



در حاشیه زلزله بم

همایون توانا
شرکت فراساخت
ایران

واژه های کلیدی: زلزله ، پستهای فشارقوی

چکیده:

با توجه به عملکرد پستهای فشارقوی در زلزله های اخیر دنیا و مطالعات فراوانی که بر روی خصوصیات دینامیکی اینگونه تجهیزات صورت پذیرفته است ، سازمانهای زیرربط متفق القول بر این باورند که طراحی ضد زلزله پستهای فشارقوی نیازمند معیارهای طراحی جدیدتر و کامل تری می باشد. با توجه به نشریات زیادی که در این مورد در کشور ژاپن و ایالت کالیفرنیا منتشر شده است ، نویسنده و شرکت فراساخت که دست اندرکار ساخت و طراحی پستهای فشارقوی هستند لازم دیدند که همکاران را در جریان این دست آوردها قرار دهند. به طور کلی تا به حال در طراحی زلزله ای پستهای فشارقوی از اثرات کابلها و شینه های اتصال دهنده تجهیزات ، رفتار دینامیکی قسمتهای چینی ، عملکرد رله ها در زلزله و... صرف نظر می شده که این امر باعث خسارات فراوانی به

قسمتهای الکتریکی اینگونه تجهیزات می گردیده است . زلزله های بم و منجیل نیز مؤیدی بر این تجربیات جهانی هستند . زلزله بم نیز عاملی گردیده تا این تجربیات که مدتهاست در شرکتهای مهندسی راجع به آن بحث می شود ، بصورت خلاصه و تحت عنوان این مقاله در نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق تهران ارائه گردد، باشد که منشأ خدمتی گردد.

0 مقدمه

اولین اقدام برای سیستماتیک نمودن محاسبات سازه ها و تجهیزات پست انتشار آیین نامه SSPB در اواخر ده ۷۰ میلادی توسط توانیر ، به کمک وزارت انرژی سوئد بوده است . در زمان انتشار این آیین نامه شرایط خاصی بر صنعت برق ایران حاکم بوده و بسیاری از رشته های مهندسی دوران نوباوگی خود را طی می نمودند (مانند مهندسی زلزله). این شرایط به طور کلی عبارتند از :

خوبی نشان دهنده کاستی های روشهای مورد استفاده در طراحی این شریانهای حیاتی است. در زلزله های اخیر سازه های فلزی که تمامی توجه طراحان را به خود معطوف نموده مقاومت بیش از حد مورد نیاز از خود نشان داده و قسمتهای چینی که گران قیمت ترین اجزاء هستند به تمامی دچار شکست شده اند. این تجربیات و این نوع رفتار در سایر نقاط زلزله خیز دنیا (مانند ژاپن و کالیفرنیا و.....) نیز در سالهای گذشته مشاهده شده است و لذا بسیاری از مؤسسات ذیربط ضوابط جدیدی برای طراحی پستهای فشارقوی ارائه نموده اند، که کارایی این شریانهای حیاتی را در مقابل زلزله افزایش فراوانی داده و پارامترهای جدیدی را در مقوله طراحی پستها وارد نموده اند. تعدادی از این مراکز عبارتند از:

PACIFIC GAS & ELECTRICITY
COMPANY, U.C. SANDIEGO,
IEEE, U.C. IRVINE, U.C. BERKELEY, ...

که هر یک با انتشار مراجع گوناگونی به روشن نمودن قسمتهایی از اثرات زلزله بر پستهای فشار قوی پرداخته اند. ذیلاً چکیده ای از این انتشارات در رابطه با موارد فوق الذکر به استحضار میرسد.

۱- برهم کنش سازه ها

تقریباً تمامی تجهیزات پستهای فشار قوی بوسیله اتصالات کابل یا لوله به یکدیگر مرتبط هستند و تغییر مکان تجهیزات در اثر نیروهای زلزله باعث می شود که این اجزای ارتباطی نیروهایی را بین این تجهیزات انتقال دهند. این نیروها اکثرابه صورت ضربه ای هستند و قسمتهای چینی تجهیزات که محل اثر نیروها هستند کاملاً ترد و شکننده (BRITTLE) و بدون شکل پذیری میباشند. لذا این ضربات علت عمده شکستن قسمتهای چینی خواهند بود.

