

Analiza elektromagnetnega polja v okolici 400 kV daljnovodov

Rado Ferlič¹, Mladen Trlep²,

¹ Elektro-Slovenija d.o.o., Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana
E-pošta: rado.ferlic@eles.si

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ulica 17,
2000 Maribor, E-pošta: mladen.trlep@uni-mb.si

Povzetek. V članku sta podani osnovna teorija elektromagnetnega sevanja in primerjava med izračuni po metodi končnih elementov, ki temeljijo na dejanskih geometrijskih in električnih parametrih uporabljenih daljnovodnih podpor in primerjalnimi meritvami, ki so bile izvedene na karakteristični razpetini dvosistemskega daljnovoda 400 kV Maribor–Krško in Maribor–Podlog.

Ključne besede: elektroenergetski sistem, električno in magnetno polje, elektromagnetno sevanje

Analysis of electric and magnetic fields in the vicinity of 400 kV high-voltage power lines

Extended abstract. The paper describes the basic theory of electromagnetic radiation. The calculation results are compared with the comparative measurement results. The calculation is made with the finite-element method based on the actual geometry and electrical parameters of the used power lines. The comparative measurements were on the made on the high-voltage power line (HVPL) 2 x 400kV Maribor–Krško and Maribor–Podlog.

When dealing with electromagnetic fields, we have to know the real voltage and current waveform.

The amplitude of the electric field strength is namely affected by the actual voltage of the power line. For single voltage levels, the highest operating voltages can be 123 kV, 245 kV and 420 kV. The electric current that flows through a single phase conductor affects the amplitude of the magnetic field density. The highest permanently allowable current for the 400 kV power line is 1600 A. The voltage of the system does not change essentially during the operation of the power line, but the currents are directly dependent on the amplitude of electricity transmission at a specific moment. Therefore, the values are changed from zero to the highest possible line thermal rating. The paper shows the power line 2 x 400 kV Maribor – Krško and Maribor – Podlog, where the direction of energy flow in the single power line is opposite to the other. However, at a particular moment we must take into consideration the phase angle between the voltage and currents in

different systems.

Keywords: electrical power system, electric and magnetic field, electromagnetic radiation

1 Uvod

V sklopu slovenskega elektroenergetskega sistema obstajajo visokonapetostni daljnovodi (DV) nazivne napetosti 110 kV, 220 kV in 400 kV. Pri obravnavi elektromagnetnih polj je treba pravilno upoštevati vplivne veličine (napetost, tok, geometrijo), saj na vrednost električne poljske jakosti (E) vpliva napetost daljnovoda, ki za 110 kV napetostni nivo lahko doseže 123 kV, za 220 kV nivo je maksimalna napetost 245 kV in za 400 kV sisteme je maksimalna napetost 420 kV. Na vrednost gostote magnetnega pretoka (B) vpliva električni tok, ki teče po posameznem faznem vodniku. Kjer so na 400 kV napetostnem sistemu montirani vodniki Al/Fe 490/65, je po veljavnem standardu najvišji dopustni tok (termični tok) takšnega enojnega vodnika 960 A. Ponavadi sta v snopu dva vodnika, zato je dopustni tok 2x960 A. Po literaturi [4], se je za izračun elektromagnetnega sevanja upošteval tok 1600 A, ki je opredeljen s tokom merilnih transformatorjev.

Poleg obratovalne napetosti in toka na vrednost elektromagnetnega polja vplivajo še geometrijski parametri, med katere štejemo oddaljenosti delov pod napetostjo ali delov, ki prevajajo električni tok do opazovanega mesta. Za 400 kV napetostni nivo velja, da je najmanjša varnostna razdalja do vodnika 8 m.

Napetost sistema se med obratovanjem daljnovoda bistveno ne spreminja, medtem ko so tokovi neposredno odvisni od energije, ki jo v danem trenutku prenaša daljnovod, in se zato spreminjajo od vrednosti nič do mogoče trajno dopustne termične obremenitve vodnika. Pri enosistemskih vodih se za prenos električne energije uporablja en sistem, ki ga sestavljajo trije fazni vodniki, medtem ko je pri dvosistemskih vodih šest faznih vodnikov, razdeljenih v dva med seboj ločena sistema, ki lahko neodvisno drug od drugega prenašata električno energijo. Najneugodnejši primer tokovne obremenitve dvosistemskega voda za prenos električne obremenitve je, če prenaša električno energijo po obeh sistemih v isto smer, kar je treba pri izračunu tudi upoštevati.

