

# طراحی بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین پست‌های فشارقوی

بهروز شفیعی<sup>۱</sup>      احمد میرزایی<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد - یزد - ایران  
[behroozshafie@stu.yazd.ac.ir](mailto:behroozshafie@stu.yazd.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد - یزد - ایران  
[mirzaei@yazd.ac.ir](mailto: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 یکتابع 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 KV 230/63 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 - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.



افزایش تعداد هادی‌ها بر کاهش ولتاژ‌های گام و تماس ارائه شده اما با مقادیر قابل تحمل آن‌ها، جهت ارزیابی اینمی مقایسه نشده است. مراجع [۸-۱۰] 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 اینمی 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 مشاهی متوالی در نظر گرفته است، اما تنها متغیر بهینه سازی طول کل هادی‌های شبکه زمین است. مراجع [۱۳-۱۵] 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 بهبد پروفیل ولتاژ‌های GPR و تماس و در نتیجه بر بهبد 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 [۱۶-۱۸] نیز برآورده از هزینه‌های اقتصادی مربوط به روش‌های طراحی بهینه ارائه شده بعمل نیامده است و صرفاً به طراحی سیستم زمین از دیدگاه اینمی پرداخته شده است.

در این مقاله یک طرح بهینه سازی جامع چند متغیره شامل هفت گام اساسی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر اینمی 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 ۸۰-۲۰۰۰ و 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 تعریفتابع هزینه مناسب در برگیرنده 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 بهبد گردایان‌های پتانسیل سطحی حاصل

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 اینمی کارکنان پست‌های شبکه قدرت، ایجاد سیستم زمین قابل اطمینان است بطوریکه گردایان 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 اضافة ولتاژ‌های ایجاد شده در فازهای سالم در محدوده مجاز
- (۳) تأمین سطح حفاظتی مناسب برای برگیرها توسط ارائه مقاومت موجی کوچک
- (۴) تضمین اینمی کارکنان و تجهیزات در پست و بهره برداری سالم از تأسیسات در کلیه شرایط

از طرف دیگر، جاری شدن امواج گذراي جريان در سیستم زمین ناشی از برخورد صاعقه و یا وقوع اتصال کوتاه فاز به زمین، باعث ایجاد گردایان پتانسیل در سطح زمین شده که در این صورت نقاط مختلف سطح زمین نسبت بهم و نسبت به زمین دور دست دارای اختلاف پتانسیل می‌شوند که چنانچه طراحی بطور دقیق انجام نشود، ممکن است این ولتاژها به حدی برسند که اینمی افراد را در محل پست به خطر بیندازند. در این شرایط، افراد در معرض ولتاژهای بالا بین لحظه 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 می‌باشد بجهت بنحوی طراحی گردد که به ترتیب مقادیر واقعی ولتاژ‌های تماس و گامی که امکان رخداد آن‌ها در محل پست و در شرایط وقوع خطا وجود دارد از ولتاژ‌های تماس و گام قابل تحمل برای انسان کمتر باشد [۱-۴].

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



$$E_{touch70} = (1000 + 1.5c_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

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

$$c_s = I - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (3)$$

### ۲-۳- تعیین سطح مقطع هادی‌های شبکه زمین

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

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

حداکثر درجه حرارت مجاز برای اتصالات با جوش احتراقی تقریباً  $250^\circ C$  ( $1083^\circ C$  (دما ذوب مس) و برای اتصالات پیچ و مهرهای  $20^\circ C$  است. درجه حرارت مرجع برابر  $20^\circ C$  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].

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (5)$$

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

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln\left(\frac{2L_C}{a'}\right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A'}} - k_2 \right], \quad a' = \sqrt{2ah} \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[ \ln\left(\frac{4L_r}{b}\right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A'}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (7)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln\left(\frac{2L_C}{L_r}\right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A'}} - k_2 + 1 \right] \quad (8)$$

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

$$L_C = \left(\frac{L_y}{D} + 1\right) L_x + \left(\frac{L_x}{D} + 1\right) L_y \quad (9)$$

$$A' = L_x \times L_y \quad (10)$$

$$L_x = W \quad (11)$$

$$L_y = L \quad (12)$$

$$L_R = n_R \times L_r \quad (13)$$

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

می‌گردد. تنها مسائلهایی 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 مجھول شان متفاوت است، معرفی و پیشنهاد شده است.

### ۲- گام اول: تعریف مسائل 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 خطای طور 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 براورده سازد:

(۱) کلیه شرایط مرزی حاکم بر نامعادلات اساسی سیستم زمین را براورده سازد.

(۲) شرایط ایمنی را تحت سخت ترین شرایط (نظیر حداکثر جریان خطای تکفار ممکن بهمراه حداکثر مدت زمان تداوم آن) براورده سازد.

