimska teža	$g_d = 1,8 \cdot (d_v)^{1/2} = 9,96 \text{ N/m}$	$g_d = 14,01 \text{ N/m}$
dod. zimska obr.	$\Delta p = 17,98 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} \cdot \text{mm}^2$	$\Delta p = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} \cdot \text{mm}^2$

Primerjava mehanskih lastnosti obeh vrst vodnikov v tabeli 3.1 pokaže, da ima Al/Fe daljnovodni vodnik večjo gostoto ρ kot primerljivi novi vodnik enakega efektivnega prereza na račun jeklenega jedra, ki ima nosilno funkcijo. V novi vrsti vodnika ga nadomestijo ogljikova vlakna. Novi vodnik ima tudi manjši temperaturni razteznostni koeficient α , a primerljiv modul elastičnosti E . Zaradi velikega prereza ima novi vodnik majhno specifično težo p . Vse to skupaj pomeni, da jedro iz ogljikovih vlaken zagotavlja, da se novi vodnik pri visokih temperaturah manj razteza, posledično pri teh temperaturah nastajajo tudi manjši povesi.

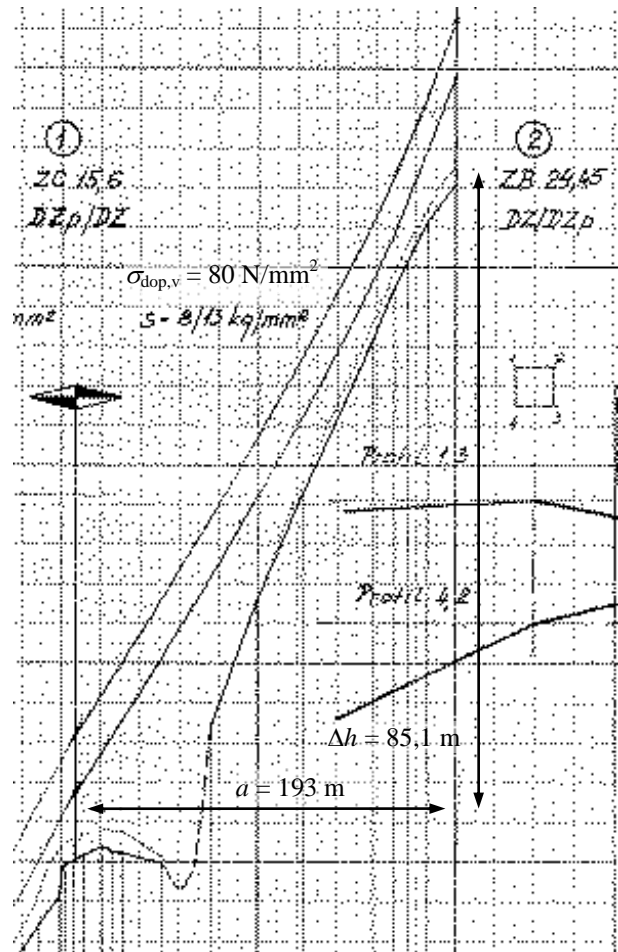
Mehanske lastnosti vodov so vhodni podatek za izračun povesa. Drugi sklop so geometrijski podatki o daljnovodni razpetini. Za izračune povesov smo izbrali obstoječi daljnovod napetosti 220 kV z različnimi razpetinami in nakloni razpetine. Osnovni podatki o izbranih stojnih mestih za izračun, razpetini in naklonu razpetine so prikazani v tabeli 3.2.

Tabela 3.2: Geometrijski podatki o izbranih razpetinah

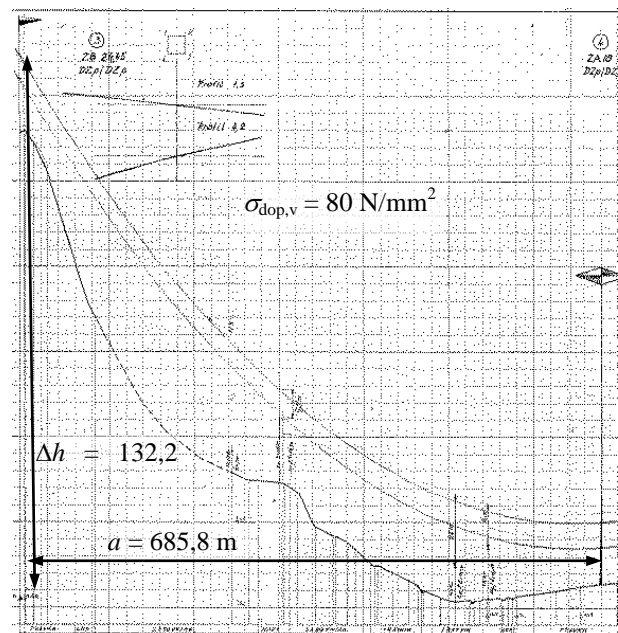
Primer razpetine	a)	b)	c)	d)
stojna mesta	1-2	3-4	21-22	32-33
razpetina a [m]	193	685,8	408	275,3
višinska razlika Δh [m]	85,1	132,2	4	2,16

