مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۵۵-۶۲

Original Article

بررسی نقش جداگرهای اصطکاکی آونگی در کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌یی تجهیزات پست‌های فشار قوی

رضا کرمی‌محمدی * **(دانشیار)**
عرفان مصفا (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

یکی از پرهزینه‌ترین تبعات وقوع زلزله، آسیب پست‌های انتقال برق فشار قوی و به تبع آن قطع برق در مناطق آسیب‌دیده است. در مطالعه‌ی حاضر، به‌واسطه‌ی به‌کارگیری جداگر اصطکاکی آونگی (FPS)، عملکرد لرزه‌یی دو تجهیز آسیب‌پذیر ترانس ولتاژ خازنی (CVT) و برق‌گیر (LA) بررسی شده است. در این راستا، با اعمال رکوردهای مقیاس‌شده براساس بیشینه‌ی تغییرمکان جنبش زمین (PGD) و طبق روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)، پاسخ لرزه‌یی تجهیزات ارزیابی شده است. به علاوه، با تعریف مقادیر مختلف فاصله میان لغزنده‌ی اصطکاکی جداگر و لبه‌های جداگر (فاصله‌ی لغزندگی)، اثر تغییرمکان لغزنده در پاسخ لرزه‌یی تجهیزات مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان نیز مشخص شده است که نصب جداگر اصطکاکی در پای برق‌گیر، بر نصب آن در پای ترانس ولتاژ برتری دارد و به‌طور چشم‌گیری پاسخ مجموعه‌ی تجهیزات را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش فاصله‌ی لغزندگی تا مقدار بهینه‌ی آن، بر اثربخشی جداگر اصطکاکی در کاهش پاسخ می‌افزاید.

واژگان کلیدی: ترانس ولتاژ خازنی، برق‌گیر، جداگر اصطکاکی آونگی، اندرکنش کابل، آنالیز دینامیکی افزاینده.

rkarami@kntu.ac.ir
emosaffa@mail.kntu.ac.ir

۱. مقدمه

بررسی ابعاد تخریب حاصل از زمین‌لرزه‌های به وقوع پیوسته در دهه‌های اخیر نشان داده است که پدیده‌ی زلزله، تهدیدی جدی علیه تجهیزات پست‌های برق فشار قوی به حساب می‌آید.[۱] تخریب تجهیزات پست برق در طی زلزله‌های لوماپریتا (۱۹۸۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴)، شبکه‌ی برق‌رسانی ایالات متحده را به‌ترتیب متحمل ۱۰۰ میلیون و ۱۸۳ میلیون دلار خسارت کرده است.[۲] همچنین زیان اقتصادی ناشی از تخریب تجهیزات پست برق در زلزله‌ی کوبه (۱۹۹۵) و متقاعب آن قطع سه روزه‌ی برق، بالغ بر ۴ میلیارد دلار تخمین زده شده است. زلزله‌ی ونشوان (۲۰۰۸) نیز خسارتی بالغ بر ۱ میلیارد دلار را برای شبکه‌ی توزیع برق کشور چین به جای گذاشت، که طی آن ۲۴۶ پست برق صدمات قابل‌توجهی را تجربه کردند.[۳]

کشور ایران نیز به‌طور متوسط در طول ۸۰ سال گذشته، هر ۵ سال یک زلزله‌ی متوسط و یا بزرگ را تجربه کرده است. آمار منتشرشده از زلزله‌ی منجیل (۱۳۶۹)، به تخریب کامل ۱۵۹ پست برق و آسیب نه‌چندان جدی ۳۵۵ پست انتقال و توزیع برق اشاره دارد.[۴] برخی از این تجهیزات آسیب‌دیده در زلزله‌ی بم (۲۰۰۳) را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد.

محدودساختن حوزه‌ی حرکتی تجهیزات به‌وسیله‌ی اتصالات پیچی دستک‌ها و مهارها، روشی مستقیم جهت مقاوم‌سازی آن‌ها محسوب می‌شود. اما عیب بزرگ آن واردکردن ضربه در تکانه‌های حاصل از زمین‌لرزه است.[۵] به همین منظور، شیوه‌ی جداسازی با عنوان جایگزینی مؤثر در بحث مقاوم‌سازی لرزه‌یی تجهیزات پست برق معرفی شده است.[۶]

در سال ۲۰۰۳، استفاده از جداگر اصطکاکی آونگی (FPS)[۱] در پای ترانس قدرت، روشی مؤثر در کاهش پاسخ لرزه‌یی بوشینگ‌های مستقر بر روی آن و نیز کاهش ابعاد فونداسیون خودتجهیز معرفی شده است.[۷] در سال ۲۰۰۸، نیز با تجهیز قطع‌کننده‌ی جریان به جداگر اصطکاکی آونگی چنین اعلام شده است که پاسخ ممان خمشی در پای روکش ستون سرامیکی عایق به میزان ۵۴٪ الی ۷۸٪ کاهش یافته است.[۸] همچنین در سال ۲۰۱۲، با بیان نقش پررنگ شیوه‌ی جداسازی لرزه‌یی در کاهش پاسخ بوشینگ‌های ترانس قدرت، ضعف اصلی آن را در پاسخ‌های قائم می‌دانند.[۹]

در مطالعه‌ی حاضر، عملکرد جداگر اصطکاکی آونگی (FPS) و برق‌گیر (LA)،

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۵/۶، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۲۷.

Archive of SID
www.SID.ir

شکل ۱. شکستگی مقره‌ی تجهیزات پست برق (زلزله‌ی بم، ۱۳۸۳).

جدول ۱. مقایسه میان مشخصات دینامیکی مدل تجهیزات و مشخصات قیدشده در مراجع.

موقعیت استفاده	کاتالوگ	مدل SAP ۲۰۰۰	خطا (٪)
ترانس ولتاژ خازنی	۸٫۹	۸٫۸۸	۰٫۲
ترانس ولتاژ (روی پایه)	۶٫۱۸	۶٫۱۳	۰٫۸
برق‌گیر	۵٫۳	۵٫۳۸	۱٫۴
برق‌گیر (روی پایه)	...	۴٫۱۷	...

از دریچه‌ی ملزومات لرزه‌یی و الکتریکی مورد بررسی قرارگرفته و سپس راهکارهای لازم جهت ارتقاء عملکرد لرزه‌یی آن‌ها پیشنهاد شده است.