(۳) شرایط لازم را جهت تشخیص و حفاظت مناسب خطای زمین فراهم کند.

(۴) طرح سیستم زمین پیشنهادی علاوه بر براورده 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 اینمی 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  $70 kg$  دست یافت [۱]

$$E_{step70} = (1000 + 6c_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$



$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (27)$$

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

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (28)$$

### ۳-۵- تعیین ولتاژ گام

ولتاژ گام با استفاده از (۲۹) بدست می‌آید

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_S} \quad (29)$$

که در آن ضرایب  $L_S$  و  $K_S$  مطابق (۳۰) و (۳۱) بدست می‌آید [۱].

$$L_S = 0.75 L_c + 0.85 L_R \quad (30)$$

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \left( 1 - 0.5^{(n-2)} \right) \right] \quad (31)$$

### ۴- گام سوم: تعیین و ارزیابی جریان خطای

#### ۱-۴- تعیین مؤلفه‌های متقارن جریان شبکه

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

$$I_g = S_f \times I_f \quad (32)$$

#### ۲-۴- تعیین مقدار مؤثر جریان خطای نامتقارن

مقدار مؤثر جریان خطای نامتقارن، به مقدار مؤثر شکل موج لحظه‌ای جریان در هنگام وقوع خطای 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

$$I_G = D_f \times I_g \quad (33)$$

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

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{t_a}{t_f} \left( 1 - e^{-\frac{t_f}{t_a}} \right)} \quad (34)$$

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

$$t_a = \frac{I_X}{\omega R} \quad (35)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای سیستم بر حسب ( $rad/sec$ ) است.

نسبت  $X/R$  نیز معروف نسبت راکتانس القایی سیستم به مقاومت آن از

$$K_1 = \begin{cases} -0.04 \left( \frac{L}{W} \right) + 1.41, & h=0 \\ -0.05 \left( \frac{L}{W} \right) + 1.20, & h=1/10\sqrt{AREA} \\ -0.05 \left( \frac{L}{W} \right) + 1.13, & h=1/6\sqrt{AREA} \end{cases} \quad (14)$$

$$K_2 = \begin{cases} 0.15 \left( \frac{L}{W} \right) + 5.50, & h=0 \\ 0.10 \left( \frac{L}{W} \right) + 4.68, & h=1/10\sqrt{AREA} \\ -0.05 \left( \frac{L}{W} \right) + 4.40, & h=1/6\sqrt{AREA} \end{cases} \quad (15)$$

### ۴-۳- تعیین ولتاژ مش

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

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \quad (16)$$

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \times \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (17)$$

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

$$K_{ii} = 1 \quad (18)$$

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

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (19)$$

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

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (20)$$

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

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (21)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A'}}} \quad (22)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x L_y}{A'} \right]^{\frac{0.7 A'}{L_x L_y}} \quad (23)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (24)$$

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

$$L_p = 2(L_x + L_y) \quad (25)$$

$$D_m = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \quad (26)$$

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

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

### ۱- مرحله اول: تعریفتابع 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 مسئله 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.

$$\text{Objective Function} = \text{Min}[Cost\ Function] \quad (39)$$

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

$$Cost\ Function = \sum_{i=1}^7 (X_i \times F_i^T) \quad (40)$$

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.

$$X_i = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_7] = [V_S \ L_C \ L_R \ L_{RISER} \ V \ A' \ n_{cj}] \quad (41)$$

$$F_i = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_7] \\ = [F_{SLM} \ F_{Mesh} \ F_{Rod} \ F_{Riser} \ F_{Excavation} \ F_{Land} \ F_{EW}] \quad (42)$$

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

$$V_S = WLh_s \quad (43)$$

$$L_{RISER} = n_{riser}L_{riser} \quad (44)$$

$$L_{riser} = h + \frac{D}{2} - \frac{l_e}{2} + l \quad (45)$$

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  $l_e/2 = l$ ، معادله (۴۵) بصورت معادله تقریبی (۴۶) ساده می‌گردد.

$$L_{riser} = h + \frac{D}{2} \quad (46)$$

$$V = WLh \quad (47)$$

$$n_{cj} = \left( \frac{L}{D} + 1 \right) \times \left( \frac{W}{D} + 1 \right) \quad (48)$$

دید نقطه خطابوده و با نسبت  $L/R$  (ثابت زمانی سیستم) متناسب می‌باشد و لذا با میزان محو شدگی آفست  $DC$  برابر است [۱].

