

Magnetno in električno polje v okolici daljnovidnega stebra

Zemljarič Borut¹, Anton R. Sinigoj²

¹ IBE d.d., Hajdrihova 4, 1000 Ljubljana

² Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: borut.zemljarič@siol.net

Povzetek. Težavnost pridobivanja dovoljenj za izklop pomembnejših daljnovodov zunaj napovedanih terminov zahteva od vzdrževalnega osebja gibanje v območjih, ki so obremenjena z elektromagnetnim poljem. Smernice za varno delo pod napetostjo so podane predvsem glede opredelitve še dopustnih razdalj približevanja do vodnikov, praksa pa kaže, da je zaznavanje učinkov elektromagnetnih polj ob stebru omejitev pri vzdrževanju in da so določeni tipi stebrov sprejemljivejši od drugih, čeravno so razdalje do virov podobne. Steber je namreč prevodno-feromagnetna struktura, ki v svoji okolici povzroči bolj ali manj očitno perturbacijo siceršnjega elektromagnetnega polja. V članku se ukvarjamo z računanjem električnega in magnetnega polja ob stebru, upoštevajoč njegovo palično zgradbo. Oba izračuna temeljita na razdelitvi strukture daljnovidnega stebra in vodnikov v ekvivalentni sestavi valjev ustreznih izmer ter določitvi tokov in nabojev v/na njih. Končni izračuni kažejo na šibko perturbacijo magnetnega in močno perturbacijo električnega polja. Numerični rezultati med drugim potrjujejo tudi navedbe vzdrževalcev: da je – s stališč poljske jakosti in učinkov polja, ki jih človek zazna ob 400 kV daljnovidnem stebru – sodasti dvosistemiški steber ugodnejši od enosistemskega stebra Y. Razvit numerični model omogoča nadgradnjo in analizo polj tudi v drugih aktualnih strukturah.

Ključne besede: električno, magnetno, elektromagnetno, daljnovod, vzdrževanje

Magnetic and electric field near overhead line towers

Extended abstract. Since it is hard to disconnect important overhead power lines outside the foreseen terms, the maintenance personnel have to move on environment exposed to electromagnetic fields. The applicable guidelines for safe work under operating lines define the limit distances between the maintain personnel and live conductors. In practice, human sensitivity of the invisible electromagnetic fields on towers is also restraint at maintenance. Certain tower types are more acceptable from standpoint of electromagnetic fields as second, although the distance measured to source is the same.

As seen from literature, the issue of electromagnetic fields near overhead transmission towers has not yet been discussed. Most of the authors deal with calculations of the electromagnetic fields near overhead power line primary concentrated with conductors [1]. The idea of field calculations discussed in this paper is basically used in high voltage substation fields [2,3].

Our focus was on the magnetic and electric field calculations, for the three-dimensional structure of line towers. In both calculations the overhead tower elements and conductors was divided into an equivalent assembly of sticks of the final length. Calculations of the corresponding charges and currents on and in it were made next. By dividing the elements we define the use of the moment method, where test functions are pulses of the same width as stick elements. In the calculation model, all the tower elements, which are of a non-circular form, are translate into the equivalent form shown in figure 1. Equivalent radius covers the surface area of the original element.

First, we determine equation for the vector magnetic potential of the current stick. To calculate magnetic field, all the currents in conductors and tower structure elements have to be known. The currents are determined through the model circuit of magnetically connected branches and analyses by

the tools of the electric circuits (5). The land contribution to primary magnetic field is neglected. The magnetic field is calculated by using the Biot-Savart law with summarizing all the sources (6).

To calculate the electric field, the scalar potential equation on the elements surface is used and the land contribution is taken into calculation (7). First, the conductor potential is known. Second, from the magnetic field analyses the scalar potential of all of the structure sticks are determined. We then join the magnetic and electric considering views, so far separated in the quasi-static approach. Here is the difference between us and other authors' who assume the potential of a grounded structure to be equal to zero. By using new approach, charges on sticks are calculated. Then electric field in an arbitrary point is calculated as a sum by using the Coulomb and Faraday law (12).

All calculations were made with the Matlab tool. At first, the overhead line geometry and tower structure are made. They are obtained from determination of the sticks start and end points, internal impedance of sticks and primary source values. In the second part we calculate the matrix coefficients regarding the magnetic and electric equations. Coefficients are expressed with double integrals, which are solved numerically.