۲. مدل‌سازی

فرایند مدل‌سازی تجهیزات پست برق در محیط نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ صورت گرفته است، که مدل صفحات و بدنه‌ی خود تجهیزات را به ترتیب المان‌های Shell و Solid تشکیل می‌دهند. به علاوه، ساختار اعضاء سازه‌ی نگه‌دارنده‌ی تجهیزات نیز به‌واسطه‌ی المان Beam مدل شده‌اند. این تذکر لازم است که رفتار کنداکتور (کابل) موجود میان تجهیزات نیز با مجموعه‌یی موازی از یک فنر غیرخطی و یک میراگر شبیه‌سازی شده است.

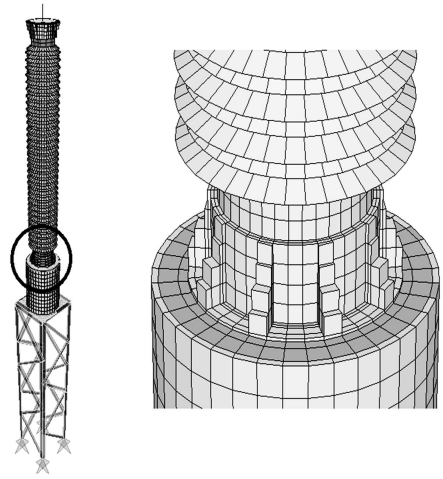
۱.۲. تجهیزات پست برق

مجموعه‌ی تجهیزات الکتریکی موردنظر در نوشتار حاضر، متشکل از تجهیز ترانس ولتاژ خازنی (CVT)[۲] مستقر در مجاورت تجهیز برق‌گیر (LA)[۳] است، که مشخصات دینامیکی آن‌ها را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

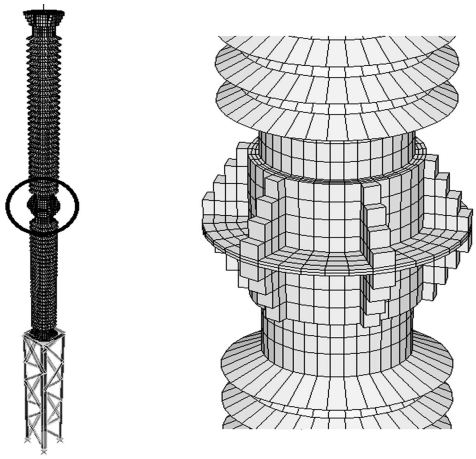
همچنین نمای کلی مدل تجهیزات مذکور در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ را می‌توان در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده کرد. این تذکر لازم است که پایه‌ی مورد استفاده برای هر دو تجهیز یکسان هستند. اعضاء قائم، افقی، و بادبندی پایه‌ی مذکور، تماماً از جنس نبشی فولادی هستند.

۲.۲. کنداکتور میان تجهیزات

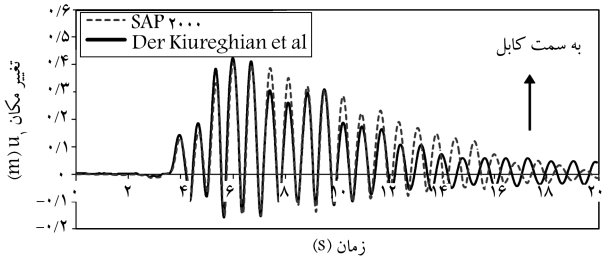
پدیده‌ی اندرکنش کابل (کنداکتور) اتصال‌دهنده‌ی تجهیزات الکتریکی مستقر در خطوط توزیع، همواره یکی از چالش‌های اصلی در مواجهه با پدیده‌ی زلزله بوده



شکل ۲. نمای کلی مدل برق‌گیر مدل‌شده در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰.



شکل ۳. نمای کلی مدل برق‌گیر مدل‌شده در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰.



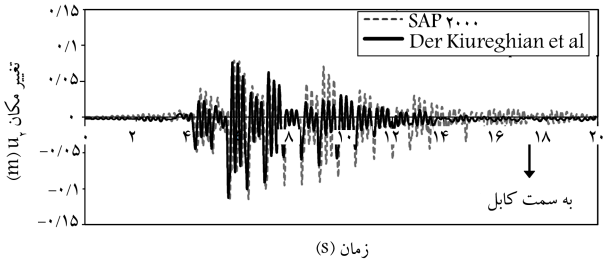
شکل ۴. مقایسه میان نتایج حاصل از تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی سر آزاد سمت راست کنداکتور تحت رکورد زلزله‌ی نورث‌ریج.

است. عدم تأمین خلاصی کافی می‌تواند به‌راحتی منجر به واژگونی و یا تخریب تجهیزات شود.[۱۰]

با عنایت به اهمیت چشم‌گیر پدیده‌ی اندرکنش، کنداکتور موجود میان ترانس ولتاژ و برق‌گیر نیز در مدل منظور شده است. در این راستا، رفتار دینامیکی کنداکتور با مجموعه‌یی از فنر و میراگر شبیه‌سازی شده است. صحت‌سنجی جابه‌جایی سر آزاد کنداکتور تحت رکورد زلزله‌ی نورث‌ریج با نتایج پژوهشی در سال ۱۹۹۹،[۱۱] را می‌توان در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده کرد.

با توجه به شدت زلزله‌های احتمالی منطقه، باید خلاصی موردنیاز کنداکتورها را محاسبه کرد، تا از کشیدگی بیش از حد آن‌ها اجتناب شود.[۱۲] طبق دستورآیین‌نامه‌ی

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۵. مقایسه میان نتایج حاصل از تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی سر آزاد سمت چپ کنداکتور تحت رکورد زلزله‌ی نورث‌ریج.

IEEE-۶۹۳،[۱۳] کمینه‌ی طول موردنیاز کنداکتور جهت تأمین خلاصی (L_0)، تابعی از طول خط مستقیم ترسیمی میان نقاط اتصال به تجهیز (L_1)، بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی میان تجهیزات ($\mathrm{Max}\, u(t)$) و طول اضافی در نظرگرفته‌شده بر پایه‌ی نوع و پیکربندی کنداکتور (L_2) است (روابط ۱ و ۲):

$$L_0 = L_1 + 1.5 \mathrm{Max}\, u(t) + L_2 \quad (1)$$

$$\mathrm{Max}\, u(t) = \sqrt{x_{\max,1}^2 + x_{\max,2}^2} \quad (2)$$

که در آن، $x_{\max}$ بیان‌گر بیشینه‌ی تغییرمکان مطلق سر هر یک از تجهیزات ترانس ولتاژ و برق‌گیر است.