Podrobnejše informacije o geometriji obesišč vodov in terenu lahko pridobimo iz projektne literature o povesih vodov v celotni trasi daljnovoda. Slike 3.1 a), b), c) in d) prikazujejo posamezne dele razpetin. Sliki 3.1 a) in 3.1 b) prikazujeta velik naklon razpetine in majhno razpetino daljnovoda. Po drugi strani pa sliki 3.1 c) in d) prikazujeta velike razpetine med stojnimi mesti z majhnimi nakloni razpetine. Osnovni podatek o daljnovodu je tudi maksimalna dovoljena natezna napetost vpetja vodnikov, ki po slikah 3.1 a) do 3.1 d) v vseh primerih znaša $\sigma_{dop,v} = 80 \text{ N/mm}^2$.

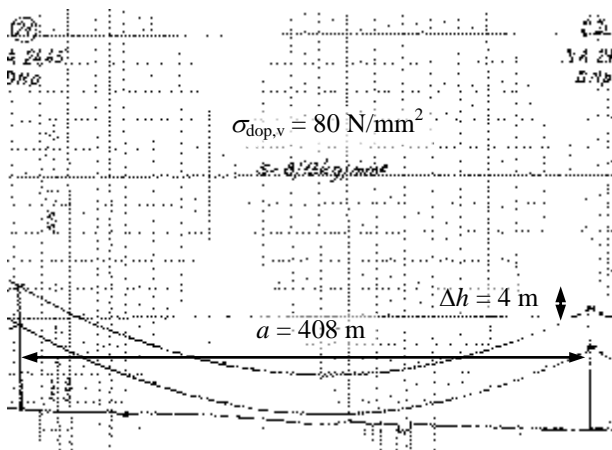
Pomemben podatek za projektiranje daljnovodov oziroma za računanje maksimalnih povesov je tudi dodatna žledna obremenitev k_d , ki znaša po projektni literaturi in po žledni karti $k_d = 1,6$. Ta koeficient pomeni, da se statistično gledano na tem območju (omenjenem daljnovodu) lahko nabere za 60 % več ledu na vodih, kot je izračunana normalna zimska žledna obremenitev k_d , (tabele 3.1)



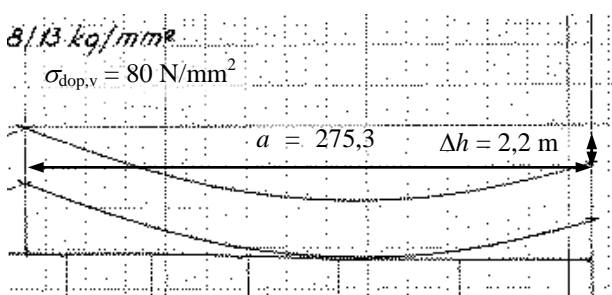
Slika 3.1 a): Razpetina med stojnima mestoma 1 in 2 dolžina 193 m, višinska razlika 85,1 m



Slika 3.1 b): Razpetina med stojnima mestoma 3 in 4



Slika 3.1 c): Razpentina med stojnima mestoma 21 in 22



Slika 3.1 d): Razpentina med stojnima mestoma 32 in 33

3.2 Rezultati izračunov

Programsko kodo v programskem paketu Matlab smo dopolnili tako, da na podlagi geometrijskih podatkov iz slik 3.1 a) do d) digitaliziramo prečni profil terena v z-osi vzdolž trase daljnovođa za vse primere. Določimo še natančne koordinate obesišč spodnjih faz. Na podlagi vseh teh vhodnih podatkov smo izračunali povese za vse štiri razpentine daljnovođa z obstoječim vodom Al/Fe 490/65 mm². Da smo se približali povese po tistih na slikah 3.1, smo optimizirali določene vhodne podatke v model ($\sigma_{dop,opt} = 87 \text{ N/mm}^2$). Potem smo dobili digitalni profil obstoječega daljnovođa.

