

Uporaba polizoliranih vodnikov pri najvišjih napetostih

Žiga Voršič¹, Jože Pihler², Jože Voršič²

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: Snovalci elektroenergetskega sistema Republike Slovenije težijo k zmanjšanju števila napetostnih nivojev. V prihodnosti naj bi imeli samo štiri: 0,4; 20; 110 in 400 kV. Na srednji napetosti je 10 kV napetostni nivo samo še v večjih mestih (Ljubljana, Maribor), večji problem je opustitev 220 kV napetostnega nivoja v prenosnem omrežju. Snovalci razmišljajo o ohranitvi tras 220 kV daljnovodov in prehod na 400 kV. Na prvi pogled najpreprostejša rešitev je postavitve novih nadzemnih vodov, kar pa zahteva veliko sredstev in nova soglasja. V članku je opisana možnost uporabe polizoliranih vodnikov, kar je finančno ugodneje kot postavitve novih nadzemnih vodov.

Ključne besede: polizoliran vodnik, poliuretan, aluminij, karbon

Using covered conductors for the highest voltage levels

Extended abstract: The Slovenian power system designers tend to reduce the number of voltage levels. In future, there will probably be only four levels: 0.4; 20; 110 and 400 kV. 10 kV are on the middle - voltage level still present only in large towns (Ljubljana, Maribor). One of the major problems is abandonment of the 220 kV voltage level in the transmission network. The designers propose to preserve the 220 kV power lines and redesign the 400 kV ones. A simple solution seems to be opting for new overhead power lines, yet this would involve substantial funds and sitting agreements. The paper analyses the possibility of using covered conductors for being financially a more advantageous solution compared to construction of new overhead power electric lines.

The covered conductor consists of a carbon core. Its reduced weight is used for additional conductor insulation, so that the elasticity module (E) on the edge of the insulation is not higher than the critical elasticity module of the air. The conductors primary and secondary constants (capacitance, wave resistance and propagation coefficient) are changed, too.

In practice, the inner electrode is insulated and the space to the outer electrode is the air. The insulation withstand strength is much higher than that of the air. It is therefore not important, that the elasticity module is small on the inner electrode. It is more important that the elasticity module in the air is the smallest. The smallest elasticity module E_2 (Fig:3.1) as a function of

radius r_2 is obtained, when the denominator in Equation 3.1 is the biggest. The optimal radius is obtained from the Equation 3.13, where the elasticity module (E) in the air is the lowest, Equation 3.14.

The conductors geometry is defined with the column, isolator chain and wire. The only variable is thus the relative permittivity. Fig. 3.2 shows the dependence of the optimal radius on the relative permittivity. By inserting the radius of conductor currently used on the 220 kV overhead lines (15.3 mm), relative permittivity $\epsilon_r = 3.4$, which is the usual value of covered conductors on the 110 kV level, thickness of 15 mm and voltage of 400 kV, the biggest elasticity module (E) in the air is obtained, Equation 3.15 and Figure 3.3. The biggest elasticity module is on the edge of the conductor as shown in Figure 3.4.

By using Equations 4.1 - 5.9, values of the conductors primary and secondary constants are obtained. For the 490/65 conductor with the insulation thickness of 15 mm and with a polyurethane coat, the capacitance is 12.6 nF/km, wave resistance Z_0 ($386,33 - j 27,48$) Ω and propagation coefficient γ ($9,13 \cdot 10^{-5} + j 1,28 \cdot 10^{-3}$).

Keywords: covered conductor, polyurethane, aluminum, carbon

1 Uvod

Polizolirani vodniki naj bi bili narejeni z jedrom iz karbona. Prihranek na teži uporabimo za izolacijo vodnika. Ta mora biti tolikšna, da električna poljska jakost na robu izolacije ne preseže kritične električne poljske jakosti za zrak. Takšen polizoliran vodnik ima

spremenjene tudi primarne in sekundarne konstante (kapacitivnost, valovna upornost in konstanta širjenja).

2 Zaporedna namestitev slojnih dielektrikov

V prostorskih ali 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 bo električna obremenitev posameznih slojev optimalna.

