VPLIV POLIZOLIRANIH VODNIKOV NA OKOLJE

Žiga VORŠIČ, Jože PIHLER, Peter KITAK

POVZETEK

Za nadzemne vode se vse več uporablja kompaktne vodnike s karbonskim jedrom. Če takšen vodnik še 'nepopolno' izoliramo, dobimo plizoliran vodnik, ki je mehansko močnejši in, kar je še pomembneje, prostorsko manj potraten. Razen tega je zaradi izolacije tudi električna poljska jakost v bližini takšnega vodnika manjša.

V prispevku smo podali zasnovo polizoliranega vodnika za najvišje napetosti, ki bi ga lahko namestili na obstoječe 220 kV stebre in tako povečali prenosno zmogljivost slovenskega elektroenergetskega omrežja. Vključevanje linijske energetske infrastrukture v prostor je vse težavnejša, zato smo raziskali vpliv takšnega polizoliranega voda za najvišje napetosti na okolje. Primerjali smo analitični izračun električnega polja v okolici predlaganega nadzemnega voda z izračunom po metodi končnih elementov. Rezultate smo ocenili glede na Uredbo o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju.

ABSTRACT

For overhead power lines, there are increasingly used compact conductors with carbon core. If such a conductor is »incomplete« isolated, we get covered conductorm which is mechanically stronger and what is even more important, it is spatially less wasteful. Furthermore, because of the isolation the electric field strength is lower near such a conductor.

There is a design of a covered conductor given in this article, which we could install on the existing 220 kV columns and so increase the transmission capacity of the Slovenian electricity network. The integration of regular energy infrastructure is increasingly demanding, therefore we investigated the impact of such covered conductor for the highest voltage levels to the environment. We compared the analytical calculation of the electric field strength near the proposed covered conductor with the method of finite elements. The results were evaluated according to the regulation on electrictromagnetic radiation in the natural and living environment.

1. UVOD

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 (Ljubljana, Maribor), večji problem predstavlja opustitev 220 kV napetostnega nivoja v prenosnem omrežju. Snovalci razmišljajo o ohranitvi tras 220 kV daljnovodov in prehod na 400 kV. Na videz najbolj preprosta rešitev je postavitev novih nadzemnih vodov, kar pa zahteva mnogo sredstev in nova soglasja. Uporaba predlaganega polizoliranega vodnika je finančno ugodnejša od postavitve novih nadzemnih vodov.

2. ZAPOREDNA NAMESTITEV SLOJNIH DIELEKTRIKOV

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

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

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \tag{2.1}$$

in gostota električnega toka

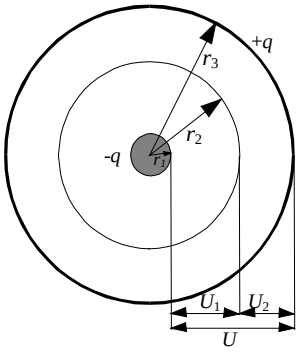
$$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E} \tag{2.2}$$

odvisni od obeh snovnih lastnosti.

Slika električnega polja in porazdelitev potencialov v električnem polju z nehomogenimi ali slojnimi dielektriki se močno razlikuje 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 elektrostatičnih poljih uporabimo zaporedno namestitev dielektrikov zato, da področja velikih električnih poljskih jakosti razbremenimo in električno polje izrinemo v področja 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:

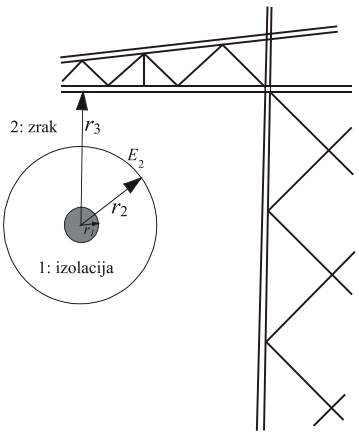


Slika 2.1: Dvoslojni enožilni kabel

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 in električna poljska jakost **[1]**

Kot dvoslojni izolirani vodnik lahko obravnavamo tudi polizolirani vodnik (slika 2.2). 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. Bolj pomembno je, da je poljska jakost v zraku najmanjša: $E_{zr} = E_2(r_2)$.



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 zraka

Ob upoštevanju $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_r$ in $\varepsilon_{r2} = 1$, dobimo:

$$E_2 = \frac{U}{r_2 \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\varepsilon_r} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{1} \right)} \tag{2.3}$$

Najmanjšo poljsko jakost E_2 v odvisnosti od r_2 dobimo, ko je imenovalec v enačbi (2.3) največji. Poiščemo največjo vrednost imenovalca in dobimo optimalni polmer,

