

Comparative Study on Seismic Code of the Disconnect Switch between Chinese and American Standard

Binxia Yuan¹, Quanjun Zhu², Dongsheng Xie³, Yangchun Xia¹, Jianxing Ren¹

¹College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai

²Global Energy Internet Research Institute, Beijing

³Economic and Technology Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan Shanxi
Email: yuanbinxia100@163.com, zhqj@geiri.sgcc.com.cn, xiedongsheng@sx.sgcc.com, 1984067447@qq.com, ren608@163.com

Received: Jan. 21st, 2017; accepted: Feb. 3rd, 2017; published: Feb. 10th, 2017

Abstract

In order to study the applicability of Chinese code for seismic design of electrical equipment, we comparatively analyze the seismic performance goal and level of electrical equipment between Chinese and American standard. As a case study of disconnect and grounding switch, its operation requirements, assessment method, assess steps, design requirement and more are expounded. Through the analysis and study of substation seismic fortification standards, this paper puts forward related suggestions on the revision of our country's seismic design of electrical equipment.

Keywords

Electrical Equipment, Seismic Code, Disconnect Switch, Grounding Switch

中美变电站隔离开关抗震设防规范的研究

袁斌霞¹, 朱全军², 谢东升³, 夏阳春¹, 任建兴¹

¹上海电力学院能源与机械工程学院, 上海

²全球能源互联网研究院, 北京

³国网山西省电力公司经济技术研究院, 山西 太原

Email: yuanbinxia100@163.com, zhqj@geiri.sgcc.com.cn, xiedongsheng@sx.sgcc.com, 1984067447@qq.com, ren608@163.com

收稿日期: 2017年1月21日; 录用日期: 2017年2月3日; 发布日期: 2017年2月10日

摘要

为研究我国电力设备抗震设计规范的适用性，通过研究中美电气设备的抗震设防标准，对比分析了电气设备的分类、设防目标、设防水准等方面之间的差异，提出了我国相关规范的特点。并以隔离开关和接地开关为例，阐述了它的操作要求、评定方法、评定步骤、设计要求和报告内容等。通过美国变电站抗震设防标准的分析研究，借鉴其先进的抗震设计理论，提出了修订我国电气设备抗震设计的建议。

关键词

变电站电气设备，抗震规范，隔离开关，接地开关

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震会造成变电站中电气设备的严重破坏，例如，在汶川地震中，40 台以上变压器发生套管漏油、脱轨等，35 台断路器发生了倾倒，21 组隔离开关出现损坏等情况。电气设备的破坏，不仅造成了巨大的经济损失，而且还影响着抗震救灾工作和国民经济的发展。因此，通过对比研究中美电气设备的抗震设计规范，评价我国电气设备的抗震设防标准的设防水平，对提高我国电气设备的抗震规范，具有十分重要的作用。

1971 年，美国加州 San Fernando 发生地震，造成变电站电气设备损坏严重。1984 年，美国电气与电子工程师协会(IEEE)制定了《变电站抗震设计推荐规程》(IEEE Std 693-1984)。此后，发展到 IEEE Std 693-1997，现行的是 IEEE Std 693-2005 [1]。1976 年，我国唐山发生地震，推动了我国抗震规范的编制。1996 年，我国颁布了强制性国家标准《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-96)。2008 年发生汶川地震后，我国吸取相关经验教训，对 GB 50260 进行了修订，实施了新标准 GB 50260-2013 [2]。

尤红兵等介绍了美国 IEEE Std 693-2005 中电气设备的抗震设防标准[3]；解琦等分析了日中美抗震规范在电气设备动力反应放大效应、法兰 - 瓷套管连接和电气设施振动台试验等方面的不同特点[4]。尤红兵等对比分析了中外电气设备抗震设防标准，从设防目标、设防水准、抗震设计反应谱等方面进行比较 [5]。钟珉等对比研究了中外电气设备设防水准的不同，提出改进我国规范的建议[6] [7]。但上述研究中对中外电气设备的抗震规范的对比研究还不够完善。

本文通过中美电气设备的抗震标准的对比，比较电气设备的分类、设防目标、设防水准等方面之间的差异，指出我国规范的不足。美国标准对 14 种电气设备都进行了详细的规定，并以隔离开关和接地开关为例，详细阐述了其设计规范标准，提出改进我国电气设备的抗震标准的相关建议。

