

# 中外电气设备抗震设防标准对比分析<sup>1</sup>

尤红兵 赵凤新

(中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

**摘要** 对比分析国内外电气设备的抗震设防标准, 对提高我国电气设备的抗震能力和相关规范的修订具有十分重要的意义。在简要介绍目前美国、日本、IEC 系列标准及我国电气设备相关规范的基本情况, 从抗震设防目标、设防水准、抗震设计反应谱等方面对比分析了电气设备抗震设防标准之间的差异, 指出了我国相关规范的优缺点。通过借鉴国外电气设备抗震设防标准确定的经验, 提出了改进我国电气设备抗震设防及规范修订的建议。

**关键词:** 电气设备 抗震设防标准 对比分析 改进建议

## 引言

近年来发生的破坏性地震再次表明电气设备具有较高的地震易损性(于永清等, 2008)。为减轻地震损失, 及时吸收新的研究成果和经验教训, 各国不断修订电气设备相关抗震设计规范或标准。对比分析国内外电气设备的抗震设防标准, 对提高我国电气设备的抗震能力和相关规范的修订具有十分重要的意义。

美国《变电站抗震设计推荐规程》(IEEE, 2005)从 IEEE Std 693-1984 发展到 IEEE Std 693-1997, 现行的是 IEEE Std 693-2005, 目前新的修订工作正在进行。美国的地震环境与我国相似, IEEE Std 693 对我国相关规范的修订具有重要借鉴意义。日本《电气设备抗震设计指南》(日本电气技术规格委员会, 2010)从 JEAG 5003-1980 发展到 JEAG 5003-1998, 现行的是 JEAG 5003-2010。同时, 国际电工委员会也在不断推出新的 IEC 相关标准, 并被我国引入成为国家标准。汶川地震推动了我国电气设备相关抗震规范的编制, 新修订了国家标准《高压开关设备和控制设备的抗震要求(GB/T 13540-2009)》(中华人民共和国国家标准, 2009)及《工业企业电气设备抗震设计规范(GB 50556-2010)》(中华人民共和国国家标准, 2010a), 《电力设施抗震设计规范(GB 50260-201X)》(报批稿)也已修订完成。

Takhirova 等(2009)、尤红兵等(2009)分别介绍了美国 IEEE Std 693-2005 中电气设备的抗震设防标准; Eric Fujisaki(2009)比较了 IEEE Std 693-2005 和 IEC 62271-300 在变电站电气设备抗震设计中的差异; Ji Ye 等(2010)对日中美抗震规范中的荷载组合进行了参数分析; Lu Zhicheng 等(2010)研究了支架的动力放大系数, 并与日中规范进行了对比; 解琦等

**1 基金项目** 地震科技星火计划专项(编号: XH12063)及地震行业科研专项(200708034, 200908011)联合资助

**[收稿日期]** 2012-10-20

**[作者简介]** 尤红兵, 男, 生于1970年。副研究员。主要研究领域: 地震工程。E-mail: hbyou@126.com

(2009) 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, 提出了我国规范的改进建议。但上述研究在电气设备的抗震设防目标、设防水准、抗震设计反应谱等方面对我国相关规范的分析还较少。

本文简要介绍了目前美国、日本、IEC 系列标准及我国相关规范的基本情况, 从抗震设防目标、设防水准、抗震设计反应谱等方面对比分析了电气设备抗震设防标准的差异, 指出了我国规范的不足, 提出了改进我国电气设备抗震设防的建议, 希望尽快提高我国电气设备的抗震能力。

## 1 电气设备抗震设防相关标准及规范

### 1.1 国外相关标准及规范

#### (1) 美国《变电站抗震设计推荐规程》IEEE Std 693-2005

美国电气与电子工程师协会 (IEEE) 于 1984 年制订了《变电站抗震设计推荐规程》IEEE Std 693-1984, 作为美国变电站电气设备抗震设计与性能测试的主要参考文件。现行 IEEE Std 693-2005 主要内容包括: 总论、依据、定义、基本说明、安装考虑、评定方法、设计考虑、电气设备抗震性能标准等。给出了变电站抗震设计的最低要求, 适用于变电站电气设备及其支撑结构的抗震设计与性能测试。

#### (2) 日本《电气设备抗震设计指南》JEAG 5003-2010

日本电气协会 2010 年制定了《电气设备抗震设计指南》JEAG5003-2010, 作为电气设备抗震设计与性能测试的主要文件。《电气设备抗震设计指南》第一章为总则, 内容包括目的、适用范围、相关法规等。第二章为抗震设计, 讨论对象包括室外、室内电气设备与变压器、其它设备等。“参考资料 I” 提供了正文部分所规定的设计条件和进行标准设计的方法, 并提供了设计实例。“参考资料 II” 整理了地基和基础的抗震设计和评价方法。最后有 10 项附录, 其中附录五为日本近年来 16 个主要地震与所致电力系统震害的详细数据, 参考价值巨大。

#### (3) IEC 系列标准

IEC (International Electrotechnical Commission) 成立于 1906 年, 是世界上最早的国际性电工标准化机构, 负责有关电工、电子领域的国际标准化工作。IEC 的工作领域包括了电力、电子、电信和原子能方面的电工技术。现已制订国际电工标准 3000 多个, IEC 系列标准主要应用于欧洲各国。