- قسمتهای الکتریکی تماماً وارداتی بوده و طرف ایرانی کنترلی بر آنها نداشته و فقط به استناد مدارک کمپانیهای سازنده (عمدتاً اروپایی) به استفاده از آنها اقدام میگردد. است.

- قسمتهای الکتریکی توأمأ در محدوده کار مهندسین سازه و برق قرار دارند و مهندسین سازه کفایت سازه ای آنها و مهندسین برق جهت کفایت الکتریکی آنها مسئول هستند ولی با توجه به ماهیت خاص این وسائل، مهندسین سازه اشراف کافی بر عملکرد مکانیکی آنها، و به خصوص دینامیکی آنها نداشته و مهندسین برق نیز توجه به عملکرد مکانیک آنها را خارج از حدود وظایف خود میدانستند.

- مهندسی زلزله دوران رشد خود را طی می کرده و عملکرد تجهیزات الکتریکی در زلزله و فاکتورهای دخیل بر رفتار آنها در زلزله روشن نبوده است بخصوص در کشورهایی که در مناطق زلزله خیز واقع شده اند.

- محاسبات کشش کابل برهمکنش سازه ها در زلزله و محاسبات دینامیکی باس بارها از دروس فوق تخصصی بوده و در دفاتر مهندسی متداول این تخصص ها کمیاب هستند. تمام عوامل فوق در آئین نامه SSPB متبلور است، سازه ها در زلزله:

- بصورت منفرد در نظر گرفته میشوند.

- اثرات تغییر مکان سازه ها که باعث کشش متغیر کابلها و نیروی محور در باس بارها و اعمال ضربه به قسمتهای چینی میشوند صرفنظر میگردد.

- عملکرد دینامیکی قسمت چینی که در رفتار سیستم در زلزله بسیار موثر است نادیده انگاشته شده است.

علیرغم مرور سالهای فراوان از انتشار SSPB این آئین نامه و یا تلفیق آن با آئین نامه 2800 مبنای طراحی پستهای فشارقوی است. عملکرد پستها در زلزله های منجیل و بم به



۱-۱ کابلها

معادله منحنی کابل به صورت ذیل میباشد. ۱، ۲

$$\frac{dT}{wL} = \frac{T}{wL} \frac{\left(\frac{S h}{L L} + \frac{H S_1}{L L} \right) \frac{wL}{T} + \frac{S}{L}}{\left(\frac{S h}{L L} + \frac{H S_1}{L L} \right) \frac{wL}{T} + \frac{S}{L} + \left(\frac{H}{L} \right)^2 - \left(\frac{S}{L} \right)^2}$$