S ciljem, da izračunamo največje vrednosti polja, je mogoče za preprostejše primere uporabiti analitični pristop s pomočjo Biot-Savart-ovega zakona, za zahtevne primere pa je korekten samo numerični pristop z uporabo 2D ali 3D izračunov. Pod daljnovodi je največje polje zagotovo v ravnini največjega povesa, zato je smiselna uporaba 2D izračunov s predpostavko, da so vodniki ravni, neskončno dolgi in vzporedni z zemljo, kar vpliva na nekoliko večji rezultat.

V nadaljevanju bo prikazan primer dvosistemskega daljnovoda 400 kV Maribor–Krško in Maribor–Podlog, pri katerih je smer pretoka električne energije nasprotna, je pa treba v danem trenutku upoštevati fazni kot med napetostjo in tokovi v različnih sistemih.

2 Teoretična podlaga

Elektromagnetno polje popolnoma opišemo s pomočjo Maxwellovih enačb [1]. Pri poenostavljeni obravnavi elektromagnetnega polja v okolici daljnovodov, ki je uporabljena v članku, problem prevedemo na reševanje 2D statičnega oz. kvazistatičnega električnega in magnetnega polja v ravnini X-Y, ki je prečno na smer vodnikov daljnovoda. Tako lahko za elektrostatično polje zapišemo naslednje enačbe:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi, \quad (4)$$

pri čemer je:

\mathbf{E} ...električna poljska jakost,

\mathbf{D} ...gostota električnega pretoka,

φ ...električni potencial,

ε ...dielektričnost,

ρ ...gostota prostorsko porazdeljene elektrine.

Funkcijo električnega potenciala φ določimo v ravnini X-Y z rešitvijo t.i. Poissonove diferencialne enačbe (5):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (5)$$

Prav tako lahko za magnetostatično polje zapišemo naslednje enačbe:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (9)$$

pri čemer je:

\mathbf{H} ...magnetna poljska jakost,

\mathbf{B} ...gostota magnetnega pretoka,

\mathbf{J} ...tokovna gostota,

\mathbf{A} ...magnetni vektorski potencial,

μ ...permeabilnost.

Funkcijo magnetnega vektorskega potenciala \mathbf{A} določimo v ravnini X-Y z rešitvijo Poissonove diferencialne enačbe (10):

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z, \quad (10)$$

pri čemer sta J_z in A_z z komponenti \mathbf{A} oz. \mathbf{J} .

Za reševanje Poissonove diferencialne enačbe uporabimo metodo končnih elementov (MKE), ki nam zaradi svoje univerzalnosti omogoča reševanje problema za poljubno geometrijo, poljubni material, poljubno vzbujanje in poljubne robne pogoje [3]. V nadaljevanju Poissonovo diferencialno enačbo za elektrostatično in magnetostatično polje zaradi preglednosti zapišemo za 2D problem v obliki [2]:

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi = \rho$$

$$\nabla \nu \nabla \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (11)$$

Če uporabimo za formulacijo MKE metodo utežnih ostankov, potem zapišemo izhodiščno enačbo v obliki (12):

$$\varepsilon \iint_S (\nabla W \nabla \varphi - W_g \rho) dS = 0$$

$$\nu \iint_S (\nabla W \nabla \mathbf{A} - WJ) dS = 0, \quad (12)$$

pri čemer je W utežnostna funkcija.