与电气设备抗震试验有关的标准主要有: 电工电子产品环境试验—第 3 部分—试验方法 (IEC, 1991)、第 2 部分—振动-时间历程法 (IEC, 1999)、振动 (正弦) (IEC, 2007a) 等。

与高压开关设备和控制设备抗震要求有关的标准主要有: 高压开关设备和控制设备—第 2 部分—额定电压 72.5 kV 及以上的抗震要求 (IEC, 2003)、高压开关设备和控制设备—第 207 部分—额定电压 52 kV 以上的气体绝缘成套开关设备的抗震要求 (IEC, 2007b)、高压开关设备和控制设备—第 300 部分—交流断路器的抗震要求 (IEC, 2006) 等。

### 1.2 国内相关标准及规范

#### (1) 国家标准《电力设施抗震设计规范》GB 50260

1996 年我国颁布实施了强制性国家标准《电力设施抗震设计规范 (GB 50260-96)》(中华人民共和国国家标准, 1996), 主要适用于电力系统的电力设施, 是变电站电气设备抗震设

计的主要依据,对减轻电气设备的地震破坏和损失起到了积极作用。为及时吸收震害经验教训及先进科研成果,《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-201X)(报批稿)已修订完成。

《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-201X)在电气设备抗震设防标准方面的修改主要为:在重要电力设施中增加了 220kV 枢纽变电站和 750kV 变电站;对于重要电气设备,由“按设防烈度提高 1 度,但设防烈度为 8 度及以上不再提高”修改为“按设防烈度提高 1 度,但设防烈度为 9 度及以上不再提高”;设计反应谱的动力放大系数最大值由 2.25 增大为 2.5;设计反应谱的特征周期与现行《建筑抗震设计规范》一致等。

### (2) 国家标准《工业企业电气设备抗震设计规范》GB 50556-2010

工业企业电气设备在地震中一旦破坏,将导致巨大的经济损失,并可能引发火灾、爆炸等严重次生灾害。为减轻工业企业电气设备地震破坏和损失,避免人员伤亡,2010 年制定了国家标准《工业企业电气设备抗震设计规范(GB 50556-2010)》(中华人民共和国国家标准,2010a)。明确了工业企业电气设备的抗震设防目标、设防标准、设计方法、抗震措施等,是工业企业变配电设备抗震设计的依据。

### (3) 国家标准《高压开关设备和控制设备的抗震要求》GB/T 13540-2009

我国先后引入了一些 IEC 标准,作为国家标准。《高压开关设备和控制设备的抗震要求(GB/T 13540-2009)》(中华人民共和国国家标准,2009)替代了《高压开关设备抗地震性能试验》(GB/T 13540-92),修改主要参考了 IEC 62271-2: 2003、IEC 62271-207: 2007、IEC 62271-300: 2006 等 IEC 系列标准。本标准适用于标称电压 3kV 及以上,频率 50 Hz 及以下的电力系统中运行的户内和户外安装的所有高压开关设备和控制设备,包括其与地面刚性连接的支撑构架。

## 2 抗震设防目标和设防水准

设防目标是指根据设防原则对工程设防要求达到的具体目标。设防水准指在工程设计中如何根据客观的设防环境和已定的设防目标,并考虑社会经济条件来确定采用多大的设防参数,即多大强度的地震作为防御的对象。如我国《建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)》(中华人民共和国国家标准,2010b)采用“小震不坏、中震可修、大震不倒”三级设防目标,相应的设防水准分别为 50 年超越概率 63%、10%、2—3%。为方便比较,表 1 给出了不同规范电气设备的设防目标及设防水准,表 2 给出了不同规范中重要电气设备的设计基本加速度取值。

### 2.1 设防目标

各国规范采用的设防目标略有不同,详见表 1。美国 IEEE693 及我国《电力设施抗震设计规范》中电气设备均采用两级设防。对于我国一般电气设备,设防目标可简称为“中震不坏”、“大震可修”;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”。IEC 系列标准和日本 JEAG 5003 采用了一级设防,要求设备的功能不降低,设防目标对应于“大震可修”。《工业企业电气设备抗震设计规范》也采用了一级设防,设防目标为“中震不坏”;重要电气设备的设计基本加速度提高 0.05g, 0.2g 及以上时不再提高。

电气设备多为含瓷套的细长型设备,在地震中常因瓷套断裂而破坏。瓷套为脆性材料,一旦破坏,将不能继续使用,没有“可修”状态。“可修”是指电气设备中的次要部件或塑性材料产生损坏或变形,经修理后即可恢复使用。因此,对于第二级设防中的“可修”,也需保证瓷套所受应力小于破坏应力,保证其不坏。上述各规范的设防目标在保证瓷套“不坏”方

面是一致的。

美国 IEEE Std 693-2005 规定了基本抗震考核水平，给出了相应的需求响应谱（Required Response Spectra，简称 RRS），也称为 RRS 考核水平。要求在 RRS 考核下瓷套的应力小于破坏应力的 50%，当地震作用增大一倍，即抗震性能水平（Performance Levels，简称 PL）时，瓷套的应力小于破坏应力。在 RRS 水平下取 2.0 的安全系数，可预期保证在 PL 时瓷套不坏，结合其他措施，达到“可修”的设防目标。