Our results show that perturbation of the magnetic field is weak and of the electric field is strong. Our numerical results, too, confirmed the maintainers observations that electric field strengths, that it is achieved near 400 kV overhead towers, the geometry of single circuit line tower in shape Y is less favorable from double circuit barrel tower, from human sensitivity standpoint.

The presented electric and magnetic field calculations can be used and extended for any shape of electric structure.

Keywords: magnetic, electromagnetic, power line, transmission, maintenance.

1 Uvod

Osnovni cilj elektroenergetskega sistema je, da porabnikom električne energije zagotovi zanesljivo in kakovostno električno energijo. V njem naj bi bilo čim manj okvar, prekinitev in motenj. Naraščanje porabe električne energije in težavnost graditve novih povezav postavljata upravljavce elektroenergetskih sistemov pred zahtevo, da obstoječe povezave izkoristijo v največji meri: daljnovodi naj bi obratovali neprekinjeno in brez napak, časi odklopov, potrebni za vzdrževanje naprav, pa naj bi bili čim krajši. Nasprotujoče si zahteve po kakovosti dobave in nezmožnost odklopov delov sistema povečujejo delež posegov v naprave, ki so pod napetostjo: mišljeni so preventivni vzdrževalni pregledi objektov v bližini virov in konkretna dela na virih ali ob njih.

Smernice za varno delo pod napetostjo so podane v smislu dopustnih razdalj do vodnikov, čeravno se v praksi izkaže, da je zaznavanje elektromagnetnih polj ob stebru odvisno od njihove geometrije: da so določeni tipi stebrov sprejemljivejši od drugih, četudi so razdalje do virov podobne.

Steber kot prevoden feromagnetni objekt je v resnici tujek, ki delno spremeni siceršnje elektromagnetno polje daljnovoda. Izračun končnega polja ob stebru zato zahteva predhodno določitev lokalnih virov na/v stebru, ki so skupaj s primarnimi soodgovorni za to polje.

Pregled literature s tega področja pokaže, da problem elektromagnetnega polja ob daljnovodnem stebru neposredno še ni bil obravnavan, čeravno del na temo elektromagnetnih polj ne manjka; avtorji so praviloma osredotočeni na izračune polj v neposredni bližini daljnovoda oziroma vodnikov in na izvajanje obratovalnega monitoringa [1]. Večina jih obravnava visokonapetostne razdelilne postaje na način, ki ga bomo uporabili tudi pri naši nalogi: da sta za izračun električnega in magnetnega polja odgovorni porazdelitvi elektrin in tokov v/na/ob obravnavanem objektu [2, 3].

V članku smo se osredotočili na električno in magnetno polje ob daljnovodnih stebrih oziroma na odstopanje teh od polj, ki jih poznamo na razpetinah med stebri. Predstavili smo matematično-fizikalni model, ki vključuje fazne vodnike, zaščitno vrv, paličje daljnovodnega stebra in zemljo. Model se pri določanju magnetnega polja prevede v reševanje vezja magnetno sklopljenih vej, pri določanju električnega polja pa v reševanje sistema električno sklopljenih teles.

2 Izhodišča

Obravnava bo potekala v $j\omega$ -prostoru: kompleksor $\underline{\Psi}(T)$ podaja skalarno časovno funkcijo $\psi(T, t)$, kompleksni vektor $\underline{\mathbf{C}}(T) = (\underline{C}_x, \underline{C}_y, \underline{C}_z)$ pa vektorsko funkcijo $\mathbf{C}(T, t)$. Harmonično zakonitost dobimo s pripojitvijo faktorja $e^{j\omega t}$; npr. $\psi(T, t) = \text{Re}[\underline{\Psi}(T)e^{j\omega t}]$.

Zaradi industrijske frekvence (50 Hz) bomo elektromagnetno polje obravnavali kot kvazistatično, kot polje, pri katerem potencialov in virov neposredno ne vežeta kontinuitetni enačbi. Viri polja so v tem primeru privzeti, lahko pa so tudi povezani, vendar tega ne določa daljnovodni sistem, ampak strukture, ki z njim oblikujejo elektromagnetno celoto. Primer te povezanosti bo viden ob določanju porazdelitve elektrine in električnega polja ob stebru, ki bosta izšla iz magnetnega polja, in tokov v paličju stebra. Naloga se v vsakem primeru razdeli v izračun magnetnega in zatem še električnega polja.