$$y = \frac{T}{w} \left[\cosh \left(\frac{w x}{T} \right) - 1 \right]$$

W= وزن بر واحد طول

T= کشش افقی کابل

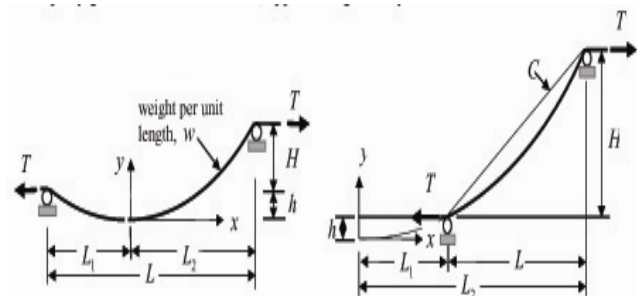
L= دهانه افقی کابل

H= اختلاف ارتفاع بین دو تکیه گاه

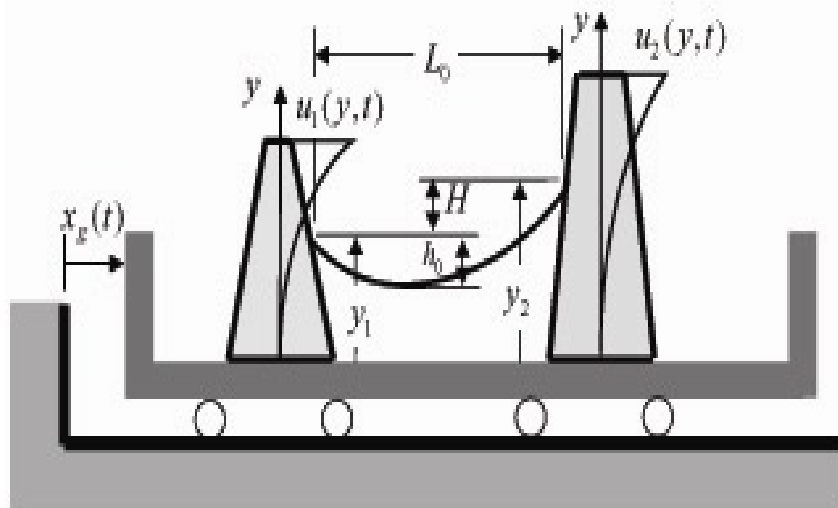
h = شکم کابل

S = طول منحنی کابل

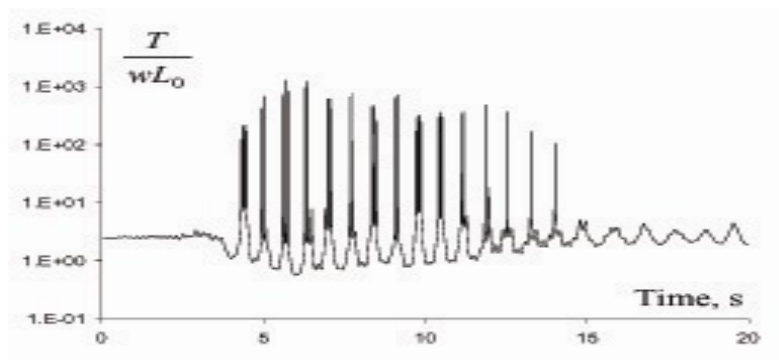
همانگونه که مشاهده میگردد این سختی غیر خطی است و با افزایش دهانه به صورت غیر خطی افزایش می یابد. لذا با افزایش تغییر مکان و نیروی کابل ناگهانی افزایش یافته و به صورت ضربه به تجهیز وارد میشود.



با صرفنظر از تغییر طول کابل و سختی تانژانت کابل به صورت فوق می باشد و فرض فوق و سختی تانژانت در محاسبات زلزله موضوعیت دارند.