Nato smo v programski kodi zamenjali podatke za obstoječi vodnik Al/Fe z novim vodnikom Pu/Al/C. Ohranili smo podatke za dopustno natezno napetost, dodatno žledno obremenitev in geometrijske podatke obesišč daljnovođa. Ohranjanje podatka za $\sigma_{dop,opt}$ je ključno za nadgradnjo in zamenjavo vodnikov. S tem se lahko ohranijo obstoječi stebri (predvsem zatezni) zaradi statične stabilnosti konzol ob napenjanju vodnikov. Programsko kodo smo dopolnili tako, da lahko po izračunih vrednosti natezne napetosti in specifične obremenitve voda izračunamo povese voda kjerkoli med obesiščema na razpentini. Slika 3.3 prikazuje primer formatiranega izpisa karakterističnih rezultatov izračunov povese veržnice za primer izračuna za razpentino d) (po sliki 3.1 d)) z novim vodnikom.

I Z R A Č U N P O V E S A Šoštanj Podlog razpentina 32-33		
vrv Pu/Al/C 2150/490/65		
modul elastičnosti vrvi	7,472E+04	N/mm ²
koefficient linearnega raztezanja vrvi	1,62E-05	1/°C
največja dopustna natezna napetost	87,36	N/mm ²
dopustna natezna napetost	69,89	N/mm ²
specifična teža vrvi	0.01594	N/mm ²
specifična teža vrvi z dodatnim bremenom	0.024255	N/mm ²
Kritična razpentina	291,925	m
Ker je kritična razpentina večja od nastopi največja natezna napetost pri -20 °C brez dodatnega zimskega bremena	275,300	m
natezna napetost pri -20°C brez dodatnega bremena	69,889	N/mm ²
največja natezna napetost	69,943	N/mm ²
največja dopustna natezna napetost	87,362	N/mm ²
poves pri -20°C brez dodatnega bremena	2,161	m
Kritična temperatura	14,797	°C
Ker je kritična temperatura manjša od nastopi največji poves pri temperaturi +40°C.	40,000	°C
natezna napetost pri 40°C	34,722	N/mm ²
poves pri 40°C	4,351	m

Slika 3.3: Primer izpisa računalniškega programa za razpentino d) v programskem paketu Matlab

Tabela 3.3 strnjeno prikazuje rezultate mehanskih izračunov povese veržnice za vse štiri obravnavane razpentine daljnovođa Iz table 3.3 je razvidno, da velikost razpentine a določa, katera izhodiščna stanja vzamemo za položajno enačbo (-20 °C pri ali pri -5 °C z dodatnim zimskim bremenom). Kritična razpentina a_{kr} je vseskozi enaka, saj se žledna obremenitev k_d ne spreminja, prav tako ne dopustna natezna napetost σ_{dop} . Pri vseh primerih izračunov je kritična temperatura enaka in nižja od +40 °C, kar pomeni, da bo največji poves nastopil vedno pri +40 °C, ne pri žledni obremenitvi.

3.3 Primerjava novega vodnika z vodniki Al/Fe 490/65

Ker iz table 3.3 vidimo, da se pri nobenem izračunu ne pojavi maksimalen poves pri -5 °C z dodatnim zimskim bremenom, smo izračunali spremenljivke za povese veržnice pri temperaturi +60 °C za obe vrsti vodnikov in vse štiri razpentine a), b), c) in d). Razlog za te izračune je analiza primerjave izračunanih povesev in uporabe obstoječega vodnika Al/Fe 490/65 mm² in novega vodnika Pu/Al/Fe 2150/490/65 mm².