در سال ۲۰۱۰، با استفاده از مدل‌سازی تجهیزات به‌صورت مدل یک درجه آزادی و تحلیل‌های آماری، رابطه‌ی ۳ برای تخمین بیشینه‌ی تغییرمکان بالای تجهیزات (در محل اتصال کنداکتور) پیشنهاد شده است:[۱۰]

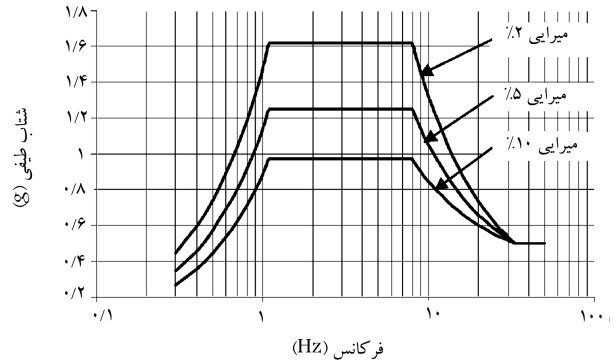
$$x_{\max} = \frac{1.62 \times S_a(f,\xi)}{\omega^2} \quad (3)$$

که در آن، S_a شتاب طیفی متناسب با f بسامد اصلی، ξ نسبت میرایی، و ω بسامد زاویه‌یی تجهیز است. آیین‌نامه‌ی IEEE-۶۹۳ توصیه می‌کند که مناطقی با ۲٪ احتمال فراگذشت از شتاب بیشینه‌ی زمین (g) ۰٫۵ در طی ۵۰ سال را باید در سطح «شدید» ارزیابی کرد. با توجه به پیشنهاد IEEE-۶۹۳ مبنی بر اخذ میرایی ۲٪ برای تجهیزات الکتریکی، مقدار S_a از طیف طراحی در سطح ارزیابی شدید استخراج شده است (شکل ۶). این تذکر لازم است که با توجه به اینکه طیف‌های نشان داده‌شده در استاندارد IEEE-۶۹۳ از نوع کاهش‌یافته هستند، باید تمامی شتاب‌های به‌دست‌آمده ۲ برابر شود. در نتیجه، با توجه به فاصله‌ی افقی ۳٫۵ متری تجهیزات و بسامد زاویه‌یی آن‌ها، کمینه‌ی طول لازم برای کنداکتور در حالت پایه‌ی ثابت و پایه‌ی جداشده به ترتیب عبارت از ۳۹۲ و ۴۰۰ سانتی‌متر است.

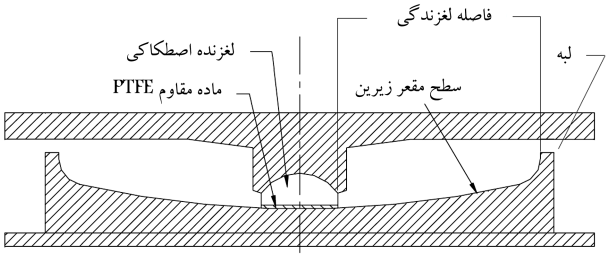
۳.۲. طراحی جداگر اصطکاکی

اصطکاک، یکی از شناخته‌شده‌ترین منابع اتلاف انرژی است که قادر به ایجاد محدودیت در تغییرمکان‌هاست. هر چند که فقدان قابلیت برگشت به مکان اولیه، عیب عمده‌ی میراگرهای اصطکاکی است.[۱۴] سیستم اصلاح‌شده‌ی اصطکاکی با نام جداگر اصطکاکی آونگی با تسهیل این امر، جای خود را در مبحث مقاوم‌سازی لرزه‌یی تجهیزات سازه‌یی و غیرسازه‌یی باز کرده است.[۱۵] مزیت اصلی جداگر اصطکاکی آونگی در عدم وابستگی دوره‌ی تناوب آن به جرم سازه‌ی رویی است. در شکل ۷، نمایی از مدل تک‌قوسی آن به نمایش درآمده است.

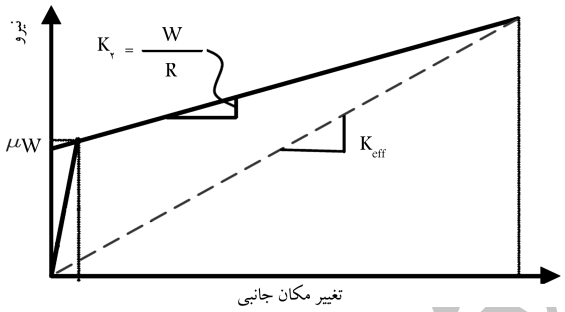
مقاومت جداگرهای اصطکاکی آونگی، ترکیبی از هندسه‌ی آونگ و اصطکاک است، که این حقیقت در سال ۱۹۹۰ به‌صورت معادله‌ی ۴ بیان شده است،[۱۶] که



شکل ۶. طیف طراحی آیین‌نامه‌ی IEEE-۶۹۳ متناسب با ارزیابی در سطح شدید.



شکل ۷. شکل نمایی جداگرهای اصطکاکی آونگی تک‌قوسی.



شکل ۸. منحنی نیرو ـ تغییرمکان جداگر اصطکاکی آونگی.

جمله‌ی اول آن به هندسه‌ی جداگر و انحنای سطح (که تأمین‌کننده‌ی حرکت آونگی است) و جمله‌ی دوم به مشخصات مکانیکی و زبری سطح باز می‌گردد:

$$F_f = \frac{W}{R} u_b + \mu W Z \quad (4)$$

که در آن، F_f نیروی مقاومت جداگر، W نیروی قائم موجود بر روی جداگر، R شعاع انحنای سطح مقعر، u_b تغییرمکان افقی جداگر، μ ضریب اصطکاک، و نهایتاً Z که متغیر هیستریک بوک ـ ون نام دارد و مقادیر ۱ و ۱- را اختیار می‌کند و براساس آزمایش‌های تجربی تعیین می‌شود. در شکل ۸، رابطه‌ی نیرو ـ تغییرمکان جداگر اصطکاکی آونگی نشان داده شده است.