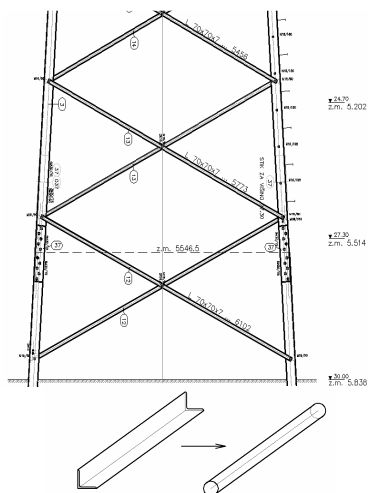
Vektorski magnetni potencial $\underline{\mathbf{A}}$ v prostoru določajo toki v vodnikih in paličju stebra. S pomočjo zveze $\underline{\mathbf{J}} = \gamma \underline{\mathbf{E}}$ (med tokovno gostoto, specifično električno prevodnostjo in električno poljsko jakostjo) moremo pristopiti k modeliranju paličja kot vezja sklopljenih impedanc. Tako izračunamo tokove v stebru, v nadaljevanju pa tudi končno magnetno polje, katerega gostota je $\underline{\mathbf{B}} = \nabla \times \underline{\mathbf{A}}$. Iz računskega modela izide tudi porazdelitev električnega potenciala \underline{V} na paličju. Iz njega in vsiljenih potencialov na daljnovodnih vrveh določimo zatem še porazdelitev elektrine po stebru in jakost električnega polja v prostoru: $\underline{\mathbf{E}} = -\nabla \underline{V} - j\omega \underline{\mathbf{A}}$. Vpliv zemlje na električno polje je zajet v zrcalnem učinku, vpliv zemlje na magnetno polje pa je, kot vemo, pri 50 Hz zanemarljiv [4].

Harmonično električno in harmonično magnetno polje opredeljujeta vektorja, katerih konici drsita po elipsah, vrednotimo pa ju z efektivnima vrednostma:

$$\text{npr. } E_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(|\underline{E}_x|^2 + |\underline{E}_y|^2 + |\underline{E}_z|^2 \right)}.$$

Daljnovodni stebri 110 kV-nega in višjega nivoja so jekleni in izvedeni kot paličje vogalnih profilov (od okoli $35 \times 35 \times 5$ mm na konici do $200 \times 200 \times 15$ mm na dnu stebra). Za potrebe računanja polja ob stebru smo paličje vogalnih profilov modelirali z valji, katerih radiji zagotavljajo enakost obsegov. Izbiro opravičuje težnja po enakosti gradnikov za vodnike in steber. Temu v prid govorita tudi kožni učinek in majhna vdorna globina za jeklo ter dejstvo, da je elektrina razporejena po površini paličja, slika 1.

Porazdelitve elektrine in toka vzdolž vodnikov in palic feromagnetnega stebra bomo aproksimirali z nizom impulzov. Pri računanju tokov v palicah bo dolžina impulzov ustrezala dolžinam palic, pri računanju elektrin pa bo dolžina impulzov nekajkrat krajša, saj je dinamika porazdelitve elektrin takrat izrazito neenakomerna.



Slika 2: Paličje jeklenega stebra in valj kot model za kotni profil

Figure 1: Bracing system and stick as a brace model.

3 Računanje magnetnega polja

Vektorski magnetni potencial v prostoru določa vsota prispevkov tokov I_k v npr. b valjih,

$$\underline{\mathbf{A}}(T) = \sum_{k=1}^b \underline{\mathbf{A}}_k = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=1}^b I_k \int_{L_k} \frac{d\mathbf{l}_k}{R}, \quad (1)$$

kjer pomeni R razdaljo med točko z osi k -tega valja in splošno točko T . V duhu momentne metode se s točko T preselimo v m -ti valj dolžine L_m in polmera ρ_m . Gustoto toka v njem določa enačba $\underline{\mathbf{J}}_m = \gamma_m \underline{\mathbf{E}}$, jakost polja pa potenciala, $\underline{\mathbf{E}} = -\nabla V - j\omega \underline{\mathbf{A}}$. Po združitvi sledi: $\underline{\mathbf{J}}_m / \gamma_m + j\omega \underline{\mathbf{A}} + \nabla V = \mathbf{0}$. Enačbo v nadaljevanju integriramo vzdolž daljice na površini m -tega valja:

$$\int_{L_m} \frac{\underline{\mathbf{J}}_m}{\gamma_m} \cdot d\mathbf{l}_m + \int_{L_m} j\omega \underline{\mathbf{A}} \cdot d\mathbf{l}_m + \int_{L_m} \nabla V \cdot d\mathbf{l}_m = 0. \quad (2)$$