مدل دو تجهیز کامل در هنگام زلزله

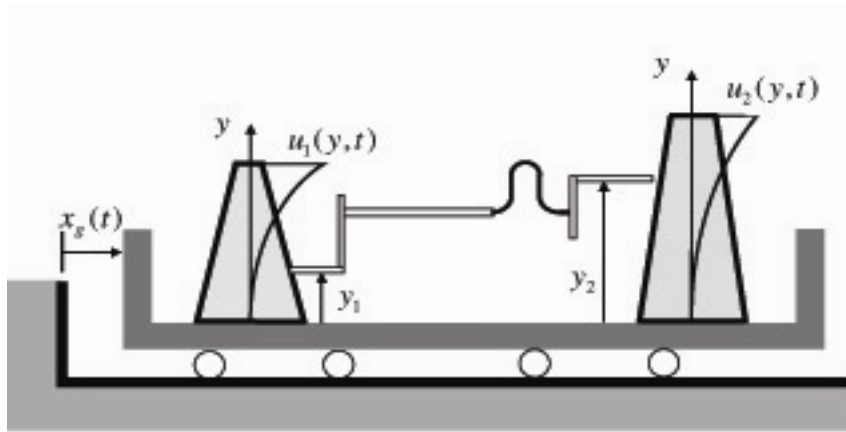


تغییرات نیروی کابل متصل کننده دو تجهیز هنگام زلزله

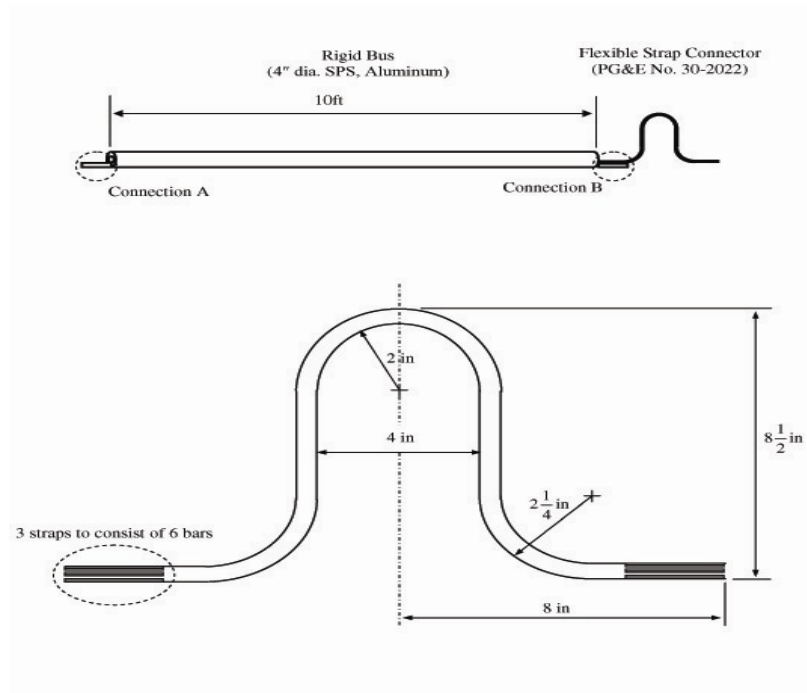
۱،۲- باس بار

باس بارها نیز باعث انتقال نیرو بین تجهیزات می شوند ولی با توجه به خصوصیات مکانیک و هندسی آنها این انتقال عمدتاً در جهت طولی صورت پذیرفته و اثرات ضربه ای آن کمتر است . با در نظر گرفتن این موضوع و روشی مشابه روش به کار گرفته شده در مورد کابلها و برای کاهش این تاثیرات با تعبیه اتصالات فلزی در محل نصب باس بارها و یا ایجاد قوس در طول باس بار سختی طولی آنها کاهش داده شده و از قابلیت انتقال نیروی آنها کاسته میشود . یک نمونه از این اضافات و قوسهای ایجاد شده در باس بارها در شکل ذیل مشاهده میشود.

با در نظر گرفتن خصوصیات مقاومتی چینی، این ضربه باعث شکست آن خواهد شد ولی باید توجه داشت که با ازدیاد شکم کابل، افزایش نیروی کابل شدیداً کاهش خواهد یافت و از حالت ضربه ای خارج خواهد شد. و لذا با در نظر گرفتن حداکثر تغییر مکان نسبی تجهیزات نسبت به یکدیگر و فاصله بین تجهیزات و ارتفاع آنها ضوابطی برای محاسبه شکم کابل در مراجع فراوانی ارائه گردیده است. ۹