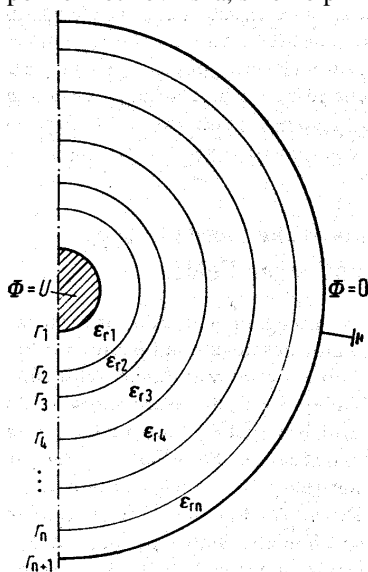
V nehomogenih elektrostatičnih poljih uporabimo zaporedno namestitev dielektrikov zato, da območja velikih električnih poljskih jakosti razbremenimo in električno polje izrinemo v območja manjših električnih poljskih jakosti.

V homogenih poljih ima zaporedna namestitev dielektrikov skoraj vedno negativne posledice. Dielektriki z majhnimi dielektričnostmi (zlasti zrak ali plini) imajo pogosto tudi manjšo električno prebojno trdnost. Vstavitve zaporednega dielektrika z večjo dielektričnostjo povzroči izriv električnega polja, kar pri manjši prebojni trdnosti povzroči električni preboj šibkejšega.

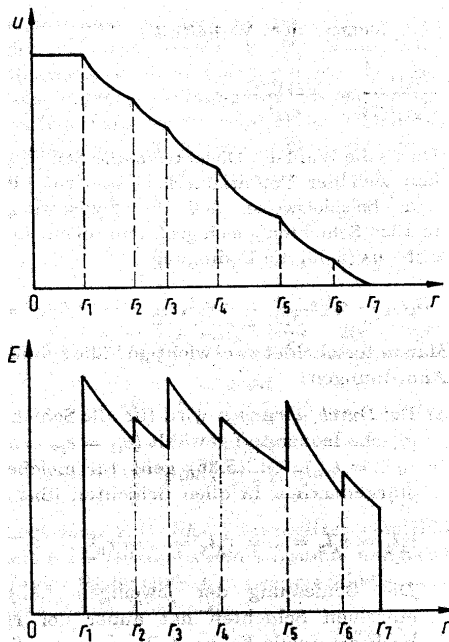
Prevleka kovinskih valjnih ali krogelnih elektrod z izolacijo

Na površini valjnih ali krogelnih visokonapetostnih elektrod ima električna poljska jakost maksimalno vrednost. Da ne pride do korone, prevlečemo elektrodo s plastjo dielektrika z večjo prebojno trdnostjo in dielektričnostjo. Ker pride do izriva električnega polja v dielektrik z nižjo dielektričnostjo, to povzroča dvoje:

- Kovinska elektroda ima lahko manjši polmer.
- Na elektrodo, ki ima skupaj z dielektrikom enak polmer kot kovinska, smemo priključiti višjo napetost.



Slika 2.1. Večslojni izolator
Figure 2.1. More layer insulator.

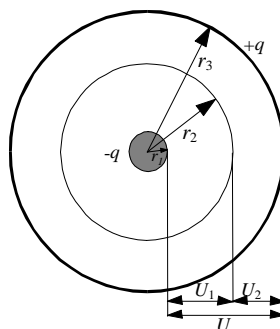


Slika 2.2. Potek napetosti in električne poljske jakosti v večslojnem izolatorju
Figure 2.2. Voltage and electric field strength in a more layer insulator

Iz obeh slik je razvidno, da morajo dielektrične konstante slojnih dielektrikov upadati od notranje plasti navzven. S primerno izbiro dielektričnih konstant lahko dosežemo v vseh slojih približno enako velikost največje električne poljske jakosti.

Dvoslojni enožilni kabel

Dvoslojni enožilni kabel (slika 2.3) je tipičen primer uporabe dvoslojnih dielektrikov. Napetost med žilo in plaščem se razdeli na dve plasti dielektrika.