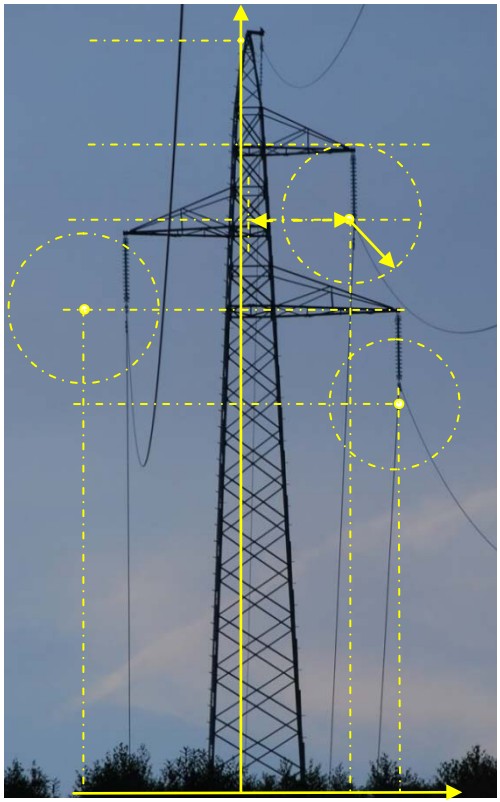
$$r_{2\,\mathrm{opt}} = r_1 \cdot \frac{1}{\mathrm{e}} \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1}} \tag{2.4}$$

pri katerem je električna poljska jakost v zraku najmanjša

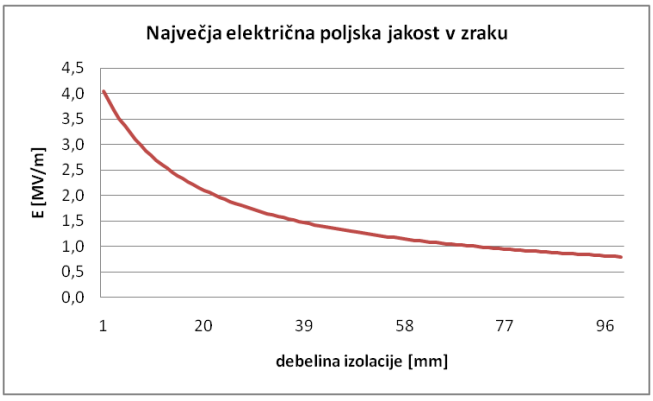
$$E_2 = E_{2\,\mathrm{min}} = \frac{U \cdot \mathrm{e}}{r_1 \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r} \right)} \tag{2.5}$$

S stebrom, verigo kapastih izolatorjev (l = 2,25 m) in vrvjo (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 (ε_r = 3,4), dobimo optimalni polmer, pri katerem je električna poljska jakost v zraku najmanjša:

$r_{2\,\mathrm{opt}} = r_1 \cdot \frac{1}{\mathrm{e}} \cdot \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^{\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1}} = 0{,}0153 \cdot \frac{1}{2{,}71828} \cdot \left(\frac{2{,}25}{0{,}0153} \right)^{\frac{3{,}4}{3{,}4-1}} = 6{,}62\ \mathrm{m}$, kar je nerealno. Na sliki 2.4 je podana električna poljska jakost skladno z enačbo 2.5 v odvisnosti od debeline izolacije.



Slika 2.3: Skica tipičnega stebra 220 kV nadzemnega voda



Slika 2.4: Največja električna poljska jakost v zraku

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

$$E_{\text{zrak}} = \frac{U}{r_2 \cdot \varepsilon_{r2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} = 2{,}39 \text{ MV/m} \tag{2.6}$$

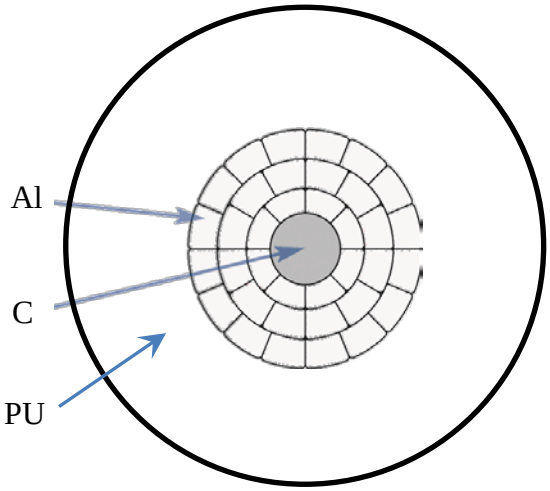
Vrednost je manjša kot je prebojna trdnost za zrak pri normalnih pogojih (3 MV/m).

Glede na rezultate raziskave ugotavljamo, da bi lahko polizoliran 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 zadovoljuje vsem pogojem – to je 15 mm.



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

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 PUAC 2150/495/65 mm^2. Pri tem je 2150 mm^2 prerez poliuretanskega plašča, 495 mm^2 prerez aluminija in 65 mm^2 prerez jedra iz karbonskih vlaken (slika 2.6).



Slika 2.6: Prerez predlaganega polizoliranega vodnika

V nadaljevanju smo preverili še mehanske lastnosti – ali je možno ohraniti tudi stebre in izračunali poves [2].

3. ELEKTROMAGNETNO SEVANJE

Prostor okrog naelektrenega telesa je v posebnem stanju. To posebno stanje prostora deluje samo na elektrine. Če vpeljemo v takšen prostor majhno elektrino, ki ne spremeni bistveno stanja prostora, ugotovimo, da deluje na novo elektrino sila. Ta sila je sorazmerna elektrini q in vektorski veličini, ki opredeljuje stanje prostora. Zaznamujemo jo z $\boldsymbol{E}$. Vektor $\boldsymbol{E}$ električne poljske jakosti ima isto smer kot sila.