المان جداگر اصطکاکی منظورشده در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰، ضریب اصطکاکی وابسته به سرعت دارد و در سرعت‌های پایین در کمینه‌ی مقدار خود قرار دارد و افزایش سرعت لغزنده، ضریب اصطکاک را به مقدار بیشینه می‌رساند. کمینه‌ی مقدار ضریب اصطکاک را باید به‌گونه‌یی تعیین کرد که تجهیز جداشده به‌راحتی در برابر غالب نیرو سرویس، که همانا نیروی باد است، ایستادگی کند و فقط تحت نیروهای زلزله فعال شود. ملزومات مبحث ششم مقررات ملی ساختمان در تحلیل دینامیکی نیروی باد،[۱۷] نیروی جانبی باد را $F = 350\ \mathrm{kg}$ به‌دست می‌دهد. این تذکر لازم است که جهت تأمین وزن سبک سازه‌ی رویی جداگر اصطکاکی و

Archive of SID
www.SID.ir

همچنین رعایت مسائل اجرایی، دال بتنی با ابعاد ۰٫۴ × ۱٫۵ × ۱٫۵ متر میان پایه‌ی سازه‌ی نگه‌دارنده و صفحه‌ی فوقانی جداگر منظور شده است. در نتیجه با توجه به وزن ۲۸۴۰ کیلوگرمی سازه‌ی رویی، ضریب اصطکاک کمینه طبق معادله‌ی ۵ عبارت است از:

$$\mu_{\min} = \frac{F}{W \times ۱٫۶} = \frac{۳۵۰}{۲۸۴۰ \times ۱٫۶} = ۰٫۰۸ \quad (۵)$$

در پژوهشی در سال ۲۰۰۶ اعلام شده است که ضریب اصطکاکی در سیکل اول به‌طور متوسط ۲۰٪ بیشتر از ضریب اصطکاکی متوسط در سیکل‌های بعدی (۳ الی ۵ سیکل تغییرمکان) است.[۱۸] همچنین طبق توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی اشتو،[۱۹] میزان بیشینه‌ی ضریب اصطکاک باید از حاصل‌ضرب ضریبی اصلاحی در میزان متوسط اصطکاک حاصل شود، که با توجه به مسائلی چون دمای محیط، جنس سطح، عمر کارکرد، و غیره برابر ۱٫۳۲ خواهد بود، که در نتیجه برابر خواهد بود با (معادله‌ی ۶):

$$\mu_{\max} = \mu_{\max} \times ۱٫۲ \times ۱٫۳۲ = ۰٫۱۲ \quad (۶)$$

فرایند تعیین ظرفیت تغییرمکان جداگرهای اصطکاکی، فرایندی تکراری و برگرفته از روابط موجود در آیین‌نامه‌ی AASHTO ۲۰۱۰،[۱۹] است و تا همگرایی پاسخ‌ها باید ادامه یابد.[۲۰] روابط ۷ الی ۱۱، بیان‌گر روند پیشرفت حلقه‌ی محاسبات هستند:

$$B_L = (\xi/۰٫۰۵)^{۰٫۳} \quad (۷)$$

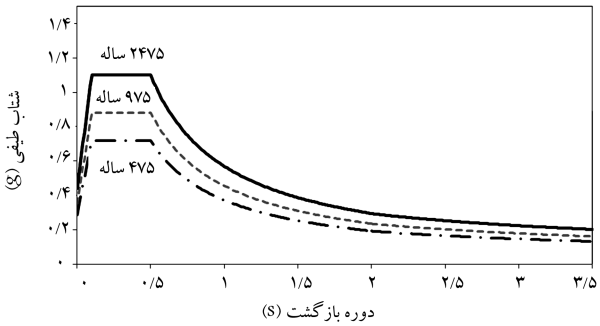
$$d = \frac{g}{۴\pi^۲} \times \frac{S_{D۱} \times T_{eff}}{B_L} \quad (۸)$$

$$\frac{f_{\max}}{W} = \mu + (\frac{۲\pi}{T_۲})^۲ \times \frac{d}{g} \quad (۹)$$

$$T_{eff} = ۲\pi \times \sqrt{\frac{d}{f_{\max}/W}} \quad (۱۰)$$

$$\xi = \frac{۲}{\pi} \times \frac{\mu}{\mu + d/R} \quad (۱۱)$$

که در آن‌ها، B_L پارامتر طیفی اصلاح میرایی، ξ نسبت میرایی هدف، d میزان تغییرمکان جداگر به ازاء بدترین سناریو (MCE)[۴] متناظر با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله، $S_{M۱}$ شتاب طیف طراحی منطقه به ازاء با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله و دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه، $f_{\max}$ بیشینه‌ی نیرو، μ ضریب اصطکاک میانگین، و T_{eff} دوره‌ی تناوب مؤثر جداگر اصطکاکی است. طراحی جداگر اصطکاکی با هدف تأمین میرایی ۲۰٪ آغاز می‌شود. شکل ۹، بیان‌گر طیف شتاب متناظر با نسبت میرایی ۲۰٪ ویژه‌ی ساختگاه پست «منتظر قائم» (مورد مطالعه در پژوهش حاضر و مستقر در اطراف شهرکرج) است.



شکل ۹. طیف طراحی ویژه‌ی ساختگاه پست «منتظر قائم» متناظر با نسبت میرایی ۲۰٪.

پارامتر مورد استفاده در شکل ۹، شتاب طیفی متناظر با دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ ساله به ازاء دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه است که برابر (g) ۰٫۵۷ است. با جایگزینی شتاب طیفی متناظر با دوره‌ی بازگشت ۹۷۵ ساله و دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه، تغییرمکان جداگر اصطکاکی به ازاء سناریو طراحی (DBE)[۵] به‌دست می‌آید.

در پایان حلقه‌ی محاسبات تکراری، تغییرمکان طراحی متناظر با سناریوی طراحی و بدترین سناریو به‌ترتیب برابر ۸٫۱ و ۱۱٫۵ سانتی‌متر به‌دست آمده است.

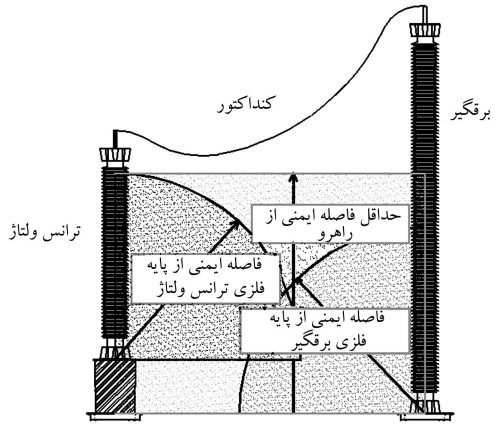
۳. فرایند تحلیل

شکست ترد مقره، اصلی‌ترین مود خرابی ترانس ولتاژ خازنی به حساب می‌آید. بر مبنای دستورآیین‌نامه‌ی IEEE-۶۹۳، میزان تنش مجاز اعمالی به مقره‌ی سرامیکی به ۵۰٪ تنش نهایی محدود می‌شود. با توجه به انتخاب سرامیک فاقد لعاب با مقاومت عادی (C۱۲۰)، فراگذشت تنش پای مقره از ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع مود اصلی شکست منظور شده است. همچنین اعمال نیروهای بیش از ۲۰۰ کیلوگرم به گیره‌های نگه‌دارنده‌ی کنداکتور، به‌عنوان دومین مود خروج از خدمت‌رسانی تجهیز منظور شده است.[۲۱]

این تذکر لازم است که آیین‌نامه‌ی IEEE-۶۹۳ در بخش تجهیزات الکتریکی مجهز به جداگر، در مورد تجاوزکنداکتور به فواصل ایمنی الکتریکی هشدار می‌دهد. بنابراین با توجه به پیکربندی افتاده[۶] (زنجیروار)، دو سرکنداکتور نباید بیش از ۴۰ سانتی‌متر به یکدیگر نزدیک شوند. در شکل ۱۰، می‌توان نمایی از نحوه‌ی استقرار تجهیزات و فواصل الکتریکی مورد بحث را مشاهده کرد.