Slika 2.3. Dvoslojni enožilni kabel
Figure 2.3. Two layer one core cable

$$U_1 = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.1)$$

$$U_2 = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \quad (2.2)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.3)$$

$$U = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \quad (2.4)$$

Izračunamo naboj in nato obe napetosti.

$$U_1 = \frac{U \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{\epsilon_{r1} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (2.5)$$

$$U_2 = \frac{U \cdot \ln \frac{r_3}{r_2}}{\epsilon_{r2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (2.6)$$

Največjo električno poljsko jakost v snovi 1 dobimo na polmeru r_1

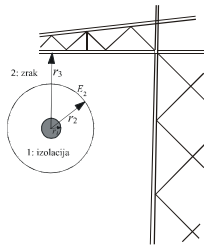
$$E_{1\max} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1}} \cdot \frac{1}{r_1} = \frac{U \cdot \frac{1}{r_1}}{\epsilon_{r1} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (2.7)$$

Največjo električno poljsko jakost v snovi 2 dobimo na polmeru r_2

$$E_{2\max} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2}} \cdot \frac{1}{r_2} = \frac{U \cdot \frac{1}{r_2}}{\epsilon_{r2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (2.8)$$

3 Polizolirani vodniki in električna poljska jakost

V praksi se velikokrat zgodi, da je notranja elektroda izolirana, prostor do zunanje elektrode pa je zrak. Izolacija ima bistveno večjo 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: $E_z = E_2(r_2)$.



Slika 3.1. Koaksialna valjna razporeditev delne izolacije
Figure 3.1. Coaxial cylinder arrangement of partial insulation

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

$$E_2 = \frac{U}{r_2 \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\epsilon_r} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{1} \right)} \quad (3.1)$$

Najmanjšo poljsko jakost E_2 v odvisnosti od r_2 dobimo, ko je imenovalac v enačbi (3.1) največji.

Imenovalac:

$$y(x) = \left(\frac{\ln \frac{x}{r_1}}{\epsilon_r} + \frac{\ln \frac{r_3}{x}}{1} \right) = x \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r} \cdot \ln \frac{x}{r_1} - \ln \frac{x}{r_3} \right) = \frac{x}{\epsilon_r} \cdot \left(\ln \frac{x}{r_1} - \epsilon_r \cdot \ln \frac{x}{r_3} \right) \quad (3.2)$$

Poiščemo največjo vrednost imenovalca

$$y(x) = \frac{x}{\epsilon_r} (\ln x - \ln r_1 + \epsilon_r \ln r_3 - \epsilon_r \ln x) \quad (3.3)$$

$$\frac{dy(x)}{dx} = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot (\ln x - \ln r_1 + \epsilon_r \ln r_3 - \epsilon_r \ln x) + \frac{x}{\epsilon_r} \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{\epsilon_r}{x} \right) = 0 \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{1}{\epsilon_r} - 1 \right) \ln x - \frac{\ln r_1}{\epsilon_r} + \ln r_3 + \frac{1}{\epsilon_r} - 1 = 0 \quad (3.5)$$

$$\left(\frac{1}{\epsilon_r} - 1 \right) \ln x = 1 - \ln r_3 + \frac{\ln r_1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_r} \quad (3.6)$$

$$(1 - \epsilon_r) \cdot \ln x = +\epsilon_r - \epsilon_r \cdot \ln r_3 + \ln r_1 - 1 \quad (3.7)$$

$$(\epsilon_r - 1) \ln x = -\epsilon_r + \epsilon_r \cdot \ln r_3 - \ln r_1 + 1 \quad (3.8)$$

$$\ln x = -\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1} + \frac{\epsilon_r \cdot \ln r_3}{\epsilon_r - 1} - \frac{\ln r_1}{\epsilon_r - 1} + \frac{1}{\epsilon_r - 1} \quad (3.9)$$

$$\ln x = \left(1 - \ln r_3 + \frac{\ln r_1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_r} \right) \cdot \frac{\epsilon_r}{1 - \epsilon_r} \quad (3.10)$$

$$\ln x = -1 + \ln r_3 \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1} - \ln r_1 \frac{1}{\epsilon_r - 1} \quad (3.11)$$

$$x = \frac{1}{e} \cdot (r_3)^{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1}} \cdot (r_1)^{\frac{1}{1 - \epsilon_r}} \quad (3.12)$$

