程永锋,刘振林,汤华,等.复合外套型特高压交流 CVT 抗震与减震试验研究[J].地震工程学报,2018,40(2):191-197.doi:10. 3969/j.issn.1000-0844.2018.02.191

CHENG Yongfeng, LIU Zhenlin, TANG Hua, et al. Experimental Study on the Seismic Performance of Polymeric-Housed UH-VAC Capacitor Voltage Transformers[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2):191-197.doi:10.3969/j.issn.1000 -0844.2018.02.191

# 复合外套型特高压交流 CVT 抗震与减震试验研究。

程永锋1,刘振林1,汤 华2,卢智成1,马 跃3,邱 宁3,朱祝兵1

(1.中国电力科学研究院,北京 100055; 2.中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北 武汉 430071;

3.国家电网公司交流建设部,北京 100031)

摘要:为研究复合外套型电气设备的抗震性能与安装减震装置后的减震效果,对其进行特高压交流 CVT 地震模拟振动台试验研究,分析设备的动力特性与地震响应。白噪声试验结果表明试验设备 安装减震器后其结构第一阶频率由 1.07 Hz 略降低至 1.04 Hz,即减震装置对结构的整体刚度影响 较小;人工波试验中原结构在地震动峰值加速度 0.2g(PAG=0.2g)抗震试验中设备最大应力与位 移响应为 46.33 MPa 与 349.12 mm,减震结构在 PAG=0.5g 抗震试验中,设备最大应力与位移响 应为 27.64 MPa 与 330.06 mm,设备安装减震装置后抗震性能得到显著提升。试验研究结果可为 复合材料电气设备抗震性能研究与减震装置应用提供参数数据。

关键词:特高压交流 CVT;复合外套;抗震;减震;地震模拟振动台;动力特性;应力;位移 中图分类号:P315.9 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2018)02-0191-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.191

# Experimental Study on the Seismic Performance of Polymeric-Housed UHVAC Capacitor Voltage Transformers

CHENG Yongfeng<sup>1</sup>, LIU Zhenlin<sup>1</sup>, TANG Hua<sup>2</sup>, LU Zhicheng<sup>1</sup>,

MA Yue<sup>3</sup>, QIU Ning<sup>3</sup>, ZHU Zhubing<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;

3. Department of AC Construction of SGCC, Beijing 100031, China)

Abstract: In this paper, the seismic performance of polymeric-housed electrical equipment and the vibration absorption effect of dampers are investigated. To this end, a shaking table test was carried out on a polymeric-housed UHVAC capacitor voltage transformer, and the dynamic characteristics and seismic response of the equipment was analyzed throughout. White noise test results show that the first-order frequency of the equipment slightly reduced from 1.07 to 1.04 Hz after the dampers were mounted, which means that the damping device had a slight influence on the overall stiffness of the structure. The maximum stress and displacement response of the original

① 收稿日期:2017-01-06

基金项目:国家电网公司科技项目(5299001352U7);特高压换流站支柱类电气设备及换流变回路系统抗震性能优化技术研究 作者简介:程永锋(1969-),男,博士,教授级高工,主要从事电力工程地基基础和电网防灾减灾研究工作。 E-mail:m13910096290\_3@163.com。

通信作者:刘振林(1987-),男,硕士,工程师,主要从事电网设施抗震性能研究工作。E-mail:liuzhenlin@epri.sgcc.com.cn。

structure under the input of artificial seismic waves with a peak ground motion acceleration of 0.2g (PAG = 0.2g) were 46.33 MPa and 349.12 mm, respectively. The maximum stress and displacement response of a structure with PAG = 0.5g after damper installation were 27.64 MPa and 330.06 mm, respectively. Based on simplified equivalent analysis, the reduction rates of the maximum stress and displacement are respectively 62.34% and 49.33% when PAG = 0.3g, and 76.14% and 62.18% when PAG = 0.5g. This shows that the seismic performance of equipment greatly improves after damper installation. This research can provide parameter data for seismic performance analysis of composite electrical equipment and the application of damper devices.