Z električnim poljem imamo opravka v okolici električno nabitih teles, na primer v okolici energetskih električnih daljnovodov, oddajnih anten telekomunikacijskih naprav. Električna polja so povsod, kjer je prisoten električni naboj. Vsak električni prevodnik, ki je pod napetostjo, okoli sebe ustvarja električno polje. To obstaja, tudi ko električni tok ne teče, torej tudi, ko na primer daljnovod ni obremenjen s porabniki. Višja napetost pomeni večje polje. Električna polja so najmočnejša tik ob viru, z razdaljo pa se zelo hitro zmanjšujejo. Kovina jih dobro zaslanja, slabijo pa jih tudi drugi materiali. Jakost električnih polj daljnovodov tako močno zmanjšajo zidovi, stavbe in drevesa. Tudi električno polje energetskih kablov, položenih v zemlji, je na površini zelo zmanjšano.

Magnetno polje nastane v prostoru v okolici trajnega magneta ali v okolici prostora, kjer teče električni tok. Gostota magnetnega pretoka je odvisna od magnetne poljske jakosti in od magnetnih lastnosti prostora. V nasprotju z električnimi polji magnetna polja nastanejo takrat, ko teče električni tok, torej kadar električne naprave delujejo. Na primer, ko je električni daljnovod obremenjen s porabniki. Višji električni tok pomeni večje magnetno polje. Magnetna polja so največja tik ob viru, z razdaljo pa se hitro zmanjšujejo.

Kadar električno in magnetno polje v prostoru nastopata skupaj (njuno medsebojno razmerje je odvisno od lastnosti prostora) in hkrati, največkrat gre za izmenični polji višjih frekvenc, govorimo o elektromagnetnem polju. To je valovanje v prostoru, zanj veljajo valovni pojavi, na primer odboj, lom, uklon, interferenca; beseda »sevanje« pa le ponazarja, da gre za elektromagnetno polje, ki se oddalji od svojega izvora in se samostojno širi v prostor.

Izpostavljenost elektromagnetnemu sevanju ni nekaj novega, saj nas spremlja že od samega začetka obstoja človeštva. Tu mislimo na naravne vire sevanja. Druga zgodba so umetno ustvarjeni viri, ki so po jakosti neprimerno močnejši, v zadnjem času pa tudi vse številčnejši. Človek je dandanes, drugače kot v preteklosti, doma in na delovnem mestu izpostavljen zapleteni mešanici električnih in magnetnih polj.

Umetne vire sevanj lahko delimo na tiste, pri katerih neionizirajoča elektromagnetna sevanja generiramo namenoma in je v svojem bistvu potrebno za delovanje nekaterih naprav, ter na tiste, pri katerih je neionizirajoče elektromagnetno sevanje prisotno kot neizbežen stranski pojav pri delovanju določenih naprav in sistemov. V prvo skupino sodijo raznovrstne telekomunikacijske naprave, radijski in TV-oddajniki, bazne postaje mobilne telefonije, radijske terapevtske medicinske naprave, mikrovalovne pečice...

V drugo skupino sodijo vse naprave, ki za svoje delovanje potrebujejo električno napetost ali zaradi njihove uporabe teče električni tok. To so poleg že naštetih še vsi gospodinjski

električni aparati, transformatorji, hišne električne napeljave, električna distribucijska omrežja in daljnovodi...

Glavni viri električnih in magnetnih polj nizkih frekvenc 50 Hz so umetni viri elektromagnetnih sevanj, torej tisti, ki jih povzroča človek, to pa so naprave za prenos in distribucijo električne energije, transformatorske postaje in vse naprave, ki za svoje delovanje uporabljajo električno energijo. Jakost elektromagnetnega sevanja, ki ga sproščajo umetni viri, je v primerjavi z naravnimi viri (zemeljsko statično magnetno polje, električno polje, ki nastane zaradi razelektritev v ozračju - strela...) neprimerno večja. Ko električno napravo priključimo na elektriko, nastane v njeni okolici električno polje. Čim večja je napetost, tem močnejše je električno polje na določeni razdalji od naprave. Za sproščanje električnega polja ni potrebno, da naprava deluje, saj lahko napetost obstaja tudi tedaj, ko tok ne teče. Magnetno polje pa v nasprotju z električnim nastane le takrat, ko je naprava vključena in tok teče. Takrat sta v prostoru tako električno kot magnetno polje. Čim večja je poraba električne energije, s tem pa tudi električnega toka, tem močnejše je magnetno polje.

