

INŽENJERSKO MODELIRANJE UZEMLJIVAČA KRUŽNOM METALNOM PLOČOM

THE ENGINEERING MODELING OF GROUDING METAL PLATE

Zdenko Balaž

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu

Sažetak

U radu je prezentiran dio problematike u pripremljenoj Doktorskoj disertaciji autora pod naslovom: "Elektromagnetski model za izračun raspodjele struje zemljospoja". Odabir elektromagnetskog modela za razliku od svi dosada razvijenih analitičkih i numeričkih modela poznatih autoru, je potreba da se u račun uvede cjelovita elektromagnetska sprega između svih sastavnica, koja podrazumijeva induktivnu, kapacitivnu i konduktivnu spregu.

Razvijeni elektromagnetski model utemeljen je na hibridnom elektromagnetskom modelu, (kombinacija elektromagnetskog modela i modela prijenosnih vodova), zasnovanom na primjeni tehnike konačnih elemenata i numeričkom modelu koji je zasnovan na metodi potencijala čvorova.

U elektroenergetskim sustavima, potrebno je uzeti u račun mnoštvo utjecajnih čimbenika kao što su: uzemljivači razmatrane transformatorske stanice, susjednih transformatorskih stanica, s transformatorima, metalni stupovi i njihovi uzemljivači s pripadnim elektroenergetskim vodovima i zaštitnim užadima, kabelski vodova s njihovim ekranima i golim vodičima položenim iznad njih i svi ostali vodljivi dijelovi. Inženjersko modeliranje za navedene svrhe koristi mnoštvo matematičkih alata, metoda i baza znanja koja ukazuju na univerzalnost primjene. U ovom odabranom dijelu prikazano je modeliranje uzemljivača metalnom pločom.

Ključne riječi: *elektromagnetski, model, inženjersko, modeliranje, uzemljivačka metalna ploča, konduktivna sprega*

Abstract

The paper presents a part of the problem in a prepared doctoral dissertation entitled "An electromagnetic model for computation of fault current distribution". The choice of

electromagnetic models, unlike all previously developed analytical and numerical models of famous authors, is the need to introduce a computation the complete electromagnetic coupling between all components, which includes inductive, capacitive and conductive coupling.

Developed electromagnetic model is based on a hybrid electromagnetic model (a combination of the electromagnetic model and the transmission lines model), based on the application of the finite element technique and the numerical model, which is based on the method of potential nodes.

In power systems, it is necessary to take into computation a multitude of factors such as grounding electrodes considered substations, other substations with transformers, metal poles and their grounding electrodes with associated power lines and earth wires, cable lines with their screens and bare conductors passed above them and all other conductive parts. The engineering modeling for the purposes specified uses a multitude of mathematical tools, methods and knowledge base indicating the universality of application. In this part is selected modeling of grounding metal plate.

Key words: *electromagnetic model, engineering modeling, grounding metal plate, conductive coupling*

1. Uvod

Istraživanjem je utvrđeno kako su proračunima, kao što je raspodjela struje zemljospoja drastično pojednostavljene elektromagnetske sprege između vodljivih dijelova elektroenergetskih postrojenja [1]. Postoje metode koje uzimaju u račun samo induktivnu spregu i to u skladu s aktualnom legislativom. Norma IEEE Std. 80-2000, preporuča da se raspodjela struje zemljospoja vrlo grubo

procijeni korištenjem grafova koji su dobiveni numeričkim izračunom. Normativni dokument HRN HD i EN, na koji ukazuje Pravilnik o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja, raspodjelu struje zemljospoja preporuča računati približno korištenjem jednostavnih analitičkih izraza.

U komercijalnom programskom paketu CDEGS, raspodjela struje zemljospoja računa se pomoću modula SPLITS, čija je teorijska podloga nadogradnja metoda s redukcijским faktorima nadzemnih vodova koja približno uzima u račun induktivna sprega. Induktivna se sprega često procjenjuje korištenjem Carsonovih formula, gdje se trostruka nulta struja po fazi nadzemnog voda koristi kao podatak iz proračuna kratkog spoja.

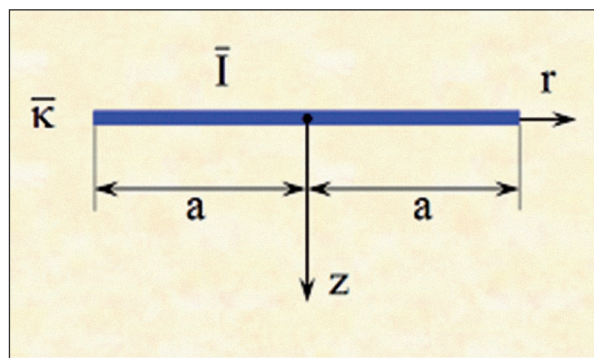
Iz tih se razloga pristupilo cjelovito riješiti tu važnu problematiku elektroenergetskih sustava postavljajući hipotezu doktorske disertacije o univerzalnom rješavanju primjenom elektromagnetskog modela [1] kojem je prethodio hibridni model [2]. Obrada problematike je obuhvatila inženjerske pristupe modeliranja tehnikom konačnih elemenata, za cilindrične vodiče [3], za transformatore [4-5], a ovim radom se obrađuju modeli ukopanih metalnih ploča [6-7]. Sve je to podloga za izračun vlastitih i međusobnih impedancija sastavnica elektromagnetskog modela koji u obzir uzima induktivnu, kapacitivnu i konduktivnu spregu, a postupak modeliranja se promatra kao projektiranje prototipa.