Prvi sumand je integral poljske jakosti oziroma napetost \underline{U}_m , ki ustreza produktu notranje impedance \underline{Z}_m in toka valja, $\underline{U}_m = \underline{Z}_m I_m$. Po vstavitvi potenciala iz (1) v drugi sumand dobimo vsoto členov, katerih koeficienti ustrezajo zunanjim in medsebojnim impedancam valjev:

$$\int_{L_m} j\omega \underline{\mathbf{A}} \cdot d\mathbf{l}_m = \sum_{k=1}^b \frac{j\omega \mu_0}{4\pi} \int_{L_m} \int_{L_k} \frac{d\mathbf{l}_k \cdot d\mathbf{l}_m}{R} I_k = \sum_{k=1}^b \underline{Z}_{mk} I_k. \quad (3)$$

Integracija v k -tem valju teče po osi, v m -tem pa po površini. Če sta indeksa enaka, sta integracijski poti vzporedni daljici, oddaljeni za radij $\rho_m = \rho_{mm}$, ki je obenem tudi najmanjša vrednost razdalje R . Če namesto R pišemo razdaljo $\sqrt{R_{mm}^2 + \rho_{mm}^2}$, sta integracijski poti kar os valja, R_{mm} pa je oddaljenost integracijskih točk z osi. Storimo podobno še pri $k \neq m$ in pot po površini m -tega valja prenesimo v njegovo os. Za R pišemo razdaljo

$\sqrt{R_{mk}^2 + \rho_{mk}^2}$, pri čemer je R_{mk} oddaljenost integracijskih točk z osi valjev, ρ_{mk} pa geometrijska srednja vrednost obeh radijev. Tretji sumand da po integraciji razliko potencialov med koncema m -tega valja:

$$\int_{L_m} \nabla V \cdot d\mathbf{l}_m = \int_{L_m} dV = V(P_{m2}) - V(P_{m1}). \quad (4)$$

Iz navedenih razčlenitev sledi napetostna enačba m -tega valja:

$$\underline{Z}_m I_m + \sum_{k=1}^b \underline{Z}_{mk} I_k + V(P_{m2}) - V(P_{m1}) = 0, \quad (5)$$

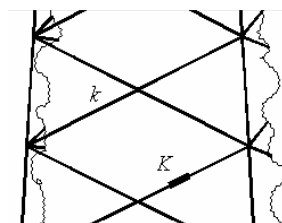
$m = 1, 2, \dots, n < b$.

Takšnih enačb je toliko, kolikor je valjev, v katerih določamo toke, v preostalih $b - n$ valjih pa so toki znani ali privzeti. Pridobljeni sistem (5) ima očitno več neznank kot enačb. Najprej se lotimo enačenja potencialov krajišč, ki oblikujejo spojišča, in indeksiranja spojišč valjev (teh naj je s). Od vseh spojišč je vsaj eno ozemljeno, v drugih pa zapišemo še $s - 1$ tokovnih enačb. Tako dobimo sistem $n + s - 1$ enačb za prav toliko neznank. Reševanja enačb za vezje z n vejami in s spojišči se v nadaljevanju lotimo s potrebno matrično metodologijo. Iz izračunanih tokov sledi zatem vektorski potencial (1) in prek rotorja še gostota magnetnega pretoka kjerkoli v prostoru:

$$\underline{\mathbf{B}}(T) = \nabla \times \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=1}^b I_k \int_{L_k} \frac{d\mathbf{l}_k}{R} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=1}^b I_k \int_{L_k} \frac{d\mathbf{l}_k \times \mathbf{R}}{R^3}. \quad (6)$$

4 Računanje električnega polja

Elementi strukture so še vedno valji, le da so tokrat veliko krajši. Zaradi formalnega razlikovanja bomo indeksiranje novih valjev opravili s črkama K in M , število vseh valjev pa označili z B , slika 2.



Slika 1: Palica (k) in del paličja (K) stebra

Figure 2: Stick (k) and part of stick (K).