2. 中美电气设备抗震设防相关标准及规范的对比分析

2.1. 电气设备的分类

美国抗震设防标准对电气设备没有明确区分。我国电气设备分为重要和一般电气设备。符合下列条款之一者为重要电力设备：

- (1) 单机容量为 300 MW 及以上或规划容量为 800 MW 及以上的火力发电厂；

- (2) 停电会造成重要设备严重破坏或危及人身安全的了矿企业的自备电厂；
- (3) 设计容量为 750 MW 及以上的水力发电厂；
- (4) 220 kV 枢纽变电站，330 kV~750 kV 变电站，330 kV 及以上换流站，500 kV~750 kV 线路大跨越塔，±400 kV 及以上线路大跨越塔；
- (5) 不得中断的电力系统的通信设施；
- (6) 经主管部(委)批准的，在地震时必须保障正常供电的其他重要电力设施。其余为一般电力设施。

2.2. 设防目标

我国和美国电气设备均采用两级设防。

GB 50260-2013 规定[2]：对于我国一般电气设备，设防目标为“中震不坏”、“大震可修”，即当遭受到相当于本地区抗震设防烈度及以下的地震影响时，不应损坏，仍可继续使用；当遭受到高于本地区抗震设防烈度相应的罕遇地震影响时，不应严重损坏，经修理后即可恢复使用。对于变电站重要的电气设备，按设防烈度提高 1 度进行设防，即“大震不坏”；但抗震设防烈度为 9 度及以上时不再提高。

美国 IEEE Std 693-2005 规定[1]：当遭遇给定水平的 RRS(需求响应谱(Required Response Spectra, 简称 RRS))地震时，设备完全无损坏，能继续运行；当遭遇给定水平的 PL(抗震性能水平(Performance Levels, 简称 PL))地震时，设备稍微损坏，大部分设备能继续运行。

2.3. 设防水准

根据电力设施抗震设计规范(GB 50260-2013)和中国地震动参数区划分图(GB 18306-2015) [8]。一般情况下，我国取 50 年超越概率 10% 的地震烈度。多遇地震取 50 年超越概率 63% 的地震烈度。罕遇地震取 50 年超越概率 2% 的地震烈度。极罕遇地震取年超越概率为 10^{-4} 的地震烈度。

美国 IEEE Std 693-2005 根据工程场地 50 年超越概率 2% 的 PGA 决定低、中、高抗震水平。

2.3.1. 设计基本地震加速度

在我国，设计基本地震加速度值是指 50 年设计基准期超越概率 10% 的地震加速度设计取值。在我国抗震设计标准中，通过场地调整系数来确定不同场地的加速度[8] [9] [10] [11]。我国以 II 类场地为主， I_0 、 I_1 、III、IV 场地的设计基本地震加速度 a 可根据 II 类场地的设计基本地震加速度 a_{II} 和场地调整系数 F_a 调整，按(1-1)确定。不同场地对应的设计基本地震加速度均不同，如表 1 所示。

$$a = F_a \times a_{II} \quad (1-1)$$

而在美国规范中，当地震发生时，场地变形，要考虑场地与结构的相互作用(soil-structure interaction, SSI)。在设备 - 地基 - 场地系统的动态性质中，场地 - 地基系统可能成为一个非常重要的部分，可能增加或者减小设备的移动。SSI 的发生与连接设备的重量和大小、地基类型、场地属性等都有一定的关系。变压器是容易发生 SSI 作用的。变压器的摇摆运动可能引起设备加速度和组件位移的增加，如套管、避雷针。

可见，美国根据场地 - 地基的交互作用，不仅要考虑场地性质，还要考虑相关的连接设备和地基类型等因素。与美国相比，我国场地影响因素仅根据不同基本地震加速度考虑了不同场地的影响。因此，应更加全面考虑场地调整系数，提高设备抗震能力。

当采用地震烈度为地震危险性的衡量尺度时，可根据表 2 确定地震烈度与 II 类场地的设计基本地震加速度的关系。

美国 IEEE Std 693-2005 根据工程场地 50 年超越概率 2% 的 PGA 决定低、中、高抗震水平。高、中、低三个基本抗震考核水平(RRS)，加速度峰值分别为 0.5 g、0.25 g、0.1 g；以及高、中二个抗震性能水平(PL)，加速度峰值分别为 1.0 g、0.5 g，是相应 RRS 的 2 倍。

与美国标准相比较, 如表 3 所示。我国基本地震加速度明显低于设计值, 我国 6 度和 7 度区设计基本加速度明显低于美国 0.25 g。9 度提高到 0.4 g 以上, 接近美国规范(0.5 g)的取值。我国 6 和 7 度区的面积较大, 电气设备抗震设防水准应再适当提高。