Key words: UHVAC CVT; polymeric-housed; seismic resistance; vibration absorption; shaking table; dynamic characteristics; stress; displacement

# 0 引言

电容式电压互感器(Capacitor Voltage Transformer,CVT)是变电站内为测量仪表和继电保护 装置供电,测量线路的电压、功率和电能,或者在线 路发生故障时保护线路中贵重设备、电机和变压器 的重要电气设备。常规特高压交流 CVT 外套为瓷 材料,但在满足电气功能要求时其抗震性能较低,无 法应用于高地震烈度场地内<sup>[1-3]</sup>。近年来随着特高 压电网的快速发展,其电站站址环境条件差别较大, 高海拔、高抗震设防场地的站址对其交流 CVT 在 电气耐污秽性能与抗震性能上提出了更高要求。

硅橡胶是电气设备用复合材料外套的伞裙,主 要提供电气绝缘的性能,其具有较好的憎水性与耐 污性;结构外套为主要提供机械性能的轻质高强纤 维增强复合材料。为提高电气设备的耐污秽能力和 机械力学性能,以适应更复杂环境的变电站站址要 求,国内各主要 CVT 厂家共同研发了复合外套型 特高压交流 CVT。

由于复合材料外套的加工能力有限,现有电气 设备外套最大壁厚可加工至 30 mm(瓷质外套最大 壁厚可加工至 70 mm)。在细高型的电气设备结构 特点下,相较于瓷质外套,复合材料外套作为受力构 件虽然其材料强度得到大幅提升,但整体抗弯刚度 较低,限制了结构形式优化以及设备抗震性能的提 升。而我国电气设备抗震设计规范<sup>[5-6]</sup>中仅对瓷质 电气设备提出了结构强度安全性要求。电气设备外 套采用复合材料后,相较于瓷质材料,其设备结构刚 度减小,导致在地震作用下位移响应较大,这需要在 复合材料电气设备抗震设计中加以注意。

近年来虽然国内外研究机构和学者已对复合材料电气设备开展了抗震性能研究<sup>[7-11]</sup>,但相关研究成果较少,特别是1000 kV 特高压复合材料电气设备的力学相关研究更少。针对复合材料电气设备在

地震作用下的应力与位移响应问题,借鉴瓷质电气 设备减震研究成果<sup>[12-13]</sup>,可采用减震装置加装电气 设备,控制其在地震作用下的总体响应,提高抗震性 能。

本文以复合外套型特高压交流 CVT 为研究对 象,采用振动台试验研究其在地震动水平加速度 0.2g(PAG=0.2g)作用下的动力特性和地震应力 与位移响应规律,并采用减震措施进行了 PAG= 0.5g 抗震试验。试验结果表明安装减震装置后复 合外套型特高压交流 CVT 地震应力与位移响应明 显降低,设备抗震性能显著提升,可为特高压复合材 料电气设备抗震性能评估与减震设计提供数据参 考。

# 1 复合外套型特高压交流 CVT

图 1 为新研发的复合外套型特高压交流 CVT 试验结构照片,设备参数如表 1 所列。该结构单体 高度 10.6 m,总重 2 930 kg(顶部均压环重 180 kg), 共 4 节 2.3 m 高外套管,其中上 2 节外径 378 mm, 壁厚 16.5 mm;下 2 节外径 395 mm,壁厚 25 mm。 实际设备顶部与其他电气设备采用硬管母连接,试 验中以 200 kg 等效配重考虑。工程中设备带支架 的整体结构高度在 18 m 左右,由于实验室空间高 度限制,无法进行带支架试验,采用了 360 mm 高底 座将设备与振动台连接固定。

表 1 设备参数

Table 1 Parameters of the electrical equipment

质量	高度	法兰弹性	复合外套弹	复合外套破
/kg	/m	模量/GPa	性模量/GPa	坏应力/MPa
2 930	10.6	70	22	128

# 2 试验概况

#### 2.1 振动台参数

本试验是在重庆交通科研设计院国家重点实验

室的三轴向地震模拟振动台上进行的。试验台面尺 寸为3 m×6 m,最大承载质量为35 t,各向最大加 速度 1.0g,工作频率为 0.1~50 Hz,倾覆力矩 70 t•m。振动台各项指标满足本次试验要求。



图 1 特高压交流 CVT 试验结构 Fig.1 UHVAC CVT test structure

#### 2.2 试验波形

由于特高压工程的快速发展,站址条件具有一定差异。国内研究机构和学者对适用于我国场地条件的特高压电气设备抗震设防标准进行了系统研究<sup>[13-17]</sup>,提出了一条如图2所示的人工合成地震波。 该地震波的频谱特性(如图3所示,频谱参数可参考 规范<sup>[6]</sup>说明)可包络我国绝大部分场地类型,使试验 结果具有通用性。