Tabela 3.3: Karakteristični podatki za izbrane razpentine

primer razpentine	a)	b)	c)	d)
a_{kr} [m]	291,9	291,9	291,9	291,9
a [m]	193	685,8	408	275,3
$\sigma_{g,0}$ [N/mm ²]	69,89 _{-20°C}	69,89 _{-5°C}	69,89 _{-5°C}	69,89 _{-20°C}
Poves f_g [m]	1,16 _{-20°C}	20,80 _{-5°C}	7,22 _{-5°C}	2,16 _{-20°C}
g_{kr} [°C]	14,79	14,79	14,79	14,79
$\sigma_{+40°C}$ [N/mm ²]	29,31	42,79	39,11	34,72
$f_{+40°C}$ [m]	2,77	22,34	8,49	4,35
$\sigma_{g,max}$ [N/mm ²]	77,08 _{-20°C}	73,28 _{-20°C}	70,12 _{-20°C}	69,94 _{-20°C}

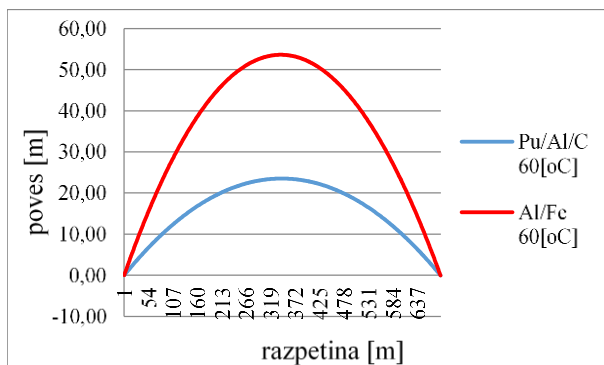
Poves $f_{x,g}$ v poljubni točki med obesiščema razpetine in pri poljubni temperaturi lahko izračunamo po enačbi (6) [12]:

$$f(x, g) = \frac{p_g \cdot b_x \cdot (a_{sk} - b_x)}{2 \cdot \sigma_g} \text{ [m]}, \quad (6)$$

pri čemer je σ_g natezna napetost vodnika pri neki temperaturi g , in specifično obremenitev vodnika p_g pri neki temperaturi g . Spremenljivka b_x je horizontalna oddaljenost od višje ležečega obesišča. Če je višje ležeče obesišče na levi strani, potem je $b_x = x$, če je na desni strani, pa velja relacija $b_x = a - x$. Spremenljivka a_{sk} je skupna razpetina in je vsota prave razpetine a in navidezne razpetine a_d , da navidezno dopolnimo povesno verižnico do celotne parabole. a_{sk} določimo prek relacije (7).

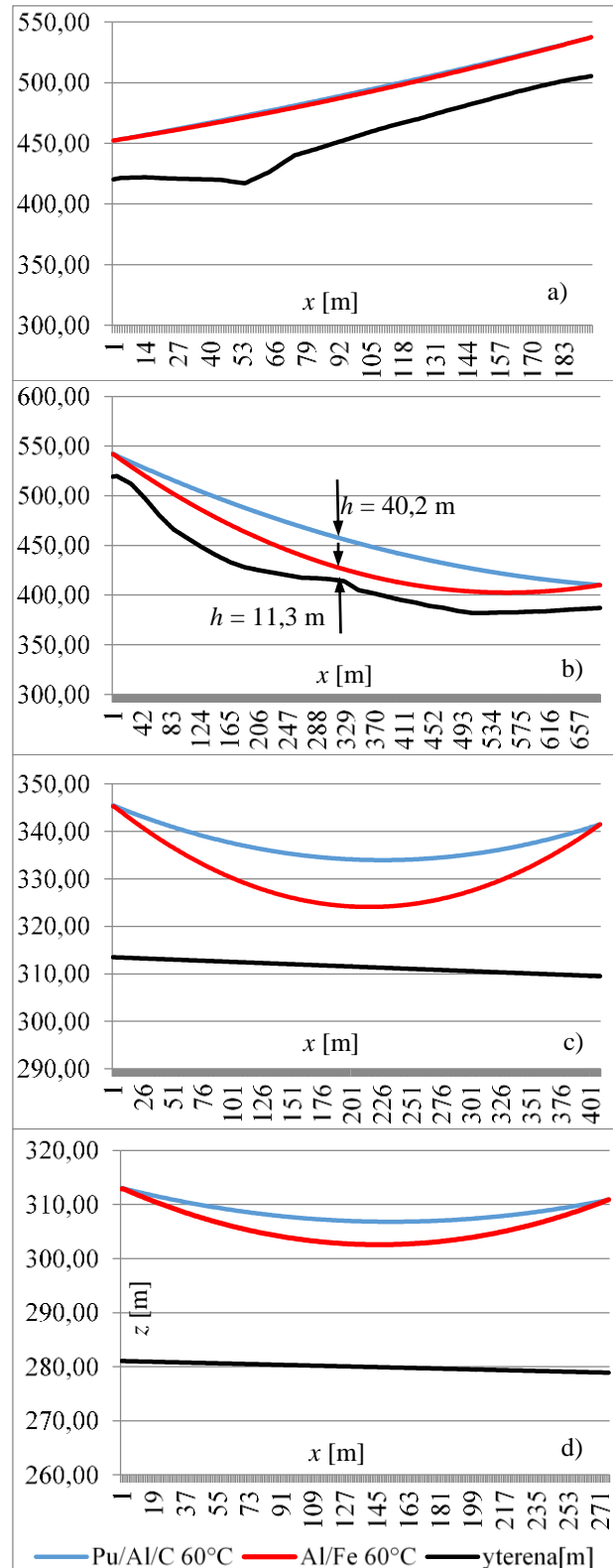
$$a_{sk} = a + a_d = a + \frac{\sigma_g \cdot \Delta h}{p_g} \text{ [m]}. \quad (7)$$