2.3.2. 特征周期

我国标准中, 特征周期是指标准化的反应谱曲线开始下降点所对应的周期值。按罕遇地震计算时, 特征周期增加 0.05 s。不同场地的特征周期如表 4 所示。

特征周期大, 结构总水平地震作用越大, 即结构所受水平地震作用越大。我国不同场地对应的特征周期不同, 对于 III 类和 II 类以下的场地, 其特征周期值均小于美国规范; 即我国在抗震设计中, 电气设备所受总水平地震作用较小, 其设计结果偏小。IV 类场地的特征周期接近美国规范。而我国大部分地区

Table 1. The adjustment coefficient in the different fields
表 1. 不同场地的场地调整系数 F_a

II 类场地设计基本地震加速度值(g)	场地类别(g)				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
≤0.05 g	0.72	0.80	1.00	1.30	1.25
0.10 g	0.74	0.82	1.00	1.25	1.20
0.15 g	0.75	0.83	1.00	1.15	1.10
0.20 g	0.76	0.85	1.00	1.00	1.00
0.30 g	0.85	0.95	1.00	1.00	0.95
≥0.40 g	0.90	1.00	1.00	1.00	0.90

Table 2. The relationship between seismic intensity and the maximum horizontal earthquake influence coefficient in site II
表 2. II 类场地的设计基本地震加速度与地震烈度及水平地震影响系数最大值的关系

II 类场地的设计基本地震加速度(g)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
地震烈度	6	7	7	8	8	9
水平地震影响系数最大值	0.125	0.250	0.375	0.500	0.750	1.000

Table 3. The comparison of basic seismic acceleration between Chinese and American Standard
表 3. 中美变电站规范的基本地震加速度的比较

相关规范	6	7	7	8	8	9
GB 50260-2013	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
IEEE Std 693-2005	0.25 g			0.50 g		

Table 4. The characteristic period value
表 4. 特征周期值

规范		场地类别				
		I ₀	I ₁	II	III	IV
GB 50260-2013	第一组	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
	第二组	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75
	第三组	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90
IEEE Std 693-2005		0.91				

是 II 类场地，应加大其抗震设防水准，适当提高其特征周期。

3. 电气设备的抗震设防规范

美国 IEEE Std 693-2005 附录对断路器、隔离开关、变压器等 14 类电气设备的抗震性能的评定作了详细规定，包括：操作要求、评定方法、评定步骤、设计要求、报告内容等。我国 GB 50260-2013 只对所有电气设备进行了一般规定、设计方法、抗震计算、抗震试验、电气设施布置等，并没有对具体的设备有详细的设防规范要求。下面以隔离开关和接地开关为例分析了美国和我国的设防规范的特点。

3.1. 隔离开关和接地开关的设防规范

3.1.1. 地震水平

美国设防规范中，地震等级分为三类：高、中、低。对于建在高和中抗震水平的场地，均要求所有电压等级的隔离开关、接地开关，也包括支架结构、操作设备、其它附件满足抗震要求。对于建在低抗震水平的场地，仅仅要求隔离开关满足抗震要求。

我国设防规范中，隔离开关和接地开关作为重要电气设施，当抗震设防烈度为 7 度及以上时，应进行抗震设计。

3.1.2. 操作要求

在地震事件中，美国规范中要求隔离开关、接地开关和支持设备等不能发生破坏或者功能损失，并保持操作过程的正确性。我国规范中没有要求。

3.1.3. 设计方法

美国规范中鉴定方法根据电压等级不同，设计方法也不同，分为四种：(1) ≥ 169 KV 以上，通过时程振动台实验。(2) < 169 KV 且 ≥ 121 KV，采用动力分析方法。(3) < 121 KV 且 ≥ 35 KV，采用静力系数方法。(4) < 35 KV，满足构造要求(inherently acceptable)。

我国主要根据不同电气设施特点，分为四类：(1) 对于基频高于 33 Hz 的刚性电气设施，可采用静力法。(2) 对于以剪切变形为主或近似于单质点体系的电气设施，可采用底部剪力法。(3) 除以上两类的电气设施，宜采用振型分解反应谱法。(4) 对于特别不规则或有特殊要求的电气设施，可采用时程分析法进行补充抗震设计。

3.1.4. 评定过程

以美国设防规范为例，对隔离开关和接地开关的评定过程进行了阐述。

测试或分析过程将与隔离开关的开闭状态一起进行。如果包括一个接地开关，在测试或分析过程中，包括隔离开关打开而接地开关关闭、隔离开关和接地开关都打开、隔离开关关闭和接地开关打开三种状态。

(1) 时程振动台测试(Time history shake-table testing)