### 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. 800-2000 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 حریان 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 ۱۰ باشد، در نتیجه حدود مقاومت سیستم زمین بر طبق نامعادله غیر خطی (۳۶) تعریف می‌گردد.

$$0 < R_g < 1 \quad (36)$$

### 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.

$$0 < E_m < E_{touch70} \quad (37)$$

$$0 < E_s < E_{step70} \quad (38)$$

### 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 مسئله با استفاده از تولید مجموعه بردارهای اعداد تصادفی (شامل اعضای تصادفی) بر اساس شرایط مرزی حاکم بر مسئله آغاز می‌گردد و سپس با صدق اعضای (اعداد تصادفی) صحیح بردارهای اعداد تصادفی بدست آمده در نامعادلات غیر خطی، پاسخهای مسئله (در صورت وجود) بدست می‌آید. در نهایت با استفاده از تابع هدف نسبت به یافتن پاسخ بهینه مسئله از میان کلیه پاسخهای آن اقدام می‌شود.



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

شماره شرط مرزی	شرط مرزی	مرجع شرط مرزی	توضیحات
۱	$0.3 < h < 1.5$	[1] مرجع	
۲	$0 < \rho < \rho_s$	[1] مرجع	
۳	$\rho < \rho_s < 10^4$	[1] مرجع	
۴	$0.03 < t_s < 3$	[1] مرجع	
۵	$t_s < t_c < 6$	[1] مرجع	
۶	$0.08 < h_s < 0.15$	[1] مرجع	
۷	$95 \times 10^{-6} < A_{mesh} < 2565.21 \times 10^{-6}$	پیشنهاد شده در این مقاله	۱) با توجه به مسائل و مطالعات عملی ۲) بدلیل مسائل مکانیکی و خودگی ۳) بر طبق جداول (۴) و (۵)
۸	$95 \times 10^{-6} < A_{riser} < 2565.21 \times 10^{-6}$		
۹	$126.68 \times 10^{-6} < A_{rod} < 2026.83 \times 10^{-6}$		
۱۰	$2.5 < D < 22.5$	[1] مرجع	
۱۱	$6.25 < A' < 10000$	[1] مرجع	
۱۲	$1 < L/D < 40$	[1] مرجع	$L/D$ : تعداد مشاهی طولی
۱۳	$1 < W/D < 40$	[1] مرجع	$W/D$ : تعداد مشاهی 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 [۱۹] (۲) پیشنهاد شده در این مقاله	در این مقاله رابطه $t_f = E_{touch70}$ بدین صورت محاسبه شده است: $t_f = 1.3051 \exp(-0.004E_{touch70})$
۱۸	$2.5 < W < 900$	پیشنهاد شده در این مقاله	مطابق شروط مرزی شماره (۱۰) و (۱۳)

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

Material	$\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	$F_{SLM}$ (\$/m <sup>3</sup> )
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

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 <sup>3</sup> )	$F_{Land}$ (\$/m <sup>2</sup> )	$F_{exothermic weld}$ (\$)
Propagandist	1	100	5

## ۴-۸- 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 اعضا 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 می شود. در این راستا تعدادی از اعضا بردارهای مذکور در نامعادلات اساسی ایمنی و حفاظت صدق نمی کنند، لذا هر یک از اعضا بردارهای اعداد تصادفی که در هر کدام از نامعادلات نامبرده صدق نکند عضو غلط شناخته شده و حذف می گردد.

## ۵-۸- 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 اعضا صحیح بردارهای اعداد تصادفی (حاصل از گزینش اعضا بردارهای اعداد تصادفی چه بر اساس نامعادلات اساسی ایمنی و حفاظت و چه بر اساس کلیه شرایط مرزی) از دیدگاه ایمنی و حفاظت بدست می آید. از طرفی، با توجه به ماهیت غیر خطی نامعادلات اساسی ایمنی و حفاظت و نیز شرایط مرزی مسئله مورد بحث، تعداد قابل توجهی عضو صحیح برای بردارهای اعداد تصادفی بدست می آید. 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 می شود. 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 طرح های (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 می گردد.

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

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

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

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

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

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

## ۲-۸- مرحله دوم: تولید اعضا بردار اعداد تصادفی

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

## ۳-۸- مرحله سوم: گزینش اولیه اعضا بردار اعداد تصادفی

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



سیستم زمین در این حالت نسبت به حالت بدون بهینه سازی می‌گردد.

## ۲-۹ 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 در این قسمت، نتایج آنالیز ایمنی برای هر دو طرح سیستم زمین پست ۶۳/۲۰ 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 خطأ ترسیم شده و آنالیز ایمنی آن صورت گرفته است. نتایج شبیه سازی پتانسیل‌های تماس و گام بهمراه مراکزیم مقدار مجازشان ناشی از جریان خطأ 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 پرنگ ترسیم شده‌اند و مراکزیم 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 بیوژه گوشش‌های کناری سیستم زمین پست در شرایط وقوع خطأ از مراکزیم 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 خطأ همواره از مراکزیم 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 پهینه سازی سیستم زمین در این حالت نسبت به حالت بدون بهینه سازی از دیدگاه ایمنی می‌گردد.