#### 2.3 测点布置

复合外套型特高压 CVT 为细高型结构,在地 震作用下主要发生弯曲变形。设备测点布置如图 4 所示:为考核设备外套抗弯强度,在每节外套底部 (复合材料处)布置 2 个应变片,共 8 个应变片;为分 析设备动力特性,在每节外套上法兰处均布置了 1 个加速度传感器;在振动台台面布置了1个加速度







Fig.4 Arrangement of measuring points on UHVAC CVT

计,为监控实际输出地震波参数,布置了5个加速度 计,在地震台和设备顶部各布置1个位移计。

#### 2.4 试验工况

复合外套型特高压 CVT 抗震设防目标为 PAG =0.5g 要求,定义地震波激励方向为 X 向。由于 试验设备为无支架结构,需要考虑支架对设备的不 利影响,参考标准考虑 1.4 倍的支架动力放大效应, 试验加载工况如表 2 所列。在各等级人工波试验后 均进行白噪声测试,用以分析设备动力特性是否发 生变化(表 3)。

#### 表 2 抗震试验工况表

Table 2 Test conditions of seismic tests

工况	地震激励波	目标峰值加速度	试验内容
1	白噪声	0.08g	测试设备动力特性
0		0.1. \/1.4	设备动力响应测试;
Ζ	八上波	$0.1g \times 1.4$	调整振动台台面输出
3	白噪声	0.08g	测试设备动力特性
4	人工波	$0.2g \times 1.4$	设备动力响应测试
5	白噪声	0.08g	测试设备动力特性

# 3 试验结果分析

# 3.1 动力特性分析

通过白噪声试验分析得到设备的频率与阻尼

#### 表 3 减震试验工况表

Table 3 Test conditions of damping tests

工况	地震激励波	目标峰值加速度	试验内容
1	白噪声	0.08g	测试设备动力特性
0		设备动力响应测试;	
Z	人上边	↓ 故 0.1g×1.4	调整振动台台面输出
3	白噪声	0.08g	测试设备动力特性
4	人工波	$0.3g \times 1.4$	设备动力响应测试
5	白噪声	0.08g	测试设备动力特性
6	人工波	$0.5g \times 1.4$	设备动力响应测试
7	白噪声	0.08g	测试设备动力特性

比,计算结果如表 4 所列。在抗震试验中,试验前后 设备基频分别为 1.07 Hz、1.06 Hz,基本无变化,表 明试验前后设备主体结构无损伤。在减震试验中, 设备结构基频在减震试验前为 1.04 Hz,相较于抗 震试验的 1.07 Hz 降低了 2.80%;随着减震试验中 加速度等级的增大,设备结构频率略有降低,在 PAG = 0.3g 和 PAG = 0.5g 试验后结构频率为 1.01 Hz,相较于抗震试验的 1.07 Hz 降低了 5.61%,而相较于减震试验前的结构频率 1.04 Hz 降低了 2.88%。减震结构频率低于抗震结构是由于 试验中为安装减震器,在设备底部额外增加了一个 支座,整体结构的重量和高度略有增大。

表 4 各白噪声工况设备频率与阻尼比

 
 Table 4
 Test results of frequency and damping ratio of equipment under different conditions

试验	工况	频率/Hz	阻尼比/%
	1	1.07	1.65
抗震	3	1.07	1.59
	5	1.06	1.70
	1	1.04	1.89
定用	3	1.02	1.86
减辰	5	1.01	1.90
	7	1.01	2.01

根据规范<sup>[6]</sup>要求:与未安装减震装置的电气设备结构相比,电气设备减震结构第一阶固有频率降低幅度不超过10%,满足正常使用功能的要求。由白噪声阻尼测试分析结果可见,抗震结构的阻尼比在1.65%左右,而减震结构阻尼比约为1.90%,阻尼比结果均为地震动峰值加速度0.07g的白噪声测试数据结果,因此设备结构阻尼特性在地震动更强烈的人工波试验中将会增大。