2. Skalarni potencijal ekvipotencijalne metalne ploče

Skalarni električni potencijal ekvipotencijalne metalne ploče u homogenom neograničenom linearnom izotropnom sredstvu (slika 1), opisan je izrazom:

$$\bar{\varphi} = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{j \cdot 8 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}} \cdot \ln \frac{\sqrt{r^2 + (z + j \cdot a)^2} + z + j \cdot a}{\sqrt{r^2 + (z - j \cdot a)^2} + z - j \cdot a} \quad (1)$$

gdje je \bar{I} fazor jakosti struje koju ploča ispušta u okolno sredstvo, a je polumjer ploče, $\bar{\kappa}$ je kompleksna provodnost sredstva, dok su r i z koordinate cilindričnog koordinatnog sustava. Izvorni izraz za kvazistatičku raspodjelu potencijala nadopunjen je prigušno-faznim



Slika 1 Presjek ekvipotencijalna kružna metalna ploča u homogenom neograničenom sredstvu

faktorom koji se u ovom slučaju može aproksimirati izrazom:

$$\bar{f} = e^{-\bar{\gamma} \cdot \sqrt{r^2 + z^2}} = e^{-\bar{\gamma} \cdot R_C} \quad (2)$$

gdje je R_C udaljenost između centra metalne ploče i točke promatranja.

Izraz (1) može se preinačiti u jednostavniji oblik:

$$\bar{\varphi} = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}} \cdot \tan^{-1} \frac{a}{\alpha} = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}} \cdot \tan^{-1} \frac{\beta}{|z|} \quad (3)$$

gdje je:

$$\alpha = \alpha(a, r, z) = \sqrt{\frac{A + \sqrt{A^2 + 4 \cdot a^2 \cdot z^2}}{2}} \quad (4)$$

$$\beta = \beta(a, r, z) = \sqrt{\frac{-A + \sqrt{A^2 + 4 \cdot a^2 \cdot z^2}}{2}} \quad (5)$$

$$A = r^2 + z^2 - a^2 \quad (6)$$

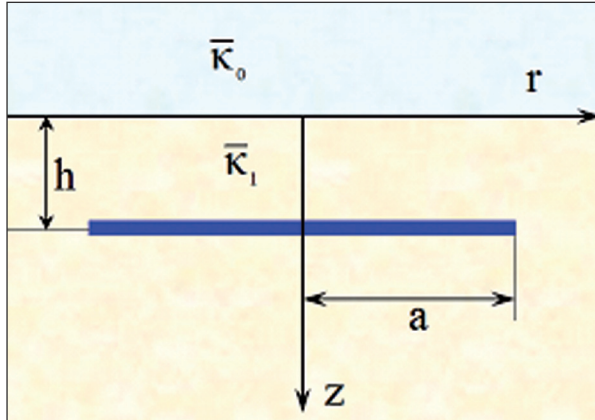
U posebnom slučaju za $r = 0$ raspodjela potencijala duž osi z opisana je izrazom:

$$\bar{\varphi} = \bar{\varphi}(z) = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}} \cdot \tan^{-1} \frac{a}{|z|} \quad (7)$$

dok je u slučaju $z = 0$, $r \geq a$ raspodjela potencijala duž osi r opisana izrazom:

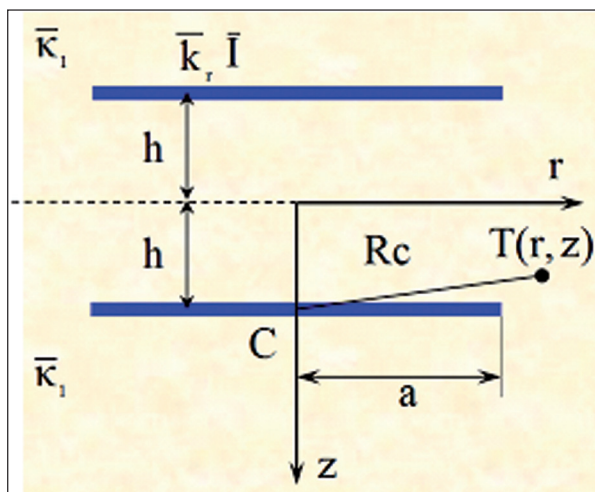
$$\bar{\varphi} = \bar{\varphi}(r) = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}} \cdot \tan^{-1} \frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}} = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}} \cdot \sin^{-1} \frac{a}{r} \quad (8)$$

Ako je metalna ploča ukopana u homogeno tlo paralelno površini tla na dubinu h (slika 2) izrazi za raspodjelu potencijala u tlu i u zraku mogu se dobiti pomoću metode odslikavanja.