Površino S oz. območje problema, kjer rešujemo, razdelimo na N_e končnih elementov, ki imajo po n vozlišč. Pri 2D problemih so to geometrijski liki, pri 3D problemih pa geometrijska telesa, ki nam tvorijo mrežo

končnih elementov. Znotraj elementa prikažemo spreminjanje potenciala s pomočjo interpolacijske funkcije za 2D z $N(x,y)$, in vozliščnih vrednosti potenciala (φ_i oz. A_i):

$$\begin{aligned}\varphi &= \sum_{i=1}^n N_i \varphi_i \\ A &= \sum_{i=1}^n N_i A_i\end{aligned}\quad (13)$$

Ko (13) vstavimo v (12), pri čemer upoštevamo še $W(x,y)=N(x,y)$, dobimo enačbo za vozlišče i :

$$\begin{aligned}\sum_{e=1}^{N_e} \iint_{S_e} \left(\varepsilon_e \sum_{j=1}^n \nabla N_i \nabla N_j \varphi_j \right) dS - \iint_{S_e} N_i \rho_e dS &= 0 \\ \sum_{e=1}^{N_e} \iint_{S_e} \left(\nu_e \sum_{j=1}^n \nabla N_i \nabla N_j A_j \right) dS - \iint_{S_e} N_i J_e dS &= 0\end{aligned}\quad (14)$$

pri čemer se indeksi i, j in e nanašajo pri že omenjenih veličinah na vozlišče (i, j) oz. končni element (e) .

Zgornjo enačbo zapišemo za vsa vozlišča mreže, upoštevajoč robne pogoje. Dobimo sistem algebrainih enačb za električno oz. magnetno polje (15):

$$\begin{aligned}[S]_{\varphi} \{\varphi\} &= \{D\}_{\varphi} \\ [S]_{A} \{A\} &= \{D\}_{A}\end{aligned}\quad (15)$$

Končna rešitev so vrednosti potenciala v vseh vozliščih:

$$\begin{aligned}\{\varphi\} &= [S]_{\varphi}^{-1} \{D\}_{\varphi} \\ \{A\} &= [S]_{A}^{-1} \{D\}_{mke}\end{aligned}\quad (16)$$

pri čemer sta $[S]$ in $\{D\}$ matrika sistema in vektor desne strani za električno ($[S]_{\varphi}$ in $\{D\}_{\varphi}$) oz. za magnetno ($[S]_{A}$ in $\{D\}_{A}$) polje. $\{\varphi\}$ je vektor vozliščnih vrednosti električnega potenciala, $\{A\}$ pa vektor vozliščnih vrednosti magnetnega potenciala.

Vrednosti potenciala znotraj končnega elementa pa izračunamo z naslednjo enačbo:

$$\begin{aligned}\varphi &= \sum_{i=1}^n N_i \varphi_i \\ A &= \sum_{i=1}^n N_i A_i\end{aligned}\quad (17)$$

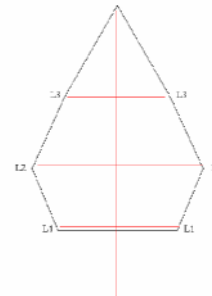
3 Izračun elektromagnetnega sevanja

Podrobno je obdelan konkreten primer obremenjevanja okolja z elektromagnetnim sevanjem dvosistemskega daljnovoda 400 kV Maribor–Krško in

Maribor–Podlog na razpetini med stebroma SM št. 20 in SM št. 21. Izračuni so opravljeni v dvodimenzionalni dimenziji »2D« za efektivne vrednosti električne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka na razdalji 1m od tal pod daljnovodom, na liniji (L) največjega povesa vodnikov. Izračuni so bili narejeni s programom »POLJE« [3], ki uporablja metodo končnih elementov (MKE). Prednosti uporabe MKE so, da v obravnavanem področju rezultati izračuna lahko zajemajo tudi ozemljene električno prevodne strukture, preostale vodnike, po katerih teče tok, in zapletene topološke strukture terena. Poleg tega nam MKE omogoča točnejši opis geometrije problema, natančno upoštevanje materialov, veliko točnost izračuna, možnost opazovanja krajevne porazdelitve polja in možnost upoštevanja časovno spremenljivega polja.

3.1 Izračun električne poljske jakosti

Presečna ravnina, v kateri se izvaja izračun, je profil, ki ga je bilo treba modelirati za program »POLJE«. Presečna ravnina je ponazorjena z likom (slika 1), ki izhaja iz izmerjenih višin vodnikov in tipa modela daljnovodnega stebra »sod«, katerega oglišča so fazni in strelovodni vodniki.



Slika 1: Model daljnovoda

Figure 1: HVPL model

S pomočjo programa je bilo treba generirati mrežo oz. razdeliti področje problema na končne elemente (trikotnike) in definirati robne pogoje. Tla so na električnem potencialu 0 V, enak potencial velja za vse strelovodne vodnike. Potencial prenosnih vodnikov je bil postavljen na dejanske vrednosti.