# 3.2 应力响应分析

在设备每节套管根部布置4对应变片,试验中 最大应变响应均出现在设备底部套管根部,抗震 PAG=0.2g和减震PAG=0.5g试验根部应变时 程曲线如图5和图6所示。由应变曲线可见,同一 试验的各测点应变波形曲线形状较为一致,由上至 下套管应变不断变大;抗震试验中的设备各测点应 变波形曲线变化与人工波较为相似,而减震试验中



图 5 抗震试验(PAG=0.2g)底部测点应变时程曲线 Fig.5 Strain time history curves of measuring points at bottom of equipment in seismic test (PAG=0.2g)



图 6 减震试验(PAG=0.5g)底部测点应变时程曲线 Fig.6 Strain time history curves of measuring points at bottom of equipment in damping test (PAG=0.5g)

设备各测点两者相差较大,且应力衰减较快,表明减 震器对设备产生的附加阻尼效果明显,从而降低了 设备应力响应。

复合外套材质为玻璃钢时具有一定的非线性力 学特征,从而对套管式设备结构的力学性能产生影 响。图 7 为真型复合外套特高压交流 CVT 进行的 顶部加载抗弯试验,试验中设备实际破坏现象为底 部法兰断裂,复合外套外观检查无异常。由设备顶 部测得的"加载力-位移"曲线关系(图 8)表明,在加 载力开始至 35.90 kN(折算应力值为 128 MPa)时, 曲线变化基本为线性关系,此范围应力与应变之间 符合 $\sigma = E \cdot \epsilon(\sigma$ 为应力; E为材料弹性模量;  $\epsilon$ 为应 变)的关系,其中 E为抗弯试验拟合结果的均值。 因此抗震试验应力结果计算中采用拉压应变绝对平 均值与弹性模量相乘而计算得到。



图 7 复合 CVT 加载力-位移曲线 Fig.7 Force-displacement curve of the UHV CVT





在抗弯试验中设备最大弹性应变为 5 818  $\mu\epsilon$ , 因此抗震与减震试验中各测点应变响应均在弹性阶段,计算得到的应力结果如图 9 所示及表 5 所列。 由于设备第 1、2 节套管相较于 3、4 节在胶装参数上 有所差别,在各试验中第 2 节应力均略低于变化趋势。通过 PAG=0.1g 的抗震与减震试验数据对比 可见,减震器在该等级试验中近似为螺栓刚性连接, 基本未发挥减震作用,减震试验的 PAG=0.5g 相 较于PAG=0.3g设备应力略大,但都远小于抗震



Fig.9 Comparison between maximum stress of bushing in seismic and damping tests

表 5 抗震与减震试验应力结果比较

 Table 5
 Stress comparison between seismic and damping tests

试验内容	阝 加速度 设省	备套管最大应变/με	最大应力/MPa
抗震	0.1g  imes 1.4	916	20.15
	0.2 $g \times 1.4$	2 106	46.33
减震	$0.1g \times 1.4$	803	17.66
	$0.3g \times 1.4$	1 189	26.17
	$0.5g \times 1.4$	1 256	27.64

*PAG*=0.2g等级的设备应力结果。规范[6]中减震 效率计算公式为:

$$\mu = \frac{\sigma_{\rm f} - \sigma_{\rm b}}{\sigma_{\rm f}} \tag{1}$$

式中: $\mu$  为减震系数; $\sigma_{f}$  为电气设备未安装减震装置时的应力, MPa; $\sigma_{b}$  为电气设备减震结构的应力, MPa。

整体设备抗震试验结果表明复合材料电气设备 在一定范围内为弹性状态,结构响应可近似为弹性 结构。由于原设备结构未进行 PAG=0.3g 和 PAG =0.5g 的抗震试验,采用抗震 PAG=0.2g 结果,通 过线性比例关系简化计算得到的 PAG=0.3g 和 PAG=0.5g 抗震应力结果,分别为 69.50 MPa 和 115.83 MPa。材料强度均在材料弹性阶段,符合强 度简化原则,依据式(1)计算得到的减震效率分别为 62.34%、76.14%。可见减震效率较高,且随输入加 速度等级增大而增大。

表 6 为国内外电网设施抗震等级划分。据此试验中 PAG=0.1g、0.3g、0.5g 可分别划分为低、中、高等级地震。根据减震设备在各等级地震动作用下的试验结果,可得到结论:(1)在低等级地震作用下减震器仅起螺栓连接作用,不对设备产生其他影响,