4. ELEKTROMAGNETNO SEVANJE V SLOVENSKI ZAKONODAJI

Smernice o mejnih vrednostih izpostavljenosti elektromagnetnih sevanj, ki so jih poleg Slovenije prevzele številne države po vsem svetu, izdaja Mednarodna komisija za varstvo pred neionizirajočimi sevanji (ICNIRP), ki je v svetu največja avtoriteta na tem področju. Mednarodne smernice in standardi za elektromagnetna sevanja nastajajo na podlagi trenutnih dognanj znanosti, njihov namen pa je zagotoviti, da elektromagnetna sevanja, ki so jim ljudje dnevno izpostavljeni, ne bodo škodovala zdravju. Ker je zelo težko ugotavljati, kakšni so dolgoročni učinki sevanja na zdravje in je glede tega prisotna znanstvena negotovost, je v smernice glede mejnih vrednosti izpostavljenosti vgrajen dodatni 50-odstotni varnostni dejavnik. Zato so mejne vrednosti izpostavljenosti za polovico nižje od znanstveno določenega praga. Poseben varnostni faktor je upoštevan predvsem zaradi dela prebivalstva (otroci, nosečnice, ostareli), ki je morebiti bolj občutljiv za izpostavljenost električnim ali magnetnim poljem. Vlada Republike Slovenije je leta 1996 sprejela Uredbo o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju [3], ki natančno določa največje dovoljene mejne vrednosti. Uredba je pri novih posegih v prostor z dodatnim preventivnim dejavnikom zaščitila najbolj občutljiva območja (I. območje varstva pred EMS, kamor sodijo bivalno okolje, šole, vrtci, bolnišnice ...). Za ta območja je zahtevano povečano varstvo pred sevanji, zato zanje veljajo desetkrat strožje omejitve kot v Evropski uniji. Za II. območje varstva pred EMS (to je območje, kjer ni stanovanjskih zgradb) veljajo v Sloveniji za magnetno polje enake omejitve kot v Evropski uniji, za električno polje pa so dovoljene dvakrat nižje vrednosti.

Mejne vrednosti veličin s katerimi opišemo elektromagnetno sevanje vodov

Pod elektromagnetno sevanje frekvence 50 Hz, kot ga imenuje slovenska Uredba (2. člen, 2. odstavek), spada elektromagnetno polje razdelilnih transformatorskih postaj, nadzemnih in

podzemnih elektroenergetskih vodov, visokonapetostnih transformatorjev itd. Pri tej frekvenci ločimo obravnavo polja na:

- električno polje, ki ga opišemo z efektivno vrednostjo električne poljske jakosti E [V/m], ki je odvisna od napetosti vira sevanja oziroma elementa;
- magnetno polje, ki ga opišemo z efektivno vrednostjo gostote magnetnega pretoka B [T], ki je odvisna od toka vira sevanja oziroma elementa.

Pri izračunih vplivov elektromagnetnega sevanja je potrebno računati z najneugodnejšimi možnimi obremenitvami okolja z elektromagnetnim sevanjem, ki se lahko pri normalnem obratovanju pojavijo.

Mejne vrednosti pri omrežni frekvenci 50 Hz, ki jih določa Uredba, so za I. območje varstva pred EMS 500 V/m in 10 μT, za II. območje pa 10000 V/m in 100 μT.

5. ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST PREMEGA VODNIKA

V vodih, ki jih uporabljamo za prenos električne energije, imamo omrežno frekvenco 50 Hz, ki povzroča elektromagnetno polje s frekvenco 50 Hz. To elektromagnetno polje spada v tako imenovano nizkofrekvenčno polje, oziroma po dogovoru na mednarodni ravni, med elektromagnetna polja zelo nizkih frekvenc (ELFF), ki obsegajo frekvenčno območje od 30–300 Hz. To je področje, pri katerem ne govorimo o elektromagnetnem polju, temveč o električnem in magnetnem polju ločeno [4].

Električno polje je posledica prisotnosti električnih nabojev na vodnikih in na zemlji. Pri električnih vodnikih pa je posredno povezano z električnimi napetostmi vodnikov do zemlje, čim višje so napetosti, tem močnejše je električno polje.

Za premi neskončno dolgi vodnik predpostavimo, da ima po vsej površini konstantno porazdeljen električni naboj. Naboj na takšnem vodniku lahko opišemo s premo elektrino, ki v splošni točki T(x,y) (slika 5.1) povzroča naslednji vektor električne poljske jakosti:

$$\vec{E} = \vec{1}_r \cdot \frac{q_+}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{\left|\vec{r}_+\right|} \tag{5.1}$$

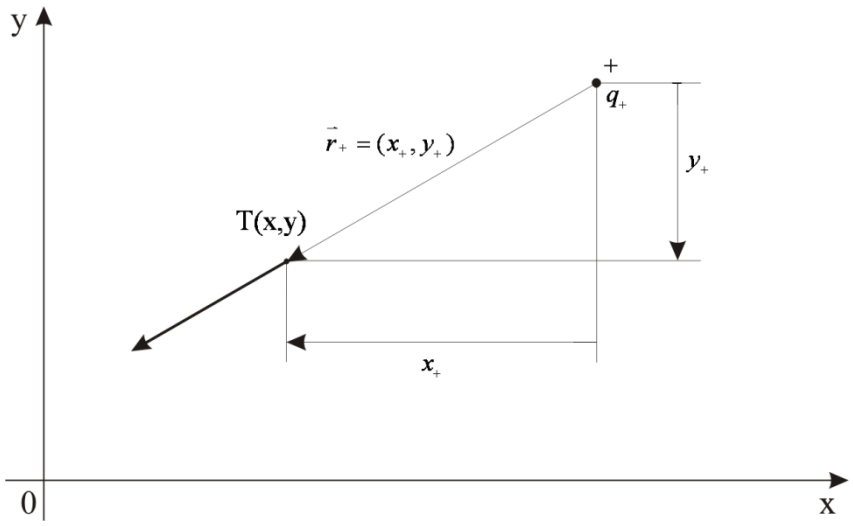
pri tem je:

$\vec{1}_r$ enotski vektor razdalje,

q_+ pozitivna vrednost premega naboja,

$\left|\vec{r}_+\right|$ absolutna vrednost vektorja razdalje med elektrino in točko opazovanja,

ε_0 dielektričnost praznega prostora.