روش بهینه سازی RSA و با در نظر گرفتن عوامل مختلف مؤثر بر ایمنی و هزینه اقتصادی سیستم زمین پست ۶۳/۲۰ 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 KV ۲۳۰/۶۳ بر اساس روش بهینه سازی RSA و روش TAE و بر اساس استاندارد IEEE Std. 80-2000 ارائه شده است.

## ۱-۹ 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 ۶۳/۲۰ KV شهرستان تفت بهمراه جزیئات آن (طرح اول بر اساس استاندارد ANSI/IEEE Std. 80-2000 و روش ANSI/IEEE Std. 80-2000 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  $A_{mesh}$  ( $mm^2$ )) ( $L_C$  (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 RSA و روش بهینه سازی

$C_7$ : 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 ۶۳/۲۰ 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

## ۱۰- نتیجه‌گیری

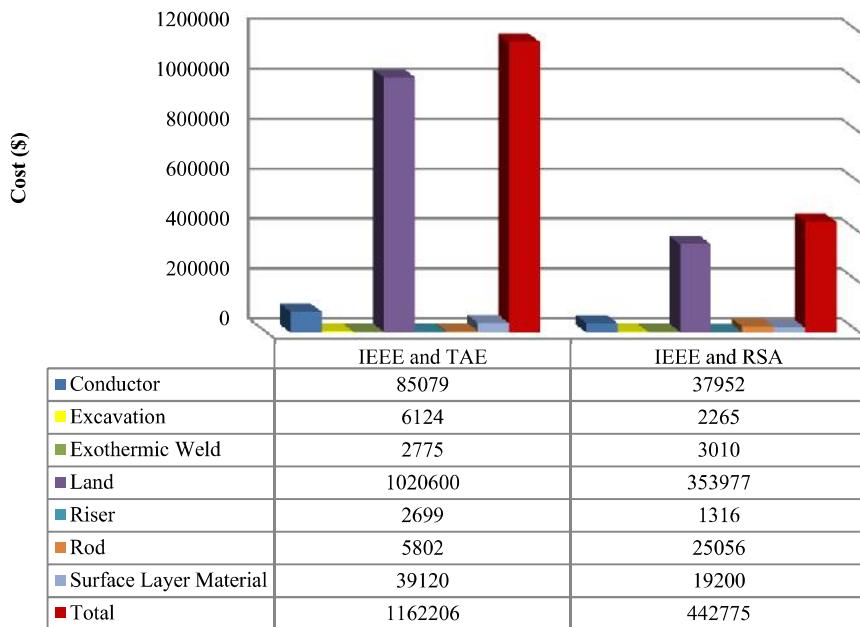
کلیه پارامترهای طراحی، هزینه اجرای سیستم زمین حداقل شده و شاخص‌های مربوط به اینمی آن بهبود می‌یابد. نتایج آنالیز و بهینه سازی اینمی و اقتصادی سیستم زمین پست  $KV\ 63/20$  شهرستان تفت و یک پست فشارقوی  $KV\ 230/63$ ، نشان دهنده بهینه بودن روش پیشنهادی جهت طراحی سیستم زمین پست‌های فشارقوی از دو دیدگاه اینمی 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 اول از دیدگاه اقتصادی دارای حداقل هزینه و حداقل مبلغ صرفه جویی است و باعث کاهش قابل توجه هزینه‌های اجرایی سیستم زمین می‌گردد و ثانیاً از دیدگاه اینمی دارای حاشیه اینمی بیشتر و توزیع گردیانهای پتانسیل یکنواخت تر بر روی سطح زمین است و باعث افزایش انعطاف بهینه سازی می‌گردد.

از آنجا که طراحی سیستم زمین اینم خود فرآیندی پیچیده است لذا در نظر گرفتن هم‌مان مؤلفه‌های اقتصادی در طراحی آن، فرآیند آن را دشوارتر می‌سازد. بر این اساس، در این مقاله بک روش جدید شامل هفت گام اساسی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر اینمی 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 اینمی 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

