طراحی بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین پست‌های فشارقوی

بهروز شفیعی[۱] **احمد میرزایی**[۲]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق ـ دانشگاه یزد ـ یزد ـ ایران
behroozshafie@stu.yazd.ac.ir
۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق ـ دانشگاه یزد ـ یزد ـ ایران
mirzaei@yazd.ac.ir

چکیده: طراحی جامع و بهینه سیستم زمین پست‌های فشارقوی از دو دیدگاه ایمنی و اقتصادی یکی از مهم‌ترین، پرهزینه‌ترین، حساس‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل پست‌های فشارقوی است. در این مقاله یک روش جدید شامل هفت گام اساسی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر ایمنی و هزینه اقتصادی سیستم زمین بعنوان متغیرهای بهینه سازی جهت طراحی جامع و بهینه سیستم زمین پست‌های فشارقوی بر اساس استاندارد ANSI/IEEE Std. 80-2000 پیشنهاد شده است. در این طراحی یک تابع هدف مناسب در بر گیرنده کلیه مؤلفه‌های اصلی هزینه اجرای سیستم زمین تعریف شده است. علاوه بر این جهت بهینه سازی سیستم زمین و حل مسائل و نامعادلات غیر خطی بهمراه شرایط مرزی غیر خطی یک روش بهینه سازی تحت عنوان الگوریتم جستجوی تصادفی، پیشنهاد شده است. در پایان نتایج طراحی بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت و یک پست فشارقوی 230/63 KV بر اساس روش پیشنهادی و بر طبق استاندارد ANSI/IEEE Std. 80-2000 و روش بهینه سازی الگوریتم جستجوی تصادفی ارائه و با نتایج طراحی آن بر اساس روش معمول آزمون و خطا و بر طبق استاندارد مذکور مقایسه شده است که مناسب بودن روش پیشنهاد شده را برای طراحی یک سیستم زمین ایمن و اقتصادی تأیید می‌نماید.

کلمات کلیدی: طراحی جامع و بهینه، طراحی ایمن و اقتصادی، سیستم زمین پست فشارقوی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۲۳
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۱۲
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر احمد میرزایی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - یزد - بلوار دانشگاه- دانشگاه یزد - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر.

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

۱- مقدمه

سیستم زمین در پست‌های فشارقوی از اهمیت بالایی برخوردار است. از لحاظ فنی، یک سیستم زمین خوب وظیفه حفاظت از تجهیزات در پست‌ها و از همه مهمتر حفاظت از جان کارکنان این بخش‌ها را به عهده دارد. از جمله اقدامات جهت تأمین ایمنی کارکنان پست‌های شبکه قدرت، ایجاد سیستم زمین قابل اطمینان است بطوریکه گرادیان ولتاژ را کاهش داده و از افزایش آن در سطح پست جلوگیری کند. بطور کلی، کارکردهای سیستم زمین در شبکه قدرت به شرح زیر است:

۱) تضمین عملکرد مطمئن و سریع رله‌های تشخیص خطای فاز به زمین (*Earth Fault*)

۲) حفظ اضافه ولتاژهای ایجاد شده در فازهای سالم در محدوده مجاز

۳) تأمین سطح حفاظتی مناسب برای برقگیرها توسط ارائه مقاومت موجی کوچک

۴) تضمین ایمنی کارکنان و تجهیزات در پست و بهره برداری سالم از تأسیسات در کلیه شرایط

از طرف دیگر، جاری شدن امواج گذرای جریان در سیستم زمین ناشی از برخورد صاعقه و یا وقوع اتصال کوتاه فاز به زمین، باعث ایجاد گرادیان پتانسیل در سطح زمین شده که در این صورت نقاط مختلف سطح زمین نسبت بهم و نسبت به زمین دوردست دارای اختلاف پتانسیل می‌شوند که چنانچه طراحی بطور دقیق انجام نشود، ممکن است این ولتاژها به حدی برسند که ایمنی افراد را در محل پست به خطر بیندازند. در این شرایط، افراد در معرض ولتاژهای بالا بین محل دو گام خود (ولتاژ گام) بوده و همچنین چنانچه یک فرد در این لحظه در تماس با یک وسیله فلزی زمین شده باشد، در معرض ولتاژ بین آن نقطه و زمین محل پای خود (ولتاژ تماس) است. لذا سیستم زمین می‌بایست بنحوی طراحی گردد که به ترتیب مقادیر واقعی ولتاژهای تماس و گامی که امکان رخداد آن‌ها در محل پست و در شرایط وقع خطا وجود دارد از ولتاژهای تماس و گام قابل تحمل برای انسان کمتر باشد [۴-۱].

تاکنون روش‌های متعددی جهت بهینه سازی سیستم زمین ارائه شده که در هریک از آن‌ها نوع خاصی از مسائل طراحی سیستم زمین مورد توجه قرار گرفته است. در این روش‌ها عموماً تنها پارامتری که جهت بهینه سازی در نظر گرفته شده، طول هادی‌های سیستم زمین است. برای نمونه، در برخی از این روش‌ها فاصله بین هادی‌های شبکه زمین با استفاده از روش‌های عددی در زمین‌های با مدل خاک دو لایه تعیین شده است [۵]. مرجع [۶] طراحی شبکه زمین را بر اساس فاصله متغیر بین هادی‌های آن و به تعبیری دیگر برای پست‌های با مش نامتقارن انجام داده است. در مرجع [۷] رابطه تغییرات ولتاژ گام و تماس با تعداد هادی‌های سیستم زمین جهت تعیین میزان تأثیر افزایش تعداد هادی‌ها بر کاهش ولتاژهای گام و تماس ارائه شده اما با مقادیر قابل تحمل آن‌ها، جهت ارزیابی ایمنی مقایسه نشده است. مراجع [۱۰-۸] مطالعه‌ای بر روی ضریب فشردگی هادی‌ها و رابطه آن با ولتاژ گام و تماس انجام داده‌اند و ضریب فشردگی متناسب با کمترین ولتاژ تماس را بدست آورده‌اند اما مقایسه‌ای با مقادیر قابل تحمل ولتاژ گام و تماس جهت ارزیابی ایمنی انجام نداده‌اند. در مرجع [۱۱] بهینه سازی به کمک روش الگوریتم ژنتیک (*GA*) انجام شده اما تعداد هادی‌های شبکه زمین از قبل معلوم و ثابت در نظر گرفته شده است و هدف حداقل کردن ولتاژ تماس بوده است، اما با مقادیر قابل تحمل ولتاژ گام و تماس مقایسه نشده است. مرجع [۱۲] جهت بهینه سازی سیستم زمین رابطه‌ای بین طول مش‌های متوالی در نظر گرفته است، اما تنها متغیر بهینه سازی طول کل هادی‌های شبکه زمین است. مراجع [۱۵-۱۳] بهینه سازی سیستم زمین را توسط *GA* انجام داده‌اند که در [۱۴] میله‌های عمودی نیز در نظر گرفته شده است، اما در این مراجع، تنها طول کل هادی‌های سیستم زمین بعنوان متغیر بهینه سازی لحاظ شده است. مرجع [۱۶] تأثیر صفحات زمین شده را در مدل خاک چند لایه بر بهبود پروفیل ولتاژهای *GPR* و تماس و در نتیجه بر بهبود روش طراحی شبکه‌های زمین تحلیل نموده است. مرجع [۱۷] با استفاده از *GA* و با ارائه یک مدل ریاضی مناسب جهت محاسبه مقاومت شبکه زمین، *GPR* و ولتاژهای گام و تماس صرف نظر از محدودیت در شکل فیزیکی شبکه‌های زمین (محدودیت استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000*) اقدام به طراحی بهینه سیستم زمین نموده است. مرجع [۱۸] با محاسبه انواع پتانسیل و پارامترهای اساسی شبکه زمین با استفاده از تکنیک *ECM* اقدام به بهینه سازی روش‌های طراحی آن نموده است. همانطور که دیده می‌شود در [۱۸-۱۶] نیز برآوردی از هزینه‌های اقتصادی مربوط به روش‌های طراحی بهینه ارائه شده بعمل نیامده است و صرفاً به طراحی سیستم زمین از دیدگاه ایمنی پرداخته شده است.