Slika 5.1: Električno polje preme elektrine

Za izračun električne poljske jakosti vodnika nad prevodno podlago uporabimo metodo ekvivalentnih nabojev. Njena glavna ideja je, da površinski naboj na bližnji prevodni podlagi (v našem primeru zemlji) zamenjamo z zrcalnimi površinskimi naboji nasprotnega predznaka, preslikanimi preko prevodne podlage.

$$[q_+] = [C] \cdot [V], \tag{5.2}$$

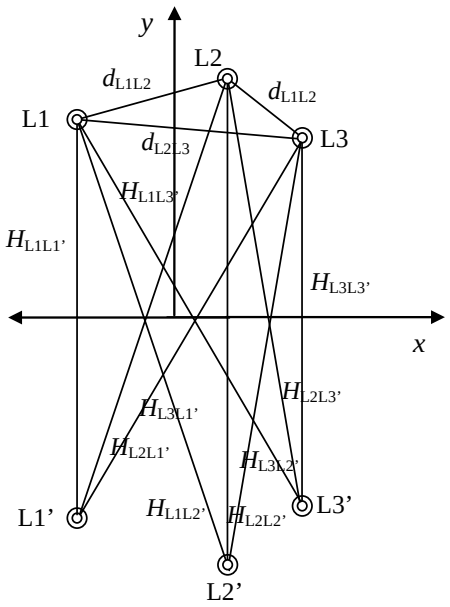
pri tem pomenijo:

$[q_+]$ stolpčni vektor pozitivnih nabojev,

$[V]$ stolpčni vektor potencialov vodnikov,

$[C]$ kvadratna matrika kapacitivnosti.

Matriko $[C]$ dobimo tako, da najprej določimo elemente matrike potencialnih koeficientov voda $[p]$. [5].



Slika 5.2: Zrcaljenje vodnikov preko prevodne podlage

Napetost na dvoslojni izolaciji se razdeli obratno sorazmerno relativni dielektričnosti. Ob upoštevanju izolacije vodnikov in oznak na sliki 5.2 so:

»lastni« potencialni koeficienti

$$p_{ii} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{r2}} \cdot \ln\frac{r_2}{r_1} + \ln\frac{H_{ii}}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \tag{5.3}$$

oziroma »medsebojni«

$$p_{ij} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{r2}} \cdot \ln\frac{r_2}{r_1} + \ln\frac{H_{ij}}{d}}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \tag{5.4}$$

Naboje na vodnikih (ki so edini realni za računanje električne poljske jakosti) izračunamo kot produkt potencialnih koeficientov in trenutnih vrednosti napetosti.

S trenutnimi vrednostmi nabojev na vodnikih smo izračunali komponente električne poljske jakosti zaradi nabojev na vseh treh fazah v želeni točki.

Električna poljska jakost pravokotno na simetralo razpetine v točki največjega povesa

S takim analitičnim pristopom smo preverili skladnost nadzemnega voda za 400 kV s predlaganimi polizoliranimi vodniki z Uredbo [3]. Preverili smo električno poljsko jakost pravokotno na simetralo razpetine v točki največjega povesa 1 m nad zemljo. V v vsaki točki

smo vektorsko sešteli prispevke vseh faznih vodnikov in njihovih zrcalnih slik. V vsaki točki smo zabeležili največjo vrednost električne poljske jakosti v času ene periode.

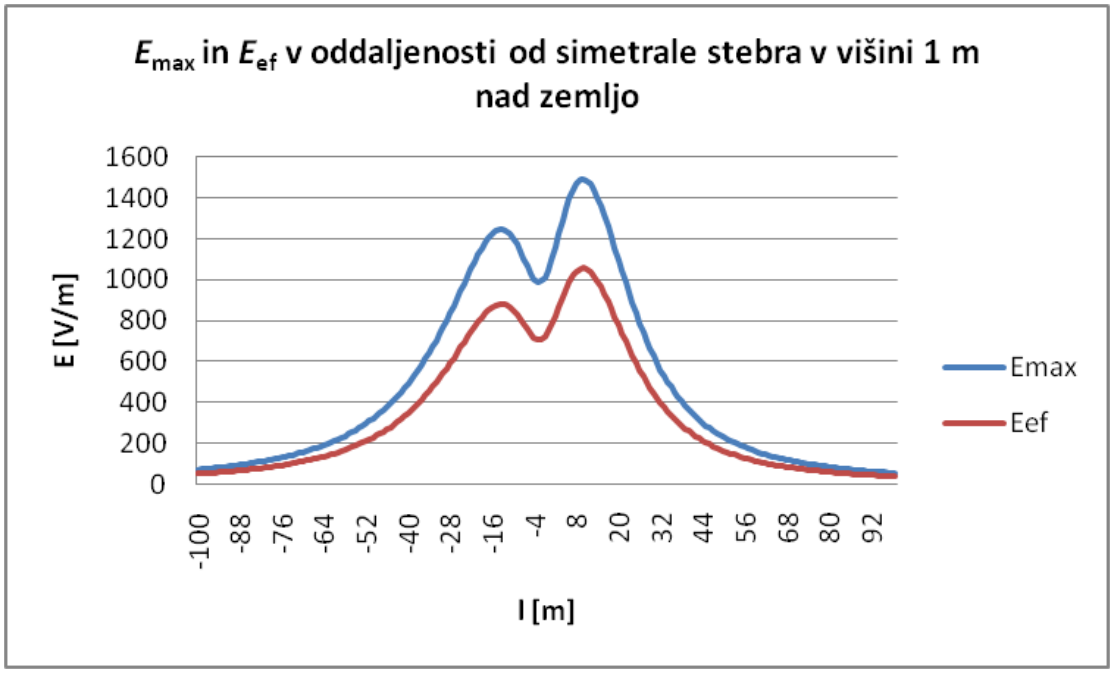
Efektivno vrednost električne poljske jakosti izračunamo s seštevanjem po celi periodi. Po definiciji je efektivna vrednost periodične veličine tista vrednost, ki naredi enak učinek kot ustrezna enosmerna veličina (enačba 5.5).