V izračunih so uporabljene povprečne vrednosti napetosti, prikazane v tabeli 1, in sicer tiste, ki so bile izmerjene v času terenskih meritev.

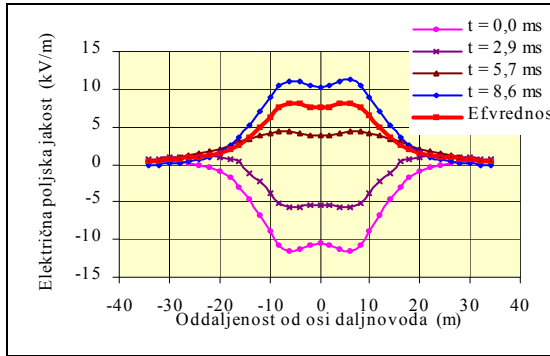
DV 400 kV Maribor–Krško in Maribor–Podlog	U_{\max} (kV)	U_{PODLOG} (kV)	$U_{\text{KRŠKO}}$ (kV)
Medfazna efektivna napetost (kV)	420	393	393
Fazna amplitudna napetost (kV)	342,9	320,9	320,9

Tabela 1: Napetosti daljnovodov

Table 1: HVPL voltages

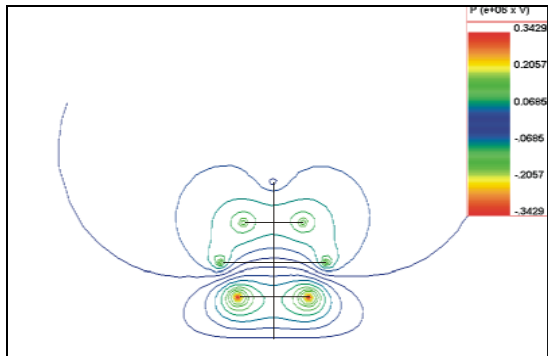
Zaradi sinusnega spreminjanja faznih napetosti oz. potencialov posameznih faznih vodnikov do zemlje, ki so med seboj premaknjene za električnih 120°, se s časom spreminjata potencial, ki ga s programom izračunamo na 1 m višine nad zemljo v amplitudnih vrednostih, kakor tudi električna poljska jakost, ki je odvod tega potenciala.

Dobljeni rezultat so izračunane vrednosti amplitud potenciala oz. električne poljske jakosti, ki so podane v osmih trenutkih za eno polperiodo. Z obdelavo teh rezultatov poiščemo maksimalno vrednost potenciala v vsaki točki oddaljenosti od osi daljnovođa in ker se potencial spreminja po sinusni odvisnosti, lahko izračunamo efektivno vrednost potenciala in efektivno vrednost električne poljske jakosti v vseh teh točkah. Rezultati amplitudnih in efektivne vrednosti so prikazani na sliki 2.



Slika 2: Vrednosti E na liniji L
Figure 2: Values of E on the line L

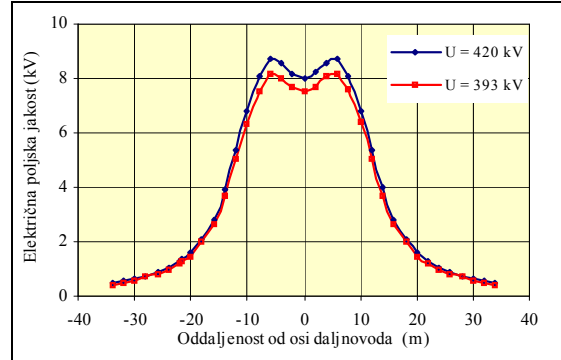
Primer oblike potenciala za daljnovod 400 kV tip sod, ko je spodnja faza na maksimalnem potencialu 320,9 kV, srednja in zgornja faza pa na polovičnem potencialu, nam prikazuje slika 3.



Slika 3: Porazdelitev potenciala
Figure 3: Electric potential distribution

Pri izračunih efektivne električne poljske jakosti na prej omenjeni razpetini 400 kV dvosistemskega daljnovođa so upoštevane napetosti, ki so bile izmerjene ob samih terenskih meritvah in napetosti, ki lahko nastanejo kot maksimalne mogoče. Rezultati izračunov

efektivne poljske jakosti v odvisnosti od višine napetosti so prikazani na sliki 4.