Električni potencial v točki T določa integral prispevkov diferencialnih elektrin z valjev (upoštevajoč tudi zrcalne elektrine). Pri tem se sklicujemo na dejstvo, da elektrine z valjev učinkujejo v prostor kot naelektrene daljice, ležeče v oseh valjev:

$$V(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^B q_K \int_{L_K} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{zrc.}} \right) d\mathbf{l}_K. \quad (7)$$

Linijsko gostoto elektrine q_K razumemo kot jakost impulza na dolžini l_K novega, krajšega valja. Potenciala v prostoru ne poznamo, ga pa v strukturi: na paličju smo ga računali hkrati s toki, na linijskih vodnikih pa so dani (izbrani), podobno kot njihovi toki. Zaradi ozemljitve stebra imamo možnost celotnemu paličju pripisati potencial nič voltov (kar se v literaturi prakticira, vendar ni čisto res), lahko pa se odločimo drugače in v izračun vključimo že izračunane potenciale. Potenciale krajišč novih valjev dobimo s pomočjo enačbe 5. Vanjo vnesemo že znane toke iz paličja in izračunamo razlike potencialov med konci valjev,

$$\underline{V}(P_{J1}) - \underline{V}(P_{J2}) = \underline{Z}_J \underline{I}_J + \sum_{K=1}^B \underline{Z}_{JK} \underline{I}_K, \quad (8)$$

nato pa s seštevanjem takšnih razlik od izbranega spojišča do krajišč novih valjev izračunamo iskane potenciale. Za M -ti valj sta to potenciala $\underline{V}(P_{M1})$ in $\underline{V}(P_{M2})$. Do potrebnega sistema enačb za izračun elektrin na novih valjih bomo prišli tako, da bomo točko T v zapisu (7) prenesli na površino M -tega valja in potencial integrirali vzdolž daljice na površini M -tega valja. Integral leve strani se pri linearni interpolaciji potenciala na valju izraža s potencialoma krajišč, ki sledita iz opisanega postopka,

$$\int_{l_M} \underline{V}(T) dl_M = \frac{1}{2} (\underline{V}(P_{M1}) + \underline{V}(P_{M2})) l_M, \quad (9)$$

integral desne strani pa vodi do potencialnih koeficientov P_{MK} :

$$\sum_{K=1}^B \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{l_M} \int_{l_K} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{zrc.}} \right) dl_K dl_M \right) q_K = \sum_{K=1}^B P_{MK} q_K. \quad (10)$$

Iz povedanega sledi sistem enačb za iskane gostote elektrin na novih valjih:

$$\sum_{K=1}^B P_{MK} q_K = \frac{1}{2} (\underline{V}(P_{M1}) + \underline{V}(P_{M2})) l_M, \quad (11)$$

$M = 1, 2, \dots, N < B$.

Koeficienti sistema enačb so povsem podobni onim v sistemu enačb 5. Razlike so v konstantah, dodatni zrcalni razdalji $R_{zrc.}$ in smernikih osi valjev. Če upoštevamo, da se integracija na K -tem valju izvaja po osi, na M -tem pa po površini, se tudi tokrat odločimo za vpeljavo reduciranih razdalj, ki jih bomo tokrat pisali kot $\sqrt{R_{MK}^2 + \rho_{MK}^2}$ oziroma $\sqrt{R_{zrc.MK}^2 + \rho_{MK}^2}$. Z njihovo uveljavitvijo se integracije v celoti prenesejo na osi valjev.

Za izračun elektrin izhajamo iz že izračunanih tokov v paličju stebra in potencialov linijskih vodnikov trifaznega sistema. Iz elektrin in tokov na v valjih sledi tudi jakost električnega polja:

$$\begin{aligned} \underline{E}(T) = & -\nabla \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^B \int_{l_K} q_K \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{zrc.}} \right) dl_K - j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{K=1}^B \underline{I}_K \int_{l_K} \frac{dl_K}{R} = \\ = & \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^B \int_{l_K} q_K \left(\frac{\mathbf{R}}{R^3} - \frac{\mathbf{R}_{zrc.}}{R_{zrc.}^3} \right) dl_K - j \frac{\omega\mu_0}{4\pi} \sum_{K=1}^B \underline{I}_K \int_{l_K} \frac{dl_K}{R}. \end{aligned} \quad (12)$$

5 Računski postopki

Računske postopke smo izvajali s programskim orodjem Matlab. V prvem delu smo opisali geometrijo daljnovodne in stebrne strukture, se odločili za načine segmentiranja strukture, opredelili začetke in konce palic in valjev, določili notranje impedance valjev in izbrali vrednosti primarnih virov. Zatem smo se lotili izračuna koeficientov matričnih enačb za potrebe izračuna magnetnega in električnega polja. Koeficienti se izražajo z dvojnimi integrali vzdolž osi valjev, izračunavajo pa se s postopki numerične integracije v Matlabu. Temu sledi oblikovanje matričnega sistema enačb in reševanje samega sistema, ki vodi do iskanih tokov in potencialov v prvem primeru in elektrin v drugem. Od virov do polja vodijo Biot-Savartov, Coulombov in Faradayev zakon, ki se v našem primeru izražajo z integracijami po valjih, na katerih so viri. Tudi te smo opravili s postopki numerične integracije v omenjenem okolju.