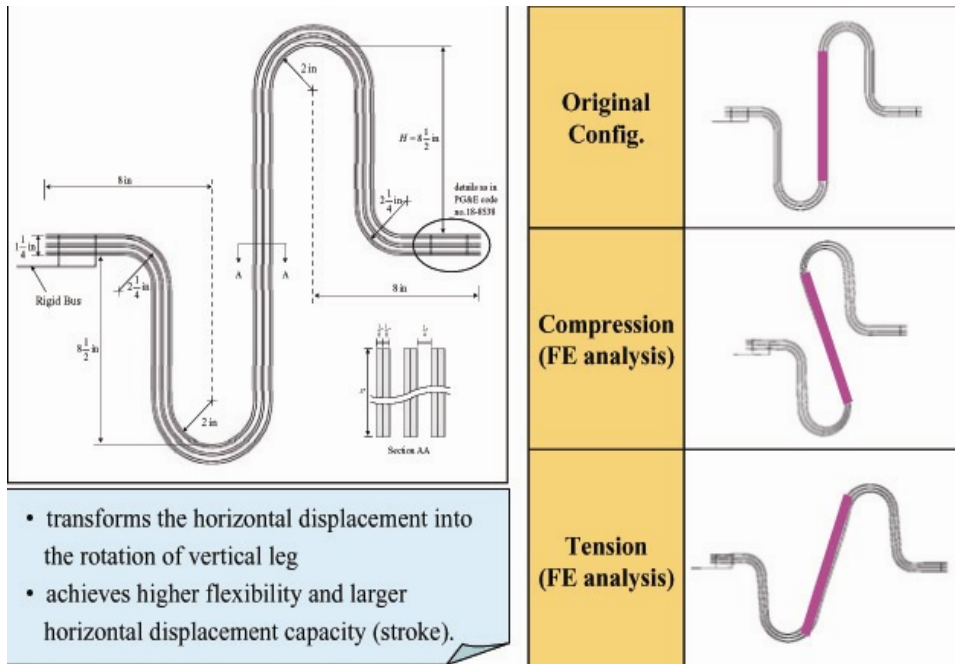


مدل ارتعاش دو تجهیز مرتبط بوسیله باس بارزلزله



متصل به باس بار میباشد. این اتصالات فلزی از خاصیت میرایی بالایی نیز برخوردار می باشند که خصوصیات دینامیک سیستم را نیز تحت تاثیر قرار خواهند داد.

در اشکال فوق اتصال فنری باس بار به تجهیز وقوس ایجاد شده در یک باس بار مشاهده میشود. کاملاً بدیهی است که هندسه این قوسها تابعی از میزان نیروی انتقالی می باشد که این نیرو به نوبه خود تابع تغییر مکان نسبی و فاصله تجهیزات



شکست بوشینگهای گران قیمت شده و انتقال این تجهیزات حجیم در دوره پس از زلزله بر روی فونداسیون اصلی نیز بسیار مشکل خواهد بود.

- رفتار قسمتهای قابل انعطاف

بر طبق IEEE693 تمامی بوشینگهای 161KV و بیشتر میبایست در معرض یک طیف زلزله سه محوری قرارگیرند تا برای استفاده مناسب تلقی شوند، از آنجا که آزمایش لرزه ای بوشینگ و ترانس غیر عملی است، استاندارد اجازه میدهد که بوشینگ بر روی قالب صلب قرار گرفته و در معرض طیف زلزله قرارگیرد، با توجه به اینکه ترانس از درجه صلبيت بالایی برخوردار است این تقریب در نتایج آزمایش تأثیری ندارد.

لذا فرض بر این است که کمپانی سازنده بوشینگهای مورد بحث را در معرض زلزله مورد درخواست قرار داده و آنها قادر به تحمل این زلزله می باشند.