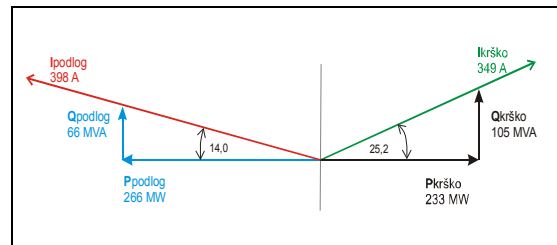
Slika 4: Efektivna vrednost E za različne napetosti daljnovođov 400 kV na liniji L
Figure 4: RMS of E for different voltages of HVPL on the line L

3.2 Izračun gostote magnetnega polja

Za izračun gostote magnetnega polja je bilo najprej treba razjasniti smeri in velikosti tokov. Smeri tokov sta si nasprotovali, fazna kota pa glede na različne pretoke delovne in jalove moči v posameznih 400 kV daljnovođih Maribor–Krško in Maribor–Podlog nista bila enaka. Srednje vrednosti posameznih tokov so prikazane v tabeli 2, kazalčni diagram izračunanih srednjih pretokov moči in tokov pa je prikazan na sliki 5.

DV 400 kV Maribor–Krško in Maribor - Podlog	I_{max} (A)	I_{PODLOG} (A)	$I_{KRŠKO}$ (A)
Efektivna vrednost toka (A)	1.600	398	358
Amplitudna vrednost toka (A)	2.263	595	502

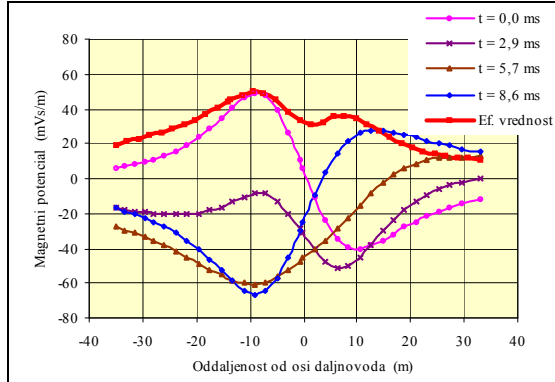
Tabela 2: Tokovi v daljnovođih
Table 2: HPVL currents



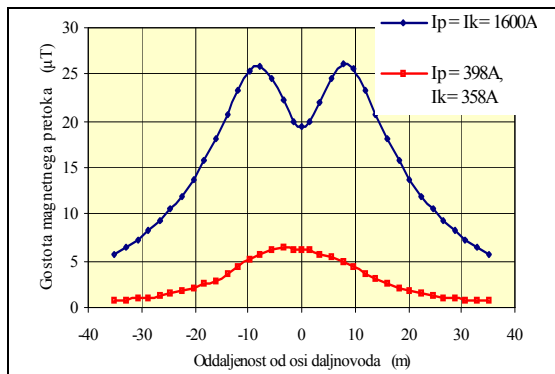
Slika 5: Kazalčni diagram srednjih pretokov moči in tokov
Figure 5: Phasor diagram of energy flows and currents

Dobljeni rezultati efektivne vrednosti magnetnega potenciala za dejanske srednje tokove, ki so bili v daljnovodu 400 kV Maribor–Krško 358 A in v daljnovodu 400 kV Maribor–Podlog 398 A, so prikazani na sliki 6. Na sliki 7 je prikazana primerjava med efektivnimi vrednostmi gostote magnetnega polja pri dejanskih prej navedenih tokovih in efektivnimi

vrednostmi gostote magnetnega polja pri maksimalnem toku, ki bi lahko tekkel v isto smer po obeh 400 kV sistemih.