در این مقاله یک طرح بهینه سازی جامع چند متغیره شامل هفت گام اساسی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر ایمنی و هزینه اقتصادی سیستم زمین پست‌های فشارقوی بعنوان متغیرهای بهینه سازی بر طبق استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش بهینه سازی الگوریتم جستجوی تصادفی (*RSA*)، پیشنهاد شده است و نتایج آن با نتایج طراحی بر طبق استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش معمول آزمون و خطا (*TAE*) مقایسه شده است. علاوه بر این، با بکارگیری الگوریتم جستجوی تصادفی و با تعریف تابع هزینه مناسب در بر گیرنده هزینه‌های اصلی اجرای سیستم زمین، روشی مؤثر و کاربردی جهت طراحی بهینه و اقتصادی سیستم زمین معرفی شده است. در این راستا کلیه متغیرهای بهینه سازی و هزینه متناظر با آن‌ها در ستون اول (C_1) از جدول (۶) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، با استفاده از این روش کاهش قابل توجه در هزینه‌های اجرایی سیستم زمین و بهبود گرادیان‌های پتانسیل سطحی حاصل

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

می‌گردد. تنها مسأله‌ای که در استفاده از روش پیشنهاد شده در این مقاله جهت طراحی جامع، بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین پست‌های فشارقوی وجود دارد این است که روش مذکور در حالت کلی به حل یک سری نامعادلات غیر خطی بهمراه شرایط مرزی غیر خطی نیاز دارد. در این مقاله روش *RSA* برای حل مسائل و نامعادلات غیر خطی بهمراه شرایط مرزی غیر خطی که تعداد معلوم و مجهول‌شان متفاوت است، معرفی و پیشنهاد شده است.

۲- گام اول: تعریف مسأله و تعیین هدف نهایی

هدف از طراحی سیستم زمین در این مقاله یافتن تمامی پارامترهای طراحی شبکه زمین مطابق با ستون اول (C_1) از جدول (۶) است، بطوریکه این سیستم بتواند در شرایط وقوع خطا جریان‌های خطا را بطور مناسب به زمین هدایت و در خاک اطراف آن پراکنده نماید. همچنین طرح سیستم زمین پیشنهاد شده در این مقاله باید بتواند بطور همزمان شروط زیر را بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* برآورده سازد:

۱) کلیه شرایط مرزی حاکم بر نامعادلات اساسی سیستم زمین را برآورده سازد.
۲) شرایط ایمنی را تحت سخت ترین شرایط (نظیر حداکثر جریان خطای تکفاز ممکن بهمراه حداکثر مدت زمان تداوم آن) برآورده سازد.
۳) شرایط لازم را جهت تشخیص و حفاظت مناسب خطای زمین فراهم کند.
۴) طرح سیستم زمین پیشنهادی علاوه بر برآورده کردن شرایط ذکر شده، می‌بایست از نظر اقتصادی نیز دارای حداقل هزینه اجرایی باشد.

در نهایت با استفاده از روش پیشنهاد شده در این مقاله می‌توان مصالحه مناسبی بین مسائل کمینه سازی هزینه‌های اقتصادی و ایمنی سیستم زمین پست‌های فشارقوی برقرار نمود، بطوریکه علاوه بر تأمین ایمنی مطلوب سیستم زمین پست‌های فشارقوی، هزینه اجرایی آن نیز کمینه باشد.

۳- گام دوم: تعیین معادلات سیستم زمین

معادلات سیستم زمین مورد نیاز جهت طراحی جامع، بهینه، ایمن و اقتصادی آن شامل موارد زیر است.

۳-۱- تعیین حداکثر ولتاژ تماس و گام

با استفاده از (۱) و (۲) می‌توان به حداکثر ولتاژ گام و تماس قابل تحمل برای انسان با وزن ۷۰ kg دست یافت [۱].

$$E_{step70}=\left(1000+6c_s\rho_s\right)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (۱)$$

$$E_{touch70}=\left(1000+1.5c_s\rho_s\right)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (۲)$$

در (۱) و (۲)، ضریب کاهش لایه سطحی را می‌توان با استفاده از (۳) بدست آورد.

$$c_s=1-\frac{0.09\left(1-\frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s+0.09} \quad (۳)$$

۳-۲- تعیین سطح مقطع هادی‌های شبکه زمین

با استفاده از (۴) می‌توان با در نظرگرفتن محدودیت حرارتی هادی‌های زمین، حداکثر جریان مجاز هادی و قیود مربوطه دیگر سطح مقطع مناسب هادی، رایزر و میله‌های سیستم زمین را محاسبه نمود [۱].

$$A=\frac{10^{-9}\times I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP.10^{-4}}{t_c\alpha_r\rho_r}\right)ln\left(\frac{K_0+T_m}{K_0+T_a}\right)}} \quad (۴)$$

حداکثر درجه حرارت مجاز برای اتصالات با جوش احتراقی تقریباً ۱۰۸۳ $°C$ (دمای ذوب مس) و برای اتصالات پیچ و مهره‌ای ۲۵۰ $°C$ است. درجه حرارت مرجع برابر ۲۰ $°C$ فرض می‌گردد [۱].

۳-۳- تعیین مقاومت سیستم زمین

مقاومت کلی شبکه زمین شامل هادی‌های موازی افقی و میله‌های زمین، که بطور تجربی توسط شوارتز بدست آمده است مطابق (۵) بیان می‌شود [۱].

$$R_g=\frac{R_1R_2-R_m^2}{R_1+R_2-2R_m} \quad (۵)$$

در (۵)، مقادیر مربوط به R_1، R_2 و R_m با استفاده از (۸-۶) بدست می‌آید.

$$R_1=\frac{\rho}{\pi L_C}\left[ln\left(\frac{2L_C}{a'}\right)+\frac{k_1L_C}{\sqrt{A'}}-k_2\right],\ a'=\sqrt{2ah} \quad (۶)$$

$$R_2=\frac{\rho}{2\pi n_R L_r}\left[ln\left(\frac{4L_r}{b}\right)-1+\frac{2k_1L_r}{\sqrt{A'}}\left(\sqrt{n_R}-1\right)^2\right] \quad (۷)$$

$$R_m=\frac{\rho}{\pi L_C}\left[ln\left(\frac{2L_C}{L_r}\right)+\frac{k_1L_C}{\sqrt{A'}}-k_2+1\right] \quad (۸)$$

با در نظر گرفتن شبکه‌های زمین مستطیل شکل، سایر ضرایب در (۸-۶) مطابق (۱۳-۹) بدست می‌آیند.

$$L_C=\left(\frac{L_y}{D}+1\right)L_x+\left(\frac{L_x}{D}+1\right)L_y \quad (۹)$$

$$A'=L_x\times L_y \quad (۱۰)$$

$$L_x=W \quad (۱۱)$$

$$L_y=L \quad (۱۲)$$

$$L_R=n_R\times L_r \quad (۱۳)$$

ثابت‌های K_1 و K_2 نیز مطابق (۱۴) و (۱۵) تعریف می‌گردد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

$$K_I=\begin{cases}-0.04\left(\frac{L}{W}\right)+1.41, & h=0\\ -0.05\left(\frac{L}{W}\right)+1.20, & h=1/10\sqrt{AREA}\\ -0.05\left(\frac{L}{W}\right)+1.13, & h=1/6\sqrt{AREA}\end{cases} \quad (۱۴)$$

$$K_2=\begin{cases}0.15\left(\frac{L}{W}\right)+5.50, & h=0\\ 0.10\left(\frac{L}{W}\right)+4.68, & h=1/10\sqrt{AREA}\\ -0.05\left(\frac{L}{W}\right)+4.40, & h=1/6\sqrt{AREA}\end{cases} \quad (۱۵)$$

۳-۴- تعیین ولتاژ مش

ولتاژ مش با استفاده از (۱۶) بدست می‌آید [۱].

$$E_m=\frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \quad (۱۶)$$

K_m یا ضریب فضا در (۱۶) بصورت (۱۷) تعریف می‌گردد.

$$K_m=\frac{1}{2\pi}\times\left[ln\left[\frac{D^2}{16hd}+\frac{(D+2h)^2}{8Dd}-\frac{h}{4d}\right]+\frac{K_{ii}}{K_h}ln\left[\frac{8}{\pi(2n-1)}\right]\right] \quad (۱۷)$$

در شبکه‌هایی که میله‌های زمین در آن‌ها در پیرامون شبکه کوبیده شده باشد، ضریب K_{ii} با استفاده از (۱۸) بدست می‌آید.

$$K_{ii}=1 \quad (۱۸)$$

ضریب k_h در (۱۷) مطابق (۱۹) تعریف می‌گردد

$$K_h=\sqrt{1+\frac{h}{h_0}} \quad (۱۹)$$

که در آن h_0 عمق مرجع شبکه است و برابر m ۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین n در (۱۷) مطابق (۲۰) بدست می‌آید

$$n=n_a n_b n_c n_d \quad (۲۰)$$

که در آن ثابت‌های n_a، n_b، n_c و n_d با استفاده از (۲۴-۲۱) تعریف می‌گردد.

$$n_a=\frac{2L_c}{L_p} \quad (۲۱)$$

$$n_b=\sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A'}}} \quad (۲۲)$$

$$n_c=\left[\frac{L_x L_y}{A'}\right]^{\frac{0.7A'}{L_x L_y}} \quad (۲۳)$$

$$n_d=\frac{D_m}{\sqrt{L_x^2+L_y^2}} \quad (۲۴)$$

برای شبکه‌های زمین مستطیل شکل، ضرایب L_P و D_m در (۲۴-۲۱) مطابق (۲۵) و (۲۶) بدست می‌آیند.