$$E_{\mathrm{ef}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E^2(t) \cdot \mathrm{d}t \tag{5.5}$$

kjer so

E_{ef} efektivna vrednost električne poljske jakosti
T perioda
E vektorska vsota prispevkov vseh nabojev

Točke smo računali v razdalji 100 m levo in desno od simetrale nadzemnega voda s korakom po 1 m. Rezultati so grafično podani na sliki 5.3. Tabelarično so vrednosti podane v [6].



Slika 5.3: Električna poljska jakost pravokotno na simetralo razpetine v točki največjega povesa

Električna poljska jakost pade pod z Uredbo [3] dovoljeno mejo na razdalji 30 m od simetrale voda.

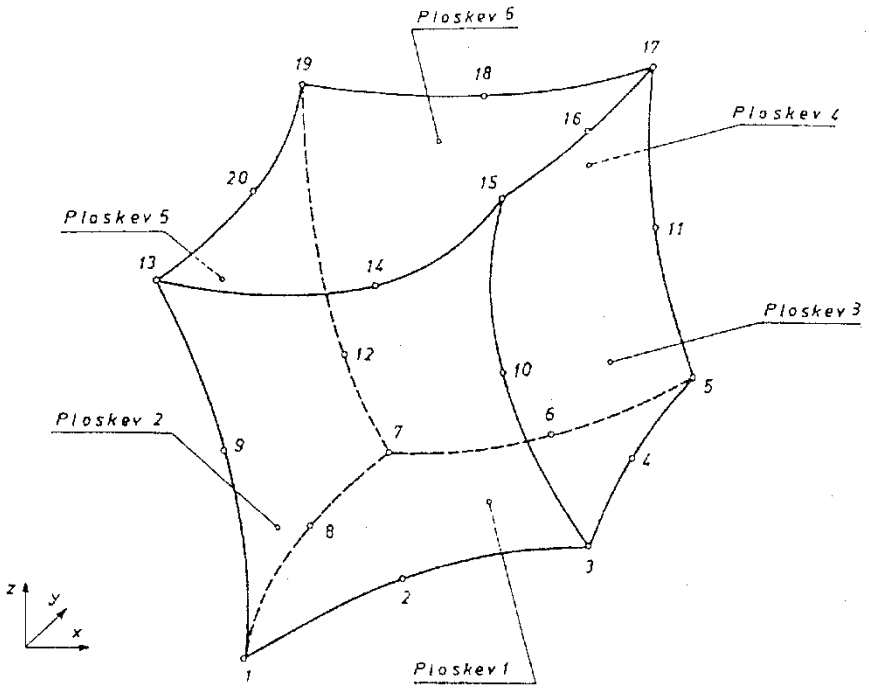
6. IZRAČUN ELEKTRIČNE POLJSKE JAKOSTI Z METODO KONČNIH ELEMENTOV

Metodo končnih elementov sedaj uporabljamo že na mnogih področjih tehnike, razvili pa so jo za računanje ekstremnih vrednosti v verjetnostnem računu. Metoda končnih elementov zadošča vsem zahtevam za numerično reševanje električnih polj. Z njo lahko računamo ravninska ali prostorska polja, polja z ali brez prostorskega naboja. Metodo je možno uporabiti pri reševanju poljubnih oblik, tudi za večslojne anizotropne dielektrike, ki imajo v različnih smereh različne lastnosti. Največja težava te metode je diskretizacija – delitev prostora. S primernimi algoritmi je mogoče tudi ta postopek avtomatizirati. Za izračun odprtih razporeditev elektrod je potrebno poznati robne pogoje kot znane potenciale ali silnice.

Za izračun elektrostatičnih polj naj bi bila funkcija potenciala V rešitev Laplaceove enačbe. Istočasno funkcija V pod določenimi robnimi pogoji minimizira energijo W določenega prostora $\mathcal{V}$.

$$W = \int_{\mathcal{V}} \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_\mathrm{r} \cdot \left(\mathrm{grad}\ V\right)^2 \cdot \mathrm{d}\mathcal{V} \tag{6.1}$$

Elektrostatično polje se tako oblikuje, da je električna energija najmanjša. Za izračun prostor diskretiziramo - razdelimo na poljubno oblikovane končne elemente. Za dvodimenzionalne probleme uporabimo na primer trikotnike, kot končne elemente, za tridimenzionalne probleme, pa lahko uporabimo tetraedre. Ti dve tvorbi omogočata (krajevno omejeno) enostavno nadaljno delitev mreže v področjih velikih sprememb električne poljske jakosti. V novejšem času uporabljamo končne elemente drugega reda (izoparametrične elemente), dvodimenzionalne z osmimi vozlišči in tridimenzionalne z dvajsetimi vozlišči (slika 6.1). Ti elementi omogočajo modeliranje tudi ukrivljenih robov in površin z relativno enostavno upodobitvijo [7].