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

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
A <sub>mesh</sub> (m <sup>2</sup> )	$95 \times 10^{-6}$	$2565.21 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	85079	$109.09 \times 10^{-6}$	37952
L <sub>C</sub> (m)	...	...	4761		2919.42	
F <sub>Mesh</sub> (\$/m)	...	...	17.87		13	
A <sub>riser</sub> (m <sup>2</sup> )	$95 \times 10^{-6}$	$2565.21 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	2699	$109.09 \times 10^{-6}$	1316
L <sub>RISER</sub> (m)	...	...	151.05		101.23	
F <sub>Riser</sub> (\$/m)	...	...	17.87		13	
A <sub>rod</sub> (m <sup>2</sup> )	$126.68 \times 10^{-6}$	$2026.83 \times 10^{-6}$	$314 \times 10^{-6}$	5802	$197.93 \times 10^{-6}$	25056
L <sub>R</sub> (m)	...	...	150		1044	
F <sub>Rod</sub> (\$/m)	...	...	38.68		24	
n <sub>cj</sub>	...	...	555	2775	602	3010
F <sub>EW</sub> (\$)	...	...	5		5	
$\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	0	10000	3000		2500	
V <sub>S</sub> (m <sup>3</sup> )	...	...	1020.6	39120	530.97	19200
F <sub>SLM</sub> (\$/m <sup>3</sup> )	...	...	38.33		36.16	
A' (m <sup>2</sup> )	6.25	10000	10206		3539.77	
F <sub>Land</sub> (\$/m <sup>2</sup> )	...	...	100	1020600	100	353977
V (m <sup>3</sup> )	...	...	6123.6		2265.45	
F <sub>Excavation</sub> (\$/m <sup>3</sup> )	...	...	1		1	
$\mu$ ( $\Omega \cdot m$ )	0	10000	206	6124	206	2265
D (m)	2.5	22.5	4.5		2.54	
h (m)	0.3	1.5	0.6		0.64	
h <sub>s</sub> (m)	0.08	0.15	0.1	1	0.15	1
t <sub>c</sub> (s)	t <sub>s</sub> (s)	6	1		1	
t <sub>f</sub> (s)	0.04	1.1	...		0.0528	
t <sub>s</sub> (s)	0.03	3	0.6	1	0.6	1
n <sub>R</sub>	0	160	50		87	
L <sub>r</sub> (m)	0	12	3		12	
L (m)	2.5	900	162	1	94.9	1
W (m)	2.5	900	63		37.3	
R <sub>g</sub> ( $\Omega$ )	0	1	0.93		0.63	
E <sub>s</sub> (V)	0	E <sub>step70</sub> (V)	920.13	1	1362.74	1
E <sub>step70</sub> (V)	E <sub>s</sub> (V)	...	2796.54		2599.18	
E <sub>m</sub> (V)	0	E <sub>touch70</sub> (V)	839.72		709.04	
E <sub>touch70</sub> (V)	E <sub>m</sub> (V)	...	851.15	1	800	1
Total Cost (\$)	...	...	...		1162206	
					...	442775





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

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

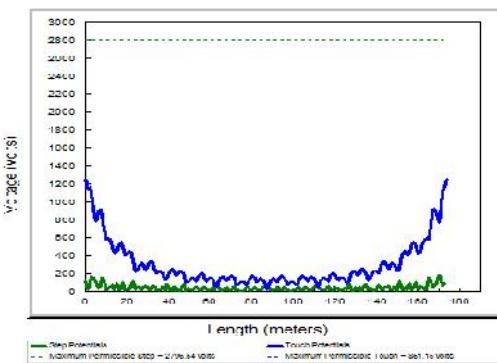
Symbol	Dealt	Symbol	Dealt	Symbol	Dealt
$I_{f-3ph}$	25 KA	$I_f$	15 KA	$f$	50 Hz
$t_c$	1 s	$t_s$	0.6 s	$D_f$	1
$S_f$	0.7	$T_A$	50 °C	$L$	162 m
$W$	63 m	$\rho$	206	$\rho_s$	3000
$h_s$	0.1 m	$h$	0.6 m	$A_{mesh}$	150 mm <sup>2</sup>
$A_{riser}$	150	$A_{rod}$	314	$D$	4.5 m
$L_r$	3 m	$n_R$	50	$n_{riser}$	53

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

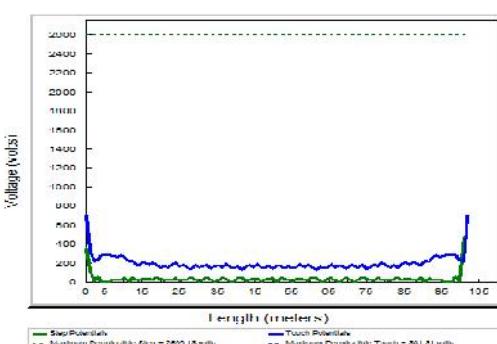
اطلاعات و پارامترهای طراحی سیستم زمین یک پست فشارقوی در 230/63 KV در جدول (۸) درج شده است.

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

Symbol	Dealt	Symbol	Dealt	Symbol	Dealt
$I_{f-3ph}$	---	$I_f$	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	$\rho$	290	$\rho_s$	3000
$h_s$	0.15 m	$h$	0.5 m	$A_{mesh}$	120 mm <sup>2</sup>
$A_{riser}$	185	$A_{rod}$	314	$D$	3 m
$L_r$	3 m	$n_R$	75	$n_{riser}$	53



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.