Slika 3.4 prikazuje izračunane poves pri +60 °C za obstoječi vodnik in novi vodnik za razpetino d). Iz slike vidimo, da je maksimalni poves pri vodniku Al/Fe približno dvakrat večji od vodnika Pu/Al/Carbon. Vidimo, da se vodnika povešata po paraboli.



Slika 3.4: Primerjava povesov pri 60 °C med novimi in klasičnimi vodniki za razpetino b)

Nas zanima dejansko položaj vodnika nad terenom pod daljnovidom. Zato prikaz povesov na sliki 3.4 ni praktičen. Ko poznamo vse parametre enačbe povesne verižnice (natezno napetost σ_g in specifično obremenitev p_g), lahko določimo koordinate tega vodnika. Če poves f_x v neki točki na razpetini med obesiščema daljnovoda po (6) odštejemo od z -koordinato višje ležečega obesišča $z_{vl,ob}$, dobimo lahko točko koordinat vodnika $T_x(x, z_t)$. Prav tako lahko izračunamo točke prečnega profila terena $T_{xt}(x, z_{xt})$. Slika 3.5 prikazuje izračunane poves vodnikov Al/Fe in Pu/Al/C nad prečnim profilom terena pri temperaturi 60 °C in za vse štiri obravnavane vrste razpetin daljnovoda (slike 3.5 a), 3.5 b), 3.5 c) in 3.5 d)). Slike prikazujejo neko realno stanje, ki bi lahko nastalo, če bi



Slika 3.5: Primerjava višine vodnikov nad terenom pri 60 °C med novimi in klasičnimi vodniki za vse razpetine

bila zunanja temperatura 60 °C. V vseh vrstah razpetin je razdalja od terena do vodnika Al/Fe manjša od

izračunane razdalje do novega vodnika. Iz slike 3. b) je razvidno, da je pri 60 °C minimalna razdalja do obstoječega vodnika sicer 11 m, vendar je to blizu minimalnim pogojem. Novi vodnik se v tem primeru obnaša veliko bolje (razdalja do vodnika je 40 m).

Na podlagi podrobne analize rezultatov izračunov povosov izbranega vodnika Pu/Al/C 2150/490/65 mm² lahko sklepamo, da se ta vodnik zaradi manjše gostote in manjšega temperaturnega koeficienta raztezanja manj poveša kot obstoječi vodnik Al/Fe 490/65 mm², kar dokazujejo tudi rezultati izračunov, ki jih prikazujejo slike od 3.5 a) do 3.5 d).

4 SKLEP

Kot osnovo za oblikovanje novega polizoliranega vodnika za najvišje napetosti smo uporabili izračun električne poljske jakosti. Le-ta na robu kovinskega vodnika ne sme preseči električne poljske trdnosti izolacije, predvsem pa na robu izolacije ne sme preseči električne poljske trdnosti zraka (korona). Dodatna omejitvev je zračna razdalja do sosednjih kovinskih delov.