$$L_P=2\left(L_x+L_y\right) \quad (۲۵)$$

$$D_m=\sqrt{L_x^2+L_y^2} \quad (۲۶)$$

ضریب بی‌نظمی k_i مربوط به n بصورت (۲۷) تعریف می‌گردد.

$$K_i=0.644+0.148n \quad (۲۷)$$

در شبکه‌های دارای میله‌های زمین در پیرامون شبکه، L_M یا طول موثر شبکه بصورت (۲۸) تعریف می‌گردد.

$$L_M=L_C+\left[1.55+1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2+L_y^2}}\right)\right]L_R \quad (۲۸)$$

۳-۵- تعیین ولتاژ گام

ولتاژ گام با استفاده از (۲۹) بدست می‌آید

$$E_s=\frac{\rho K_s K_i I_G}{L_S} \quad (۲۹)$$

که در آن ضرایب L_S و K_S مطابق (۳۰) و (۳۱) بدست می‌آید[1].

$$L_S=0.75L_c+0.85L_R \quad (۳۰)$$

$$K_S=\frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2h}+\frac{1}{D+h}+\frac{1}{D}\left(1-0.5^{(n-2)}\right)\right] \quad (۳۱)$$

۴- گام سوم: تعیین و ارزیابی جریان خطا

۴-۱- تعیین مؤلفه‌های متقارن جریان شبکه

مؤلفه متقارن جریان شبکه زمین عبارت است از آن قسمتی از شدت جریان متقارن خطا که بین شبکه زمین و محیط اطراف جاری می‌گردد و با استفاده از (۳۲) بدست می‌آید

$$I_g=S_f\times I_f \quad (۳۲)$$

۴-۲- تعیین مقدار مؤثر جریان خطای نامتقارن

مقدار مؤثر جریان خطای نامتقارن، به مقدار مؤثر شکل موج لحظه‌ای جریان در هنگام وقوع خطا اطلاق می‌گردد. حداکثر شدت جریان منتقل شده به شبکه زمین یعنی I_G که در طراحی آن استفاده می‌شود با استفاده از (۳۳) محاسبه می‌گردد

$$I_G=D_f\times I_g \quad (۳۳)$$

که در آن، D_f ضریب کاهش مؤلفه DC برای تمام بازه زمانی رخداد خطا یعنی t_f است که در حالت کلی از (۳۴) بدست می‌آید.

$$D_f=\sqrt{1+\frac{t_a}{t_f}\left(1-e^{\frac{-2t_f}{t_a}}\right)} \quad (۳۴)$$

در (۳۴)، t_a ثابت زمانی آفست DC بر حسب ثانیه بوده و با استفاده از (۳۵) بدست می‌آید

$$t_a=\frac{1}{\omega}\frac{X}{R} \quad (۳۵)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای سیستم بر حسب (rad/sec) است. نسبت X/R نیز معرف نسبت راکتانس القایی سیستم به مقاومت آن از

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

دید نقطه خطا بوده و با نسبت L/R (ثابت زمانی سیستم) متناسب می‌باشد و لذا با میزان محو شدگی آفست DC برابر است [1].

۵- گام چهارم: تعریف و تعیین شرایط مرزی

در این گام شرایط مرزی مربوط به سیستم زمین و پارامترهای مربوط به آن مطابق جدول (۱) و بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و مسائل و مطالعات عملی معرفی می‌گردد.

۶- گام پنجم: تعریف نامعادله اساسی حفاظت

این نامعادله ویژه طراحی بهینه سیستم زمین جهت حفاظت خطای زمین تعریف می‌شود. عملکرد رله‌های حفاظتی در جهت تشخیص و رفع خطای فاز به زمین بستگی به جریان زمین داشته و لذا وجود سیستم زمین با مقاومت ثابت (و به اندازه کافی کوچک) برای عملکرد صحیح رله‌های حفاظتی ضروری است. بر این اساس در پست‌های انتقال و فوق توزیع اغلب مقاومت سیستم زمین باید کمتر از ۱ Ω باشد، در نتیجه حدود مقاومت سیستم زمین بر طبق نامعادله غیر خطی (۳۶) تعریف می‌گردد.

$$0<R_g<1 \qquad (۳۶)$$

۷- گام ششم: تعریف نامعادلات اساسی ایمنی

این نامعادله جهت طراحی بهینه سیستم زمین از دیدگاه ایمنی تعریف می‌گردد. جهت تأمین ایمنی مطلوب در سطح پست در مقابل گرادیان پتانسیل ناخواسته، لازم است تا مقادیر واقعی ولتاژهای گام، تماس، مش و انتقالی در سطح پست از ولتاژ گام و تماس قابل تحمل برای انسان با وزن بدن ۷۰ kg کمتر باشد [۱]. لذا حدود ولتاژهای گام و مش مطابق نامعادلات غیر خطی (۳۷) و (۳۸) در نظر گرفته می‌شود.

$$0<E_m<E_{touch70} \qquad (۳۷)$$

$$0<E_s<E_{step70} \qquad (۳۸)$$

۸- گام هفتم: بکارگیری الگوریتم جستجوی تصادفی جهت طراحی بهینه سیستم زمین

در این مقاله برای حل نامعادلات غیر خطی بهمراه شرایط مرزی غیر خطی یک روش بهینه سازی تحت عنوان، الگوریتم جستجوی تصادفی طراحی شده است. در این روش حل مسأله با استفاده از تولید مجموعه بردارهای اعداد تصادفی (شامل اعضای تصادفی) بر اساس شرایط مرزی حاکم بر مسأله آغاز می‌گردد و سپس با صدق اعضای (اعداد تصادفی) صحیح بردارهای اعداد تصادفی بدست آمده در نامعادلات غیر خطی، پاسخ‌های مسأله (در صورت وجود) بدست می‌آید. در نهایت با استفاده از تابع هدف نسبت به یافتن پاسخ بهینه مسأله از میان کلیه پاسخ‌های آن اقدام می‌شود.

در ادامه مراحل طراحی و بکارگیری روش بهینه سازی *RSA* جهت طراحی جامع، بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین پست‌های فشارقوی معرفی می‌گردد.

۸-۱- مرحله اول: تعریف تابع هدف

در روش‌های مختلف بهینه‌سازی، ابتدا باید یک مدل ریاضی و تحلیلی مناسب شامل یک تابع هدف بر حسب متغیرهای طراحی و شرایط مرزی حاکم بر مسأله مورد نظر تعریف نمود. بر این پایه در این مقاله برای مرحله اول روش بهینه سازی *RSA*، معادله (۳۹) بعنوان تابع بهینه سازی یا تابع هدف جهت طراحی جامع، بهینه و اقتصادی سیستم زمین پست‌های فشارقوی در نظر گرفته شده است که هدف از آن حداقل کردن هزینه اجرایی طرح سیستم زمین بهینه و ایمن است.

$$Objective\ Function=Min[Cost\ Function] \quad (\$) \qquad (۳۹)$$

در (۳۹) تابع هزینه با استفاده از (۴۰) بدست می‌آید.

$$Cost\ Function=\sum_{i=1}^{7}\left(X_i\times F_i^T\right) \quad (\$) \qquad (۴۰)$$

معادلات (۳۹) و (۴۰) بر حسب واحد پول (در اینجا ($\$$)) تعریف شده که در (۴۰) بردارهای X_i و F_i به ترتیب بر طبق (۴۱) و (۴۲) تعریف شده است. نماد T نیز به معنای ترانهاده بردار F_i است.