<b>ضمیمه (۳): فهرست علائم و اختصارات</b>	
$\alpha_0$	ضریب حرارتی هادی الکتریکی در دمای صفر درجه سانتیگراد ( $^{\circ}C$ ). $(I/^{\circ}C)$ .
$K_m$	ضریب حرارتی هادی الکتریکی در دمای مرجع ( $^{\circ}C$ ). $(I/^{\circ}C)$ .
$K_s$	مقاومت ویژه خاک ( $\Omega \cdot m$ ). مقاومت ویژه لایه سطحی ( $\Omega \cdot m$ ). مقاومت ویژه هادی‌های زمین در درجه حرارت مرجع ( $\mu\Omega \cdot cm$ ). شعاع هادی شبکه زمین ( $m$ ). کل مساحت اشغال شده توسط شبکه زمین ( $m^2$ ). سطح مقطع هادی ( $m^2$ ). سطح مقطع رایزر ( $m^2$ ). سطح مقطع میله ( $m^2$ ). شعاع میله ( $m$ ). ضریب کاهش لایه سطحی. قطر هادی شبکه زمین ( $m$ ). فاصله بین هادی‌های موازی ( $m$ ). ضریب کاهش جهت تعیین $J_G$ حداکثر فاصله بین هر دو نقطه دلخواه شبکه زمین ( $m$ ). ولتاژ مش در مرکز مش گوشاهای ( $V$ ). ولتاژ گام بین نقطه‌ای در بالای گوشاه خارجی شبکه و نقطه‌ای بفاصله یک متر در خارج از شبکه ( $V$ ). ولتاژ گام قابل تحمل برای انسان با وزن بدن $70 kg$ ( $V$ ). ولتاژ تماس قابل تحمل برای انسان با وزن بدن $70 kg$ ( $V$ ). قیمت بر واحد حجم خاکبرداری ( $$/m^3$ ). قیمت هر عدد جوش احتراقی ( $$$ ). قیمت بر واحد سطح زمین ( $$/m^2$ ). قیمت بر واحد طول هادی ( $$/m$ ). قیمت بر واحد طول رایزر ( $$/m$ ). قیمت بر واحد طول میله ( $$/m$ ). قیمت بر واحد حجم ماده لایه سطحی ( $$/m^3$ ). عمق دفن هادی‌های شبکه زمین ( $m$ ). ضخامت لایه سطحی ( $m$ ). جریان خطای متقارن در پست جهت تعیین اندازه هادی ( $A$ ). جریان متقارن شبکه ( $A$ ). حداکثر جریان شبکه، جاری شده بین شبکه زمین و زمین اطراف (شامل آفست $dc$ ) ( $A$ ). ضریب ثابت و برابر با $I/\alpha_0$ با ( $^{\circ}C$ ). ضرایب ثابت مربوط به هندسه شبکه زمین. ضریب توزین اصلاحی، تقویت کننده اثرات عمق شبکه. ضریب تصحیح هندسه شبکه.
$L$	
$L_C$	
$L_M$	
$L_P$	
$L_r$	
$L_{riser}$	
$L_R$	
$L_S$	
$L_x$	
$L_y$	
$n$	
$n_{cj}$	
$n_{riser}$	
$n_R$	
$R_I$	
$R_2$	
$R_g$	
$R_m$	
$S_f$	
$t_a$	
$t_c$	
$t_f$	
$t_s$	
$T_a$	
$TCAP$	
$T_m$	
$V$	
$V_S$	
$W$	