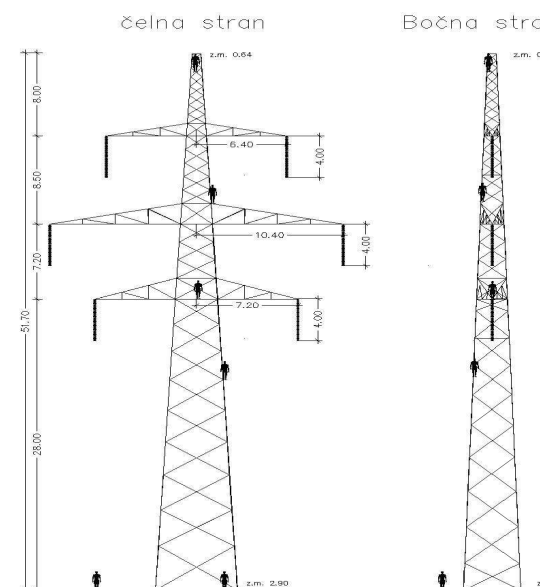
6 Analiza polj

V nadaljevanju želimo predstaviti rezultate učinkovitih vrednosti polj, ki povzamejo učinke elementov strukture na oblikovanost polja v aktualnih območjih prostora. Kot primer. Model dvosistemskega 400 kV stebra, ki smo ga v analizi rezultatov podrobno predstavili, je zahteval vnos okoli 250 gradnikov, slika 3. Toliko je bilo tudi tokov, ki smo jih določali za potrebe magnetnega polja. Za izračun gostot elektrin smo število elementov podeseterili. Izkáže se, da se čas magnetnega izračuna »meri« v minutah, čas električnega pa v urah.

Daljnovodni steber je opremljen z vodniki tipa Al/Je 490/65 mm² vrvi premera 30,6 mm z dvema v snopu na oddaljenosti 400 mm. Čez vrhove stebrov je obešana zaščitna vrv Al/Mg1 E 240/55 premera 22,4 mm. Za boljše predstavbo so vrisane silhete človeka, visokega 1,85 m. Pri izračunu smo za levi sistem upoštevali fazni razpored L1, L2, L3, za desnega pa L3, L2, L1. Za toke smo izbrali vrednost 800 A, za napetost pa 400 kV.

Daljnovodni steber je sestavljen iz množice palic, ki »zagotavljajo« težavnost izračuna. Ker pa je naš cilj določiti stopnjo vpliva stebra na okolico, raziščimo hkrati še mogoče poenostavitve te zapletene strukture. Steber poenostavimo s štirimi približki struktur:

struktura A- vsebuje linijske in zaščitne vrvi (običajni 2D primer brez stebrov),
struktura B- vsebuje vrvi in vogalnike stebra,
struktura C- vsebuje vrvi, vogalnike in konzole stebra,
struktura D- vsebuje vrvi, vogalnike, konzole in diagonale do spodnje konzole.



Slika 3: Dvosistemski 400 kV steber
 Figure 3: Double-circuit 400 kV tower.

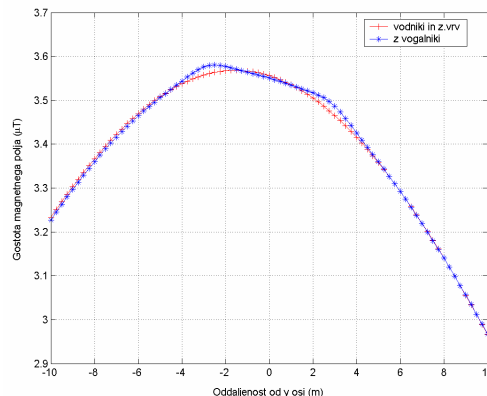
Analizirajmo najprej magnetno polje okolice stebra. Izračuni kažejo, da so inducirani tokovi v paličju majhni in za inženirsko prakso tako rekoč zanemarljivi, enako tudi potenciali. Če ne upoštevamo toka zaščitne vrvi, so inducirani tokovi v paličju reda velikosti 100 do 1000 μA . Razmere so nekoliko spremenijo s tokom zaščitne vrvi, ki se delno razvije skozi paličje, vendar tudi v tem primeru potenciali palic ne dosežejo zavidljivih vrednosti (le do nekaj deset voltov).