لازم به ذکر است که X_i معرف بردار توابع متغیرهای هزینه و F_i معرف بردار توابع قیمت پایه است.

$$X_i=[X_1\ X_2 \ldots\ X_7]=[V_S\ L_C\ L_R\ L_{RISER}\ V\ A'\ n_{cj}] \qquad (۴۱)$$

$$F_i=[F_1\ F_2 \ldots\ F_7]$$
$$=[F_{SLM}\ F_{Mesh}\ F_{Rod}\ F_{Riser}\ F_{Excavation}\ F_{Land}\ F_{EW}] \qquad (۴۲)$$

در (۴۱) تابع متغیرهای هزینه‌ی L_C، L_R و A' به ترتیب با استفاده از (۹)، (۱۳) و (۱۰) بدست می‌آید و تابع سایر متغیرهای هزینه با استفاده از (۴۸-۴۳) بدست می‌آید.

$$V_S=WLh_s \qquad (۴۳)$$

$$L_{RISER}=n_{riser}L_{riser} \qquad (۴۴)$$

$$L_{riser}=h+\frac{D}{2}-\frac{l_e}{2}+l \qquad (۴۵)$$

در (۴۵)، l_e طول تجهیزات زمین شده در سطح پست و l طول هادی مورد نیاز جهت اتصال تجهیزات در سطح پست به هادی رایزر است. با فرض $l=l_e/2$، معادله (۴۵) بصورت معادله تقریبی (۴۶) ساده می‌گردد.

$$L_{riser}=h+\frac{D}{2} \qquad (۴۶)$$

$$V=WLh \qquad (۴۷)$$

$$n_{cj}=\left(\frac{L}{D}+1\right)\times\left(\frac{W}{D}+1\right) \qquad (۴۸)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

جدول (۱): شرایط مرزی مربوط به سیستم زمین و پارامترهای مربوط به آن

شماره شرط مرزی	شرط مرزی	مرجع شرط مرزی	توضیحات
۱	$0.3<h<1.5$	مرجع [1]	
۲	$0<\rho<\rho_s$	مرجع [1]	
۳	$\rho<\rho_s<10^4$	مرجع [1]	
۴	$0.03<t_s<3$	مرجع [1]	
۵	$t_s<t_c<6$	مرجع [1]	
۶	$0.08<h_s<0.15$	مرجع [1]	
۷	$95\times10^{-6}<A_{mesh}<2565.21\times10^{-6}$	پیشنهاد شده در این مقاله	۱) با توجه به مسائل و مطالعات عملی ۲) بدلیل مسائل مکانیکی و خوردگی ۳) بر طبق جداول (۴) و (۵)
۸	$95\times10^{-6}<A_{riser}<2565.21\times10^{-6}$		
۹	$126.68\times10^{-6}<A_{rod}<2026.83\times10^{-6}$		
۱۰	$2.5<D<22.5$	مرجع [1]	
۱۱	$6.25<A'<10000$	مرجع [1]	
۱۲	$1<L/D<40$	مرجع [1]	L/D : تعداد مش‌های طولی
۱۳	$1<W/D<40$	مرجع [1]	W/D : تعداد مش‌های عرضی
۱۴	$2.5<L<900$	پیشنهاد شده در این مقاله	مطابق شروط مرزی شماره (۱۰) و (۱۲)
۱۵	$0<L_r<12$	پیشنهاد شده در این مقاله	با در نظر گرفتن، اتصال حداکثر ۴ عدد میله ۳ متری بهمدیگر
۱۶	$0<n_R<\frac{2(L+W)}{D}$	پیشنهاد شده در این مقاله	با توجه به مسائل و مطالعات عملی، که در آن $2(L+W)/D$: تعداد نقاط اتصال هادی بهمدیگر در پیرامون شبکه زمین
۱۷	$0.04<t_f<1.1$	۱) مطابق مرجع [19] ۲) پیشنهاد شده در این مقاله	در این مقاله رابطه t_f-$E_{touch70}$ بدین صورت محاسبه شده است: $t_f=1.3051exp(-0.004E_{touch70})$
۱۸	$2.5<W<900$	پیشنهاد شده در این مقاله	مطابق شروط مرزی شماره (۱۰) و (۱۳)

همچنین، در (۴۲) توابع قیمت پایه مطابق جداول (۲) تا (۵) تعریف می‌گردد. قیمت بر واحد حجم خاکبرداری، قیمت بر واحد سطح زمین و قیمت هر عدد جوش احتراقی مطابق با مقادیر جدول (۲) فرض شده است. در جدول (۳) قیمت بر واحد حجم ماده لایه سطحی پست بر حسب مقاومت ویژه آن برای مقادیر نوعی مواد لایه سطحی ذکر شده است. برای محاسبه قیمت بر واحد طول هادی، رایزر و میله‌های سیستم زمین کافیست به ترتیب با استفاده از جدول‌های (۴) و (۵) و بر اساس سطح مقطع هادی مورد نظر قیمت بر واحد طول آن را تعیین کنیم.

جدول (۲): قیمت‌های نوعی خاکبرداری، زمین و جوش احتراقی

Base price functions	$F_{Excavation}$ ($/m^3)	F_{Land} ($/m^2)	$F_{exothermic\ weld}$ ($)
Propagandist	1	100	5

جدول (۳): انواع مواد سطحی بهمراه مقاومت ویژه و قیمت نوعی آنها

Material	ρ_s (Ω.m)	F_{SLM} ($/m^3)
Gravel with brine (wet)	10	8.3
Armored concrete (wet)	60	13.23
Gravel with Freshwater (wet)	100	16.06
1.5 in (0.04 m) crusher run granite (Ga.) with fines (wet)	1200	29.73
Crusher run granite with fines (N.C.) (wet)	1300	31
Crushed rock (wet)	2500	36.16
Washed granite similar to pea gravel (wet)	5000	43.1
0.75–1 in (0.02–0.025 m) granite (Calif.) with fines (wet)	6513	46.68
#57 (0.75 in) (0.02 m) washed granite (N.C.) (wet)	8000	49.97
Asphalt (wet)	10000	54.08

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]

جدول (۴): سطح مقطع هادی و رایزر شبکه زمین بهمراه قیمت آنها

Material	Cross section (m^2)	$F_{Mesh} - F_{Riser}$ ($/m)
Conductor/Riser	86.85×10^{-6}	10
Conductor/Riser	109.09×10^{-6}	13
Conductor/Riser	142.33×10^{-6}	17
Conductor/Riser	182.41×10^{-6}	22
Conductor/Riser	241.24×10^{-6}	29
Conductor/Riser	316.24×10^{-6}	39
Conductor/Riser	419.60×10^{-6}	52
Conductor/Riser	490.62×10^{-6}	62
Conductor/Riser	1080.10×10^{-6}	141
Conductor/Riser	1346.27×10^{-6}	178
Conductor/Riser	1551.79×10^{-6}	206
Conductor/Riser	2171.19×10^{-6}	293
Conductor/Riser	2565.21×10^{-6}	350

جدول (۵): سطح مقطع میله‌های شبکه زمین بهمراه قیمت نوعی آنها

Material	Cross section (m^2)	F_{Rod} ($/m)
Rod	126.68×10^{-6}	15
Rod	197.93×10^{-6}	24
Rod	285.02×10^{-6}	35
Rod	387.95×10^{-6}	48
Rod	445.34×10^{-6}	56
Rod	506.71×10^{-6}	64
Rod	572.02×10^{-6}	72
Rod	641.30×10^{-6}	81
Rod	713.93×10^{-6}	91
Rod	791.73×10^{-6}	102
Rod	957.99×10^{-6}	124
Rod	1140.09×10^{-6}	149
Rod	1338.02×10^{-6}	176
Rod	1551.79×10^{-6}	206
Rod	1781.39×10^{-6}	238
Rod	2026.83×10^{-6}	273

۸-۲- مرحله دوم: تولید اعضای بردار اعداد تصادفی

در مرحله دوم روش بهینه سازی *RSA*، برای هر متغیر طراحی بر اساس شرایط مرزی بدست آمده برای آن، اعضای مناسب جهت تشکیل بردار اعداد تصادفی در بازه مناسب تولید می‌گردد. در این مقاله برای حل مسأله مذکور، هر بردار با تعداد ۱۰۰ میلیون عضو جهت بهینه سازی در نظر گرفته شده است.

۸-۳- مرحله سوم: گزینش اولیه اعضای بردار اعداد تصادفی

در مرحله سوم روش بهینه سازی *RSA*، اعضای بردارهای اعداد تصادفی تعریف شده در مرحله دوم بر اساس سایر شرایط مرزی حاکم بر مسأله مورد بحث، گزینش اولیه می‌شود. بدیهی است که تعدادی از اعضای بردارهای مذکور شرایط مرزی مورد نظر را برآورده نسازند، لذا هر یک از اعضای بردارهای اعداد تصادفی که هر کدام از شرایط مرزی نامبرده را برآورده نسازد عضو غلط شناخته شده و حذف می‌گردد.

۸-۴- مرحله چهارم: گزینش ثانویه اعضای صحیح بردار اعداد تصادفی

در مرحله چهارم روش بهینه سازی *RSA*، پس از اجرای مراحل دوم و سوم، گزینش ثانویه اعضای صحیح بردار اعداد تصادفی با صدق اعضای بردارهای اعداد تصادفی در نامعادلات اساسی ایمنی و حفاظت، بمنظور محاسبه متغیرهای مربوط به تابع هدف (شامل متغیرهای بردار X_i و بردار F_i) انجام می‌شود. در این راستا تعدادی از اعضای بردارهای مذکور در نامعادلات اساسی ایمنی و حفاظت صدق نمی‌کنند، لذا هر یک از اعضای بردارهای اعداد تصادفی که در هر کدام از نامعادلات نامبرده صدق نکند عضو غلط شناخته شده و حذف می‌گردد.