ضریب توزین اصلاحی، تنظیم کننده اثرات هادی.  
ضریب فاصله بندی مربوط به ولتاژ مش.  
ضریب فاصله بندی مربوط به ولتاژ گام.  
طول ناحیه اشغال شده توسط شبکه زمین ( $m$ ).  
طول کل هادی‌های شبکه زمین ( $m$ ).  
طول مؤثر مربوط به ولتاژ مش ( $m$ ).  
محیط شبکه زمین ( $m$ ).  
طول میله زمین در هر محل ( $m$ ).  
طول رایزر زمین ( $m$ ).  
طول کل رایزرهای زمین ( $m$ ).  
طول کل میله‌های زمین ( $m$ ).  
طول مؤثر مربوط به ولتاژ گام ( $m$ ).  
حداکثر طول هادی‌های شبکه زمین در راستای محور  $x$  ( $m$ ).  
حداکثر طول هادی‌های شبکه زمین در راستای محور  $y$  ( $m$ ).  
ضریب هندسی مرکب از ضرایب  $n_d$  و  $n_c$ ،  $n_b$ ،  $n_a$  تعداد نقاط اتصال هادی به همدیگر.  
تعداد رایزرهای زمین.  
تعداد میله‌های تعبیه شده در ناحیه  $'A'$ .  
مقاومت زمین هادی‌های شبکه زمین در خاک یک لایه ( $\Omega$ ).  
مقاومت زمین میله‌های زمین در خاک یک لایه ( $\Omega$ ).  
مقاومت سیستم زمین ( $\Omega$ ).  
مقاومت زمین متقابل بین هادی‌های شبکه و میله‌های زمین در خاک یک لایه ( $\Omega$ ).  
ضریب تقسیم جریان خطای (ضریب تقسیم).  
ثابت زمانی آفست  $dc$  یا ثابت زمانی فوق گذرای سیستم ( $s$ ).  
مدت زمان تداوم جریان خطای جهت تعیین اندازه هادی زمین ( $s$ ).  
مدت زمان تداوم جریان خطای جهت تعیین ضریب کاهش ( $s$ ).  
مدت زمان تداوم شوک جهت تعیین جریان مجاز عبوری از بدن ( $s$ ).  
دماهی محیط ( $^{\circ}C$ ).  
ضریب ظرفیت حرارتی هادی بر حسب ( $J/Cm^3/^{\circ}C$ ).  
حداکثر درجه حرارت مجاز هادی ( $^{\circ}C$ ).  
کل حجم اشغال شده توسط شبکه زمین ( $m^3$ ).  
حجم ماده لایه سطحی ( $m^3$ ).  
عرض ناحیه اشغال شده توسط شبکه زمین ( $m$ ).



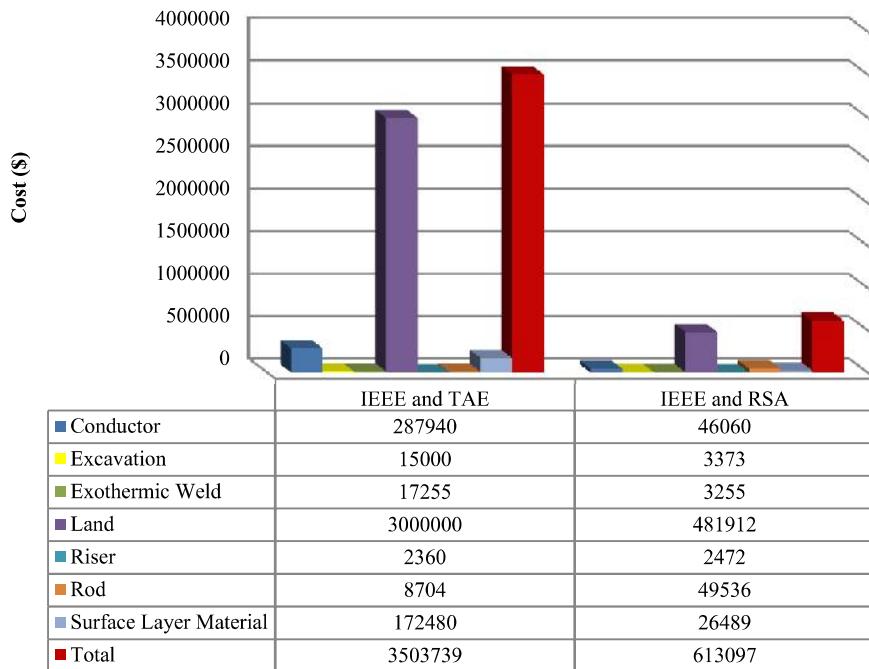
علاوه بر این، نتایج آنالیز ایمنی برای هر دو طرح سیستم زمین پست 230/63 KV ارائه شده است. در این راستا با استفاده از نرم افزار CYMGRD نمودار پروفیل پتانسیل سیستم زمین پست فشارقوی 230/63 KV برای هر دو طرح آن، در شرایط وقوع خطا ترسیم شده و آنالیز ایمنی آن صورت گرفته است. نتایج شبیه سازی پتانسیل های تماس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