Slika 2 Presjek kružne metalne ploče ukopane u homogeno tlo paralelno površini tla

Za metalnu ploču ukopanu u homogeno tlo, raspodjeli potencijala u tlu doprinose struja koju ploča ispušta u tlo i struja kvazistatičke slike ploče (slika 3).



Slika 3 Presjek kružne metalne ploče i njene kvazistatičke slike za raspodjelu potencijala u tlu

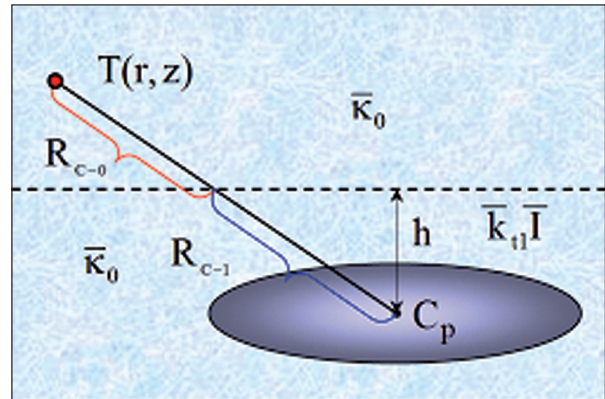
Tada izraz koji opisuje raspodjelu potencijala u tlu glasi:

$$\bar{\varphi} = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}_1} \cdot \left[\tan^{-1} \frac{a}{\alpha(a, r, z-h)} + \bar{k}_{r1} \cdot \tan^{-1} \frac{a}{\alpha(a, r, z+h)} \right] \quad (9)$$

gdje je koeficijent kvazistatičke refleksije \bar{k}_{r1} , a prigušeno-fazni faktor \bar{f} u ovom slučaju, opisan je izrazom:

$$\bar{f} = e^{-\bar{\gamma} \cdot \sqrt{r^2 + (z-h)^2}} = e^{-\bar{\gamma} \cdot R_C} \quad (10)$$

Raspodjelu potencijala u zraku uzrokuje struja kvazistatičke slike razmatrane metalne ploče, koja se preklapa sa stvarnom pločom (slika 4),



Slika 4 Kvazistatička slika kružne metalne ploče koja uzrokuje potencijal u zraku

pa izraz koji opisuje raspodjelu potencijala u zraku glasi:

$$\bar{\varphi} = \bar{f} \cdot \frac{\bar{I}}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}_0} \cdot \bar{k}_{t1} \cdot \tan^{-1} \frac{a}{\alpha(a, r, z-h)} \quad (11)$$

gdje je faktor kvazistatičke transmisije \bar{k}_{t1} , dok je, u ovom slučaju, prigušeno-fazni faktor opisan izrazom:

$$\bar{f} = e^{-\bar{\gamma}_1 \cdot R_{C-1} - \bar{\gamma}_0 \cdot R_{C-0}} \quad ; \quad \bar{\gamma}_1 = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \bar{\kappa}_1}$$

$$\bar{\gamma}_0 = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \bar{\kappa}_0} \quad (12)$$

Prema dosad uvedenim pretpostavka, metalne ploče koje nadomještaju uzemljivače transformatorskih stanica jesu ekvipotencijalne, a to znači da one nemaju uzdužne komponente struje. To znači da ekvipotencijalne metalne ploče ne stvaraju vektorski magnetski potencijal, već samo skalarni električni potencijal.

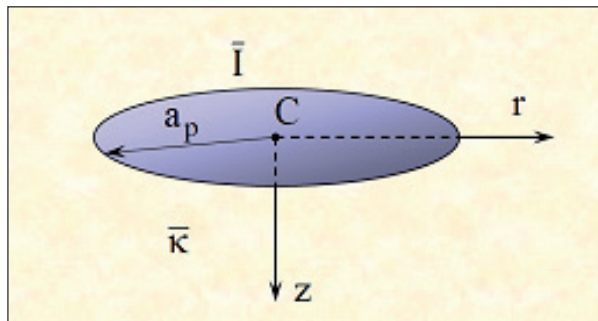
3. Poprečna impedancija kružnih metalnih ploča