۸-۵- مرحله پنجم: فرآیند بهینه سازی الگوریتم جستجوی تصادفی و تعیین بردار جواب نهایی، جامع، بهینه، ایمن و اقتصادی

در فرآیند بهینه سازی *RSA*، با اجرای مراحل چهارگانه قبل اعضای صحیح بردارهای اعداد تصادفی (حاصل از گزینش اعضای بردارهای اعداد تصادفی چه بر اساس نامعادلات اساسی ایمنی و حفاظت و چه بر اساس کلیه شرایط مرزی) از دیدگاه ایمنی و حفاظت بدست می‌آید. از طرفی، با توجه به ماهیت غیر خطی نامعادلات اساسی ایمنی و حفاظت و نیز شرایط مرزی مسأله مورد بحث، تعداد قابل توجهی عضو صحیح برای بردارهای اعداد تصادفی بدست می‌آید. بر این اساس در هر تکرار فرآیند *RSA*، به ازای هر عضو صحیح بردارهای اعداد تصادفی، طرح یک سیستم زمین بهینه از دیدگاه ایمنی و حفاظت پیشنهاد می‌شود. لذا کافیست که بطور همزمان طرح سیستم زمین مذکور در هر تکرار با استفاده از (۴۰) آنالیز اقتصادی شده و هزینه مربوط به آن محاسبه شود. نهایتاً مطابق (۳۹) از بین طرح‌های (بردارهای اعداد تصادفی صحیح) پیشنهاد شده برای سیستم زمین بهینه از دیدگاه ایمنی و حفاظت بهترین طرح سیستم زمین از دیدگاه اقتصادی (یگانه بردار اعداد تصادفی صحیح دارای حداقل هزینه اقتصادی) بعنوان طرح نهایی، جامع، بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین انتخاب می‌گردد.

۹- نتایج طراحی جامع، بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین پست فشارقوی

در بخش‌های قبل نحوه طراحی سیستم زمین بهینه، ایمن و اقتصادی با استفاده از حل نامعادلات غیرخطی ایمنی (روابط (۳۸-۳۷)) و حفاظت (رابطه (۳۶)) بهمراه شرایط مرزی حاکم بر سیستم زمین (مطابق جدول (۱)) بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش بهینه سازی *RSA* ارائه شد. در این بخش، با استفاده از نتایج بخش‌های قبل و با استفاده از اطلاعات پیوست (۱)، نتایج طراحی و بهینه سازی جامع بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

روش بهینه سازی *RSA* و با در نظر گرفتن عوامل مختلف مؤثر بر ایمنی و هزینه اقتصادی سیستم زمین پست *63/20 KV* شهرستان تفت بعنوان متغیرهای بهینه سازی، ارائه می‌گردد و با نتایج طراحی آن بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش معمول *TAE*، مقایسه می‌شود.

در ضمیمه (۴) نیز نتایج طراحی و بهینه سازی جامع یک پست فشارقوی *230/63 KV* بر اساس روش بهینه سازی *RSA* و روش *TAE* و بر اساس استاندارد *IEEE Std. 80-2000* ارائه شده است.

۹-۱- نتایج آنالیز و بهینه سازی اقتصادی سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت

در این قسمت، نتایج طراحی و آنالیز اقتصادی برای هر دو طرح سیستم زمین پست *63/20 KV* شهرستان تفت بهمراه جزییات آن (طرح اول بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش معمول *TAE* و طرح دوم بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش بهینه سازی *RSA*) در جدول (۶) ارائه شده است. علاوه بر این، در جدول (۶) کلیه متغیرهای طراحی (نظیر A_{mesh} (mm^2)) بهمراه شاخص هزینه مورد نیاز برای هر متغیر طراحی (نظیر L_C (m)) و هزینه واحد مورد نیاز برای هر متغیر طراحی (نظیر F_{Mesh} $(\$/m)$) برای هر دو طرح سیستم زمین جهت مقایسه آورده شده است.

در جدول (۶) نمادهای C_1 تا C_7 به شرح ذیل معرفی می‌گردد:

C_1: پارامترهای هزینه و طراحی سیستم زمین

C_2: حد پایین پارامترهای هزینه و طراحی سیستم زمین

C_3: حد بالای پارامترهای هزینه و طراحی سیستم زمین

C_4: نتایج طراحی سیستم زمین بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش معمول *TAE*

C_5: هزینه کل هر یک از پارامترهای طراحی سیستم زمین مربوط به طرح اول آن

C_6: نتایج طراحی سیستم زمین بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش بهینه سازی *RSA*

C_7: هزینه کل هر یک از پارامترهای طراحی سیستم زمین مربوط به طرح دوم آن

در شکل (۱) نیز مقایسه‌ای جامع بین هزینه اکثر اجزاء تشکیل دهنده سیستم زمین پست *63/20 KV* شهرستان تفت برای هر دو طرح آن صورت گرفته است.

بررسی نتایج جدول (۶) و شکل (۱) نشان می‌دهد که در حالت بهینه سازی چند متغیره جهت طراحی اقتصادی سیستم زمین و برآورده شدن شرایط ایمنی، مجموع هزینه اجرایی سیستم زمین نسبت به حالت بدون بهینه سازی آن کمتر است. در نهایت بر اساس نتایج جدول (۶) و شکل (۱) مناسب بودن روش پیشنهاد شده در این مقاله در حالت بهینه سازی چند متغیره جهت طراحی یک سیستم زمین اقتصادی تأیید می‌گردد و باعث کاهش چشم گیر هزینه اجرایی سیستم زمین در این حالت نسبت به حالت بدون بهینه سازی می‌گردد.

۹-۲- نتایج آنالیز و بهینه سازی ایمنی سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت

در این قسمت، نتایج آنالیز ایمنی برای هر دو طرح سیستم زمین پست *63/20 KV* شهرستان تفت ارائه شده است. در این راستا با استفاده از نرم افزار *CYMGRD* [20] نمودار پروفیل پتانسیل سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت برای هر دو طرح آن، در شرایط وقوع خطا ترسیم شده و آنالیز ایمنی آن صورت گرفته است. نتایج شبیه سازی پتانسیل‌های تماس و گام بهمراه ماکزیمم مقدار مجازشان ناشی از جریان خطا در سیستم زمین پست برای طرح اول در شکل (۲) و برای طرح دوم در شکل (۳) ارائه شده است.

در نمودارهای پروفیل پتانسیل شکل‌های (۲) و (۳) پتانسیل‌های گام و تماس در دو نمودار (همگی واقع در دیاگرام پروفیل) با خط پررنگ ترسیم شده‌اند و ماکزیمم مقادیر مجاز این دو کمیت نیز بصورت خط چین جهت مقایسه و ارزیابی نقاط خطرناک در همان دیاگرام پروفیل آورده شده است. بر اساس نمودار پروفیل پتانسیل شکل (۲) مربوط به طرح اول می‌توان نتیجه گیری کرد که توزیع پتانسیل‌های تماس و گام در حالت طراحی سیستم زمین بدون بهینه سازی تا حد زیادی غیر یکنواخت است. اما بر اساس نمودار پروفیل پتانسیل شکل (۳) مربوط به طرح دوم نتیجه گیری می‌گردد که در حالت بهینه سازی چند متغیره جهت طراحی ایمن و اقتصادی سیستم زمین، توزیع پتانسیل‌های تماس و گام نسبت به حالت بدون بهینه سازی به میزان قابل توجهی یکنواخت تر شده است.

از طرفی نتایج آنالیز ایمنی نمودار پروفیل پتانسیل شکل (۲) مربوط به طرح اول نشان می‌دهد که پتانسیل تماس نواحی اطراف و بویژه گوشه‌های کناری سیستم زمین پست در شرایط وقوع خطا از ماکزیمم مقدار مجاز خود فراتر رفته و وارد ناحیه خطرناک می‌شود. اما نتایج آنالیز ایمنی نمودار پروفیل پتانسیل شکل (۳) مربوط به طرح دوم نشان می‌دهد که پتانسیل تماس کلیه نواحی سیستم زمین پست در شرایط وقوع خطا همواره از ماکزیمم مقدار مجاز خود کمتر بوده و وارد ناحیه خطرناک نخواهد شد. لازم به ذکر است که پتانسیل گام برای هر دو طرح سیستم زمین در کلیه نواحی آن در حد مجاز خود قرار دارد.