开关、结构、操作装置和其它相关附件将都装在振动台并进行调整。测试之前，必须核对下正确操作(全开和全闭)。

设备安装和调试完成后，测试过程如下：设备和结构根据相关要求 A.1.2.2 的时程振动测试。主要要求：(a) 为了避免过量试验，在合适范围内，允许试验反应谱 TRS (test response spectrum) 的值比需求反应谱 RRS 的值降低一点。(b) 在所有案例中，应该采用 1.1 Hz 的频率点；根据规定分辨率，从这个起点开始测试其它频率点。最大允许频率点的间隔应满足八分之一的，如 $f_i + 1/n = 21/n$ (f_i 代表第 i 个的频率点， n 代表 1/8 的个数)。

共振频率搜索根据 A.1.2.1 共振频率搜索测试要求，主要包括：(a) 为了搜索设备的共振频率，一个正弦扫描频率搜索应当小于每分钟一个八度范围内，但至少从 1 Hz。振幅应大于 0.05 g。该标准建议采用 0.1 g 的振幅。不需要搜索 33 Hz 以上的频率。(b) 白噪声可以代替正弦扫描使用，它的输入振幅应大于 0.25 g 和测试时间应 T 大于 $8/(f_n \times z)$ ，其中， f_n 是最低固有频率， z 是临界阻尼值的分数。(c) 对于 RRS 测试，共振频率测试搜索应该在测试开始和结束都要进行。初始测试视为了确定测试样品的固有频率，最后的频率搜索测试是用来确定是否发生明显改变。大于 20% 的变化将仅用来一个参数来确定是否存在结构变化和变化的意义。

接地开关、隔离开关和支持设备的关键位置将监测最大位移、最大加速度和最大应力。监测要求应和 A.2.8 一致和以下要求：(a) 在绝缘子的顶部和刀片底部的最大位移。(b) 在绝缘子的顶部、刀片底部和振动台的顶部，水平和垂直最大加速度。(c) 最大应力：瓷绝缘体的基底或者金属终端部件的复合绝缘体、开关手臂铰链的基底和两个相反斜腿的基底；(d) 任何电子设备，例如电动机执行机构，在监测和测试过程应注意中监测继电器反弹和误操作的可能性。

(e) 监测以下不见的关键部分：柱形绝缘子的铸造支架、垂直断路器的铰链、旋转绝缘体的轴承支撑。所有数据应与时间有关，便于对比分析。

(2) 动态测试

测试过程应根据 A.1.3.3 的要求，采用有限元模型。具体要求：(a) 在定义正交轴系统中，有限元模型的模态响应的动态分析应当有三个平移组件和 3 个旋转组件。(b) 为了设备具有正确的动态响应，应当包括足够的模型，以确保得出一个合理的动态响应。一个特定的方向的合理设计应当包含所有模型有效质量的 90% 以上。(c) 在动态测试中，采用 2% 或更小的阻尼值。

(3) 静力系数方法

测试过程应根据 A.1.3.2 的要求。一般情况下，设备的加速度应由 RRS 最大峰值确定，此时阻尼值为 2%。每个组件的地震力等于的设备质量乘以 RRS 最大峰值静态系数。除非特别注明，静态系数的常用值为 1.5，且水平值的 80% 应用在垂直轴上。通过对每个点所受三个正交应力的平方和开根号，并结合所有静载和正常操作应力确定最大的应力点。另外，静态系数 1.0 也可以被用。

(4) 满足构造要求

测试过程应根据 A.1.4 的要求。在设备或支架的重心位置，锚固设备应至少能承受 1.0 倍水平方向和 0.8 倍垂直方向的重量。通过正常操作的最大载荷和静载的合成获得最大应力，该最大的应力应使用在锚固结构的设计。

3.1.5. 验收准则

如果满足以下两点的要求，被认为是满足要求的。

(1) 一般要求：满足 A.2.1 和 A.2.2 的标准。在测试过程中，隔离开关和接地开关应具有正确的操作状态，例如当测试“关闭位置”，在整个测试过程中应一直保持关闭，或当处于“打开位置”，在整个测试过程中应一直保持打开状态。振动台测试，隔离开关或接地开关的设计限制应与测试变形量相一致。对于时程测试，应根据 A.2.3 的要求。对于动态和静态系数分析，应根据 A.2.7 的要求。

(2) 振动试验台测试装备的功能要求

设备应满足 A.2.2.1 的要求。在振动台测试前后，要检查具体设备的功能。如果测试后，设备继续执行其预定功能，认为该测试是可接受的。

为了确保它的功能性，振动试验台的测试开关必须通过以下相关测试：(a) 毫伏降实验(Millivolt drop test)。根据 IEC 129 的规定，振动台测试前后需测试回路电阻。(b) 连续性(Continuity)。在振动测试中当