Iz izvedene analize sledi, da toki v paličju bistveno ne spremenijo primarnega magnetnega polja v njegovi okolici, kar ga pa, gre to na račun toka zaščitne vrvi, ki se delno usmeri skozi steber, slika 4. Ta prikazuje magnetno polje struktur A in B v čelni ravnini stebra.

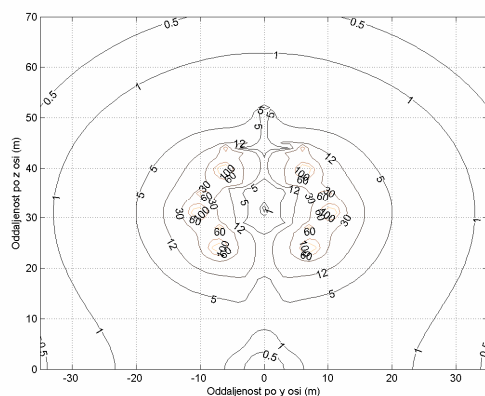
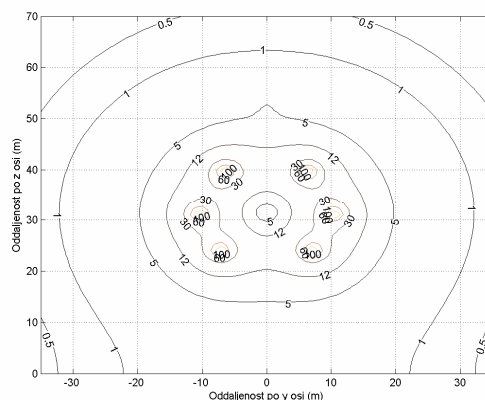
Nadaljujmo z analizo električnega polja. Na sliki 5 so prikazane izolinije električne poljske jakosti za strukturi A in C v čelni ravnini. Slika 5 zgoraj prikazuje klasično obliko jakosti polja, ki se vzpostavi na razpetini med stebroma, upoštevajoč linijske elektrine na vodnikih in zaščitni vrvi. Pri strukturi C razpadejo nivojske linije v izraziti polovici. Polje v bližini stebra ne presega 12 kV/m, nastane pa tudi zvončasta oblika jakosti polja na dnu stebra. Zaradi bližine stebra je polje pod njim šibkejše; slika 5 spodaj.

V višini glave stebra se jakost polja zmanjša, kar pripisujemo razširitvi ozemljenih delov konstrukcije, maksimalne vrednosti polj ostajajo podobne. Iz njih je

razvidna močna perturbacija polja v bližini stebra, ki pa stran od njega hitro izzveni. Razmere se približno 20 m



Slika 4: Perturbacija magnetnega polja 1,5 m od tal
 Figure 4: Magnetic field perturbation at the distance of 1.5 m from ground level.



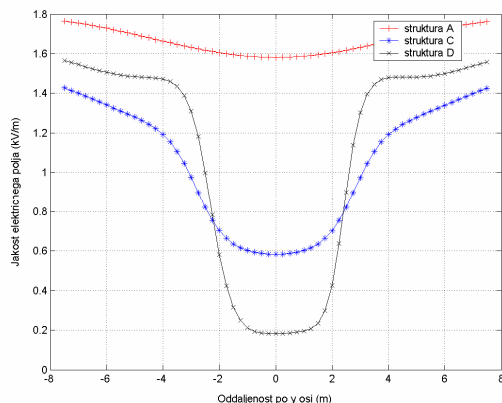
Slika 5: Električna poljska jakost v kV brez (zgoraj) in s stebrom (spodaj)
 Figure 5: Electric field in kV without (up) and with a (below) tower.

stran od stebra bistveno ne spremenjajo.

Zanima nas jakost električnega polja v bližini in znotraj »prosojnih« stena stebra do spodnje konzole. Opravili smo tri izračune: za polje v odsotnosti stebra,

struktura A, za polje z upoštevanjem vogalnikov, struktura C, in za polje z upoštevanjem pletenja diagonal stebra, struktura D; slika 6.

Kaže se izraziti upad jakosti polja znotraj pletenega stebra. Upoštevanje vogalnikov kaže na upad polja, čeravno so ti za 2,3 m oddaljeni od osi, pletenje pa oslabi polje do 0,2 kV/m.



Slika 6: Vpliv zaslanjanja paličja na električno polje
Figure 6: Stick impact on the electric field.