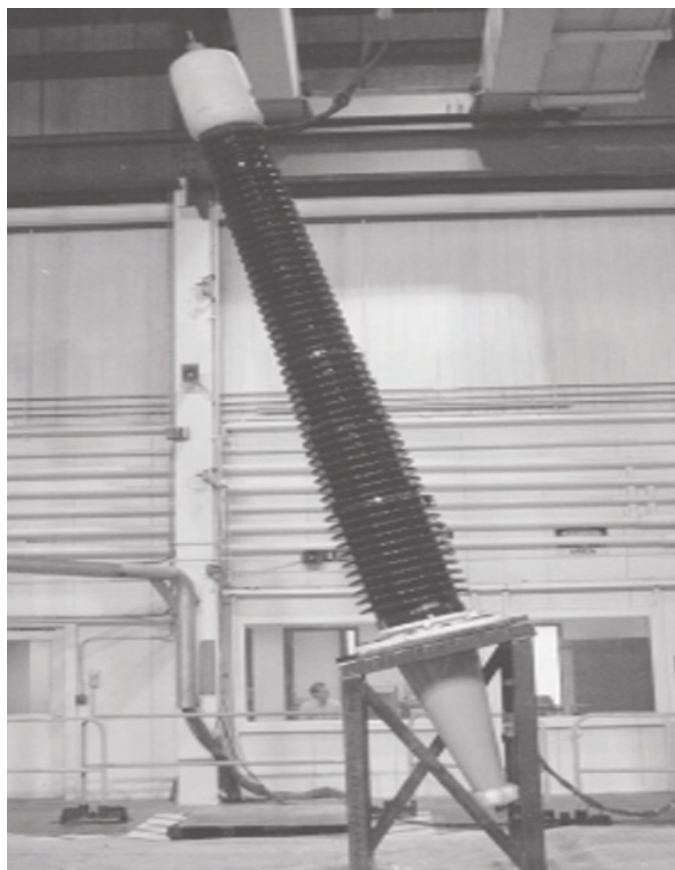
۲- تجهیزات حجیم

بدنه تجهیزات حجیم در پستهای فشار قوی (مانند ترانسها) از صلبيت بالایی برخوردار بوده و شتابی برابر با شتاب زمین خواهند داشت و فقط بوشینگهای متصل به آنها به علت انعطاف نسبی بالا، دچار تغییر مکانهای دینامیک خواهند شد. خصوصیات فوق الذکر رعایت مواردی را در طراحی زلزله ای این تجهیزات ایجاد می نماید. ۶، ۷

- برای انتقال نیروی شتاب زلزله این تجهیزات به پی باید اتصالات کافی فراهم گردد. در صورتیکه این اتصالات فاقد مقاومت کافی باشند، دچار گسیختگی شده (به زبان ساده تجهیز از زمین جا خواهد ماند) و دارای یک تغییر مکان متفاوت با زمین خواهد شد (این تغییر مکان در مورد ترانس 230KV پست بم حدود 40cm و در مورد زلزله منجیل در همین حدود بوده است) این تغییر مکان باعث ایجاد تخریب زیاد در قسمت حجیم نخواهد گردید. ولی باعث



بوشینگ 550KV قبل از تست زلزله در دانشگاه برکلی

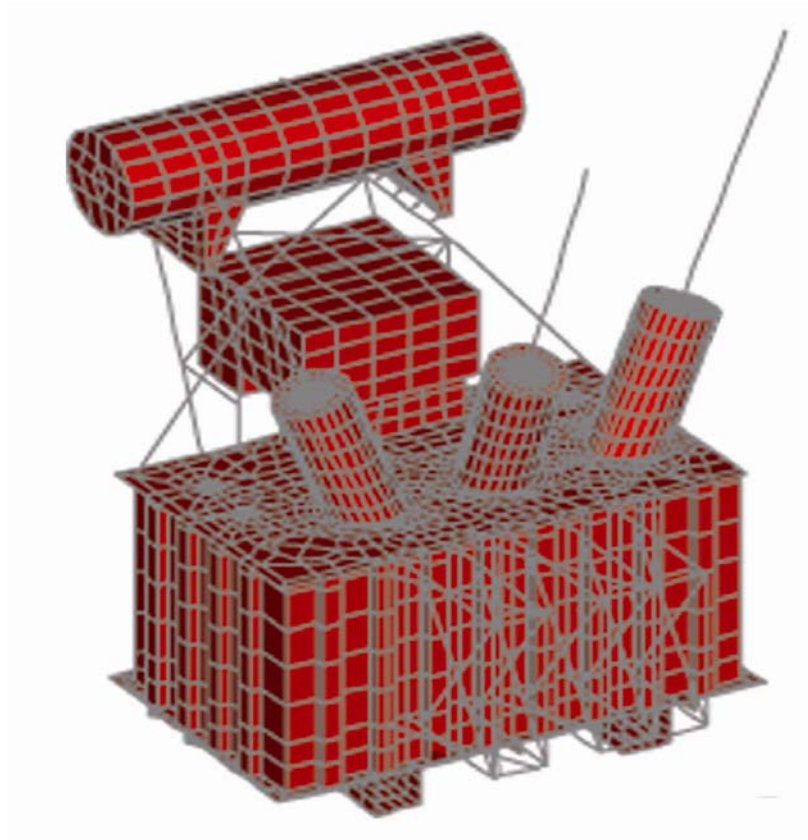


۳ تست بوشینگ توسط USACERL طبق ضوابط IEEE693

- نشست روغن
 - لغزش قسمت چینی
 - خارج شدن گاسکت
 - ترک خوردن قسمت چینی (در موارد معدود)
- انتخاب طیف زلزله در اینجا اهمیت خاصی داشته و در صورت برخورد صحیح با محتوای فرکانسی و شتاب زلزله (و اتصال صحیح به فونداسیون) پوشینگها در غالب موارد زلزله را تاب خواهند آورد .
در این صورت خرابی پوشینگها به یکی از اشکال زیر خواهد بود.