3.1. Poprečne impedancije ploča u neograničenom sredstvu

Vlastita poprečna impedancija p -te ekvipotencijalne kružne metalne ploče, polumjera a_p u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti $\bar{\kappa}$ (slika 1)

opisana je izrazom:

$${}^n\bar{Z}_{p,p}^p = {}^{qn}\bar{Z}_{p,p}^p = \frac{1}{8 \cdot a_p \cdot \bar{\kappa}} \quad (13)$$



Slika 5 Ekvipotencijalna kružna metalna ploča u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti $\bar{\kappa}$

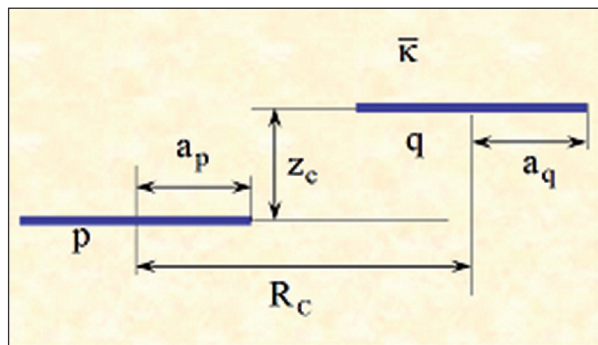
Gustoća struje koju ploča s obje strane ispušta u okolno homogeno i neograničeno sredstvo opisana je izrazom:

$$\bar{J} = \frac{\bar{I}}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sqrt{a^2 - r^2}} = N \cdot \bar{I} \quad (14)$$

gdje je, prema nazivlju metode konačnih elemenata za ploču postavljenu u cilindrični koordinatni sustav oblikovna funkcija:

$$N = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sqrt{a^2 - r^2}} \quad (15)$$

Neka su dvije kružne međusobno paralelne metalne ploče p i q, različitih polumjera a_p i a_q , smještene u homogenom i neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti $\bar{\kappa}$, čiji su centri horizontalno udaljeni za R_c i vertikalno udaljeni za z_c (slika 6).



Slika 6 Presjek paralelno ukopanih kružnih metalnih ploča u homogenom neograničenom sredstvu

Lako se dobije da je međusobna impedancija ploča u homogenom neograničenom sredstvu po

Galjerkin-Bubnovovoj metodi opisana izrazom:

$${}^n\bar{Z}_{p,q}^p = \bar{f}_{p,q} \cdot {}^{qn}\bar{Z}_{p,q}^p = \bar{f}_{p,q} \cdot \iint_{S_p} N \cdot \bar{P}(a_q, r, z_c, \bar{\kappa}) \cdot dS \equiv {}^n\bar{Z}_{q,p}^p \quad (16)$$

gdje je:

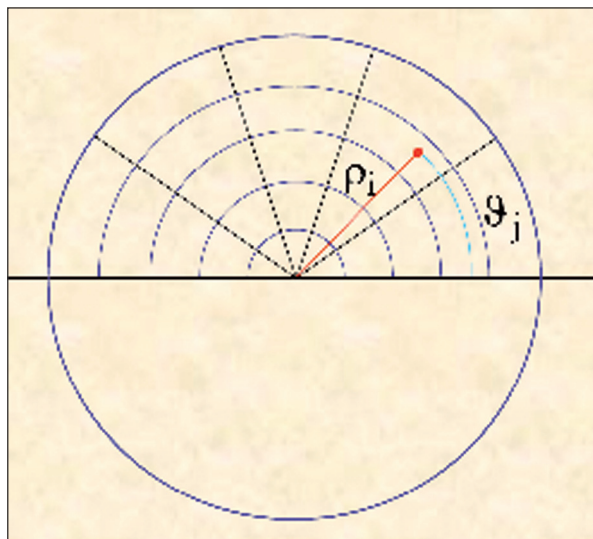
$$\bar{P}(a, r, z, \bar{\kappa}) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \bar{\kappa}} \cdot \tan^{-1} \frac{a}{\alpha(r, a, z)} \quad (17)$$

dok je veličina α opisana izrazom (4), N izrazom (15), a prigušno-fazni faktor opisuje izraz:

$$\bar{f}_{p,q} = e^{-\bar{\gamma} \cdot \sqrt{r_c^2 + z_c^2}} = e^{-\bar{\gamma} \cdot R_c} \quad (18)$$

gdje je R_c udaljenost između središta razmatranih ploča.

Za potrebe 2D numeričko-analičke integracije po površini p-te ploče površine S_p , polovica p-te ploče podijeljena je na 25 dijelova u polarnom koordinatnom sustavu (ρ, ϑ) , a svakom od tih dijelova pridružena je po jedna integracijska točka tako da duž osi ρ i osi ϑ ima po 5 integracijskih točaka. Dakle, integracijske točke su (ρ_i, ϑ_j) $i = 1, 2, \dots, 5$; $j = 1, 2, \dots, 5$ (slika 7).



Slika 7 Podjela p-te ploče za potrebe 2D numeričko-analičke integracije

Vrijedi da je:

$$\rho_i = a \cdot u_i \quad (19)$$

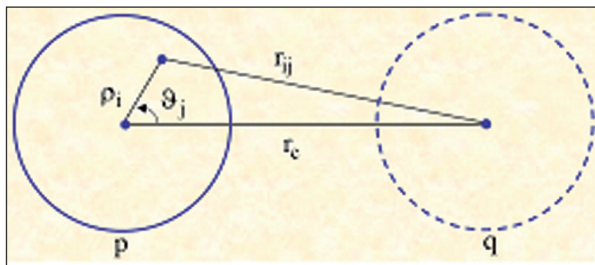
$$\vartheta_j = \pi \cdot u_j \quad (20)$$

gdje su u_i i u_j , $i = 1, 2, \dots, 5$; $j = 1, 2, \dots, 5$ koordinate Gaussovih integracijskih točaka u lokalnom 1D koordinatnom sustavu, (tablica 1).

Horizontalna udaljenost pojedine integracijske točke (ρ_i , ϑ_j) ploče p od središta ploče q (slika 8) opisana je izrazom:

$$r_{ij} = \sqrt{\rho_i^2 + r_c^2 - 2 \cdot \rho_i \cdot r_c \cdot \cos \vartheta_j} \quad (21)$$

gdje je r_c horizontalna udaljenost središta ploča.



Slika 8 Horizontalna udaljenost integracijske točke p-te ploče od središta q-te ploče

Korištenjem numeričko-analitičke integracije, izraz (16) poprima oblik:

$$\begin{aligned} {}^n \bar{Z}_{p,q}^p &= \bar{f}_{p,q} \cdot {}^{qn} \bar{Z}_{p,q}^p = \bar{f}_{p,q} \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \bar{P}(a_q, r_{ij}, z_c, \bar{\kappa}) \\ &\cdot H_j \cdot W_i \equiv {}^n \bar{Z}_{q,p}^p \end{aligned} \quad (22)$$

gdje je P opisan izrazom (17), dok je:

$$W_i = \int_{\rho_{si}}^{\rho_{ei}} N \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho = \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{si}}{a_p}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{ei}}{a_p}\right)^2} \quad (23)$$

gdje su granice integrala:

$$\rho_{ei} = a_p \cdot \sum_{k=1}^i H_k \quad (24)$$

$$\rho_{si} = \rho_{ei} - a_p \cdot H_i \quad (25)$$

Analičkom integracijom izraza (23) dobije se sljedeći izraz:

$$W_i = \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{si}}{a_p}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{ei}}{a_p}\right)^2} \quad (26)$$

Dane su koordinate Gaussovih integracijskih točaka u_j i njima pripadne težinske funkcije H_j za j

$= 1, 2, \dots, 5$ za lokalni 1D koordinatni sustav, (tablica 1).

Tablica 1 Koordinate Gaussovih integracijskih točaka i njima pripadne težinske funkcije

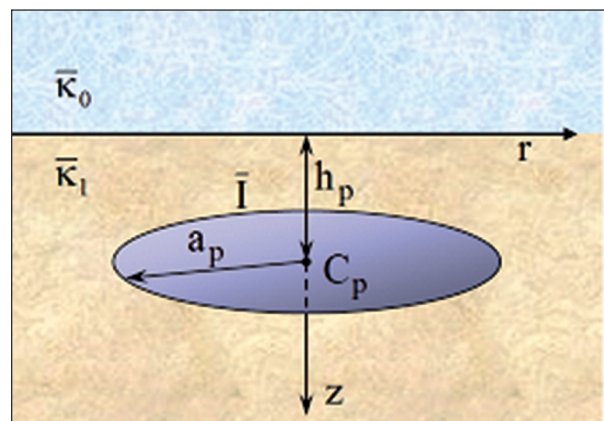
j	u_j	H_j
1	$\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \cdot \sqrt{5+2} \cdot \sqrt{\frac{10}{7}}$	$\frac{322 - 13 \cdot \sqrt{70}}{1800}$
2	$\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \cdot \sqrt{5-2} \cdot \sqrt{\frac{10}{7}}$	$\frac{322 + 13 \cdot \sqrt{70}}{1800}$
3	$\frac{1}{2}$	$\frac{64}{225}$
4	$\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \sqrt{5-2} \cdot \sqrt{\frac{10}{7}}$	$\frac{322 + 13 \cdot \sqrt{70}}{1800}$
5	$\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \sqrt{5+2} \cdot \sqrt{\frac{10}{7}}$	$\frac{322 - 13 \cdot \sqrt{70}}{1800}$

Prema izrazu (22), kvazistatička međusobna impedancija kružnih metalnih ploča u homogenom i neograničenom sredstvu opisana je izrazom:

$${}^{qn} \bar{Z}_{p,q}^p = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \bar{P}(a_q, r_{ij}, z_c, \bar{\kappa}) \cdot H_j \cdot W_i \equiv {}^{qn} \bar{Z}_{q,p}^p \quad (27)$$

3.2. Poprečne impedancije ploča u dvoslojnom sredstvu

Neka je p-ta ekvipotencijalna kružna metalna ploča polumjera a_p ukopana u tlo na dubini h_p (slika 9).



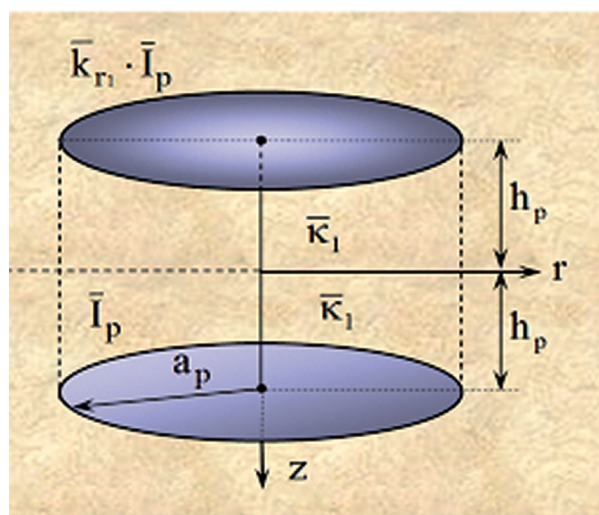
Slika 9. Ekvipotencijalna kružna metalna ploča ukopana u tlo dvoslojnog sredstva

Ako se primijeni metoda kvazistatičkog odslikavanja (slika 10), vlastita poprečna impedancija p-te ploče koja se nalazi u tlu dvoslojnog sredstva opisana je izrazom:

$$\bar{Z}_{p,p}^p = {}^{qn}\bar{Z}_{p,p}^p + \bar{k}_{r1} \cdot {}^{qn}\bar{Z}_{p,p}^r \quad (28)$$

gdje je:

- ${}^{qn}\bar{Z}_{p,p}^p$ • kvazistatička vlastita poprečna impedancija p-te ploče u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti tla $\bar{\kappa}_1$,
- ${}^{qn}\bar{Z}_{p,p}^r$ • kvazistatička međusobna poprečna impedancija p-te ploče i njene refleksijske slike u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti tla $\bar{\kappa}_1$,
- \bar{k}_{r1} • faktor kvazistatičke refleksije.



Slika 10. Ekvipotencijalna kružna metalna ploča ukopana u tlo dvoslojnog sredstva i njezina kvazistatička refleksijska slika

Međutim, u ovom slučaju, zbog simetričnog položaja slike ploče, u odnosu na ploču, vrijedi jednostavniji izraz za međusobnu kvazistatičku poprečnu impedanciju ploče i njene refleksijske slike:

$${}^{qn}\bar{Z}_{p,p}^r = \sum_{j=1}^5 \bar{P}(a_p, r_j, 2 \cdot h_p, \bar{\kappa}) \cdot W_j \quad (29)$$

gdje je:

$$r_j = u_j \cdot a \quad (30)$$

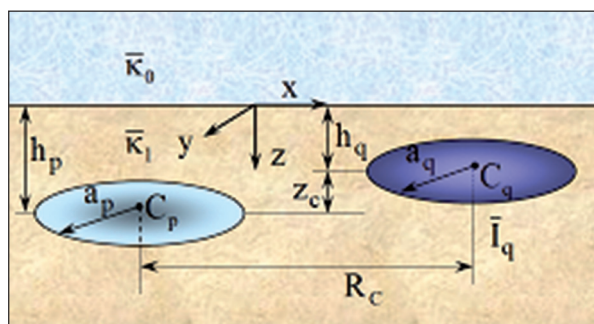
$$W_j = \int_{r_{sj}}^{r_{ej}} N \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \sqrt{1 - \left(\frac{r_{sj}}{a}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{ej}}{a}\right)^2} \quad (31)$$

$$r_{ej} = a \cdot \sum_{k=1}^j H_k \quad (32)$$

$$r_{sj} = r_{ej} - a \cdot H_j \quad (33)$$

I u ovom su slučaju, koordinate Gaussovih integracijskih točaka u_j i njima pripadne težinske funkcije H_j (tablica 1).

Neka su dvije metalne ploče ukopane u homogeno tlo te neka su ploče paralelne u odnosu na površinu tla (slika 11).



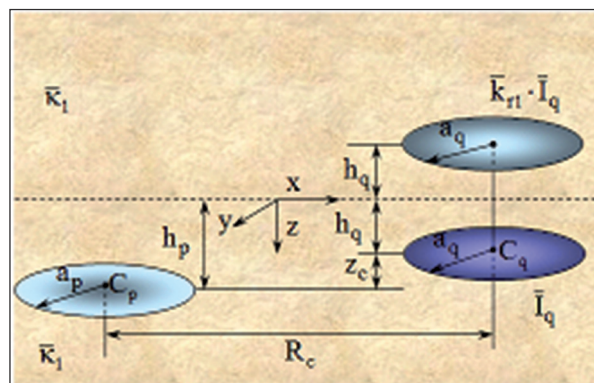
Slika 11. Kružne metalne ploče ukopane u homogenom tlu

Neka je C_p centar (središte) ploče p, a C_q centar (središte) ploče q:

$$C_p = (x_p, y_p, z_p) \quad (34)$$

$$C_q = (x_q, y_q, z_q) \quad (35)$$

Međusobna impedancija ploča u homogenom tlu lako se dobije iz izraza za međusobnu impedanciju dviju ploča u homogenom i neograničenom sredstvu, uz korištenje metode odslikavanja (slika 12).



Slika 12. Odslikavanje q-te kružne metalne ploče ukopane u homogenom tlu

Konačni izraz za međusobnu impedanciju ploča u homogenom tlu glasi:

$${}^n\bar{Z}_{p,q} = \bar{f}_{p,q} \cdot ({}^n\bar{Z}_{p,q} + \bar{k}_{r1} \cdot {}^n\bar{Z}_{p,q,r}) \quad (36)$$

gdje je:

${}^n\bar{Z}_{p,q}$ • kvazistatička međusobna impedancija kružnih metalnih ploča u homogenom i neogreničenom sredstvu

${}^n\bar{Z}_{p,q,r}$ • kvazistatička međusobna impedancija p-te kružne metalne ploče i refleksijske slike q-te metalne ploče u homogenom i neogreničenom sredstvu

\bar{k}_{r1} • faktor kvazistatičke refleksije.

Prigušno-fazni faktor opisan je izrazom

$$\bar{f}_{p,q} = e^{-\bar{\gamma}_1 \cdot R_c} \quad (37)$$

gdje je:

$$R_c = \sqrt{r_c^2 + z_c^2} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (h_p - h_q)^2} \quad (38)$$

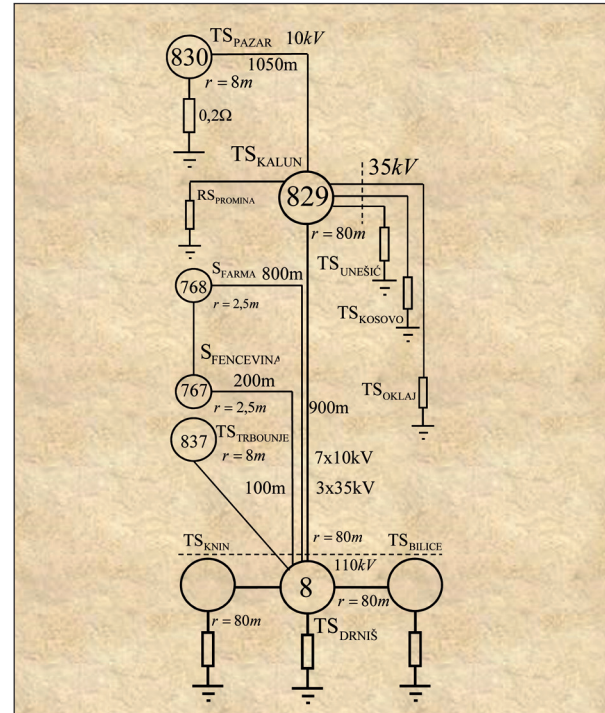
međusobna udaljenost između središta ploča.

4. Primjer modela

Model je razvijen tako da se koriste za uzemljivače trafostanica i stupova kružni pločasti uzemljivači. Za kabele, segmenti jednožilnih kabela. Vodiči dalekovoda kao i zaštitnu užad, modeliraju se segmentima nadzemnih cilindričnih vodiča. Uzemljivačka užad se modeliraju segmentima ukopanih cilindričnih vodiča.

Ovisno o veličini modela uvode se nadomjesne jednočvorne impedancije, te trofazni naponski izvori i zadani nulti potencijali. Navedene sastavnice predstavljaju ulazne podatke za razvijeni programski alat u pripremljenoj doktorskoj disertaciji kojim je obrađeno distribucijsko područje uz transformatorsku stanicu TS 110/35/10(20) kV Drniš, koje je načelnim prikazom svedeno na jednopolnu shemu s ucrtanim kružnim metalnim pločama (slika 13).

Ovaj elektromagnetski model je izgrađen s 1957 sastavnica i ima 868 globalnih čvorova i isto toliko linearnih jednadžbi. Sve skupa ima zadanih 8001 ulazni podatak.