Slika 6.1: 3D končni element z 20. vozlišči ter oštevilčenjem vozlov in stranic

Znotraj elementov aproksimiramo potek potenciala V kot funkcijo koordinat x, y in z. Posebej primerni so polinomi.

Vsaka točka doprinese k prostorninski gostoti energije električnega polja:

$$w = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_\mathrm{r}\left(\mathrm{grad}\,V\right)^2. \tag{6.2}$$

Za dvodimenzionalna polja je prispevek vsakega elementa polja ploskovni integral. Za izračun polja je treba ta ploskovni integral raztegniti čez celotno opazovano območje.

$$W = \frac{1}{2}\int_A \varepsilon_0\varepsilon_\mathrm{r}\left(\mathrm{grad}\,V\right)^2\,\mathrm{d}A \tag{6.3}$$

Minimizacijo energije dosežemo z odvajanjem za vsako vozlišče i mreže:

$$\frac{\partial W}{\partial V_\mathrm{i}} = f\left(V_\mathrm{i}, c_\mathrm{i}\right) = 0. \tag{6.4}$$

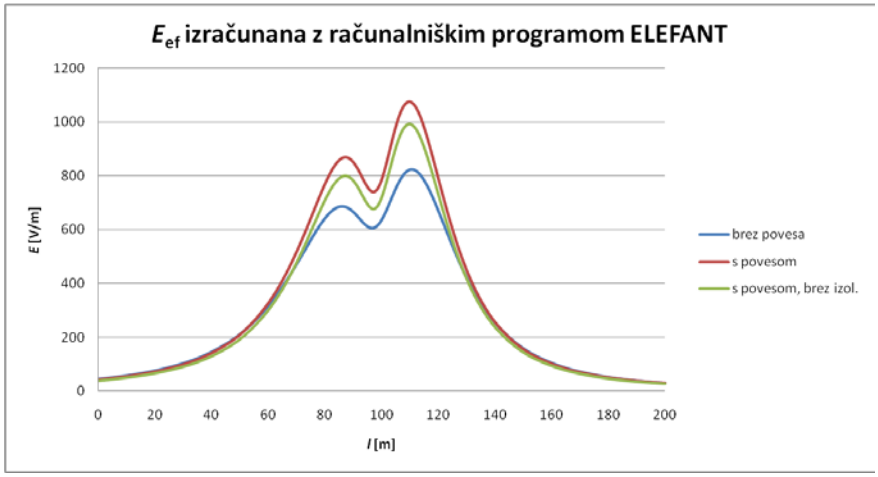
Del potencialov V_i so podani potenciali elektrod, ostale lahko izračunamo. Pogoj je, da so znani vsi robni potenciali. Posebna prednost metode je fleksibilnost pri določanju mreže. Uporabniku prijazni računalniški programi znajo avtomatsko prilagajati velikost mreže v odvisnosti od nehomogenosti polja. Naslednja značilnost je, da lahko že takoj zajamemo

različne relativne dielektričnosti (enačba 6.2). Vse to postavlja to metodo trenutno za meritorno. Pričakovana točnost je odvisna od vrste funkcije, s katero aproksimiramo potencial. Višja stopnja polinoma da točnejšo rešitev in zahteva daljši izračun. Za izračun polja popolnoma zadošča že polinom druge stopnje.

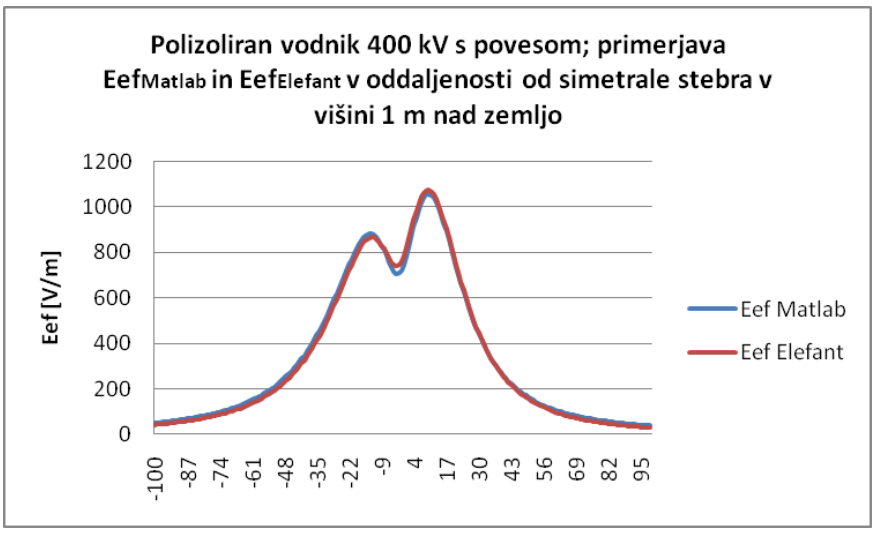
Izračun električne poljske jakosti prečno na vod

Kot rezultat je prikazana sliki, ki prikazuje izračun efektivne vrednosti električne poljske jakosti prečno na vod v točki največjega povesa. Primerjan je izračun s programom Matlab in s programom Elefant (slika 6.3).