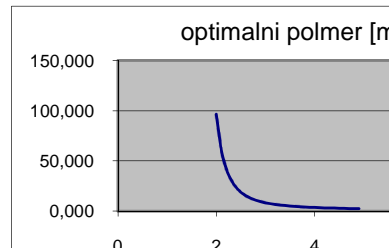
in dobimo polmer

$$r_{2\text{opt}} = r_1 \cdot \frac{1}{e} \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1}}, \quad (3.13)$$

pri katerem je električna poljska jakost v zraku najmanjša

$$E_2 = E_{2\min} = \frac{U \cdot e}{r_1 \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)} \quad (3.14)$$

S stebrom, verigo kapastih izolatorjev in vrvjo je določena geometrija, tako je edina spremenljivka relativna dielektričnost. Na sliki 3.2 je prikazana odvisnost optimalnega polmera od relativne dielektričnosti.

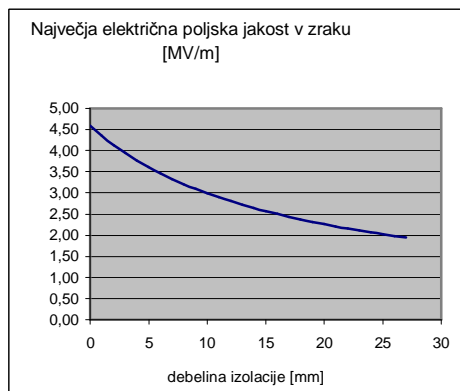


Slika 3.2. Optimalni polmer v odvisnosti od relativne dielektričnosti

Figure 3.2. Optimal radius in dependence of relative permittivity

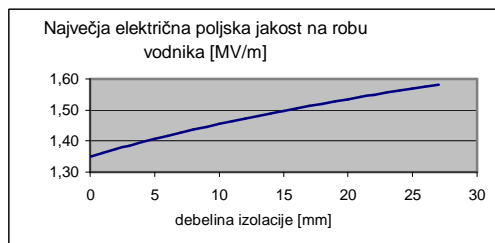
Če vstavimo za polmer vodnika polmer trenutno uporabljenega vodnika pri 220 kV nadzemnih vodih (15,3 mm), za relativno dielektrično konstanto $\epsilon_r = 3,4$, vrednost, ki je običajna pri polizoliranih vodnikih na 110 kV nivojih in debelino 15 mm, ter napetost 400 kV, dobimo (slika 3.3):

$$E_{\text{zrak}} = \frac{U}{r_2 \cdot \epsilon_2 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} = 2,57 \text{ MV/m} \quad (3.15)$$



Slika 3.3. Največja električna poljska jakost v zraku
Figure 3.3. The largest electric field strength in the air

Vrednost je manjša od prebojne trdnosti za zrak pri normalnih pogojih (3 MV/m).



Slika 3.4. Največja električna poljska jakost na robu vodnika
Figure 3.4. The largest electric field strength on the edge of the conductor

4 Primarne konstante voda

Ohmsko upornost daljnovođa na enoto dolžine R'_L pri temperaturi vodnika 20 °C določimo iz nazivnega prereza A_n in specifične upornosti ρ :

$$R'_L = \frac{\rho}{A_n} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

Kot specifične upornosti lahko uporabimo naslednje vrednosti:

material:	baker	aluminij	aluminijeve zlitine
spec. upornost ρ [$\Omega \cdot m$]	$\rho = \frac{10^{-6}}{54}$	$\rho = \frac{10^{-6}}{34}$	$\rho = \frac{10^{-6}}{31}$

Ker pri vodnikih z jeklenim jedrom ne upoštevamo prevodnosti jekla, se ohmska upornost polizoliranega

vodnika v primerjavi s klasičnim vodnikom ne spremeni.

Za vodnik 490 mm²/65 mm² je $R = 0,0592 \Omega / km$.