《电力设施抗震设计规范（GB 50260-96）》及报批稿（GB 50260-201X）在地震作用、强度验算等方面给出了具体要求，可保证第一级设防目标“不坏”的实现。但规范没有给出实现“可修”的具体措施，导致第二级设防目标不易实现，这是该规范在抗震设防方面的不足之处。如有些瓷套在中震时，可确保设备“不坏”；但在大震时，不能保证瓷套不破坏，“可修”的目标则不能实现。在中震时规范给出的安全系数为 1.67，只是考虑电瓷产品破坏应力的离散性及脆性破坏，并没有考虑“大震可修”的设防目标。可参考美国 IEEE Std 693 的相关规定，通过增大安全系数，明确瓷套破坏应力的计算方法，实现“可修”的设防目标。

表 1 抗震设防目标及设防水准比较

Table 1 Comparison of the seismic fortification goal and seismic fortification level

| 标准及规范   |      | 设防目标   | 设防水准  |
|---|------|--|---|
| 美国《变电站抗震设计推荐规程》<br>IEEE Std 693-2005  |      | 当遭遇给定水平的 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 地震时，设备稍微损坏，大部分设备能继续运行。                  | 根据工程场地 50 年超越概率 2% 的 PGA 决定低、中、高抗震水平。   |
| GB/T 13540-2009<br>IEC 62271-2-2003<br>IEC 62271-300-2006<br>IEC 62271-207-2007 |      | 主回路、控制和辅助回路包括相关的安装构架不应出现故障。只要不降低设备的功能，永久的变形是允许的。                                   | 所选择的抗震性能水平应与设施的安装地点地震时最大地面运动相一致。这一水平对应于 S2 级地震。                                     |
| 日本 JEAG 5003-2010   |      | 电气设备功能无异常现象发生  | 正弦共振三波 0.3g（电瓷型设备）、0.5g（变压器）  |
| 《电力设施抗震设计规范》<br>GB 50260-96   | 一般设备 | 当遭受到相当于设防烈度及以下的地震影响时，不受损坏，仍可继续使用；当遭受到高于设防烈度预估的罕遇地震影响时，不致严重损坏，经修理后即可恢复使用。           | 设防地震：50 年超越概率 10%<br>罕遇地震：50 年超越概率 2-3%   |
|   | 重要设备 |  | 按设防烈度提高 1 度，但设防烈度为 8 度及以上不再提高。  |
| 《电力设施抗震设计规范》<br>GB 50260-201X<br>(报批稿)  | 一般设备 | 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，不受损坏，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，不致严重损坏，经修理后即可恢复使用。 | 设防地震：50 年超越概率 10%<br>罕遇地震：50 年超越概率 2-3%   |
|   | 重要设备 |  | 按设防烈度提高 1 度，但设防烈度为 9 度及以上不再提高。  |
| 《工业企业电气设备抗震设计规范》<br>GB 50556-2010   | 一般设备 | 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，可不受损坏，可继续使用。   | 设防地震：50 年超越概率 10%   |
|   | 重要设备 |  | 按本地区抗震设防烈度提高一度采取抗震措施，但抗震设防烈度为 9 度时，应按比 9 度更高要求采取抗震措施；设计基本加速度提高 0.05g，0.2g 及以上时不再提高。 |

## 2.2 设防水准

日本规范采用了正弦三波 0.3g（电瓷型设备）、0.5g（变压器），其放大系数约为相同峰值加速度时程的 1.3 倍，转换为地震动时程分别为 0.39g（电瓷型设备）、0.65g（变压器）。

美国 IEEE 693-2005 定义了高、中、低三个基本抗震考核水平（RRS），加速度峰值分别为 0.5g、0.25g、0.1g；以及高、中二个抗震性能水平（PL），加速度峰值分别为 1.0g、0.5g，是相应 RRS 的 2 倍。对于 RRS 水平，可根据工程场地 50 年超越概率 2% 的 PGA 值而进行选择：当 PGA 小于 0.1g 时取低等级，介于 0.1g—0.5 g 时取中等级，大于 0.5 g 时取高等级；对于 PL，当 PGA 介于 0.1g—0.5 g 时取中等级，大于 0.5 g 时取高等级。可以看出，IEEE 693 在一个较大的范围内考核水平是就高不就低，抗震设防水准较高。根据我国的地震危险性分析，8 度 0.2g 区 50 年超越概率 2% 的 PGA 一般小于 0.5g，表 2 中按 0.25g 选取；8 度 0.3g 区 50 年超越概率 2% 的 PGA 一般大于 0.5g，按 0.5g 选取。

表 2 不同规范设计加速度取值比较

Table 2 Comparison of the design basic acceleration values for different standards

| 相关规范                |                             | 6 度<br>(0.05g)               | 7 度<br>(0.10g) | 7 度<br>(0.15g) | 8 度<br>(0.20g) | 8 度<br>(0.30g) | ≥9 度<br>(≥0.4g)          |  |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|--|
| 人工<br>合成<br>地震<br>波 | GB 50260-96                 | 0.1g                         | 0.2g           |                | 0.2g           |                | 0.4g                     |  |
|                     | GB 50260-201X               | 0.1g                         | 0.2g           |                | 0.4g           |                | 0.4g                     |  |
|                     | GB 50556-2010               | 0.1g                         | 0.15g          | 0.2g           | 0.2g           | 0.3g           | 0.4g                     |  |
|                     | IEEE Std 693- 2005          | 0.25g                        |                |                |                | 0.5g           |                          |  |
|                     | GB/T 13540-2009 及<br>IEC 标准 | 0.2g                         |                |                | 0.3g           |                | 0.3g (9 度)<br>0.5g(>9 度) |  |
| JEAG 5003-2010      |                             | 正弦共振三波 0.3g（电瓷型设备）、0.5g（变压器） |                |                |                |                |                          |  |
| IEEE Std 693- 2005  |                             | 十周拍波（断路器） 0.25g              |                |                |                | 0.5g           |                          |  |
| 五周<br>拍波            | GB 50260-96                 | 0.075g                       | 0.15g          |                | 0.15g          |                | 0.3g                     |  |
|                     | GB50260-201X                | 0.075g                       | 0.15g          |                | 0.3g           |                | 0.3g                     |  |
|                     | GB/T13540-92                | 0.15g                        |                |                |                |                | 0.3g                     |  |

GBT 13540-2009 给出的设防目标（表 1），从文字描述上看其大体相当于 IEEE 693 中 PL 的设防目标；对应的设防水准为 S2 级地震，相当于核电站中的安全停堆地震，这一水平要高于 IEEE 693 中 PL 地震。但 GBT 13540-2009 给出的加速度值（表 2）明显达不到 S2 级地震，有些分区甚至低于 PL 地震。如设防烈度为 7 度时取 0.2g，大体相当于我国 50 年 2% 的超越概率，与 S2 地震（50 年超越概率 0.5%）相差较大，也低于 IEEE 693 给出的 0.25g。对于 8 度 0.3g 区，GBT 13540-2009 标准取 0.3g，在我国相当于 50 年 10% 的超越概率，与 S2 地震的差异更大；而 IEEE 693-2005 取 0.5g，也明显高于 IEC 标准。可以看出，GBT 13540-2009 标准没有很好地结合我国的地震情况，给出的设防水准和加速度取值不一致，加速度取值偏低。

《电力设施抗震设计规范》报批稿（GB 50260-201X）6 度区设计基本加速度为 0.1g，明显低于美国、日本规范的取值。8 度 0.2g 区提高到 0.4g，高于美国、日本规范的取值，抗震

设防水准大约相对于 50 年超越概率 2%，基本符合我国国情。我国 6 度区的面积较大，电气设备抗震设防水准应再适当提高。

《工业企业电气设备抗震设计规范（GB 50556-2010）》中重要电气设备的设计基本加速度提高 0.05g, 0.2g 及以上时不再提高，设防水准低于其他规范，尤其是高烈度区。由于工业企业电气设备在地震中一旦破坏，可引起火灾、爆炸等严重次生灾害。与其他规范相比，应适当提高工业企业电气设备的抗震设防水准。

### 3 抗震设计反应谱

抗震设计反应谱是电气设备抗震设计的主要依据，对设计地震动输入影响最大的参数是动力放大系数最大值  $\beta_{\max}$  和特征周期  $T_g$ 。

#### 3.1 动力放大系数最大值 $\beta_{\max}$

我国规范的设计谱一般采用动力放大系数的形式，并采用统一的阻尼比 5%。动力放大系数最大值应根据强震记录的统计分析 & 经济条件综合确定。《中国地震动参数区划图》宣贯教材指出反应谱平台段放大系数的优势分布为 2.5，周锡元等（1984）、张皎（2008）、毛天尔等（2012）对强震记录进行了统计分析，也认为  $\beta_{\max}$  应取 2.5。目前，美国、欧洲、台湾等较发达国家或地区相关规范的动力放大系数最大值均为 2.5。

在编制 1974 年的抗震设计规范时，动力放大系数最大值取为 2.25，综合反映了我国当时的国情，因经济原因将 2.5 降低了 10%。现行《建筑抗震设计规范（GB 50011-2010）》、《电力设施抗震设计规范（GB 50260-96）》及其他规范的动力放大系数  $\beta_{\max}$  均沿用了这一结果，近 40 年来一直未变。但随着我国经济的快速发展，我国规范中动力放大系数最大值理应调整为 2.5。

对于电气设备的抗震设计，不同规范的动力放大系数最大值比较见表 3。当阻尼比为 5% 时，美国《变电站抗震设计推荐规程》（IEEE Std 693-2005）中动力系数最大值  $\beta_{\max}$  采用 2.5。新修订的《电力设施抗震设计规范》（GB 50260-201X）为与新一代区划图衔接， $\beta_{\max}$  也采用 2.5，并且其他阻尼比的  $\beta_{\max}$  与美国 IEEE Std 693-2005 也基本一致。

表 3 不同规范动力放大系数最大值比较

Table 3 Comparison of the maximum dynamic amplification coefficient for different standards

|                 | 阻 尼 比 |      |      |
|-----------------|-------|------|------|
|                 | 2%    | 5%   | 10%  |
| GB/T 13540-2009 | 2.8   | 1.74 | 1.28 |
| GB 50260-96     | 2.99  | 2.25 | 1.68 |
| GB 50556-2010   | 2.82  | 2.25 | 1.76 |
| GB 50260-201X   | 3.17  | 2.5  | 1.98 |
| IEEE 693-2005   | 3.24  | 2.5  | 1.94 |

现行的《工业企业电气设备抗震设计规范（GB 50556-2010）》及《电力设施抗震设计规范（GB 50260-96）》采用 2.25，主要是考虑与我国现行其他规范的衔接。

代表 IEC 标准的《高压开关设备和控制设备的抗震要求（GB/T 13540-2009）》，不同阻尼

比的动力放大系数最大值在各规范中最小。与 IEEE Std 693 相比, GB/T 13540-2009 的  $\beta_{\max}$  分别降低了 13.6% (阻尼比 2%)、30.4% (阻尼比 5%)、34.0% (阻尼比 10%)。

通过对比分析, 建议《工业企业电气设备抗震设计规范》在以后的修订中将  $\beta_{\max}$  调整为 2.5, 《高压开关设备和控制设备的抗震要求》应大幅调整 5% 阻尼比的动力放大系数最大值。

### 3.2 特征周期 $T_g$

特征周期是设计反应谱曲线下降段起点对应的周期值, 我国规范一般是根据场地类别与地震综合效应确定特征周期。对于电气设备的抗震设计, 我国规范与美、日等国外规范对特征周期的规定明显不同, 具体比较见表 4。

为满足电气设备标准化生产要求, 美国 IEEE Std 693-2005 给出的设计反应谱是场地的包络谱, 特征周期为 0.91s (1.1Hz)。对于软土地, 规范建议进行专门研究。

《高压开关设备和控制设备的抗震要求 (GB/T 13540-2009)》及其他 IEC 标准给出的特征周期为 0.42s, 只适用于我国 I 类及 II 类场地。对于较软的 III、IV 类场地, 特征周期取 0.42s 明显偏小。

表 4 不同规范特征周期比较 (单位: s)

Table 4 Comparison of the design characteristic period for different standards (unit: s)

| 规范             | 场地类别           |                |           |           |           |
|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
|                | I <sub>0</sub> | I <sub>1</sub> | II        | III       | IV        |
| GB/T13540-2009 | 0.42           |                |           |           |           |
| GB 50260-96    | 0.2—0.24       |                | 0.25—0.35 | 0.36—0.51 | 0.51—0.65 |
| GB 50556-2010  | 0.25—0.35      |                | 0.35—0.45 | 0.45—0.65 | 0.65—0.90 |
| GB 50260-201X  | 0.20—0.30      | 0.25—0.35      | 0.35—0.45 | 0.45—0.65 | 0.65—0.90 |
| IEEE 693- 2005 | 0.91           |                |           |           |           |

《工业企业电气设备抗震设计规范 (GB 50556-2010)》及《电力设施抗震设计规范》报批稿 (GB 50260-201X) 均采用了《建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010)》给出特征周期。但与国外规范相比较, 在场地类似情况下, 我国的特征周期值偏小约 30% (周锡元等, 1999)。这两个规范没有采用不同类型场地的包络谱, 主要是考虑与现行建筑抗震设计规范的衔接及电气设备支架的设计。由于规范给出的特征周期偏小, 对于自振周期较大的电气设备明显不安全, 同时也不利于电气设备及支架的标准化生产。

《电力设施抗震设计规范 (GB 50260-96)》根据场地指数计算特征周期, 可避免因很小的差异就带来场地类别的差异。但没有考虑震级、距离等对特征周期的影响, 给出的结果偏小。

许多电气设备的自振周期在 0.5s—2.0s 之间, 与地震波的卓越频率接近, 而且设备的阻尼比较小, 动力放大效应很大。如果设计特征周期选择太小, 将无法保证设备的地震安全, 这也是汶川地震中电气设备破坏严重的原因之一 (中国电机工程学会, 2009; 尤红兵等, 2012)。

由于电气设备未来安放地点的不确定及设备标准化生产的要求, 建议我国相关规范借鉴美国 IEEE693, 采用 I—III 类场地的包络谱, 特征周期可根据强震记录的统计及参考相关规范综合确定。

### 3.3 不同规范设计反应谱比较

为便于比较动力放大系数最大值及特征周期的不同对设计反应谱的影响, 选取峰值加速

度均为 0.2g，不同规范不同阻尼比（2%、5%）设计反应谱比较见图 1 所示。II 类场地在我国分布较广，最具代表性，图中 GB 50260-201X、GB 50556-2010 等规范的特征周期取表 4 中 II 类场地对应的最大值。由于电气设备的自振周期一般在 0.2s—1.0s，因此，重点对 0.2s、0.4s、0.6s、0.8s、1.0s 等不同周期点的各规范谱值进行了比较。

《电力设施抗震设计规范》报批稿（GB 50260-201X）与《电力设施抗震设计规范（GB 50260-96）》相比，反应谱谱值明显提高。当阻尼比分别为 2%、5% 时，0.2s—1.0s 间 5 个周期点谱值平均提高了 30.8%、41.7%，主要原因是  $\beta_{\max}$  从 2.25 提高到 2.5，II 类场地的特征周期由 0.35s 增大到 0.45s，修改后的《电力设施抗震设计规范》抗震设防标准明显提高，可有效增强电气设备的抗震能力。但当设备自振周期大于 0.45s 时，GB 50260-201X 设计谱的谱值明显低于美国 IEEE693 的相应谱值。以 2% 阻尼比为例，0.6s 时的谱值分别为 0.52g、0.65g，相差 25%；0.8s 时的谱值分别为 0.4g、0.65g，相差 62.5%。因此，建议《电力设施抗震设计规范》在以后的修订中，根据电气设备的特点及标准化生产的要求，给出不同场地的包络设计反应谱，不能简单照搬《建筑抗震设计规范》给出的设计反应谱。

在各标准中，当峰值加速度相同时，《高压开关设备和控制设备的抗震要求（GB/T 13540-2009）》的设计反应谱平台段的谱值最低。当阻尼比为 2% 时，平台段谱值比其他标准低 3.6%—16.1%；当阻尼比为 5% 时，平台段谱值则比其他标准低 29.4% 或 47.1%。如果采用此标准进行抗震设计或抗震性能考核，电气设备的抗震能力可能被高估。

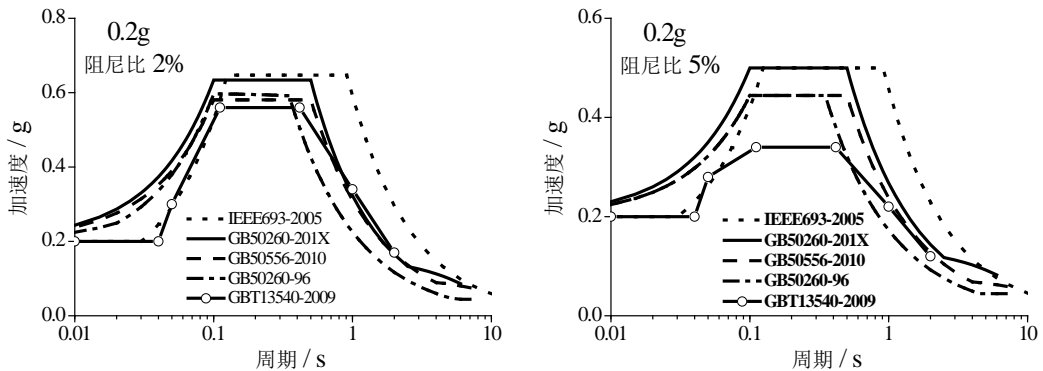


图 1 不同规范设计反应谱比较

Fig. 1 Comparison of the design response spectra for different codes

## 4 电气设备抗震设防标准综合比较

电气设备的抗震设计大多采用容许应力法，安全系数是评定抗震设防标准高低的重要因素之一。电气设备的破坏主要是因为瓷材料的破坏，《电力设施抗震设计规范》GB 50260-201X 中对于瓷套管和瓷绝缘子，地震作用和其它荷载产生的总应力不超过其破坏应力与 1.67 的比值，即安全系数为 1.67。而其他规范的安全系数均为为 2.0，是《电力设施抗震设计规范》的 1.2 倍。根据《电力设施抗震设计规范（GB 50260-96）》，1.67 最初来源于 1980 年制定的《导体和电器选择设计技术规定》（DLGJ 14-80）（试行）。随着经济的发展和电网重要性的提高，应将安全系数提高至 2.0，与其他相关规范协调一致。



根据表 2 中不同规范设计基本加速度的取值, 图 2 分别给出了 6 度 0.05g、7 度 0.1g、8 度 0.2g 区的设计反应谱, 阻尼比分别为 2%、5%。图中 GB 50260-201X、GB 50556-2010 等规范的特征周期取表 4 中 II 类场地对应的最大值。

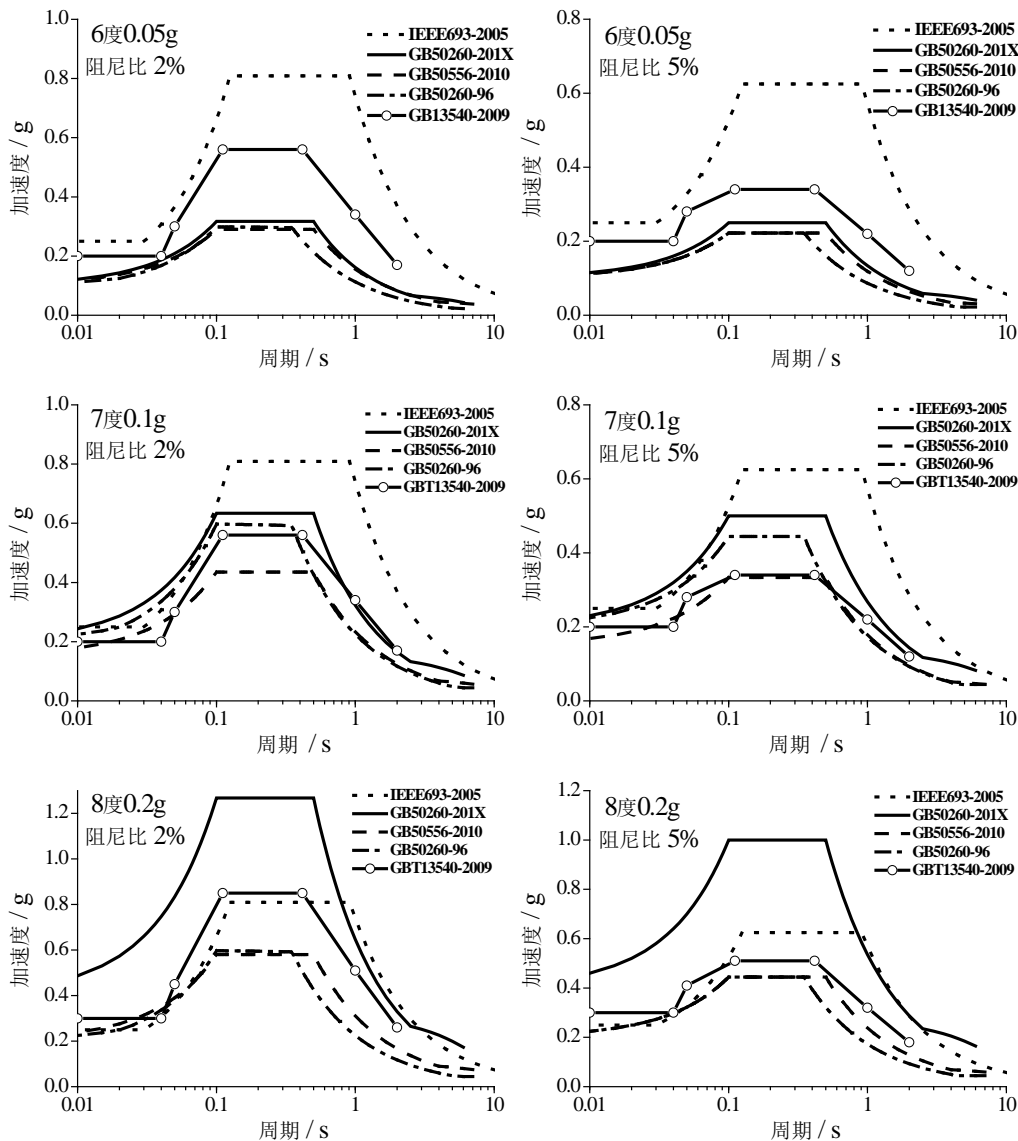


图 2 不同规范设防标准综合比较

Fig. 2 Comparison of the seismic precautionary criteria of different codes

《电力设施抗震设计规范》GB 50260-201X 与 GB 50260-96 相比, 8 度区的设计基本加速度从 0.2g 提高到 0.4g, 增大了一倍。同时,  $\beta_{\max}$  与特征周期也均有所提高, 有效提高了电气设备的抗震设防标准, 对减轻地震损失具有重要意义。

根据《中国地震动参数区划图 (GB 18360-2001)》(中华人民共和国国家标准, 2001), 我国 0.05g 区的城镇为 904 个, 为全国的 37.8%。对于 6 度 0.05g 区, 《电力设施抗震设计规

范》GB 50260-201X 设计谱平台值为 0.317g，虽然高于《工业企业电气设备抗震设计规范（GB 50556-2010）》平台值 0.29g，但安全系数相差 1.2 倍。GB 50260-201X 设计谱平台值将折减为 0.264g，其设防标准要比《工业企业电气设备抗震设计规范》低，对我国分布较多的 0.05g 区电气设备的抗震明显不利。

当阻尼比为 2% 时，对于 6 度 0.05g 区，IEEE693 谱的平台值为 0.809g，是《电力设施抗震设计规范》GB 50260-201X 设计谱平台值 0.317g 的 2.55 倍；对于 7 度 0.1g 区，GB 50260-201X 设计谱平台值为 0.634g，约为 IEEE693 相应谱值的 78.4%；对于 8 度 0.2g 区，GB 50260-201X 设计谱平台值为 1.268g，明显高于 IEEE693 的相应谱值，但周期大于 0.8s 的谱值与 IEEE693 相当。考虑到安全系数，我国《电力设施抗震设计规范》中电气设备的抗震设防标准总体上低于美国 IEEE693。

代表 IEC 标准的《高压开关设备和控制设备的抗震要求（GB/T 13540-2009）》给出的 5% 阻尼比反应谱平台高度明显偏低，不建议采用此标准进行抗震设计或考核。

## 5 结论

简要介绍了目前美国、日本、IEC 系列标准及我国相关规范的基本情况，从抗震设防目标、设防水准、抗震设计反应谱等方面对比分析了电气设备抗震设防标准的差异，指出了我国规范的不足，提出了改进我国电气设备抗震设防的建议，希望尽快提高我国电气设备的抗震能力。