Ob primerjavi vidimo, da dobimo pri obeh izračunih približno enak rezultat in da so po obeh metodah vrednosti pod dopustnimi efektivnimi vrednostmi, ki jih predpisuje zakonodaja.



Slika 6.2: E_{ef} v točki največjega povesa, izračunana z računalniškim programom ELEFANT®



Slika 6.3: Primerjava izračuna E_{ef} prečno na vod v točki največjega povesa z Matlabom in Elefantom

Efektivno vrednost na sliki 6.3 (Elefant) smo dobili tako, da smo izračunali efektivno vrednost vsakih 10 stopinj. Iz teh vrednosti smo izračunali efektivno vrednost ($E_{\text{ef}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E^2(t) \cdot \mathrm{d}t$).

Na sliki 6.3 je prikazan izračun za točke 1 m nad zemljo prečno na daljnovod v točki največjega povesa.

7. SKLEP

Po podatkih iz literature so vodniki z jedrom iz karbona do dve tretjine lažji kot klasični z jeklenim jedrom. Menimo, da prihranek na masi zadošča za dodano maso izolacijskega materiala in bi bili tako stebri kakor kapasti izolatorji zmožni nositi takšne polizolirane vodnike. Potrebna je natančnejša raziskava, predvsem vpliva vetra na obremenitev vodnikov in stebrov.

Z računalniškim programom smo izračunali fazne napetosti linijskih vodnikov v odvisnosti od časa (v času ene periode – 20 ms). Na osnovi geometrije (razporeditve vodnikov in izolacije na vodnikih), smo izračunali potencialne koeficiente s kapacitivnostjo (inverzno vrednostjo matrike potencialnih koeficientov); s trenutnimi vrednostmi napetosti smo izračunali trenutne naboje na faznih vodnikih. Z znanimi naboji smo v iskani točki izračunali vse tri vektorje električnih poljskih jakosti, ki jih v iskani točki povzročajo trenutne vrednosti nabojev na posameznih linijskih vodnikih. Trenutne vrednosti vektorjev smo v iskani točki sešteli in dobili skupni vektor električne poljske jakosti, ki ga povzročajo vse tri trenutne vrednosti nabojev na linijskih vodnikih. Dobljena električna poljska jakost ni sinusna veličina, je pa periodična. Efektivno vrednost smo izračunali skladno z definicijo.

Efektivno vrednost (Elefant) smo dobili tako, da smo izračunali efektivno vrednost vsakih 10 stopinj. Iz teh vrednosti smo izračunali efektivno vrednost.

Po analitični metodi in z metodo končnih elementov smo izračunali električno poljsko jakost v točki največjega povesa. Izračuna sta skladna in potrjujeta našo hipotezo, da polizoliran vodnik manj vpliva na okolje kot klasična dvoslojna 'gola' vrv.

8. VIRI, LITERATURA

[1] Jože Voršič, Jože Pihler, *Tehnika visokih napetosti in velikih tokov,* Univerza v Mariboru, FERI, Maribor 2005.

[2] Žiga Voršič, Jože Pihler, Janez Ribič, *Mehanske lastnosti polizoliranih vodnikov,* Elektrotehniški vestnik, (v tisku), Ljubljana 2014

[3] Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju, Uradni list RS, št. 70/1996

[4] Janko ŠARMAN, *Električno in magnetno polje v okolici visokonapetostnih daljnovodov 110,220 in 400 kV*, diplomska naloga, UM FERI, 1999.

[5] Igor TIČAR, Tine ZORIČ, *Osnove elektrotehnike 1. zvezek Elektrostatična in tokovna polja*, Univerza v Mariboru, FERI, Maribor 2003

[6] Žiga Voršič, *Uporaba polizoliranih vodnikov pri najvišjih napetostih*, magistrska naloga, UM FERI, 2010

[7] Igor TIČAR, Oszkar BIRO, Kurt PREIS, *Uporaba 2D in 3D metode končnih elementov v bielektromagnetnih raziskavah*, Tretja konferenca slovenskih elektroenergetikov, Nova Gorica, 3.-5.junij 1997.

[8] Manfred Beyer, Wolfram Boeck, Klaus Möller, Walter Zaengl, *Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen*; Springer-Verlag 1986.

[9] IEC 60652 (2002), *Voltage measurement by means of standard air gaps (one sphere earthed)*, International Electrotechnical Commission, Geneve 2002.

[10] Arnold Roth, *Hochspannungstechnik*, Springer Verlag, Wien 1938.

[11] Terminološka komisija (urednik Anton Ogorelec), *Slovenski elektrotehniški slovar, Področje elektroenergetika*, Sloko CIGRÉ, Ljubljana 1996.

[12] A. Leschanz, *Hochspannungstechnik 2, Studienbehelf*, Institut fur Hochspannungstechnik an der Technischien Hochschule in Graz, Graz 1973.

[13] Andreas Kuechler, *Hochspannungstechnik*, VDI Verlag, 1996.

NASLOV AVTORJEV

mag. Žiga Voršič [1], univ.dipl. inž.el.

red. prof. dr. Jože Pihler [2]

doc. dr. Peter Kitak [2]

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

Zagrebška cesta 85, 2000 Maribor, Slovenija

[2] Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija