

طراحی و شبیه سازی شبکه زمین برای ایستگاه فوق توزیع شهرستان الشتر به دو روش اجزا محدود و روش بهینه سازی IEEE Std 80-2000

¹ مهدی ذوالفقاری ² دکتر مریم السادات اخوان حجازی،

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت، دانشگاه علامه فیض کاشانی

Mahdizolfaghari66@gmail.com

² دانشکده مهندسی برق-دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)

چکیده

از آنجایی که پست مذکور فاقد شبکه زمین می باشد، در این مقاله یک سیستم شبکه زمین به دو روش اجزا محدود و IEEE 80-2000 برای آن طراحی شده است. همچنین مدل خاک پست بصورت دو لایه در نظر گرفته شده و پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نتایج عملی روش ونر بدست آمده است. نتایج نشان می دهند وجود یک شبکه زمین با مشخصات بدست آمده از روش IEEE برای حفظ ولتاژهای ناخواسته در پست مذکور ضروری است.

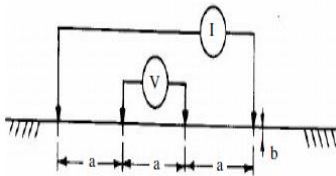
واژه های کلیدی: شبکه زمین، الگوریتم ژنتیک، مقاومت زمین، ولتاژ تماسی و گام، wenner

۱- مقدمه

در صنعت برق تامین امنیت پرسنلی که در محیط و اطراف ایستگاههای نیرو فعالیت می کنند یکی از اصول و ضوابط اولیه است. به هنگام بروز یک خطابه زمین، مانند خطاهای نامتقارن، نباید ولتاژهای گام و تماس از حدود قابل تحمل برای افراد خارج شوند. برای نیل به این هدف یک سیستم شبکه زمین (ground grid system) مناسب باید طراحی شده و در محل استقرار تجهیزات ایستگاه ها دفن گردد و تجهیزات قدرت به آن اتصال یابند. بنابراین در صورت بروز خطایی به زمین، جریان خطا در شبکه زمین توزیع شده و از بین می رود، اما پتانسیلی که در این حالت ایجاد می شود نباید از حد مجاز بیشتر شود. در مقاله حاضر یک شبکه زمین به دو روش اجزا محدود (FEM) و روش بهینه سازی IEEE 80-2000 برای ایستگاه فوق توزیع الشتر که فاقد این سیستم است طراحی می شود. مهمترین عامل در طرح یک شبکه زمین تعیین پارامترهای خاک است که در اینجا برای ارزیابی دقیق سه پارامتر برای خاک در نظر گرفته شده است و به وسیله الگوریتم ژنتیک تحت نظارت بهینه سازی می شوند. آنالیز خطای نامتقارن انجام شده و GPR، ولتاژهای گام و تماسی، حداکثر جریان شبکه زمین و مقاومت آن محاسبه می شوند. شبکه زمین (ground grid) یک قسمت ضروری در ایستگاههای نیرو است و شامل مجموعه ای از هادی های (conductors) افقی و عمودی و میله ها (rods) می باشد که به یکدیگر متصل شده و در محل باس ها و تجهیزات دفن می شوند. انتخاب بهینه تعداد عناصر مذکور با توجه به هزینه ها برای محدود کردن ولتاژهای ناخواسته از جمله ولتاژهای گام و تماسی مهم است. در اینجا بعد از تعیین دقیق ولتاژها به روش اجزا محدود، تعداد بهینه اجزا را نیز به وسیله روش IEEE Std 80-2000 تعیین می کنیم.

۱. تعیین مدل و پارامترهای خاک

اولین پارامتر مهم در طراحی یک شبکه زمین تعیین ساختار خاک و مقاومت الکتریکی آن در محل استقرار شبکه زمین است [3]. مقاومت خاک تحت عواملی مانند رطوبت، دما و ساختارهای شیمیایی و همچنین بکارگیری کابل های فشار قوی و متوسط زیرزمینی به شدت تغییر می کند [9]. روش متداول اندازه گیری عملی مقاومت ویژه خاک روش wenner می باشد [4] که به روش چهارپین نیز موسوم است و در شکل (۱) نشان داده شده است.

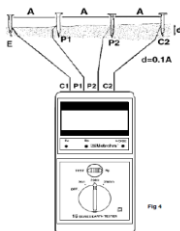


شکل (۱): wenner method test circuit arrangement

در این صورت مقاومت ویژه زمین از رابطه (۱) تعیین می شود:

$$\rho = 2\pi aR \quad (1)$$

در این رابطه $R=V/I$ مقاومت ظاهری و a فاصله بین الکترودهاست [3,5]. در عمل می توان از یک megger-E 1610 به صورت شکل (۲) نیز استفاده نمود.

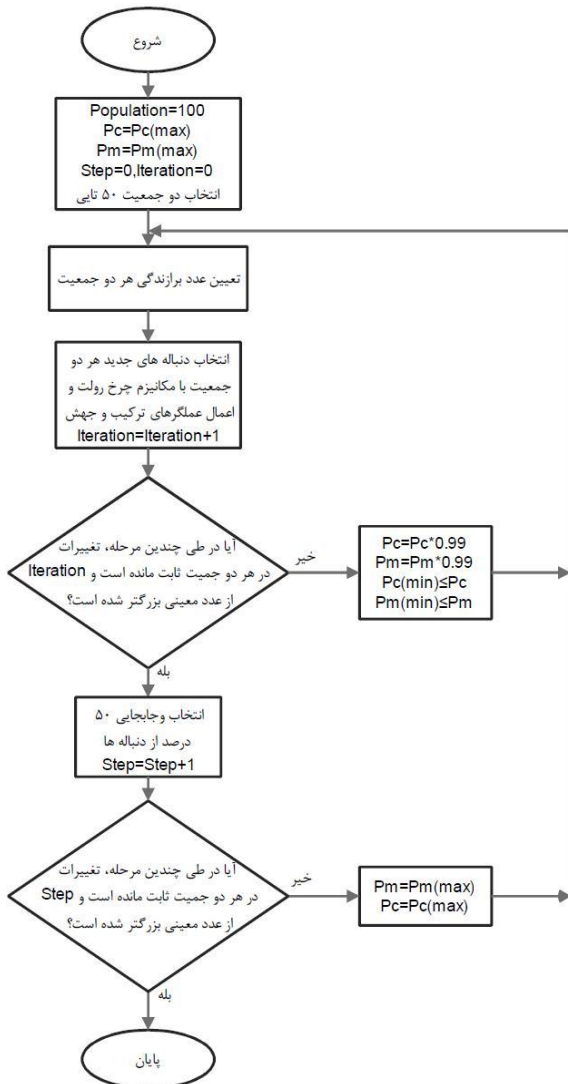


شکل (۲): wenner arrangement

کاهش احتمال تا حد P_{min} ادامه می یابد. اگر در طی مراحل اجرای الگوریتم حداکثر احتمال انتخاب که مربوط به بهترین کروموزوم است و با توجه به رابطه (۲) تعیین می شود در چندین مرحله تغییرات کمی داشت، احتمال به مقدار اولیه P_{max} افزایش یافته و مجدداً طبق روند ارائه شده کاهش می یابد. با این روند الگوریتم ژنتیک از نقاط بهینه محلی رهایی یافته و به سمت نقطه بهینه سراسری حرکت می کند.

$$P_{l,max} = \max\{P_{l,i}\}, l = 1, 2, \dots, N$$

فلوچارت الگوریتم تحت نظارت در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم ژنتیک

نتایج عملی حاصل از این روش در جدول (۱) آمده است. در این تحقیق مدل دولایه برای خاک در نظر گرفته شد که شامل سه پارامتر سطح خاک h ، مقاومت لایه بالایی ρ_1 و مقاومت لایه پایینی ρ_2 می باشد. همچنین در این مقاله از الگوریتم ژنتیک تحت نظارت به عنوان بهینه ساز تابع تابع خطا (رابطه (۲)) استفاده شده است تا با استفاده از اندازه گیری های عملی مقاومت ویژه خاک، پارامترهای مدل خاک دو لایه (شکل (۲)) تعیین شود.

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (2)$$

مقاومت خاک اندازه گیری شده (measured) ρ_{ai}^c و مقاومت خاک محاسبه شده (calculated) می باشند هنگامی که فاصله بین دو probe متوالی ai باشد

۱-۱ الگوریتم ژنتیک تحت نظارت و تعیین پارامترهای خاک [2,7] هر کروموزوم شامل ۶۰ عنصر برای پارامترهای مقاومت ویژه لایه ها و ضخامت لایه ها می باشد. در مدل خاک دولایه، ۲۲ عنصر اول هر کروموزوم مربوط به ρ_1 ، ۲۲ عنصر دوم مربوط به ρ_2 و ۱۶ عنصر باقیمانده مربوط به h می باشد. تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰ در نظر گرفته شده است که ۱۰۰ مقدار تصادفی برای لایه بالایی ($\rho_1 > 1500$) و ۱۰۰ مقدار تصادفی برای مقاومت ویژه لایه دوم ($\rho_2 > 1500$) و ۱۰۰ مقدار تصادفی برای ضخامت لایه اول ($h > 8$) تولید می شود. الگوریتم ژنتیک به صورت دو جمعیت مجزای ۵۰ تایی و به طور موازی اجرا شده است. پس از اتمام هر مرحله از اجرا ۵۰ درصد از کروموزوم های هر جمعیت توسط مکانیزم چرخ رولت انتخاب و جابه جا شده اند. سپس با احتمال ترکیب (P_c) و احتمال جهش (P_m) تحت نظارت، الگوریتم ژنتیک بر اساس مکانیزم چرخ رولت برای هر جمعیت اجرا می شود. مقدار $P_m(\max)$ برای احتمال جهش و مقدار $P_c(\max)$ برای احتمال ترکیب در نظر گرفته می شوند. سپس این مقادیر به صورت زیر کاهش می یابند:

$$P_c = P_c(\max)$$

$$P_c = P_c(\max) * 0.99$$

$$P_c \geq P_c(\min)$$

$$P_m = P_m(\max)$$

$$P_m = P_m(\max) * 0.99$$

$$P_m \geq P_m(\min)$$

۳- GPR ، ولتاژهای گام و تماسی قابل تحمل

۱-۳ (Ground Potential Rise) GPR

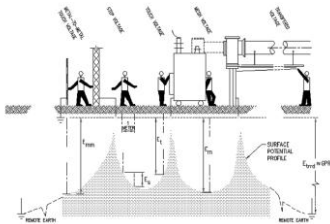
GPR حداکثر پتانسیل الکتریکی است که یک شبکه زمین نسبت به زمین دور (remote earth) می تواند داشته باشد. این پتانسیل تابع حداکثر جریان شبکه زمین و مقاومت شبکه زمین است.

۲-۳ ولتاژ تماسی (Touch Voltage)

اختلاف پتانسیل بین GPR و پتانسیل سطح در نقطه ای که شخص یک سازه زمین شده را لمس می کند ولتاژ تماسی نامیده می شود.

۳-۳ ولتاژ گام (Step Voltage)

ولتاژ گام اختلاف پتانسیل بین دو پای یک شخص است که به فاصله یک متر از یکدیگر قرار دارند در حالی که شخص به هیچ ساختار فلزی زمین شده ای متصل نیست. ولتاژهای ناخواسته دیگری نیز مانند ولتاژ تماسی فلز به فلز (metal-to-metal touch voltage) و ولتاژ مش (mesh voltage) که در واقع حداکثر ولتاژ تماسی می باشد ممکن است رخ دهد. در شکل (۵) این ولتاژها به تصویر کشیده شده اند [9].



شکل (۵): ولتاژهای ناخواسته ای که ممکن است ایجاد شوند

۴-۳ نحوه محاسبه

با استفاده از رابطه زیر می توان ولتاژهای گام و تماسی را تعیین نمود [9,14].

ولتاژ تماسی و گام قابل تحمل برای فردی با میانگین وزن 50kg:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_S \rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{step50} = (1000 + 6C_S \rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

(D_f و فاکتور کاهشی (decrement factor) بوده و از روابط زیر تعیین می شوند: K فاکتور بازتاب (reflection factor)

$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (4)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-2t_f/T_a})} \quad (5)$$

پارامترهای خاک دو لایه پس از اندازه گیری های عملی (جدول (۱)) و اجرای الگوریتم بصورت زیر است:

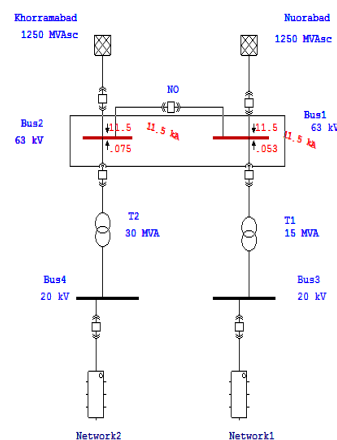
$$\rho_1 = 157.87 (\Omega.m)$$

$$\rho_2 = 348.23 (\Omega.m)$$

$$h = 2,12m$$

۲- شبیه سازی و آنالیز خطای نامتقارن

به منظور طراحی و ارزیابی یک شبکه زمین برای پست عناصر پست و بار روی فیدرهای خروجی آن با توجه به گزارش بار روزانه هر فیدر [1] به صورت جدول (۲) در نظر گرفته شده است. شبکه زمین در شین ۶۳kv قرار داده شده است. بار روی ترانسفورماتورها توسط دو شبکه مرکب (composit network) دیده شده است به طوریکه network 1 شامل ۴ فیدر خروجی (به ترتیب فیدرهای قلابی، هنام، الشتر ۱ و خدمات کشاورزی) و همچنین network 2 شامل ۲ فیدر خروجی (به ترتیب فیدرهای الشتر ۲ و فیروزآباد) هستند. همچنین هر کدام از شبکه های مذکور دارای دو فیدر خازنی با مجموع ظرفیت ۲,۴ MVAR هستند. دو شبکه فوق از شین های ۲۰kv تغذیه می شوند. همچنین بار روی فیدرها به صورت یکجا (Lumped) در نظر گرفته شده است. در عمل خطای نامتقارنی که باعث ایجاد حداکثر جریان زمین می شود خطای دو فاز به زمین (line-to-line-to-ground) است [۹]. بنابراین، این نوع خطا به باس های تحت پوشش شبکه زمین اعمال شده (بر اساس ANSI SC Unbalanced Fault-half cycle Value) و مقدار جریان خطا و پارامترهای آن ($3I_o$) به دست می آیند که برای محاسبه GPR و ولتاژهای تماسی و گام لازم است. محاسبات شبکه زمین بر اساس شینی که بیشترین مقدار جریان خطا را دارد انجام می شود.



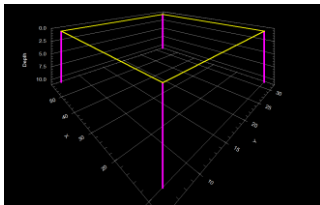
شکل (۴): آنالیز خطای نامتقارن

روش FEM روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و انتگرالی است. اساس کار آن حذف معادلات و یا ساده سازی آن ها به معادلات دیفرانسیل معمولی می باشد که با روش های عددی مانند اویلر حل می شوند. در این مورد به دلیل حجم زیاد محاسبات و البته دقیق تر بودن آن ها باید از نرم افزارهایی مانند Ansys, ABAQUS, Nastran استفاده نمود. به دلیل حجم و زمان بالای انجام محاسبات به این روش تعداد میله ها کمتر در نظر گرفته شد (که در نتیجه ممکن است اختلاف بین مقادیر ولتاژهای قابل تحمل و محاسبه شده زیاد باشد) اما ولتاژهای ناخواسته بدست آمده در این روش دقیق تر از روش IEEE است. نتایج حاصل از طراحی به این روش در ضمیمه آمده است.

۷- طراحی به روش بهینه سازی IEEE Std 80-2000

در این روش مصالحه ای بین تعداد هادی ها و مقدار تأثیر آنها در کاهش ولتاژهای گام و تماسی و رساندن آنها به مقادیر قابل تحمل به وجود آید.

برنامه عمل بهینه سازی را ابتدا با دو هادی (conductor) افقی موازی و دو هادی عمودی (یعنی اضلاع مستطیل) و چهار میله (rod) که در چهار گوشه شبکه زمین به صورت ستون قرار می گیرند، شروع می کند. در هر تکرار تعداد هادی ها و میله ها بر مبنای هزینه آنها نسبت به میزان درصد کاهش در سطوح ولتاژهای ناخواسته افزایش می یابد [14]. شکل (۷) هادی ها و میله های اولیه بکار گرفته شده را نشان می دهد.



شکل (۷): هادی ها و میله های به کار گرفته شده

۸- نتیجه گیری

از آنجایی که پست فوق توزیع شهرستان الشتر فاقد شبکه زمین است، در این مقاله یک شبکه زمین به دو روش FEM و بهینه سازی IEEE Std 80-2000 برای پست مذکور طراحی شد که داده ها نشان می دهند وجود چنین شبکه ای برای حفظ حدود ولتاژهای ناخواسته در محدوده های مجاز برای تامین امنیت پرسنل ضروری است. طراحی به روش FEM نتایج دقیق تری بدست می دهد که البته در این روش حجم محاسبات و زمان انجام آن زیاد است. لذا برای انجام امورات مهندسی که نیازمند مصالح بهینه و زمان کوتاه انجام محاسبات است روش IEEE بسیار مناسب خواهد بود. بنابراین برای پست مذکور شبکه زمینی که در اینجا به روش IEEE طراحی گردید مناسب خواهد بود.

در اینجا ρ مقاومت لایه تحتانی خاک و ρ_s مقاومت لایه سطحی بر حسب ohm-m بوده و T_a ثابت زمانی معادل زیرگذرای سیستم می باشد.

C_s ضریب کاهش حد مجاز لایه سطحی (surface layer derating factor) می باشد و برای IEEE std 80-2000 به قرار زیر است:

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \rho / \rho_s)}{2h_s + 0.09} \quad (6)$$

هنگامی که $k=0$ باشد $C_s = 1$ خواهد بود. سایر روابط برای تعیین مقدار واقعی این ولتاژها را در [8] می توان یافت.

۴- مقاومت شبکه زمین

مقاومت شبکه زمین یعنی مقاومت آن نسبت به زمین دور (remote earth) بدون دیگر هادی های متصل شده [8] و از رابطه Sverak بدست می آید:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (7)$$

در اینجا

$$R_g = \text{مقاومت شبکه زمین}, \Omega$$

$$\rho = \text{مقاومت خاک}, \Omega \cdot m$$

$$A = \text{مساحت تحت پوشش شبکه زمین}, m^2$$

$$h = \text{عمق شبکه زمین}, m$$

$$L_T = \text{طول معادل هادی های دفن شده}, m$$

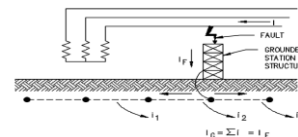
۵- حداکثر جریان شبکه زمین

از آنجایی که حداکثر جریان شبکه زمین موجب ایجاد حداکثر پتانسیل زمین (GPR) می شود و همچنین همانطور که در روابط ولتاژهای تماسی و گام مشاهده گردید، برای تعیین این ولتاژها به این جریان نیاز است و لذا باید آنرا محاسبه کرد. برای نمونه شکل (۶) جریان زمین را در حالت خطای یک فاز به زمین نشان می دهد.

حداکثر جریان شبکه زمین از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_g = S_f \cdot C_p \cdot D_f \cdot (3I_0)$$

S_f ضریب پراکندگی جریان، I_0 جریان خطای توالی صفر و C_p, D_f از روابط گذشته تعیین می گردند.



شکل (۶): یک جریان خطای نوعی زمین

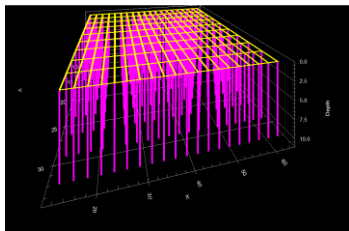
۶- طراحی به روش اجزا محدود (Finite Element

Method)

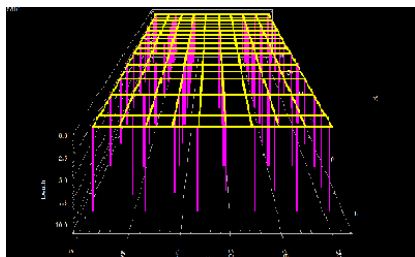
۱۴. The User Guide of Etap Power Station.Chapter 28.

۱۵. Chow, Y.L., M.M. Elsherbiny and M.M.A. Salama1996. Resistance formulas of grounding systems in two-layer earth. IEEE Trans.Power Delivery, 11 (3): 1330-1336.

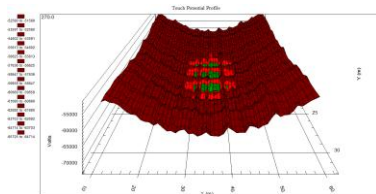
ضمیمه



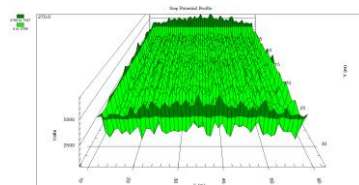
شکل(۸):نمای شبکه زمین طراحی شده به روش IEEE



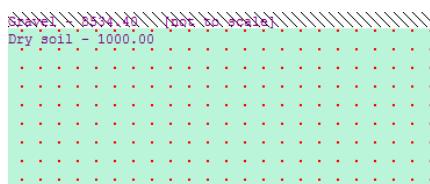
شکل(۹): نمای شبکه زمین طراحی شده به روش FEM



شکل(۱۰):نمودار سه بعدی ولتاژ تماسی بدست آمده از روش FEM



شکل(۱۱):نمودار سه بعدی ولتاژ گام بدست آمده از روش FEM



۱. مهدی ذوالفقاری، گزارش دوره کارآموزی کارشناسی، امور انتقال برق استان لرستان، اداره R.D.C ، ۱۳۸۸
۲. "بهینه سازی مدل خاک چند لایه در آزمایش تعیین مقاومت ویژه با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحت نظارت" سومین کنفرانس حفاظت و کنترل سیستم های قدرت، IAEEE، پویا حاجی و... .

۳. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Std. 81-1983, IEEE, Piscataway, NJ, 1983.

۴. Wenner, F., A method of measuring earth resistances, Rep. 258, Bull. Bur. Stand., 12,469-482, 1916.

۵. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std. 80-2000, IEEE, Piscataway, NJ, 2000.

۶. N.Mohmad Nor, R.Rajab and K.Ramar, "Validation of the Calculation and Measurement Techniques of Earth Resistance Value". American Journal of applied Sciences 5(10):1313-1317.2008.

۷. Gonos, I.F. and I.A. Stathopoulos, 2005. Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms. IEEE Trans. Power Delivery, 20(1) 100-106.

۸. Orellana, E. and H.M. Mooney, 1996. MasterTables and Curves for Vertical Electrical Sounding(VES) Over Layered Structures. Madrid Interciecia.

۹. Richard P. Keil "chapter 11 'Substation Grounding' of Electric Power Substations Engineering book.2003.

۱۰. WWW.Megger.com

۱۱. R.J.Edwards G4FGQ ©15th February 1998.

۱۲. Jeff Jowlet, " Measuring Ground Resistance-The Fall of Potential Method". NETA World. Spring 2002.

۱۳. Robert L.Casico and William J.Helfrich, "Ground Resistance Testing in the Mining Industry", presented at Annual Technique Conference of the International Electrical Testing Association, March 19, 1987.



چهارمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران

4th Iranian Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE2012)

دانشگاه آزاد اسلامی گناباد - ۷ و ۸ و ۹ شهریور ماه ۱۳۹۱



شکل (۲): مدل خاک پست

Material Constants:							
Conductor/Rod	Type	Conductivity %	α Factor	r Factor	Fusing Temperature °C	Resistivity @ 20 $\mu\Omega$	Thermal Capacity J/(cm ³ .°C)
Conductor & Rod	Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245.0	1084.0	4.40	

جدول (۳) مشخصات مواد استفاده شده در هر دو روش

Rod Data:				
Diameter cm	Length M	Optimized No. of Rods	Arrangement	Cost \$/Rod
2.0	10.0	342	Rods Throughout Grid Area	100.0

a_i	۳	۳	۶	۶
ρ_i	۲۲۸,۴۱	۲۳۵,۲۱	۲۷۱,۴۵	۲۹۳,۴۳

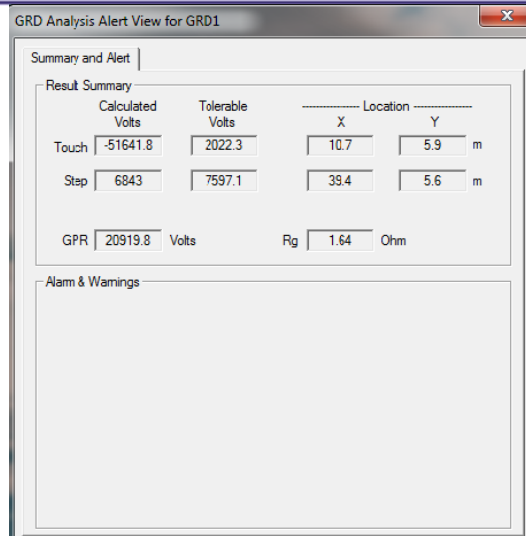
جدول (۱) نتایج عملی روش و نر برای خاک پست

PF	MVA	kv	فیدر
0.95	3.20	20	السترا ۱
0.95	3.117	20	السترا ۲
0.90	۲,۲۵۱	20	قلایی
0.94	0.52	20	هنام
0.90	0.52	20	خدمات کشاورزی
۰,۹۴	۲,۹۴۴	۲۰	فیروزآباد

جدول (۱) بار فیدرها

rods	conductors	روش/تعداد
342	30	IEEE
70	30	FEM

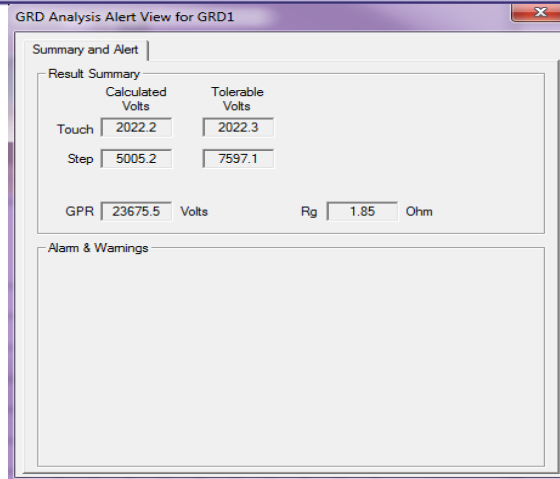
جدول (۴) تعداد میله ها و هادی ها در هر دو روش



شکل (۱۳): اجرای برنامه حاصل از روش FEM

Intermediate Constants for IEEE 80 Methods
- Correction factor for grid geometry regarding touch voltage (K _{im}): 2.676
Correction factor for grid geometry regarding step voltage (K _{is}): 2.676
Spacing factor for touch voltage (K _m): 0.417
- Spacing factor for step voltage (K _s): 0.535
Corrective weighting factor that adjusts for the effects of inner conductors on the corner mesh (K _{ii}): 1.000
Constants 1 related to the geometry of system (K ₁): 1.329
Constants 2 related to the geometry of system (K ₂): 5.667
Surface Layer Derating Factor (C _s): 0.885
Decrement Factor (D _f): 1.108
Maximum Grid Current: 12.777 kA

جدول (۴): ضرایب استفاده شده در روش IEEE



شکل (۱۱): اجرای برنامه حاصل از روش IEEE