Rezultati izračunov povosov novega vodnika Pu/Al/C in primerjava mehanskih karakteristik in povosov z obstoječim vodnikom Al/Fe pokažejo, da je nadgradnja obstoječih vodnikov z novimi mogoča glede mehanskega dimenzioniranja vodov. Glede na analizo primerjav povosov obeh vrst vodnikov za različne vrste razpetin je nadgradnja mogoča tudi za velike naklone razpetin, kot tudi za velike razpetine med daljnovidnimi stebri. Zaradi manjše specifične teže novega vodnika je tudi obremenitev višje ležečega zateznega stebra manjša kot pri uporabi vodnika Al/Fe. Ker novih vodnikov ni treba prenapenjati v primerjavi z obstoječimi, se lahko obstoječi stebri na 220 kV ohranijo pri nadgradnji. Obnašanje novih vodnikov pri visokih temperaturah obratovanja daljnovoda je boljše kot pri obstoječih vodnikih (manjši povesi).

Glede na rezultate raziskave ugotavljamo, da bi lahko polizolirani vodnik omogočil ohranitev tras 220 kV daljnovidov in prehod na 400 kV, še več, da ne bi preveč povečali teže polizoliranega vodnika, se odločimo za najmanjšo debelino izolacije, ki še zadovoljuje vse pogoje – to je 15 mm. Predlagamo vodnik z jedrom iz karbona, prevodno plast iz aluminija in izolacijo iz poliuretana. Prihranek na masi ob zamenjavi jeklenega jedra s karbonskim omogoča namestitvev izolacije iz poliuretana. Za takšen vodnik smo izračunali povese in natezne napetosti vodnikov za štiri tipične razpetine in naredili primerjavo s klasičnimi vodniki. Izračuni kažejo, da bi bilo mogoče nove vodnike obesiti na obstoječe stebre in tako dvigniti napetost na 400 kV. V nadaljevanju moramo preveriti še vpliv takšnih vodnikov na okolico.

LITERATURA

- [1] R. J. Bacha, GPU/PENELEC Compact 115 kV Covered Conductor Study, Minutes of the Meeting – Pennsylvania Electric Association, Engineering Section, 1981.
- [2] Manfred Beyer, Wolfram Boeck, Klaus Möller, Walter Zaengl, Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen; Springer-Verlag 1986.
- [3] Ray Elford: Covered Conductors – making the right choice, Electrical engineer, februar 1995.
- [4] <http://www.eles.si/za-poslovne-uporabnike/razvoj-in-uporaba-prenosnega-omrezja/strategija-razvoja-elektroenergetskega-sistema-rs.aspx>
- [5] Žiga VORŠIČ: Polizolirani vodniki na visokih napetostih, seminarska naloga pri predmetu Teoretska elektrotehnika, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor 2007.
- [6] Jože Pihler, Igor Tičar: Design of systems of covered overhead conductors by means of electric field calculation, IEEE, April 2005.
- [7] Jože VORŠIČ, Jože PIHLER: Tehnika visokih napetosti in velikih tokov, UM FER, 2005.
- [8] Pravilnik o tehničnih normativih za graditev nadzemnih elektroenergetskih vodov z nazivno napetostjo od 1kV do 400 kV, Ljubljana 2009.
- [9] Marjan PLAPER: Vodenje električne energije, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1961 Stara literatura!
- [10] Marjan PLAPER: Elektroenergetska omrežja III, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1977.
- [11] Miran HORVAT: Navodila za vaje pri predmetu Prenos električne energije, UM FER, 2003.
- [12] Janez RIBIČ: Navodila za vaje pri predmetu Elektroenergetska omrežja, UM FER, 2007.
- [13] JUS N.C1.351, Aluminij-jeklene vrvi za nadzemne vode, tehnične zahteve (1985).

Žiga Voršič je diplomiral leta 2006 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, leta 2010 pa magistriral. Zaposlen je na SODO sistemski operater distribucijskega omrežja z električno energijo, d. o. o., kjer se večinoma ukvarja z obratovanjem in kakovostjo električne energije.

Jože Pihler je diplomiral leta 1978 na Visoki tehniški šoli v Mariboru. Leta 1991 je magistriral, leta 1995 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je zaposlen kot redni profesor. Je član mednarodnih elektrotehniških združenj CIGRE - Pariz in IEEE - New York; član mednarodnega tehničnega komiteja IEC SC32A za visokonapetostne varovalke ter domačih Zveze inženirjev in tehnikov-EZ Maribor, SLOKO CIGRE ter predsednik tehničnega odbora SIST za visoko napetost in član drugih tehničnih odborov.

Janez Ribič je diplomiral leta 2002, leta 2007 magistriral in leta 2011 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je zaposlen kot asistent. Je član IEEE.