در نهایت با توجه به نتایج آنالیز ایمنی صورت گرفته بر اساس نمودارهای پروفیل پتانسیل شکل‌های (۲) و (۳)، مناسب بودن روش پیشنهاد شده در این مقاله در حالت بهینه سازی چند متغیره جهت طراحی یک سیستم زمین ایمن تأیید می‌گردد و باعث افزایش قابلیت انعطاف بهینه سازی سیستم زمین در این حالت نسبت به حالت بدون بهینه سازی از دیدگاه ایمنی می‌گردد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]

۱۰- نتیجه‌گیری

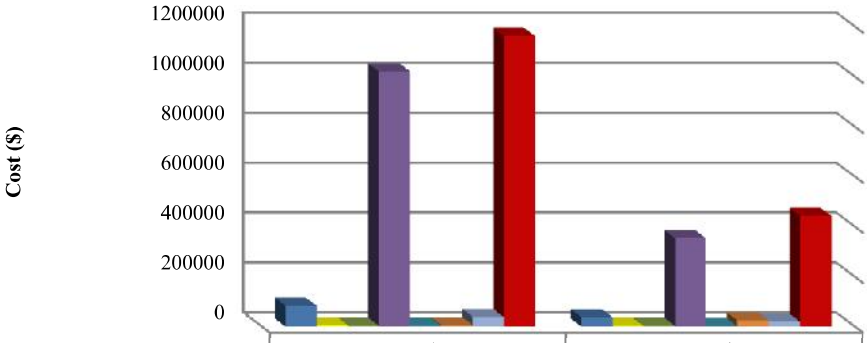
از آنجا که طراحی سیستم زمین ایمن خود فرآیندی پیچیده است لذا در نظر گرفتن همزمان مؤلفه‌های اقتصادی در طراحی آن، فرآیند آن را دشوارتر می‌سازد. بر این اساس، در این مقاله یک روش جدید شامل هفت گام اساسی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر ایمنی و هزینه اقتصادی سیستم زمین بعنوان متغیرهای بهینه سازی جهت طراحی جامع و بهینه سیستم زمین پست‌های فشارقوی بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* پیشنهاد شده است. علاوه بر این، جهت بهینه سازی طراحی سیستم زمین از دو دیدگاه ایمنی و اقتصادی و همچنین برای حل مسائل و نامعادلات غیر خطی بهمراه شرایط مرزی غیر خطی روش بهینه سازی الگوریتم جستجوی تصادفی، استفاده شده است، به نحوی که با تعریف تابع هدف مناسب و با تعیین بهینه کلیه پارامترهای طراحی، هزینه اجرای سیستم زمین حداقل شده و شاخص‌های مربوط به ایمنی آن بهبود می‌یابد. نتایج آنالیز و بهینه سازی ایمنی و اقتصادی سیستم زمین پست *63/20 KV* شهرستان تفت و یک پست فشارقوی *230/63 KV*، نشان دهنده بهینه بودن روش پیشنهادی جهت طراحی سیستم زمین پست‌های فشارقوی از دو دیدگاه ایمنی و اقتصادی است، بطوریکه نتایج مذکور نشان می‌دهد که طرح سیستم زمین پیشنهاد شده در این مقاله نسبت به طرح پیشین آن بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش معمول *TAE*، اولاً از دیدگاه اقتصادی دارای حداقل هزینه و حداکثر مبلغ صرفه جویی است و باعث کاهش قابل توجه هزینه‌های اجرایی سیستم زمین می‌گردد و ثانیاً از دیدگاه ایمنی دارای حاشیه ایمنی بیشتر و توزیع گرادیان‌های پتانسیل یکنواخت تر بر روی سطح زمین است و باعث افزایش انعطاف بهینه سازی می‌گردد.

جدول (۶): نتایج طراحی و آنالیز اقتصادی سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت برای هر دو طرح آن

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
A_{mesh} (m^2)	95×10^{-6}	2565.21×10^{-6}	150×10^{-6}	85079	109.09×10^{-6}	37952
L_C (m)	…	…	4761		2919.42	
F_{Mesh} ($/m)	…	…	17.87		13	
A_{riser} (m^2)	95×10^{-6}	2565.21×10^{-6}	150×10^{-6}	2699	109.09×10^{-6}	1316
L_{RISER} (m)	…	…	151.05		101.23	
F_{Riser} ($/m)	…	…	17.87		13	
A_{rod} (m^2)	126.68×10^{-6}	2026.83×10^{-6}	314×10^{-6}	5802	197.93×10^{-6}	25056
L_R (m)	…	…	150		1044	
F_{Rod} ($/m)	…	…	38.68		24	
n_{ci}	…	…	555	2775	602	3010
F_{EW} ($)	…	…	5		5	
ρ_s (Ω.m)	0	10000	3000	39120	2500	19200
V_S (m^3)	…	…	1020.6		530.97	
F_{SLM} ($/$m^3$)	…	…	38.33		36.16	
A' (m^2)	6.25	10000	10206	1020600	3539.77	353977
F_{Land} ($/$m^2$)	…	…	100		100	
V (m^3)	…	…	6123.6	6124	2265.45	2265
$F_{Excavation}$ ($/$m^3$)	…	…	1		1	
ρ (Ω.m)	0	10000	206		206	
D (m)	2.5	22.5	4.5		2.54	
h (m)	0.3	1.5	0.6		0.64	
h_s (m)	0.08	0.15	0.1		0.15	
t_c (s)	t_s (s)	6	1		1	
t_f (s)	0.04	1.1	…		0.0528	
t_s (s)	0.03	3	0.6		0.6	
n_R	0	160	50		87	
L_r (m)	0	12	3		12	
L (m)	2.5	900	162		94.9	
W (m)	2.5	900	63		37.3	
R_g (Ω)	0	1	0.93		0.63	
E_s (V)	0	E_{step70} (V)	920.13		1362.74	
E_{step70} (V)	E_s (V)	…	2796.54		2599.18	
E_m (V)	0	$E_{touch70}$ (V)	839.72		709.04	
$E_{touch70}$ (V)	E_m (V)	…	851.15		800	
Total Cost ($)	…	…	…	1162206	…	442775

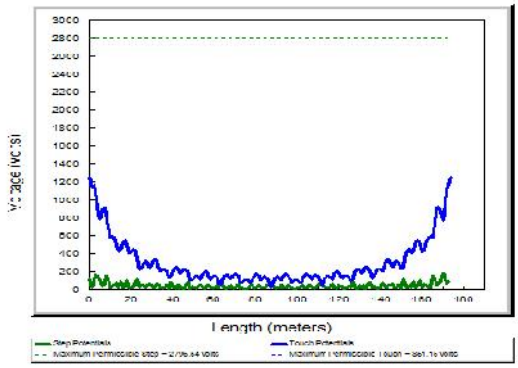
[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

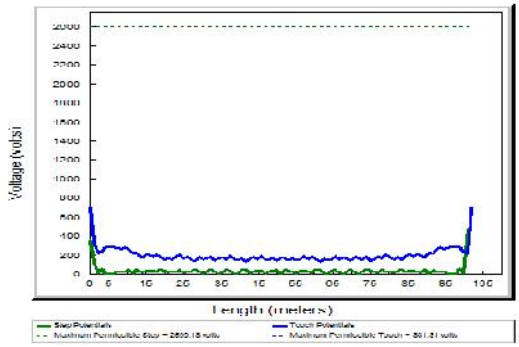


	IEEE and TAE	IEEE and RSA
Conductor	85079	37952
Excavation	6124	2265
Exothermic Weld	2775	3010
Land	1020600	353977
Riser	2699	1316
Rod	5802	25056
Surface Layer Material	39120	19200
Total	1162206	442775

شکل (۱): مقایسه مجموع هزینه و هزینه کلیه پارامترهای طراحی سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت برای هر دو طرح آن



شکل (۲): پروفیل پتانسیل طرح اول سیستم زمین پست تفت



شکل (۳): پروفیل پتانسیل طرح دوم سیستم زمین پست تفت

ضمیمه (۱): اطلاعات و پارامترهای طراحی سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت

اطلاعات و پارامترهای طراحی سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت در جدول (۷) درج شده است.

جدول (۷): اطلاعات سیستم زمین پست فشارقوی شهرستان تفت

Symbol	Dealt	Symbol	Dealt	Symbol	Dealt
$I_{f\text{-}3ph}$	25 KA	I_f	15 KA	F	50 Hz
t_c	1 s	t_s	0.6 s	D_f	1
S_f	0.7	T_A	50 °C	L	162 m
W	63 m	ρ	206 Ω	ρ_s	3000 Ω
h_s	0.1 m	h	0.6 m	A_{mesh}	150 mm^2
A_{riser}	150 $_2$	A_{rod}	314 $_2$	D	4.5 m
L_r	3 m	n_R	50	n_{riser}	53

ضمیمه (۲): اطلاعات و پارامترهای طراحی سیستم زمین یک پست فشارقوی 230/63 KV

اطلاعات و پارامترهای طراحی سیستم زمین یک پست فشارقوی 230/63 KV در جدول (۸) درج شده است.