Slika 6: Vrednosti magnetnega potenciala na liniji L
Figure 6: Values of magnetic potencial on the line L

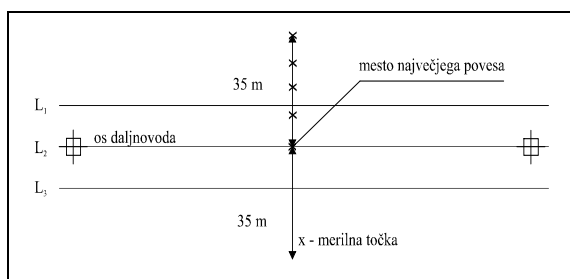


Slika 7: Efektivna vrednost B za različne vrednosti in smeri tokov v daljnovodih 400 kV
Figure 7: RMS B for different values and direction currents in HVPL

4 Izvedba meritev

4.1 Meritve elektromagnetnega sevanja

Meritve elektromagnetnega sevanja smo izvedli na dvosistemskem daljnovodu 400 kV Maribor–Podlog in Maribor–Krško, med stebroma SM 20 in SM 21 na liniji L najnižjega povesa vodnikov. Izbranih je bilo 40 merilnih točk, 35 m levo in desno od osi daljnovoda (sliki 8 in 9). Merilne točke so bile med seboj oddaljene 1, 2 ali 5 metrov.



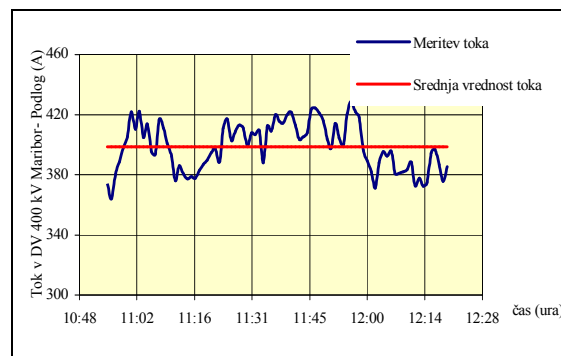
Slika 8: Določitev merilnih točk na liniji L
Figure 8: Determination of measurement points on the line L



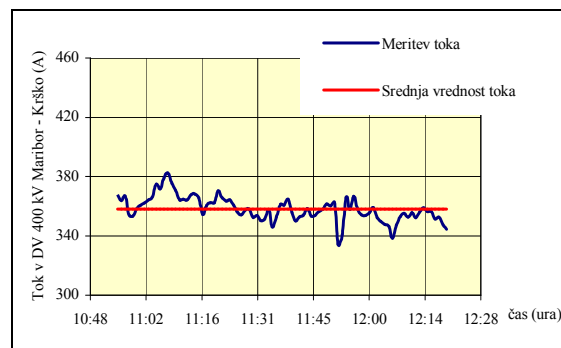
Slika 9: Merilne točke pod daljnovodom
Figure 9: Measurement points under HVPL

4.2 Meritev napetosti, tokov in moči

Vrednosti medfaznih napetosti in faznih tokov so pridobljene iz merilnega sistema, vgrajenega v RTP 400/110 kV Maribor. Deklarirani skupni pogrešek vgrajenega merilnega sistema je 5 %. Izmerjene vrednosti tokov so prikazane na slikah 10 in 11.



Slika 10: Izmerjen tok v DV 400 kV Maribor–Podlog
Figure 10: Measured current of the 400 kV Maribor–Podlog HVPL

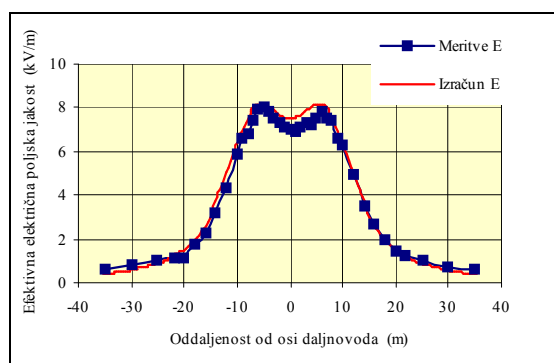


Slika 11: Izmerjen tok v DV 400 kV Maribor–Krško
Figure 11: Measured current of the 400 kV Maribor–Krško HVPL