روش تحلیل مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) است که ابتدا رکوردهای حرکت زمین را مقیاس می‌کند و سپس آن را به روشی که بتواند به‌دقت کل محدوده‌ی رفتاری المان از حالت کشسان تا ویرانی را پوشش دهد، تعمیم می‌دهد. به عبارت ساده‌تر، هدف اصلی در روش مذکور، محاسبه‌ی پاسخ المان یا اندازه‌ی خسارت (DM) در ازاء مقادیر مختلف شدت زمین‌لرزه (IM) است، که نتایج آن معمولاً به‌صورت منحنی ترسیم می‌شود.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) نمی‌تواند بهترین گزینه، جهت تبیین عملکرد لرزه‌یی تجهیزات سبک‌وزن و مجهز به جداگر باشد. بلکه معیارهای مرتبط با انرژی و به تبع آن سرعت جنبش‌های زمین (PGV)



شکل ۱۰. مقایسه‌ی میان فواصل ایمنی الکتریکی و موقعیت کنداکتور.

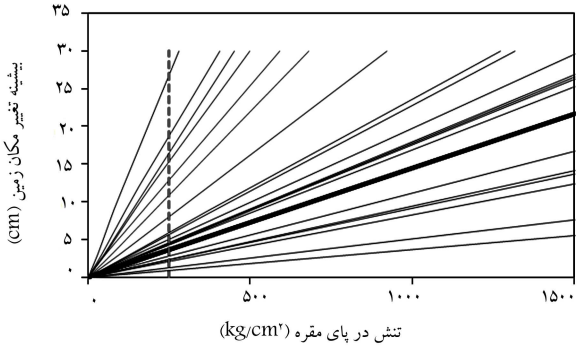
Archive of SID
www.SID.ir

از این حیث برتری دارند.[۲۲] با وجود این، در پژوهش حاضر پارامتر بیشینه‌ی تغییرمکان زمین (PGD)، به‌عنوان معیار مناسب جهت سنجش پاسخ لرزه‌یی تجهیزات جداسازی‌شده‌ی پست برق و به عبارت دیگر، پارامتر IM برگزیده شده است. منطق حاکم بر تصمیم مذکور، به نقش احتمالی تغییرمکان لغزنده‌ی اصطکاکی و برخورد آن به لبه‌های جداگر (شکل ۷) در تعیین عملکرد لرزه‌یی تجهیزات باز می‌گردد، که این فاصله (فاصله‌ی لغزندگی) براساس تغییرمکان هدف تعیین می‌شود. به‌عبارت دیگر، گمان می‌رود که برخورد لغزنده‌ی اصطکاکی با لبه‌های مذکور و به تبع آن ایجاد مکانیزم ضربه، پاسخ تجهیز را به‌صورت ناگهانی افزایش دهد، که اثر آن در بخش‌های آتی بررسی شده است.

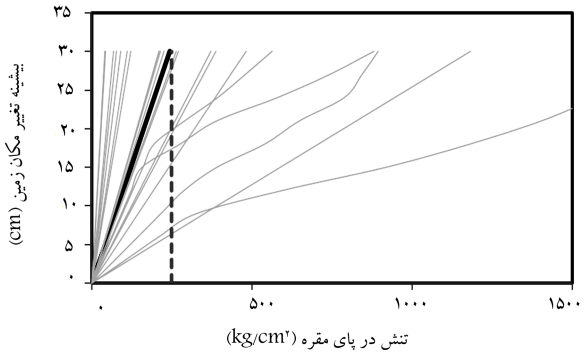
گزینش رکورد در مطالعه‌ی حاضر، بر مبنای انتخاب ۲۰ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور استوار است، که در فاصله‌ی کمینه‌ی ۱۵ کیلومتری از گسل واقع شده‌اند، که با توجه به مطالعات ژئوتکنیک محل احداث پست برق فشار قوی، بستر خاک محل ثبت رکوردها از نوع C (برگرفته از گزارش ژئوتکنیک منطقه و مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE 7-05) [۲۳] است که انتشار موج برشی در این نوع بستر، با سرعت ۳۶۰ الی ۷۶۰ متر بر ثانیه صورت می‌گیرد. طبق توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی IEEE-693، رکوردها در دو راستای متعامد افقی به همراه ۸۰٪ آن در راستای قائم اعمال و نتایج آن‌ها با روش جذر مجموع مربعات (SRSS) ترکیب و ارزیابی می‌شود.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲، بیان‌گر پاسخ پای مقره‌ی تجهیزات پایه‌ی ثابت و در عین حال متصل به یکدیگر است. این تذکر لازم است که خطوط نقطه‌چین عمودی، نماینده‌ی مرز پاسخ مجاز مود خرابی متناظر و خطوط کم‌رنگ، نشان‌گر پاسخ به ازاء هریک از رکوردها هستند، که هدف از آن‌ها، نمایش پراکندگی پاسخ‌هاست.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تنش پای مقره‌ی برق‌گیر با شیب تندتری افزایش می‌یابد و به ازاء PGD کمتری، وارد محدوده‌ی تخریب می‌شود. به‌عبارت دیگر،



شکل ۱۱. پاسخ در پای مقره‌ی برق‌گیر با پایه‌ی ثابت.



شکل ۱۲. پاسخ در پای مقره‌ی ترانس ولتاژ با پایه‌ی ثابت.