Po definiciji je **induktivnost** na enoto dolžine zaradi magnetnega polja v zunanosti tako

$$L_{\text{zun}} = \frac{\Psi_{\text{zun}}}{I} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d}{r} \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (4.2)$$

Za izračun skupne induktivnosti moramo tej induktivnosti na enoto dolžine prišteti še relativno majhen delež zaradi magnetnih silnic v notranjosti polnega vodnika:

$$L_{\text{not}} = \frac{\mu_0}{8 \cdot \pi} \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (4.3)$$

Za celotno induktivnost na dolžinsko enoto (magnetne silnice računamo od osi vodnika do razdalje d) lahko zapišemo

$$L = L_{\text{zun}} + L_{\text{not}} = \left(\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d}{r} + \frac{\mu_0}{8 \cdot \pi} \right) \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (4.4)$$

Oba člena v oklepaju lahko zapišemo tudi drugače:

$$L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{d}{r} + 0,25 \right) \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (4.5)$$

Izraz je veljaven tudi za trifazne vode, pri katerih so fazni vodniki razporejeni v ogliščih enakostraničnega trikotnika in je med njimi razdalja d . Če fazni vodniki niso razporejeni v ogliščih enakostraničnega trikotnika, temveč so razdalje med njimi d_{L1L2} , d_{L2L3} , d_{L1L3} , vodniki pa so prepleteni, je treba namesto razdalje d izračunati geometrijsko srednjo razdaljo med faznimi vodniki.

Induktivna upornost (reaktanca) za pozitivni sistem tokov na enoto dolžine $X'_{(1)L}$ je za enojni daljnovođa

$$X'_{(1)L} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(0,25 + \ln \frac{d}{r} \right) \quad \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (4.6)$$

kjer so:

$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L3L1}}$ – srednja geometrijska razdalja med vodniki

r – polmer posameznega vodnika

ω – krožna frekvenca

μ_0 – permeabilnost zraka $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Relativna dielektrična konstanta plašča polizoliranega vodnika ne vpliva na induktivnost vodnika.

Za vodnik 490 / 65 je $x = 0,414 \Omega / km$.

Nadaljnja pomembna in v večini primerov dovolj natančno izračunljiva elektromagnetna lastnost vodov je obratovna **kapacitivnost**. Kapacitivnost je snovno geometrijska lastnost zaključenega električnega polja. Količinsko je podana z razmerjem električnega naboja na elektrodah in napetostjo med elektrodama

$$C = \frac{Q}{U} \quad [F] \quad (4.7)$$

Vod je simetrični valj, na katerem je elektrina približno enakomerno razporejena po vsem cilindričnem plašču. Zato se omejimo na enoto dolžine, na kateri je elektrina.

$$q = \frac{Q}{l} \quad \left[\frac{\text{A s}}{\text{m}} \right] \quad (4.8)$$

Polje takega valja se po dolžini nič ne spreminja, valj sam pa nadomestimo z naelektreno premico, ki leži v osi valja. Če je na površini valja ploskovna gostota elektrine

$$\delta = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad \left[\frac{\text{A s}}{\text{m}^2} \right], \quad (4.9)$$

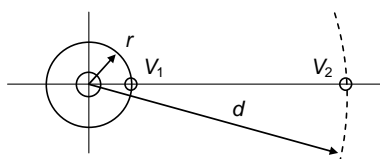
je tam gostota električnega pretoka

$$D = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot r} = \epsilon \cdot E \quad (4.10)$$

in ustrezna električna poljska jakost

$$E = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r} \cdot \frac{1}{r}. \quad (4.11)$$

Če poznamo električno poljsko jakost, lahko izračunamo napetost med površino vodnika in sosednjim vodnikom.



Slika 4.1. Potencialna razlika med dvema vodnikoma
Figure 4.1. The potential difference between two conductors

$$U_{12} = V_1 - V_2 = \int_1^2 E \cdot dr = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \int_1^2 \frac{dr}{r} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \ln \frac{d}{r} \quad (4.12)$$

Pri simetrični obremenitvi lahko upoštevamo, da ima vsaka faza trifaznega voda enako obratovalno kapacitivnost

$$C = \frac{q}{U} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{d}{r}}. \quad (4.13)$$

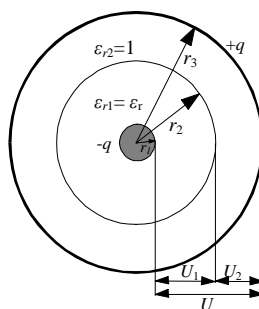
Za nadzemne vode je izolant zrak in s tem dielektrična konstanta

$$\epsilon = \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36 \cdot \pi} = 8,854 187 818 \cdot 10^{-12} \quad \left[\frac{\text{A s}}{\text{V m}} \right]. \quad (4.14)$$

Pri polizoliranih vodnikih moramo upoštevati, da izolant do sosednjih vodnikov ni samo zrak, ampak tudi plašč z relativno dielektričnostjo ϵ_r (slika 4.2).