5 Primerjava izračunanih in izmerjenih vrednosti

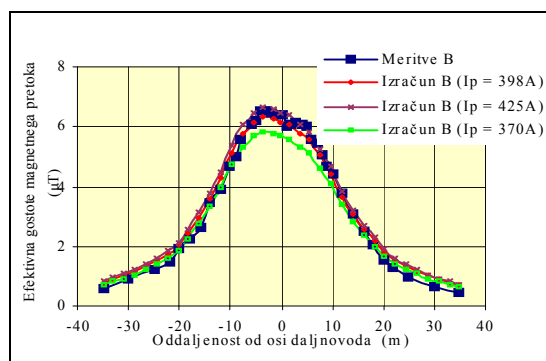
Izračunane vrednosti elektromagnetnih polj za dvosistemski daljnovod 400 kV Maribor–Krško in Maribor–Podlog na razpetini med SM 20 in SM 21 izhajajo iz srednje vrednosti napetosti in toka, ki so dobljene iz povprečnih vrednosti, določene na podlagi meritev v časovnem intervalu ene minute.

Podana je primerjava med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi električne poljske jakosti, ki je razvidna na sliki 12.



Slika 12: Primerjava izračunanih in izmerjenih efektivnih vrednosti E

Figure 12: Comparison between calculated and measured values of E



Slika 13: Preimerjava izračunanih in izmerjenih efektivnih vrednosti B

Figure 13: Comparison between calculated and measured values of B

Pri magnetnih poljih zaradi večjega nihanja toka in vpliva različnih pretokov jalove in delovne komponente moči izračunane vrednosti bolj odstopajo od merjenih vrednosti kot pri električnem polju. V času meritev elektromagnetnega polja je tok v daljnovodu 400 kV Maribor–Podlog precej nihal med vrednostmi 370 A in 425 A, zato so na sliki 13 prikazani izračuni za tri različne tokove v tem daljnovodu, za daljnovod 400 kV Maribor–Krško pa je upoštevan konstanten tok 358 A.

6 Sklep

Ugotavljanje jakosti elektromagnetnega polja poteka v dveh delih. V prvem delu se opravijo izračuni s pomočjo računskega modela, v drugem pa sledijo terenske meritve elektromagnetnega polja.

Pri analizi odstopanja izračunanih in izmerjenih vrednosti je treba upoštevati dejstva, ki vplivajo na točnost izračuna in točnost merilnega rezultata. Izračun temelji na predpostavki, da so vodniki v presečni ravnini vzporedni s podlago, v resnici pa se vodniki iz presečne ravnine po parabolični krivulji dvigujejo proti obesiščem na stebrih stojnih mest. Zato je v grafu efektivnih vrednosti električne poljske jakosti in efektivne gostote magnetnega polja razvidno, da je izračunana vrednost pod daljnovodi nekoliko višja od izmerjene vrednosti.

Veličine, ki ob pazljivem merilnem postopku in ugodnih vremenskih dejavnikih, še najbolj vplivajo na točnost merilnega rezultata so nihanje napetosti in spreminjanje jakosti pretoka električne energije.

7 Literatura

- [1] M. Trlep, *Teoretska elektrotehnika*, Fakulteta za elektrotehniko Maribor, Maribor, 2003.
- [2] M. Željznov, *Osnove teorije elektromagnetnega polja*, Fakulteta za elektrotehniko Ljubljana, Ljubljana, 1986.
- [3] M. Trlep, *Interna dokumentacija za programski paket »POLJE«*, Laboratorij za aplikativno elektromagnetiko, FERI Maribor, 2002.
- [4] Elektromagnetna sevanja električnih naprav in postrojev v naravno in življensko okolje, Elektroinštitut Milan Vidmar, referat št.: 1349, Ljubljana, 1998.

Rado Ferlič je leta 2004 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od leta 1991 je zaposlen v Elektro–Slovenija, kjer se ukvarja z vzdrževanjem visokonapetostnih elektroenergetskih naprav.

Mladen Trlep je diplomiral leta 1979 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 1985 je magistriral, leta 1994 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Inštitutu za močnostno elektrotehniko, kot redni profesor. Je vodja laboratorija za Aplikativno elektromagnetiko. Njegovo raziskovalno in pedagoško delo obsega razvoj in uporabo numeričnih metod, predvsem: metode končnih elementov, metode robnih elementov in hibridne metode, za izračun elektromagnetnega polja, razvoj programske opreme za CAD elektromagnetnih naprav in sistemov ter področje inverznih problemov, električnih strojev in pogonov. Je član strokovnih združenj ED, IEEE in ICS.