در این آزمایش دینامیک کشش تجهیز پس از کابل قطع شده و سپس با اندازه گیری تغییر مکانها خصوصیات دینامیکی آن کمی میشود.



متمرکز (LUMPEDMASS) به روشن شدن رفتار تجهیز و ترکیب سازه و تجهیز کمک بسیار زیادی می نمایند. آنالیزهای ساده ای که به روش جرم متمرکز برای تجهیزات فشار قوی توسط مولف انجام شده با تحلیل‌های آلمان محدود، حدود ۱۵٪-۱۰٪ متفاوت بوده است.

۳- جداسازی لرزه ای ۵، ۴، ۸

علی رغم تمام تمهیدات فوق ، در مواردی زلزله باعث شکست قسمت چینی تجهیزات خواهد شد (مثلا در بعضی موارد (TOP CORE C.T.) سازندگانی که با این موارد روبرو گشته اند ، با استفاده از تکنیک جداسازی لرزه ای ، استفاده از میراگر و کنترل ارتعاش فعال ACTIVE VIBRATION CONTROL) با این پدیده برخورد نموده اند . به عنوان مثال شرکت بالتو که عمده فعالیت آن در کشورهای اروپایی بوده است در فروش TOP CORE C.T. به کشورهای زلزله خیز دچار مشکل گردید ، زیرا آنها در زلزله رفتار مناسبی

در شکل فوق مدل آلمان محدود یک ترانس مشاهده میشود که توسط مشاورین AC CONSULTING GROUP برای بررسی رفتار ترانس در زلزله استفاده میشود (البته مشاورین دیگر از مدل‌های اغلب ساده تری استفاده می نمایند). از مدل‌های آلمان محدود میتوان برای بررسی رفتار انواع تجهیزات برقی در زلزله استفاده نمود . نکته مهم در این مدلسازیها ابعاد ، مدلسازی اتصالات و خصوصیات مکانیکی قسمت چینی می باشد. ابعاد قسمتهای مختلف تجهیز را میتوان از کاتالوگ مربوطه استخراج نمود ولی خصوصیات قسمتهای چینی (مانند E) میبایست از کارخانه سازنده درخواست شود زیرا خصوصیات مکانیک شدیداً تابع ترکیبات به کار رفته در ساخت چینی و روش ساخت میباشد. علاوه بر این مدول الاستیسیته چینی غیرخطی بوده (مانند بتن) و کارخانجات معمولاً یک E معادل را ارائه میدهند که رفتار دینامیکی تجهیز را در یک محدوده تنش به منصف ظهور میرساند. با در نظر گرفتن موارد فوق ، مدل‌های ساده جرم

منجر میشود که تعمیم آن برای به حالت‌های دیگر و یا استخراج فرمول‌های ساده از آن بسیار مشکل است. با ترکیب تئوری، مدل‌های عددی، مراجع و تجربه استخراج فرمول‌های ساده ای برای طراحی بهینه پستها کاملاً ممکن بوده و در بسیاری از مراجع انتهایی مقاله این فرمول‌ها ارائه گردیده اند ولی با توجه به گستردگی موضوع ارائه تمام این فرمول‌ها و ضوابط در حوصله یک کنفرانس نمی باشد.

از طرف دیگر کاملاً واضح است که مدلسازی عددی یک پست و یا قسمتی از آن بسیار وقت گیر و حتی غیر ممکن است، بخصوص آنکه مدلسازی نقاط اتصال کابل و شینه به تجهیزات، با توجه به تنوع آنها و مشخص نبودن تمامی آنها در مراحل طراحی اولیه روش فوق را تقریباً غیر ممکن میسازد. لذا تا زمانی که چنین ضوابطی در ایران برای شرایط خاص این کشور تهیه نشده است، گنجاندن قسمتهایی از ضوابط نشریات

Peer (Pacific Earthquake Engineering Research center), USACE (United States Army Corps of Engineers), IEEE