جدول (۸): اطلاعات سیستم زمین پست فشارقوی 230/63 KV

Symbol	Dealt	Symbol	Dealt	Symbol	Dealt
$I_{f\text{-}3ph}$	---	I_f	30 KA	f	50 Hz
t_c	1 s	t_s	0.5 s	D_f	1
S_f	0.7	T_A	40 °C	L	200 m
W	150 m	ρ	290 Ω	ρ_s	3000 Ω
h_s	0.15 m	h	0.5 m	A_{mesh}	120 mm^2
A_{riser}	185 $_2$	A_{rod}	314 $_2$	D	3 m
L_r	3 m	n_R	75	n_{riser}	53

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]

ضمیمه (۳): فهرست علائم و اختصارات

α_0	ضریب حرارتی هادی الکتریکی در دمای صفر درجه سانتیگراد $(1/°C)$.
α_r	ضریب حرارتی هادی الکتریکی در دمای مرجع $(1/°C)$.
ρ	مقاومت ویژه خاک $(\Omega.m)$.
ρ_s	مقاومت ویژه لایه سطحی $(\Omega.m)$.
ρ_r	مقاومت ویژه هادی‌های زمین در درجه حرارت مرجع $(\mu\Omega.cm)$.
a	شعاع هادی شبکه زمین (m).
A'	کل مساحت اشغال شده توسط شبکه زمین (m^2).
A_{mesh}	سطح مقطع هادی (m^2).
A_{riser}	سطح مقطع رایزر (m^2).
A_{rod}	سطح مقطع میله (m^2).
b	شعاع میله (m).
C_s	ضریب کاهش لایه سطحی.
d	قطر هادی شبکه زمین (m).
D	فاصله بین هادی‌های موازی (m).
D_f	ضریب کاهش جهت تعیین I_G
D_m	حداکثر فاصله بین هر دو نقطه دلخواه شبکه زمین (m).
E_m	ولتاژ مش در مرکز مش گوشه‌ای (V).
E_s	ولتاژ گام بین نقطه‌ای در بالای گوشه خارجی شبکه و نقطه‌ای بفاصله یک متر در خارج از شبکه (V).
E_{step70}	ولتاژ گام قابل تحمل برای انسان با وزن بدن ۷۰ kg (V).
$E_{touch70}$	ولتاژ تماس قابل تحمل برای انسان با وزن بدن ۷۰ kg (V).
$F_{Excavation}$	قیمت بر واحد حجم خاکبرداری $(\$/m^3)$.
F_{EW}	قیمت هر عدد جوش احتراقی $(\$)$.
F_{Land}	قیمت بر واحد سطح زمین $(\$/m^2)$.
F_{Mesh}	قیمت بر واحد طول هادی $(\$/m)$.
F_{Riser}	قیمت بر واحد طول رایزر $(\$/m)$.
F_{Rod}	قیمت بر واحد طول میله $(\$/m)$.
F_{SLM}	قیمت بر واحد حجم ماده لایه سطحی $(\$/m^3)$.
h	عمق دفن هادی‌های شبکه زمین (m).
h_s	ضخامت لایه سطحی (m).
I_f	جریان خطای متقارن در پست جهت تعیین اندازه هادی (A).
I_g	جریان متقارن شبکه (A).
I_G	حداکثر جریان شبکه، جاری شده بین شبکه زمین و زمین اطراف (شامل آفست dc) (A).
K_0	ضریب ثابت و برابر با $1/\alpha_0$ $(°C)$.
K_1, K_2	ضرایب ثابت مربوط به هندسه شبکه زمین.
K_h	ضریب توزین اصلاحی، تقویت کننده اثرات عمق شبکه.
K_i	ضریب تصحیح هندسه شبکه.
K_{ii}	ضریب توزین اصلاحی، تنظیم کننده اثرات هادی.
K_m	ضریب فاصله بندی مربوط به ولتاژ مش.
K_s	ضریب فاصله بندی مربوط به ولتاژ گام.
L	طول ناحیه اشغال شده توسط شبکه زمین (m).
L_C	طول کل هادی‌های شبکه زمین (m).
L_M	طول مؤثر مربوط به ولتاژ مش (m).
L_P	محیط شبکه زمین (m).
L_r	طول میله زمین در هر محل (m).
L_{riser}	طول رایزر زمین (m).
L_{RISER}	طول کل رایزرهای زمین (m).
L_R	طول کل میله‌های زمین (m).
L_S	طول مؤثر مربوط به ولتاژ گام (m).
L_x	حداکثر طول هادی‌های شبکه زمین در راستای محور x (m).
L_y	حداکثر طول هادی‌های شبکه زمین در راستای محور y (m).
n	ضریب هندسی مرکب از ضرایب n_a، n_b، n_c و n_d.
n_{cj}	تعداد نقاط اتصال هادی به همدیگر.
n_{riser}	تعداد رایزرهای زمین.
n_R	تعداد میله‌های تعبیه شده در ناحیه A'.
R_1	مقاومت زمین هادی‌های شبکه زمین در خاک یک لایه (Ω).
R_2	مقاومت زمین میله‌های زمین در خاک یک لایه (Ω).
R_g	مقاومت سیستم زمین (Ω).
R_m	مقاومت زمین متقابل بین هادی‌های شبکه و میله‌های زمین در خاک یک لایه (Ω).
S_f	ضریب تقسیم جریان خطا (ضریب تقسیم).
t_a	ثابت زمانی آفست dc یا ثابت زمانی فوق گذرای سیستم (s).
t_c	مدت زمان تداوم جریان خطا جهت تعیین اندازه هادی زمین (s).
t_f	مدت زمان تداوم جریان خطا جهت تعیین ضریب کاهش (s).
t_s	مدت زمان تداوم شوک جهت تعیین جریان مجاز عبوری از بدن (s).
T_a	دمای محیط $(°C)$.
$TCAP$	ضریب ظرفیت حرارتی هادی بر حسب $(J/Cm^3/°C)$.
T_m	حداکثر درجه حرارت مجاز هادی $(°C)$.
V	کل حجم اشغال شده توسط شبکه زمین (m^3).
Vs	حجم ماده لایه سطحی (m^3).
W	عرض ناحیه اشغال شده توسط شبکه زمین (m).

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

ضمیمه (۴): نتایج طراحی سیستم زمین یک پست فشارقوی 230/63 KV بر اساس روش‌های TAE و RSA

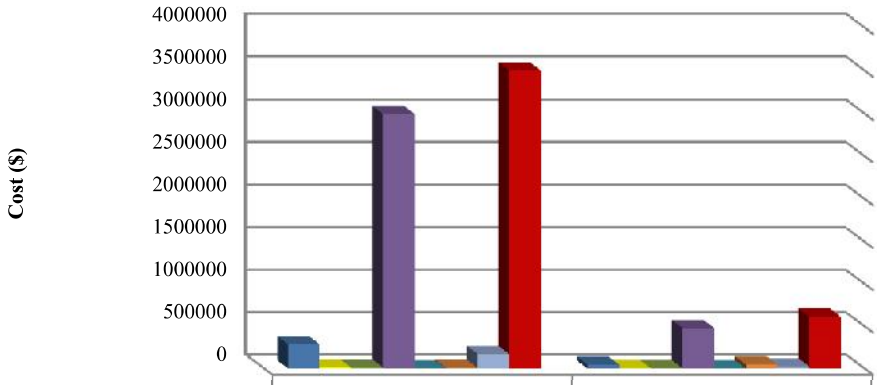
در این ضمیمه، نتایج طراحی و آنالیز اقتصادی برای هر دو طرح سیستم زمین پست فشارقوی *230/63 KV* بهمراه جزییات آن (طرح اول بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش معمول *TAE* و طرح دوم بر اساس استاندارد *ANSI/IEEE Std. 80-2000* و روش بهینه سازی *RSA*) در جدول (۹) ارائه شده است. در شکل (۴) نیز مقایسه‌ای جامع بین هزینه اکثر اجزاء تشکیل دهنده سیستم زمین پست *230/63 KV* برای هر دو طرح آن صورت گرفته است. بررسی نتایج جدول (۹) و شکل (۴) نشان می‌دهد که در حالت بهینه سازی چند متغیره جهت طراحی اقتصادی سیستم زمین و برآورده شدن شرایط ایمنی، مجموع هزینه اجرایی سیستم زمین نسبت به حالت بدون بهینه سازی آن کمتر است.

علاوه بر این، نتایج آنالیز ایمنی برای هر دو طرح سیستم زمین پست *230/63 KV* ارائه شده است. در این راستا با استفاده از نرم افزار *CYMGRD* نمودار پروفیل پتانسیل سیستم زمین پست فشارقوی *230/63 KV* برای هر دو طرح آن، در شرایط وقوع خطا ترسیم شده و آنالیز ایمنی آن صورت گرفته است. نتایج شبیه سازی پتانسیل‌های تماس و گام بهمراه ماکزیمم مقدار مجازشان ناشی از جریان خطا در سیستم زمین پست برای طرح اول در شکل (۵) و برای طرح دوم در شکل (۶) ارائه شده است. در نمودار پروفیل پتانسیل شکل (۵) مربوط به طرح اول ملاحظه می‌شود که پتانسیل تماس سیستم زمین در شرایط وقوع خطا از ماکزیمم مجاز خود فراتر رفته و وارد ناحیه خطرناک می‌شود، اما بر اساس نمودار پروفیل پتانسیل شکل (۶) مربوط به طرح دوم ملاحظه می‌شود که در حالت بهینه سازی چند متغیره جهت طراحی ایمن و اقتصادی سیستم زمین، پتانسیل تماس سیستم زمین در شرایط وقوع خطا همواره از ماکزیمم مقدار مجاز خود کمتر بوده و وارد ناحیه خطرناک نمی‌شود.