تجهیز برق‌گیر در مقایسه با ترانس ولتاژ، آسیب‌پذیری بیشتری دارد. اکنون به موضوع اثر استفاده از جداگر اصطکاکی و به دنبال آن اثر تغییر فاصله میان لغزنده و لبه‌ی جداگر اصطکاکی پرداخته شده است. به منظور تعیین پاسخ مجموعه‌ی دو عضوی تجهیزات، ابتدا دو موقعیت مختلف متصور شده است:

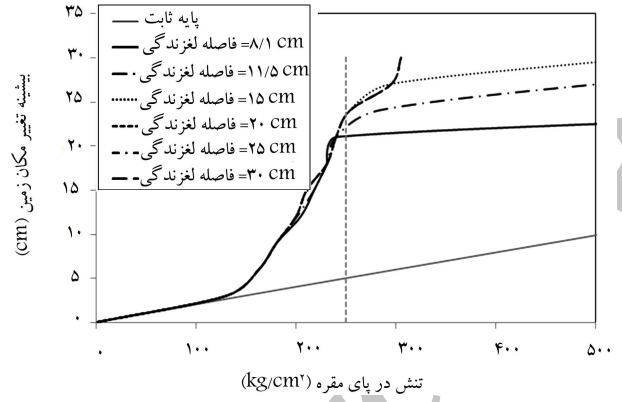
الف) برق‌گیر مجهز به جداگر اصطکاکی و ترانس ولتاژ با پایه‌ی ثابت.

ب) ترانس ولتاژ مجهز به جداگر اصطکاکی و برق‌گیر با پایه‌ی ثابت.

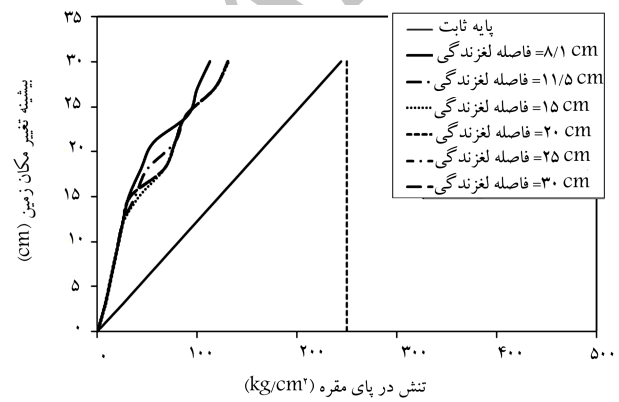
شکل‌های ۱۳ و ۱۴، نشان‌گر مقایسه میان پاسخ تجهیزات با پایه‌ی ثابت و پاسخ آن‌ها در وضعیت الف هستند. دقت شود که نمودارهای ترسیمی در شکل‌های مذکور، نماینده‌ی میانه‌ی پاسخ تجهیزات به هر یک از ۲۰ رکورد اعمالی است. فواصل انتخابی فاصله‌ی لغزندگی از این قرار است: ۸٫۱ سانتی‌متر (سناریوی طراحی DBE)، ۱۱٫۵ سانتی‌متر (سناریوی طراحی MCE)، ۱۵ سانتی‌متر، ۲۰ سانتی‌متر، ۲۵ سانتی‌متر و ۳۰ سانتی‌متر.

منطق حاکم بر انتخاب اعداد، فقط بررسی اثر افزایش فاصله‌ی لغزندگی است. همان‌گونه که در شکل‌های مذکور نشان داده شده است، نصب جداگر اصطکاکی در پای برق‌گیر سبب می‌شود تا در مقایسه با حالت پایه‌ی ثابت، پاسخ تنش در پای مقره‌ی هر دو تجهیز ترانس ولتاژ و برق‌گیر بهبود یابد. در واقع به ازاء تمامی PGDهای انتخابی، نصب جداگر اصطکاکی در پای برق‌گیر به مقاوم‌سازی لرزه‌یی مجموعه می‌افزاید.

از سوی دیگر، افزایش فاصله‌ی لغزندگی نیز گامی مثبت در راستای کاهش

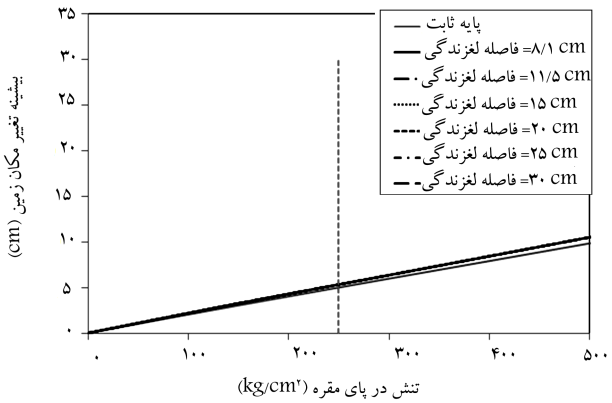


شکل ۱۳. پاسخ در پای مقره‌ی برق‌گیر به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت الف).

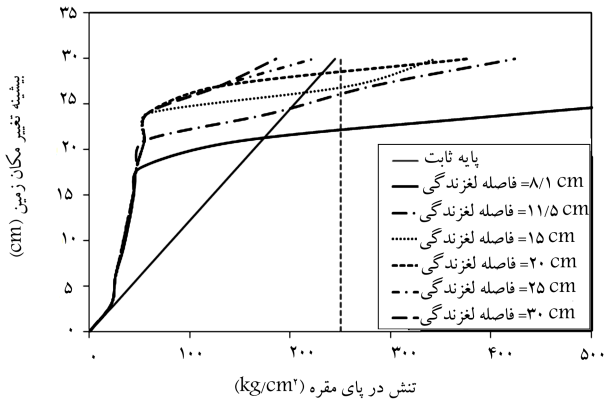


شکل ۱۴. پاسخ در پای مقره‌ی ترانس ولتاژ به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت الف).

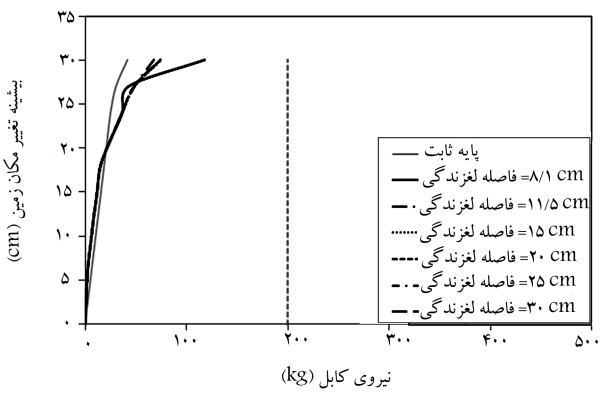
www.SID.ir



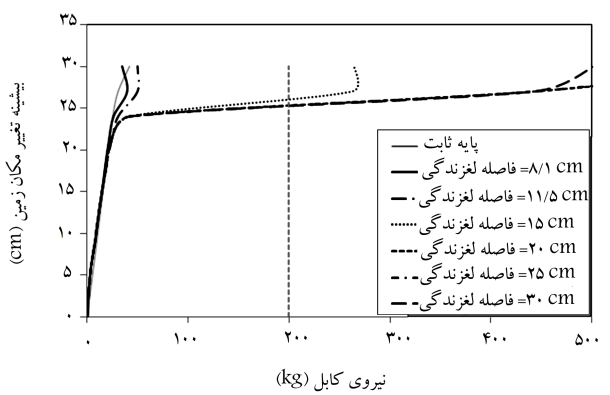
شکل ۱۵. پاسخ در پای مقره‌ی برق‌گیر به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت ب).