Slika 13. Načelni prikaz sastavnica elektromagnetskog modela TS 110/35/10(20) kV Drniš za proračun raspodjele struje zemljospoja

Elektromagnetski model nadomješta, (predstavlja u stvarnosti), 560 elektroenergetskih objekata, na području jednog dijela Operatora distribucijskog sustava HEP-a, čija je površina 3.031 kvadratni kilometar i ima oko 83.368 kupaca. Nakon izračuna za tu namjenu originalno razvijenim računalnim programom, u prilogu [1] dobiveno je ukupno 3136 izlaznih podataka.

Elektromagnetski model, ali drugim računalnim programom je prethodno provjeren i u studiji za potrebe Operatora prijenosnog sustava HEP-a, gdje je obrađen 231 primjer pogonskih stanja, kvarova i radova na 35kV, 110kV i 220kV zračnim vodovima, kabelskim vodovima i podmorskim kabelima [8].

5. Zaključak

Razvijeni elektromagnetski model i proračuni provedeni razvijenim originalnim programom rezultiraju zaključcima koji upućuju na primjene u elektroenergetskim sustavima za koje je moguće donijeti odluke o pogonu rješavanjem sličnih problema. Opažanja i razumijevanja predmetne problematike slična su onima iz ekspertnog računalnog sustava, (sadrži mehanizam zaključivanja, bazu podataka i bazu znanja), a koji

se može promatrati kao projektantsko pomagala. Prezentacijski materijal obrade, naročito u [8] grafički prikazuje zorno konkretna pogonska stanja, ali je njegova baza podataka raspoloživa za sve druge obrade koje uključuju analize i sinteze sličnih primjera jer se parametri mogu mijenjati.

Iako projektiranje nije izum a niti otkriće, prezentirani proces modeliranja koji se shvaćen kao projektiranje s konkretnim rezultatima originalno je djelo. Dokazana je univerzalnost primjene jer može biti modeliran bilo koji novi ili postojeći elektroenergetskih objekt, ali i njihova

elektromagnetska stanja u cijelom sustavu. Modeliranje se može smatrati projektiranjem sustava koji se svodi na prototip kada se u sustav ubacuju realne ili simulirane elektroenergetske komponente za bilo koji režim rada. Kao takav izvrstan je alat za testiranje ili planiranje održavanja na velikim sustavima.

Iako s odličnim rezultatima, na temelju stečenih iskustava otvorena su pitanja novih smjernica legislative i intelektualnog vlasništva nad ovakvim ekspertnim računalnim procesima - projektantskim pomagalima.

6. Reference

- [1] Balaž Z.; Elektromagnetski model za izračun raspodjele struje zemljospoja; Sveučilište u Splitu; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje - FESB Split; Doktorski studij elektrotehnike i informacijske tehnologije; Doktorska disertacija pripremljena za predaju, 2014.
- [2] Vujević S.; Balaž Z.; Modrić T.; Sarajčev P.; Hybrid Model for Analysis of Ground Fault Current Distribution; International Review of Electrical Engineering (IREE); Vol. 7; No. 3; pp. 4035-4045; 2012.
- [3] Balaž Z.; Inženjerske metode elektromagnetskog modeliranja; Tehničko veleučilište u Zagrebu; Rad pripremljen za Zbornik radova Elektrotehničkog odjela TVZ-a; Rad br. 1, predan za objavu, svibanj 2014.
- [4] Lucić R.; Jurić-Grgić I.; Balaž Z.; Grounding Grid Transient Analysis Using the Improved Transmission Line Model Based on the Finite Element Method; European Transactions on Electrical Power (ETEP 2011.); DOI: 10. 1002/etep 664; 2011.
- [5] Vujević S.; Lovrić D.; Balaž Z.; Gaurina S.; Time-Harmonic Modelling of Two-Winding Transformers Using the Finite Element Technique; International Review on Modelling and Simulations (IREMOS); No. 6 6; Part B; pp 1922-1927; 2013.
- [6] Vujević S.; Balaž Z.; Lovrić D.; Ground impedance of Cylindrical Metal Plate Buried in Homogeneous Earth; ISTET'11, University of Klagenfurt, Austria; 25.-27. July, 2011.
- [7] Vujević S.; Lovrić D.; Balaž Z.; Self and mutual ground impedances of cylindrical metal plates buried in homogeneous earth; International journal of numerical modelling- electronic networks devices and fields; Rad prihvaćen za objavljivanje u CC časopisu; 2014.
- [8] Vujević S.; Lucić R.; Jurić-Grgić I.; Lovrić D.; Modrić T.; Balaž Z.; Izrada pravila i mjera sigurnosti za osiguranje mjesta rada na elektroenergetskim vodovima; Sveučilište u Splitu; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje - FESB Split; Studija, veljače 2013.

AUTOR

Zdenko Balaž - nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 2, No. 1, 2014.