Zunanji izolator je zrak z $\epsilon_{r2} = 1$, relativna dielektrična konstanta plašča $\epsilon_{r1} = \epsilon_r$.

$$U = U_1 + U_2 = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \left[\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right] \quad (4.15)$$



Slika 4.2. Skica za določitev kapacitivnosti dvoslojno izoliranega vodnika

Figure 4.2. Determining capacitance of two layer insulated conductor

Kapacitivnost polizoliranega vodnika je tako

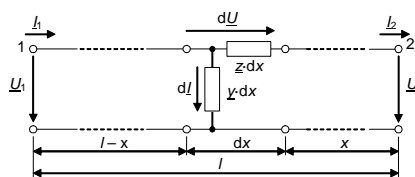
$$C = \frac{q}{U} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\left[\frac{1}{\epsilon_r} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_3}{r_2} \right]} \quad (4.16)$$

Za vodnik 490 / 65 s 15 mm debelim plaščem izolacije iz polietilena ($\epsilon_r = 3,4$) je kapacitivnost $C = 9,533$ nF/km. Brez plašča bi bila kapacitivnost $C = 8,88$ nF/km.

5 Sekundarne konstante voda

Prenosni nadzemni vod je edini element električnega omrežja, v katerem so parametri R , L , G in C prostorsko porazdeljeni. Čeprav navadno ohmsko prevodnost G zanemarimo (v primerjavi z drugimi parametri je zanemarljivo majhna), jo bomo mi zaradi univerzalnosti izpeljave vseeno upoštevali.

Zaradi porazdeljene narave parametrov bomo celotni vod predstavili kot kaskadno vezavo diferencialno majhnih četverpolov. Slika voda z vrisanim diferencialnim četverpolom na razdalji x od izhodnih spolk voda je podana na sliki 5.1.



Slika 5.1. Predstavitev voda
Figure 5.1. Presentation of the conductor

Ob predpostavki, da so vse električne veličine sinusne, imamo na dolžinskem diferencialu dx spremembo napetosti:

$$dU = \underline{I} \cdot \underline{z} \cdot dx \quad (5.1)$$

in spremembo toka

$$dI = \underline{U} \cdot \underline{y} \cdot dx, \quad (5.2)$$

kjer sta tako U kot I funkciji kraja x . Tu sta z vzdolžna impedanca voda na dolžinsko enoto in y prečna admitanca voda na dolžinsko enoto. Obe enačbi prevedemo v obliko

$$\frac{dU}{dx} = \underline{I} \cdot \underline{z} \quad (5.3)$$

$$\frac{dI}{dx} = \underline{U} \cdot \underline{y} \quad (5.4)$$

Če dobljeni enačbi še enkrat odvajamo po x , dobimo z upoštevanjem predhodnih enačb

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - \underline{z} \cdot \underline{y} \cdot \underline{U} = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} - \underline{z} \cdot \underline{y} \cdot I = 0 \quad (5.6)$$

Dobljeni diferencialni enačbi imenujemo telegrafski enačbi, podajata krajevno odvisnost kompleksnih efektivnih vrednosti toka in napetosti vzdolž voda.

V zgornjih dveh enačbah označimo z

$$\underline{\gamma}^2 = \underline{z} \cdot \underline{y} \quad \text{ali} \quad \underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \alpha + j \cdot \beta \quad (5.7)$$

propagacijsko konstanto ali konstanto širjenja voda. Konstanta širjenja γ je na splošno za sinusne oblike toka in napetosti kompleksna vrednost. Realno komponento α imenujemo konstanto dušenja in nam pove, kako se vzdolž voda spreminja temenska vrednost sinusne veličine. Imaginarno komponento β imenujemo fazna konstanta (konstanta vrtenja); pove, kako se spreminja fazni kot sinusne veličine vzdolž voda.