شکل ۱۶. پاسخ در پای مقره‌ی ترانس ولتاژ به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت ب).



شکل ۱۷. پاسخ نیروی انتهای کابل به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت الف).



شکل ۱۸. پاسخ نیروی انتهای کابل به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت ب).

پاسخ برق‌گیر به حساب می‌آید، در حالی‌که پاسخ ترانس ولتاژ چندان دستخوش تغییر نمی‌شود و پاسخ آن را می‌توان کاملاً مشابه حالت پایه‌ی ثابت تلقی کرد. این تذکر لازم است که روند کاهشی پاسخ مقره‌ی برق‌گیر فقط تا فاصله‌یی تقریباً معادل ۲۰ سانتی‌متر ادامه می‌یابد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، به پاسخ تجهیزات در موقعیت (ب) پرداخته شده است.

با توجه به شکل‌های مذکور، نصب جداگر اصطکاکی در پای ترانس ولتاژ، نقشی در کاهش و یا حتی افزایش پاسخ در پای مقره‌ی برق‌گیر ندارد، که این مسئله به ازاء تمامی فواصل لغزندگی صادق است. همچنین پاسخ تنش در پای مقره‌ی ترانس ولتاژ نیز به گونه‌یی است که به ازاء نیمی از فواصل لغزندگی انتخابی، شاهد پاسخ معکوس در مقایسه با حالت پایه‌ی ثابت هستیم. به علاوه، مقایسه‌ی شکل‌های ۱۳ و ۱۴ با شکل‌های ۱۵ و ۱۶، دلالت بر عملکرد لرزه‌یی بهتر وضعیت (الف) در مقایسه با وضعیت (ب) دارد.

در ادامه، به مود دوم تخریب تجهیزات یعنی کشیدگی در انتهای کنداکتور پرداخته شده است. شکل‌های ۱۷ و ۱۸، بیان‌گر میانه‌ی پاسخ مجموعه در قبال دو وضعیت مذکور هستند.

با توجه به شکل‌های ذکرشده می‌توان به این نتیجه رسید که نصب جداگر اصطکاکی در پای برق‌گیر و همچنین تغییر فاصله‌ی لغزندگی، موجب افزایش کشیدگی کابل نمی‌شود. از سوی دیگر، نصب جداگر اصطکاکی در پای ترانس ولتاژ و اختیار فواصل کمتر از ۱۵ سانتی‌متر میان لغزنده و لبه‌ی جداگر، سبب افزایش کشیدگی کابل نمی‌شود. اما با تجاوز فاصله‌ی مذکور از ۱۵ سانتی‌متر، شاهد افزایش ناگهانی کشیدگی کابل هستیم. نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌های ۱۷ و ۱۸ را می‌توان بار دیگر به پاسخ لرزه‌یی بهتر وضعیت (الف) در قیاس با حالت (ب) تعبیر کرد.

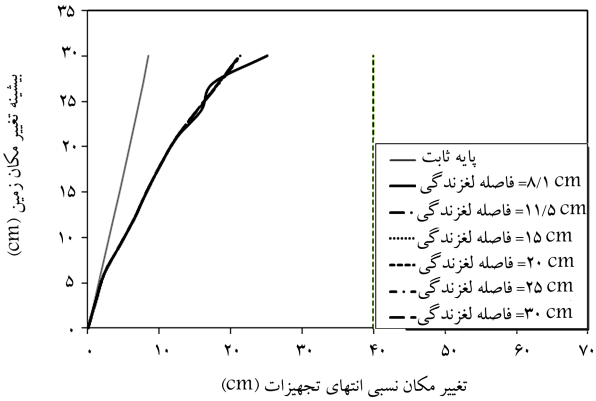
در پایان به رعایت شرط فواصل ایمنی الکتریکی پرداخته شده است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شده است، تجاوز کنداکتور حاوی جریان برق به محدوده‌ی ایمن موجود میان ترانس ولتاژ خازنی و برق‌گیر می‌تواند به ایجاد قوس الکتریکی و تخریب تجهیزات منتهی شود. شکل‌های ۱۹ و ۲۰، به چگونگی تغییر فاصله میان دو سر تجهیزات در قبال افزایش PGD رکوردهای اعمالی اشاره دارند.

مطابق آنچه در شکل‌های مذکور نمایان است، فواصل ایمنی الکتریکی به ازاء تمامی مقادیر PGD و هر دو وضعیت مورد بررسی حفظ شده است. در نتیجه نگرانی از بابت تولید قوس الکتریکی وجود نخواهد داشت.

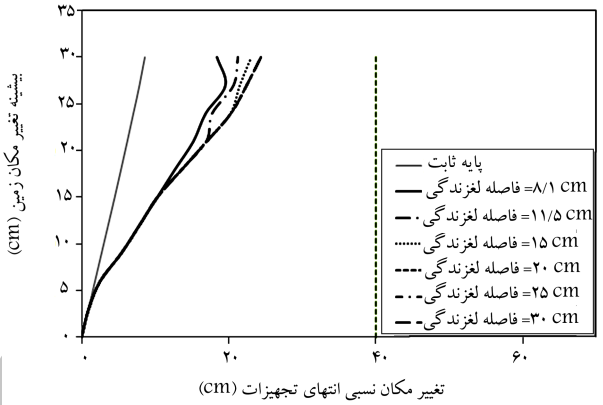
۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تغییر رفتار حاصل از نصب جداگر اصطکاکی آونگی در پای دو تجهیز ترانس ولتاژ خازنی و برق‌گیر پرداخته شده است، که با توجه به بررسی نتایج حاصل از اعمال رکوردهای مقیاس‌شده بر حسب معیار بیشینه‌ی تغییرمکان زمین و انجام تحلیل دینامیکی فزاینده، این نتایج حاصل شده است:

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۹. تغییرمکان نسبی انتهای تجهیزات به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت الف).