جدول (۹): نتایج طراحی و آنالیز اقتصادی سیستم زمین یک پست فشارقوی 230/63 KV برای هر دو طرح آن

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
A_{mesh} (m^2)	95×10^{-6}	2565.21×10^{-6}	120×10^{-6}	287940	109.09×10^{-6}	46060
L_C (m)	…	…	20350		3543.05	
F_{Mesh} ($/m)	…	…	14.15		13	
A_{riser} (m^2)	95×10^{-6}	2565.21×10^{-6}	185×10^{-6}	2360	182.41×10^{-6}	2472
L_{RISER} (m)	…	…	106		112.36	
F_{Riser} ($/m)	…	…	22.26		22	
A_{rod} (m^2)	126.68×10^{-6}	2026.83×10^{-6}	314×10^{-6}	8704	387.95×10^{-6}	49536
L_R (m)	…	…	225		1032	
F_{Rod} ($/m)	…	…	38.68		48	
n_{ci}	…	…	3451	17255	651.06	3255
F_{EW} ($)	…	…	5		5	
ρ_s (Ω.m)	0	10000	3000	172480	8000	26489
V_S (m^3)	…	…	4500		530.1	
F_{SLM} ($/$m^3$)	…	…	38.33		49.97	
A' (m^2)	6.25	10000	30000	3000000	4819.12	481912
F_{Land} ($/$m^2$)	…	…	100		100	
V (m^3)	…	…	15000	15000	3373.38	3373
$F_{Excavation}$ ($/$m^3$)	…	…	1		1	
ρ (Ω.m)	0	10000	290		290	
D (m)	2.5	22.5	3		2.84	
h (m)	0.3	1.5	0.5		0.70	
h_s (m)	0.08	0.15	0.15		0.11	
t_c (s)	t_s (s)	6	1		1	
t_f (s)	0.04	1.1	…		0.199×10^{-3}	
t_s (s)	0.03	3	0.5		0.5	
n_R	0	160	75		86	
L_r (m)	0	12	3		12	
L (m)	2.5	900	200		102.1	
W (m)	2.5	900	150		47.2	
R_g (Ω)	0	1	0.7567		0.5792	
E_s (V)	0	E_{step70} (V)	1887.5		3170.87	
E_{step70} (V)	E_s (V)	…	2796.54		8120.71	
E_m (V)	0	$E_{touch70}$ (V)	3385.5		1958.41	
$E_{touch70}$ (V)	E_m (V)	…	1013		2196.70	
Total Cost ($)	…	…	…	3503739	…	613097

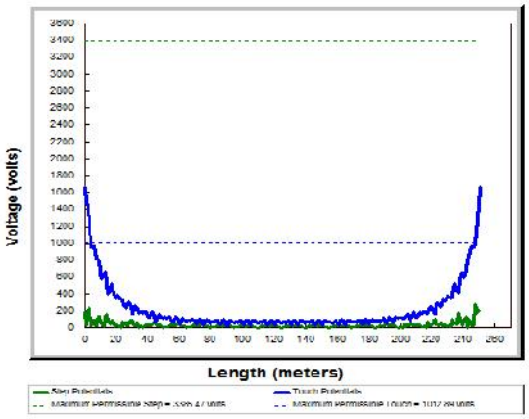
[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]



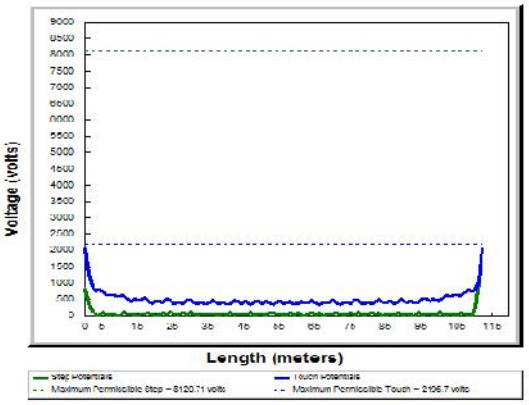
	IEEE and TAE	IEEE and RSA
Conductor	287940	46060
Excavation	15000	3373
Exothermic Weld	17255	3255
Land	3000000	481912
Riser	2360	2472
Rod	8704	49536
Surface Layer Material	172480	26489
Total	3503739	613097

شکل (۴): مقایسه مجموع هزینه و هزینه کلیه پارامترهای طراحی سیستم زمین یک پست فشارقوی 230/63 KV برای هر دو طرح آن

شکل (۶): پروفیل پتانسیل طرح دوم سیستم زمین پست230/63 KV



شکل (۵): پروفیل پتانسیل طرح اول سیستم زمین پست230/63 KV



مراجع

[1] ANSI/IEEE Std. 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE, New York, 2000.

[2] ANSI/IEEE Std. 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE, New York, 1986.

[3] IEEE Standard 81.2-1991, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, IEEE, New York, 1991.

[4] ANSI/IEEE Std. 81–1983, IEEE guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE, New York, 1983.

[5] Dawalibi. F. P, Mukhedkar. D, "Optimum Design of Substation Grounding in Two-Layer Earth Structure; Part I-Analytical Study, Part II-Comparison Between Theoretical and Experimental Results, and Part III- Study of Grounding Grids Performance and New Electrodes Configuration", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, pp. 252 261, 262–266, 267–272, Mar./Apr. 1975.

[6] Sverak. J. G, "Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Techniques", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vo1. 95, pp. 362–374, Jan. 1976.

[7] Gao. Y, Zeng. R, Liang. X, He. J, Sun. W, Su. Q, "Safety Analysis of Grounding Grid for Substations

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

with Different Structure", IEEE Inter. Conference on Power System Technology, Vol. 3, pp. 1487–1492, Dec. 2000.
[8] Lee. H. S, Kim. J, Dawalibi. F. P, Ma. J, "Efficient Ground Grid Design in Layered Soils", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, pp. 745–751, Jul. 1998.
[9] Sun. W, He. J, Gao. Y, Zeng. R, Wu. W, Su. Q, "Optimal Design Analysis of Grounding Grids for Substations Built in Nonuniform Soil", IEEE Inter. Conference on Power System Technology, Vol. 3, pp. 1455–1460, Dec. 2000.
[10] He. J, Gao. Y, Zeng. R, Sun. W, Zou. J, Guan. Z, "Optimal Design of Grounding System Considering the Influence of Seasonal Frozen Soil Layer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, pp. 107–115, Jan. 2005.
[11] Neri. F, "A New Evolutionary Method for Designing Grounding Grids By Touch Voltage Control", IEEE Inter. Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, pp. 1501–1505, May. 2004.
[12] Costa. M. C, Filho. M. L. P, Maréchal. Y, Coulomb. J, Cardoso. J. R, "Optimization of Grounding Grids by Response Surfaces and Genetic Algorithms", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 39, pp. 1301–1304, May. 2003.
[13] Otero. A. F, Cidrbs. J, Garrido. C, "Genetic Algorithm Based Method for Grounding Grid Design", Proc. of the IEEE Inter. Conference on Evolutionary Computation, pp. 120–123, May. 1998.
[14] Covitti. A, Delvecchio. G, Fusco. A, Lerario. F, Neri. F, "Two Cascade Genetic Algorithms to Optimize Unequally Spaced Grounding Grids with Rods", IEEE Inter. Conference on Computer as a Tool, Vol. 2, pp. 1533–1536, Nov. 2005.
[15] He. Z, Wen. X, Wang. J, "Optimization Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm", IEEE Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007), Vol. 4, pp. 140–144, Aug. 2007.
[16] Ma. J, Dawalibi. F. P, "Computerized Analysis of Grounding Plates in Multilayer Soils", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 24, pp. 650–655, Apr. 2009.
[17] Yi-min. Y, Min-fang. P, Hai-tao. H, Yue-hua. Y, "Optimal Design of Grounding Grids Based on Genetic Algorithm", Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, pp. 129–132, 2009.
[18] Bendito. E, Carmona. A, Encinas. A. M, Jimenez. M. J, "The Extremal Charges Method in Grounding Grid Design", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, pp. 118–123, Jan. 2004.
[19] Mitolo. M, Sutherland. P. E, Natarajan. R, "Effects of High Fault Currents on Ground Grid Design", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 46, pp. 1118–1124, May/Jun. 2010.
[20] CYMGRD, User Guide and Reference Manual, Canada, 2006.

[Downloaded from jiaeee.com on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.10.4]