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

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
A <sub>mesh</sub> (m <sup>2</sup> )	95×10 <sup>-6</sup>	2565.21×10 <sup>-6</sup>	120×10 <sup>-6</sup>	287940	109.09×10 <sup>-6</sup>	46060
L <sub>C</sub> (m)	...	...	20350		3543.05	
F <sub>Mesh</sub> (\$/m)	...	...	14.15		13	
A <sub>riser</sub> (m <sup>2</sup> )	95×10 <sup>-6</sup>	2565.21×10 <sup>-6</sup>	185×10 <sup>-6</sup>	2360	182.41×10 <sup>-6</sup>	2472
L <sub>RISER</sub> (m)	...	...	106		112.36	
F <sub>Riser</sub> (\$/m)	...	...	22.26		22	
A <sub>rod</sub> (m <sup>2</sup> )	126.68×10 <sup>-6</sup>	2026.83×10 <sup>-6</sup>	314×10 <sup>-6</sup>	8704	387.95×10 <sup>-6</sup>	49536
L <sub>R</sub> (m)	...	...	225		1032	
F <sub>Rod</sub> (\$/m)	...	...	38.68		48	
n <sub>cj</sub>	...	...	3451	17255	651.06	3255
F <sub>EW</sub> (\$)	...	...	5		5	
ρ <sub>s</sub> (Ω.m)	0	10000	3000		172480	
V <sub>S</sub> (m <sup>3</sup> )	...	...	4500	15000	8000	26489
F <sub>SLM</sub> (\$/m <sup>3</sup> )	...	...	38.33		530.1	
A' (m <sup>2</sup> )	6.25	10000	30000		49.97	
F <sub>Land</sub> (\$/m <sup>2</sup> )	...	...	100	3000000	4819.12	481912
V (m <sup>3</sup> )	...	...	15000		100	
F <sub>Excavation</sub> (\$/m <sup>3</sup> )	...	...	1		3373.38	
ρ (Ω.m)	0	10000	290	15000	1	3373
D (m)	2.5	22.5	3		290	
h (m)	0.3	1.5	0.5		2.84	
h <sub>s</sub> (m)	0.08	0.15	0.15	3000000	0.70	102.1
t <sub>c</sub> (s)	t <sub>s</sub> (s)	6	1		0.11	
t <sub>f</sub> (s)	0.04	1.1	...		1	
t <sub>s</sub> (s)	0.03	3	0.5	8704	0.199×10 <sup>-3</sup>	47.2
n <sub>R</sub>	0	160	75		0.5	
L <sub>r</sub> (m)	0	12	3		86	
L (m)	2.5	900	200	15000	12	0.5792
W (m)	2.5	900	150		2.84	
R <sub>g</sub> (Ω)	0	1	0.7567		47.2	
E <sub>s</sub> (V)	0	E <sub>step70</sub> (V)	1887.5	3503739	0.5792	3170.87
E <sub>step70</sub> (V)	E <sub>s</sub> (V)	...	2796.54		8120.71	
E <sub>m</sub> (V)	0	E <sub>touch70</sub> (V)	3385.5		1958.41	
E <sub>touch70</sub> (V)	E <sub>m</sub> (V)	...	1013	3503739	2196.70	613097
Total Cost (\$)	...	...	...		...	

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

در این ضمیمه، نتایج طراحی و آنالیز اقتصادی برای هر دو طرح سیستم زمین پست فشارقوی KV 230/63 بهمراه جزییات آن (طرح اول بر اساس استاندارد ANSI/IEEE Std. 80-2000 و روش معمول ANSI/IEEE Std. 80-2000 و طرح دوم بر اساس استاندارد TAE) در جدول (۹) ارائه شده است. در شکل (۴) نیز مقایسه ای 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 می دهد 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.

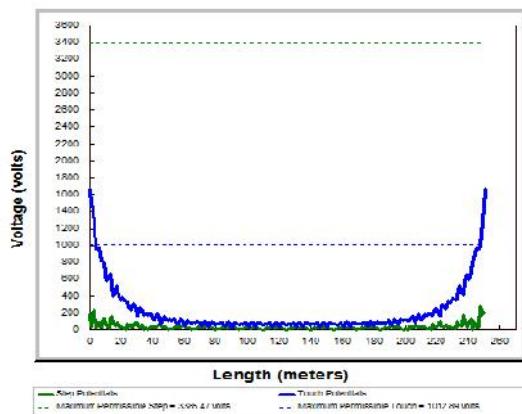


شکل (۴) : مقایسه مجموع هزینه و هزینه کلیه پارامترهای طراحی سیستم زمین یک پست فشارقوی 230/63 KV برای هر دو طرح آن

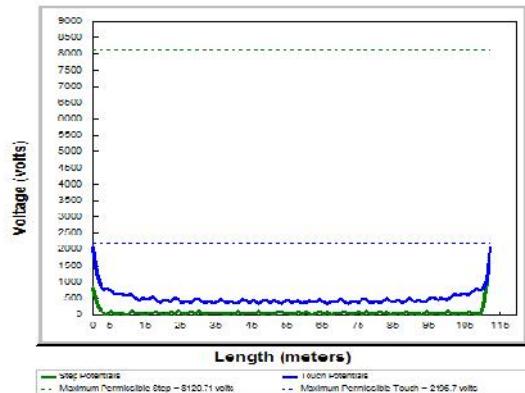
شکل (۵) : پروفیل پتانسیل طرح دوم سیستم زمین پست 230/63 KV

## 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, Vol. 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



شکل (۵) : پروفیل پتانسیل طرح اول سیستم زمین پست 230/63 KV



- 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.