شکل ۲۰. تغییرمکان نسبی انتهای تجهیزات به ازاء انواع فواصل لغزندگی انتخابی (وضعیت ب).

- تجهیز برق‌گیر در مقایسه با ترانس ولتاژ خازنی، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر شتاب‌های اعمالی زلزله دارد.

- نصب جداگر اصطکاکی آونگی در پای برق‌گیر، به ازاء تمامی مقادیر بیشینه‌ی تغییرمکان زمین (PGD)، به کاهش پاسخ تنش پای مقره‌ی هر دو تجهیز برق‌گیر و ترانس ولتاژ خازنی می‌انجامد. همچنین افزایش فاصله‌ی لغزندگی، به اثربخشی جداگر اصطکاکی در کاهش پاسخ تنش‌ها می‌افزاید.

- نصب جداگر اصطکاکی آونگی در پای ترانس ولتاژ، تغییری در پاسخ تنش پای مقره‌ی برق‌گیر ایجاد نکرده است. از سوی دیگر، اگرچه تنش پای مقره‌ی ترانس ولتاژ تغییر یافته است، اما این تغییر اثری در بهبود عملکرد لرزه‌یی تجهیز نداشته و به ازاء نیمی از فواصل لغزندگی انتخابی، منجر به تخریب پیش از موعد در مقایسه با حالت پایه ثابت شده است.

- در صورت نصب جداگر اصطکاکی در پای برق‌گیر، نیروی کشیدگی کابل در مقایسه با حالت پایه‌ی ثابت تجهیزات، دستخوش تغییر نمی‌شود، که این پدیده به ازاء تمامی مقادیر بیشینه‌ی تغییرمکان زمین (PGD) و همچنین تمامی فواصل لغزندگی صادق است.

- نصب جداگر اصطکاکی در پای ترانس ولتاژ خازنی، فقط در مقادیر اندک فاصله‌ی لغزندگی سبب شکست اتصالات انتهایی کابل نمی‌شود. با افزایش فاصله‌ی مذکور (بیش از ۱۵ سانتی‌متر)، نیروی کشش انتهای کابل به صورت ناگهانی افزایش یافته و به شکست اتصال آن منتهی شده است.

- نصب جداگر اصطکاکی آونگی در پای برق‌گیر (تجهیز آسیب‌پذیر) به بهبود عملکرد لرزه‌یی هر دو تجهیز (از منظر تنش پای مقره و نیروی کشیدگی در اتصالات انتهایی کابل) در مقایسه با حالت پایه‌ی ثابت می‌شود.

پانوشت‌ها

1. friction pendulum system (FPS)
2. cumulative voltage transformer (CVT)
3. lightning arrester (LA)
4. maximum considered earthquake
5. design basis earthquake
6. catenary configuration

منابع (References)

1. Stearns, C. and Filiatrault, A. "Electrical substation equipment interaction: Experimental rigid conductor studies", Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), California, USA (2005).
2. ASCE96, *Manuals and Report on Engineering Practice*, Guide to Improved Earthquake Performance of Electric Power Systems, American Society of Civil Engineering (ASCE) (1999).
3. Liu, R.S., Zhang, M.J. and Wu, Y.B. "Vulnerability study of electric power grid in different intensity area in wenchuan earthquake", *in 15th World Conference of Earthquake Engineering (WCEE)*, Lisboa, Portugal (2012).
4. Farahani, H.F. "Investigate into faragility curves for cumulative voltage transformer (CVT)", Master of Science Thesis, Science and Culture University, Tehran (In Persian) (2009).
5. Lopez, G.D. and Soong, T.T. "Sliding fragility of block-type nonstructural components. Part 1: Unrestrained components", *Earthquake Engineering Structures Dynamic*, **32**(1), pp. 131-149 (2003).
6. Wen, B., Zhang, J. and Niu, D. "Application of isolation technology in high-voltage electrical equipments", *in The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (October 2004).

Archive of SID
www.SID.ir

7. Hashemi Nezhad Ashrafi, A. "Issues of seismic response and retrofit for critical substation equipment", Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology (August 2003).
8. Junke, H., Chunlei, Zh., Fengli, Y. and Meigen, C. "Application of base isolation in high voltage electrical equipment", *in 14th World Conference on Earthquake Engineering,* Beijing, China (2008).
9. Oikonomou, K., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M. "Seismic isolation of electrical equipment (seismic table simulation)", *in 15th World Conference of Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal (2012).
10. Dastous, J.B. and Der Kiureghian, A. "Application guide for the design of flexible and rigid bus connections between substation equipment subjected to earthquakes", Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), California, USA (April 2010).
11. Der Kiureghian, A., Sackman, J.L. and Hong, K.J. "Interaction in interconnected electrical substation equipment subjected to earthquake ground motions", Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), California, USA (1999).
12. Ghalibafian, H. "An experimental study on the seismic interaction of flexible conductors with electrical substation equipments", Master of Applied Science Thesis, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia (UBC), Vancouver, Canada (2001).
13. *IEEE-693-Recommended Practice for Seismic Design of Substations*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2005).
14. Villaverde, R., *Earthquake Engineering From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering, Chapter19: Seismic Analysis and Design of Nonstructural Elements*, Califirnia, USA: CRC Press (2004).
15. Zayas, V.A., Low, S.S. and Mahin, S.A. "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", *Earthquake Spectra*, **6**(2), pp. 317-333 (1990).
16. Constantinous, M.C., Mokha, A. and Rinhorn, A.M. "Teflon bearings in base isolation II: Modeling", *Journal of Structural Engineering,* **116**(2), pp. 455-474 (1990).
17. *Iranian National Building Code for Structural Loadings: Part 6*, The Ministry of Housing and Urban Development, Iran (2001).
18. Buckle, I.G., Constantinou, M.C., Dicleli, M. and Ghasemi, H., *Seismic Isolation of Highway Bridges*, Multidisciplinary Center For Earthquake Engineering Research (MCEER), Federal Highway Administration, 171 p. (2006).
19. *Revised AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, American Association of State Highway Transportation and Officials (AASHTO), Washington D.C. (2010).
20. Richins, B.D. "Evaluation and seismically isolated substructure redesign of a typical multi-span pre-stressed concrete girder highway bridge", Master of Science Thesis, Utah State University, Civil and Environmental Engineering, Utah (2011).
21. *IEEE Standard 1527-IEEE Recommended Practice for the Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2006).
22. Akiyama, H., *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*, The University of Tokyo (1985).
23. *ASCE 7-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers (ASCE) (2005).

Archive of SID

www.SID.ir