Povzemimo še rezultat primerjave električnega polja enosistemskega in dvosistemskega 400 kV stebra [8]. Upoštevač velikost vzdrževalca in njegovo pot gibanja po jekleni konstrukciji stebra račun pokaže, da pri enosistemskih stebrih tipa Y vzdrževalec prehaja prek električnega polja jakosti 35 kV/m, pri dvosistemskih stebrih prehaja prek polj velikosti 15 kV/m. Ko postavimo mejno vrednost zaznavanja električnega polja človeka na 20 kV/m, dobimo potrditev navedbe vzdrževalcev, da na Y stebrih »začutijo« polje.

7 Sklep

Dogaja se že, da se določene ključne energetske povezave ne smejo izklapljati iz sistema brez vnaprejšnje enoletne napovedi. Vse to otežuje potrebno vzdrževanje in preglede, ki morajo biti včasih izvedeni na obratujočem prenosnem vodu. Prav zato je podroben vpogled v elektromagnetne razmere na vseh delih daljnovidne trase še toliko pomembnejši.

Pri analizi magnetnega polja smo ugotovili, da so perturbacije polja ob stebrih neznatne. Pri analizi električnega polja smo opozorili na anomalije, ki se kažejo skozi oblikovanost izolinij jakosti polja, posvetili smo se morebitnim redukcijam, ki pohitrijo postopke analize, numerično smo potrdili tezo, da je z vidika zaznavanja polja dvosistemski steber do vzdrževalcev »prijaznejši« od enosistemskega, in za konec smo osvetlili še električno polje izza paličja.

Prikazan način izračuna magnetnega in električnega polja je mogoče uporabiti za katerokoli obliko palične strukture in jo po potrebi tudi smiselno nadgraditi.

Korak naprej je tudi možnost določitve električnega polja elektrin iz predhodno določenega magnetnega in inducirane polja. Čeravno se ta pristop pri daljnovidnem stebrih ni pokazal kot boljši od navadne aproksimacije, pa bo v prihodnosti na voljo pri problemih, kjer bo sklopljenost polj očitnejša in bo prišla tudi bolj do izraza.

8 Literatura

- [1] K. Budnik, W. Machczynski: »Contribution to studies on calculation of the magnetic field under power lines«, European transactions on electrical power, št. 16, str. 345 – 364, 2006
- [2] F. Dawalibi: »Elektromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors«, Part 2 – Ground networks«, IEEE Transactions on power delivery, Vol. PWRD-1, št. 4, str. 112 – 119, 1986
- [3] L. Huang, D. G. Kasten: »Modeling of ground grid and metallic structure currents in high voltage a.c. substations for the computation of electromagnetic fields«, Electric power systems research 59, str. 31 – 37, 2001
- [4] A. R. Sinigoj: »ELMG polje«, založba FE, Ljubljana, 1996
- [5] Zhang, J. He, X. Cui, S. Han, J. Zou: »Electric field calculation for HV insulators on the head of transmission tower by coupling CSM with BEM«, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 42, št. 4, str. 543 – 546, 2006
- [6] » Guidelines for insulation coordination in live working«, Working group 33.07, Cigre, 2000
- [7] G. Gela, H. J. Fox, R. Ferraro, T. Verdecchio, P. Lyons: »Live working on vintage 138 kV steel lattice structures«, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 16, št. 1, str. 6 – 11, 2001
- [8] B. Zemljarič: »Računanje električnega in magnetnega polja v okolici daljnovidnega stebra«, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2008

Borut Zemljarič je leta 1994 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, ter magistriral leta 2008. Deluje v okviru projektantske gospodarske družbe na mestu projektanta visokonapetostnih naprav. Ožja usmeritev je projektiranje visokonapetostnih nadzemnih vodov od 110 kV napetostnega nivoja navzgor. Poleg izdelave projektne dokumentacije je aktiven v okviru CIGRE ter delovne skupine za atmosferske zaledenitve objektov (IWAIS). Konkretni strokovni problemi so ga navedli k proučevanju elektromagnetnih polj in ustreznih numeričnih metod za njihovo reševanje. Trenutno je osredotočen na proučevanje polj okoli daljnovidnih stebrov z upoštevanjem realnih struktur.

Anton Rafael Sinigoj je diplomiral leta 1978, magistriral leta 1981 in doktoriral leta 1989 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Na tej fakulteti predava predmete Osnove elektrotehnike I in II ter Elektromagnetika. Področji njegovega dela sta teorija elektromagnetnega polja in uporaba numeričnih metod v elektromagnetiki.