Nadalje vpeljemo oznake

$$\frac{\underline{z}}{\underline{y}} = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \underline{Z}_0 \quad (5.8)$$

oziroma

$$\frac{\underline{\gamma}}{\underline{z}} = \sqrt{\frac{\underline{y}}{\underline{z}}} = \underline{Y}_0, \quad (5.9)$$

kjer je Z_0 valovna upornost in $Y_0 = 1/Z_0$ valovna prevodnost voda. Valovno upornost Z_0 in konstanto širjenja γ imenujemo tudi sekundarne parametre voda.

Izračun sekundarnih konstant klasičnega voda za napetostni nivo 220 kV s tremi faznimi vodniki 490/65 Al/Fe nam da valovno upornost

$Z_0 = (386,33 - j 27,48) \Omega$ in konstanto širjenja $\gamma = (7,66 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1,08 \cdot 10^{-3})$. Predlagani polizolirani vodnik ima

$Z_0 = (324,32 - j \cdot 23,07) \Omega$ in konstanto širjenja $\gamma = (9,13 \cdot 10^{-5} + j 1,28 \cdot 10^{-3})$.

6 Sklep

Vodniki z jedrom iz karbona so do dve tretjini lažji od klasičnih z jeklenim jedrom. Prihranek na masi zadošča za potrebno dodano maso izolacijskega materiala in bi bili tako stebri kakor kapasti izolatorji zmožni nositi takšne polizolirane vodnike. V članku smo z analitičnimi izračuni ugotovili, da električna poljska jakost na robu izolacije ne presega prebojne trdnosti zraka. Zaradi nekoliko povečane kapacitivnosti se spremenijo tudi sekundarne konstante polizoliranega trifaznega voda.

7 Viri, literatura

- [1] Manfred Beyer, Wolfram Boeck, Klaus Möller, Walter Zaengl, *Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen*; Springer-Verlag 1986.
- [2] IEC 60652 (2002), *Voltage measurement by means of standard air gaps (one sphere earthed)*, International Electrotechnical Commission, Geneve 2002.
- [3] Terminološka komisija (urednik Anton Ogorelec), *Slovenski elektrotehniški slovar, Področje elektroenergetika*, Sloko CIGRÉ, Ljubljana 1996.
- [4] Igor Tičar, Oszkar Biro, Kurt Preis, *Uporaba 2D in 3D metode končnih elementov v bielektromagnetnih raziskavah*, Sloko CIGRÉ, Nova Gorica, 3.-5. junij 1997.
- [5] Igor Tičar, Tine Zorič, *Osnove elektrotehnike 1. zvezek Elektrostatika in tokovna polja*, Univerza v Mariboru, FERI, Maribor 2003.
- [6] Andreas Kuechler, *Hochspannungstechnik*, VDI Verlag, 1996.
- [7] Jože Voršič, Jože Pihler, *Tehnika visokih napetosti in velikih tokov*, Univerza v Mariboru, FERI, Maribor 2008.

Žiga Voršič je diplomiral leta 2006. Zaposlen je na SODO sistemski operater distribucijskega omrežja z električno energijo d.o.o.

Red.prof.dr. 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 - Paris 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.

Red.prof.dr. Jože Voršič je diplomiral iz elektrotehnike na Univerzi v Ljubljani leta 1972, magistriral na Sveučilištu u Zagrebu 1982 in doktoriral na Univerzi v Mariboru leta 1983. Zaposlen je kot redni profesor za elektroenergetiko na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Od leta 1976 je aktivno sodeloval v samoupravnih organih fakultete, pozneje tudi na PISERU (posebna izobraževalna skupnost elektrotehniške in računalniške usmeritve R Slovenije) in MZT (Ministrstvo za znanost in tehnologijo). Trenutno je predstojnik Instituta za močnostno elektrotehniko na UM FERI. Je član IEEE (The Institute of Electrical and Electronic Engineers), CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques), WEC (World Energy Council), ED Maribor (elektrotehniško društvo) in SDVD (Slovensko društvo za visokošolsko didaktiko).