در مشخصات فنی مناقصات پستهای فشار قوی آتی تنها راه حل میباشد. پستهای فشار قوی موجود نیز با افزایش شکم کابلها (در صورتیکه منجر به تخطی از فواصل مجاز نشود) و اتصالات U شکل برای نقاط اتصال شینه ها تا حد زیادی در برابر زلزله مقاوم خواهند گردید، هر چند در بسیاری از کشورها از انواع سیستم جداسازی لرزه ای و میراساز استفاده گردیده است. برای ترانسها از نوع "پاندول اصطکاکی" و تجهیزات از نوع "میراساز ویسکوز" استفاده شده است که با توجه به قیمت بالا و پیچیدگی اجرا به نظر نگارنده مناسب نمیرسد.

بدین ترتیب مشاهده میشود که با اجرای یک برنامه عمدتاً تحقیقاتی و تئوریک میتوان به راه‌های مناسب برای افزایش ضریب اطمینان این شریانهای حیاتی در مقابل زلزله دست یافت.

نداشتند. از یک طرف تغییر خط تولید برای بازار کشورهای زلزله خیز اقتصادی نبود و از طرف دیگر چشم پوشی از این بازار نیز امکانپذیر نبود. لذا با نصب میراگرهایی در زیر این C.T و افزایش میرایی آنها، از شکست آنها در زلزله جلوگیری کرد، هر چند این روش جدید بوده و در موارد معدودی به کار گرفته شده است.

۴- رفتار رله ها

رله های مکانیکی دارای اجزای متحرکی هستند که تکانهای زلزله عملکرد آنها را دچار اختلال ساخته و زمان عکس العمل آنها دچار اختلال می سازد. IEEE برای بررسی لرزه ای رله ها مشخصاتی ارائه نموده است که در صورت ارضای این مشخصات و آزمایشات آنها را در زلزله موثر میدانند، لذا رله هایی که این ضوابط را ارضاء نمایند، در زلزله عملکرد مناسبی نداشته و تاثیر چندانی در قطع جریان اتصال کوتاه به هنگام زلزله نخواهند داشت.

۵- نتیجه گیری

با توجه به موارد عنوان شده می توان دریافت که در طراحی لرزه ای پستها توجه مهندسین به ارزان قیمت ترین قسمتهای پست (سازه های فلزی) معطوف بوده و به قسمتهای گران قیمت (تجهیزات الکتریکی) توجه کافی مبذول نگردیده و رفتار پستها در زلزله های گذشته نیز مؤید این امر است.

برای پیشگیری از خسارتهای احتمالی آتی و توجه کافی به قسمتهای الکتریکی یک درک عمیق از رفتار تجهیزات پستهای فشارقوی در زلزله با در نظر گرفتن اتصالات بین آنها کاملاً ضروری است. این درک عمیق جز با اشراف کامل به تئوریهای مربوط و تطبیق آن با مدل‌های عددی و مراجع بین المللی و تجربیات گذشته حاصل نخواهد گردید. روش متداول در دفاتر مهندسی استفاده صرف از مدل‌های عددی و عدم استفاده از سایر عناصر فوق الذکر است. با توجه به حجم بالای اطلاعات این مدلها، نتیجه گیری از آنها بسیار مشکل بوده و معمولاً به نتیجه ای فقط برای یک حالت خاص

References:

- 1- Derkiureghian ,Hong, sakman "seismic interaction in cable connected electrical substation equipment"
- 2- Derkiureghion song sack man "Reducing the effect of interaction between electrical substation equipment connected by rigid bus"
- 3- USACE "Fragility testing of power transformer bushing"
- 4- Saadegh vaziri, Fang "Experimental and analytical study of base- isolation for electric power equipments"
- 5- Skinner, Robinson , Mc Very" An introduction to seismic isolation"
- 6- Gilani, Whitaker, Fences, Fujisaki "Seismic evaluating of 550kv porcelain transformer bushings"
- 7- Villa Verde, Paradoen ,Carnalla "Ground motion amplification at base of bushings mounted on electric substation transformers"
- 8- Filiatrout, Matt, "Seismic response of voltage transformers"
- 9- Filliatrout, kremmidos, Elganal, Sieble "Substation equipment interaction & flexible conductor studies"