(1) 新修订的《电力设施抗震设计规范》GB 50260-201X 有效提高了电气设备的抗震设防标准，但总体上低于美国、日本的相关标准。

(2) 建议《电力设施抗震设计规范》在以后的修订中，根据电气设备的特点及标准化生产的要求，给出不同场地的包络设计反应谱，并增大安全系数的取值。

(3) 建议提高《电力设施抗震设计规范》中 6 度 0.05g 区电气设备的抗震设防标准。

(4) 《工业企业电气设备抗震设计规范（GB 50556-2010）》的抗震设防水准与其他规范相比略低，建议以后逐步提高。

(5) 《高压开关设备和控制设备的抗震要求（GB/T 13540-2009）》给出的设防水准与加速度取值不一致，加速度取值偏低；并建议提高 5% 阻尼比反应谱的动力放大系数最大值。

## 参考文献

- 毛天尔，曾双双，栾极等，2012. 抗震设计反应谱的动力放大系数. 土木工程与管理学报，**29**（1）：89—92.
- 日本電気技術規格委員会，2010，《电气设备抗震设计指南》（JEAG 5003-2010）. 日本.
- 解琦，郝际平，张文强，2009. 日中美抗震规范中电气设备抗震设计研究. 世界地震工程，**25**（4）：188—193.
- 尤红兵，赵凤新，刘锡荟，2009. 美国《变电站抗震设计推荐规程》评介. 电力建设，**30**（6）：43—47.
- 尤红兵，张郁山，赵凤新，2012. 电气设备振动台试验输入的合理确定. 电网技术，**36**（5）：118—124.
- 于永清，李光范，李鹏等，2008. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析. 电网技术，**32**（11）：1—6.
- 张皎，2008. 场地条件对地震动峰值及衰减关系的影响研究. 北京：北京工业大学.
- 周锡元，王广军，苏经宇，1984. 场地分类和平均反应谱. 岩土工程学报，**6**（5）：59—68.
- 周锡元，樊水荣，1999. 场地分类和设计反应谱的特征周期：《建筑抗震设计规范》修订简介（八）. 工程抗震，（4）：3—8.

- 中华人民共和国国家标准, 1996. 电力设施抗震设计规范 (GB 50260-96). 北京: 中国计划出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2001. 中国地震动参数区划图 (GB 18306-2001). 北京: 地震出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2009. 高压开关设备和控制设备的抗震要求 (GB/T 13540-2009). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2010a. 工业企业电气设备抗震设计规范 (GB 50556-2010). 北京: 中国计划出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2010b. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中国电机工程学会, 2009. 地震对电力设施影响及应对调研报告. 北京: 中国电机工程学会.
- Eric Fujisaki, 2009. Seismic Design Standards for Electric Substation Equipment, TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, 296—307.
- IEC, 1991. Environmental testing. Part 3 Guidance Seismic test methods for equipments (IEC 68-3-3 1991).
- IEC, 1999. Environmental testing –Part 2-57: Tests–Test Ff: Vibration–Time-history method (IEC 60068.2.57) .
- IEC, 2003. High-voltage switchgear and controlgear–Part 2: Seismic qualification for rated voltages of 72.5 kV and above (IEC 62271-2).
- IEC, 2006. High-voltage switchgear and controlgear–Part 300: Seismic qualification of alternating current circuit-breakers (IEC 62271-300).
- IEC, 2007a. Environmental testing–Part 2-6: Tests–Test Fc: Vibration (sinusoidal) (IEC 60068-2-6) .
- IEC, 2007b. High-voltage switchgear and controlgear–Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies for rated voltages above 52 kV (IEC 62271-207).
- IEEE, 2005. Recommended Practice for Seismic Design of Substations. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE Std 693-2005). USA.
- Ji Ye, Zhu Zhubing, Lu Zhicheng, 2010. Research on dynamic amplification factor of 1000kV transformation device supporting structures. 2010 International Conference on Power System Technology, 2129—2133.
- Lu Zhicheng, Dai Zebing, Zhu Zhubing, 2010. Parameter study of load combinations in seismic design for UHV transformation devices. 2010 International Conference on Power System Technology, 2144—2149.
- Takhirov S.M., Gilani A.S.J., 2009. Earthquake Performance of High Voltage Electric Components and New Standards for Seismic Qualification, TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, 274—284.

# Comparative Analysis of Sino-foreign Seismic Precautionary Criteria for Electrical Equipments

You Hongbing and Zhao Fengxin

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

**Abstract** It has great significance to conduct comparative analysis on seismic fortification criteria at home and abroad for improving anti-seismic capacity of the electrical equipments and revising the relevant national standards. A brief overview of American, Japanese, IEC standards and Chinese seismic design codes of the electrical equipments is presented in this paper. The difference among seismic fortification criteria of electrical equipments is analyzed in terms of seismic fortification, seismic fortification level and seismic design spectrum. The advantages and disadvantages of Chinese related standards are pointed out. Through learning from foreign experience about the determination of seismic fortification criteria, improvement of seismic precautionary criteria of electrical equipments and standard revised recommendations are provided.

**Key words:** Electrical equipments; Seismic fortification criteria; Comparative analysis; Suggestions for improvement