关闭隔离或接地开关时，必须在主要的隔离开关或者接地回路进行电流连续性监控。(c) 机械操作测试。如果可能，隔离开关和接地开关应该进行开-关-开的操作。需验证正确操作，如全开和全关。所有附件的正确操作和功能也应被验证。应该监测绝缘支持平板、轴、机械联动装置的变形或失效。

当隔离开关放在振动台上时，应该进行毫伏降实验和机械操作测试。

3.1.6. 其他要求

(1) 设计要求：设备、支架、锚固的设计应根据 A.4。

(2) 振动测试报告：这份报告包括两部分，第一部分应包括附件的关键信息；第二部分应包括支持关键信息的详细的信息、图表等。报告、试验、试验计划以及所有的实验结果、计算、地震输出图表等都应符合标准中的抗震要求，并应由在地震测试和电气设备的专家批准和签字确认。

(3) 设备和附件的频率或阻尼修改：需满足 A.7。设备的寿命预定为 30 年。

(4) 地震识别板：应附加到每个装备上。平板应根据 A.8。

4. 结论与建议

(1) 在 GB 50260-2013 标准中，我国的 6 度和 7 度区设计基本加速度明显低于美国 0.25 g。9 度提高到 0.4 g 以上，接近美国规范(0.5 g)的取值。但我国 6 和 7 度区的面积较大，应再适当提高设计基本加速度，加强这类区域电气设备抗震。

(2) 我国场地影响因素仅根据不同基本地震加速度考虑了不同场地的影响，并没有考虑相关的连接设备和地基类型的影响。因此，应进一步加入这些因素，改善场地调整系数，提高设备的抗震能力。

(3) 特征周期大，结构所受水平地震作用越大。我国 III 类和 II 类以下的场地，其特征周期值(0.65-0.20 s)均小于美国规范(0.91 s)，其电气设备所受总水平地震作用较小，设计结果偏小。我国大部分地区是 II 类场地，应适当提高其特征周期，加大其抗震设防水准。

(4) 我国 GB 50260-2013 只对所有电气设备进行了一般规定、设计方法、抗震计算、抗震试验、电气设施布置等，比较笼统，并没有对具体的设备有详细的设防规范要求，应更加详细列出重要电气设备的抗震规范要求。另外，美国标准对核电站也进行专门规定，而我国这块相关规定还很缺乏。

(5) 以隔离开关和接地开关为例，在美国设防规范中，对于建在高和中抗震水平(相当于我国 6 度以上)的场地，均要求所有开关和附件都要满足抗震设计要求；在我国设防规范中，当抗震设防烈度为 7 度及以上时，应进行抗震设计。可见，应适当提高 6 度区的抗震设计要求。

(6) 美国规范中根据电压等级不同评定方法也不同，包括时程振动台实验、动力分析方法、静力系数方法、满足构造要求。而我国主要根据不同电气设施特点，可分别采用静力法、振型分解反应谱法、采用时程分析法进行补充抗震设计。但对隔离开关等没有具体说明。

基金项目

国家电网科技项目(SGRI-WD-71-15-010)。

参考文献 (References)

- [1] IEEE (2005) Recommended Practice for Seismic Design of Substations. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE Std. 693-2005). USA.
- [2] 中华人民共和国国家标准. 电力设施抗震设计规范(GB 50260-2013) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [3] 尤红兵, 赵凤新, 刘锡荟. 美国《变电站抗震设计推荐规程》评介[J]. 电力建设, 2009, 30(6): 43-47.
- [4] 解琦, 郝际平, 张文强, 丁媛媛, 林山, 张玉明. 日中美抗震规范中电气设备抗震设计研究[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 188-193.

-
- [5] 尤红兵, 赵凤新. 中外电气设备抗震设防标准对比分析[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(1): 40-51.
- [6] 钟珉, 程永锋, 代泽兵, 房正刚. 变电站电气设备分级抗震设防原则研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 571-575.
- [7] 钟珉, 房正刚. 电气设备抗震设防水准研究[J]. 电工电气, 2013(10): 54-58.
- [8] 中华人民共和国国家标准. 中国地震动参数区划图(GB 18306-2015) [S]. 北京: 地震出版社, 2015.
- [9] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范(GB 50011-2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 中华人民共和国电力行业标准. 电力工程场地地震安全性评价规程(DL/T 5494-2014) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [11] 中华人民共和国国家标准. 工程场地地震安全性评价(GB 17741-2005) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org