图 10 抗震与减震(PAG=0.5g)应变时程曲线对比 Fig.10 Comparison between strain time history curves in seismic and damping tests (PAG=0.5g)

表 6 电网设施抗震等级

Table 6 Seismic levels of electrical equipments

相关规程	抗震等级	PAG/g
中国由网设施地震	低等水平:<<0.1g	0.1
中中区地图[18]	中等水平:0.1g~0.4g	0.4
火舌区划图	高等水平:≥0.5g	0.6
美国 IFFF Std	低等水平:<0.1g	0.1
CO2 2005[19]	中等水平:0.1g~0.5g	0.25
693-2005 <sup>[10]</sup>	高等水平:>0.5g	0.5

#### 3.3 位移响应分析

在设备顶部和振动台台面各布置了 1 个位移 计,实测位移值为绝对位移,而地震作用中设备结构 的相对位移是其抗震性能的体现。相对位移响应时 程曲线如图 11 所示,统计结果列于表 7。





Table 7 Displacement comparison between

seismic and damping tests

试验内容	加速度	设备顶部相对位移/mm	位移角/%
抗震	$0.1g \times 1.4$	149.51	1.41
	0.2g  imes 1.4	349.12	3.29
	$0.1g \times 1.4$	147.90	1.40
减震	$0.3g \times 1.4$	265.30	2.50
	0.5g  imes 1.4	330.06	3.11

参考式(1)进行位移减小率计算,其计算公式如下:

$$\mu_{\rm D} = \frac{D_{\rm f} - D_{\rm b}}{D_{\rm f}} \tag{2}$$

式中: $\mu_D$ 为位移减小率; $D_f$ 为电气设备未安装减震装置时的位移,mm; $D_b$ 为电气设备减震结构的位移,mm。

同样采用线性简化计算相对位移结果,得到 PAG=0.3g和PAG=0.5g的位移减小率分别为 49.33%、62.18%。同样也表明地震作用越大减震 器性能发挥越显著,可充分保护电气设备在地震作 用下的响应。

# 4 结论

本文对新研发的复合外套型特高压交流 CVT 在地震模拟振动台上进行了抗震与减震试验研究。 通过试验结果分析表明:

(1) 通过振动台白噪声得到的设备安装减震器 后结构基频由 1.07 Hz 略降至 1.04 Hz,表明小震作 用下减震装置对结构的整体刚度影响较小。

(2) 抗震试验 PAG=0.1g 和 PAG=0.2g 中设 备最大应力响应为 20.15 MPa、46.33 MPa;减震试验 PAG=0.1g、PAG=0.3g 和 PAG=0.5g 中设备最大 应力响应为 17.66 MPa、26.17 MPa 及 27.64 MPa。

(3) 通过简化等效对比分析,设备安装减震器后,在 PAG=0.3g 时应力减小了 62.34%、位移减 小了 49.33%;在 PAG=0.5g 时应力减小了 76.14%、位移减小了 62.18%。

(4)电气设备安装减震器后,在低等级地震作用下仅起螺栓连接作用,不对设备产生其他影响,从而可保障设备在小震或大风状态下的正常使用;在中高等级地震作用下开始发挥作用,且地震响应越大减震器减震效率越高。

#### 参考文献(References)

[1] 邱宁,程永锋,钟珉,等.1 000 kV 特高压交流电气设备抗震研

究进展与展望[J].高电压技术,2015,41(5):1732-1739. QIU Ning, CHENG Yongfeng, ZHONG Min, et al. Progress and Prospect in Seismic Research of 1 000 kV UHV AC Electrical Equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1732-1739.

- [2] 卢智成,邱宁,程永锋,等.特高压 TYD1000 型电容式电压互感器抗震试验研究[J].高电压技术,2015,41(11):3694-3701.
   LU Zhicheng, QIU Ning, CHENG Yongfeng, et al. Study on Seismic Experiment of Ultra High Voltage TDY1000 Capacitive Voltage Transformer[J].High Voltage Engineering,2015,41(11):3694-3701.
- [3] 刘振林,卢智成,张搏字,等.特高压瓷套避雷器标准化抗震性 能优化研究[J].电网技术,2016,40(5):1570-1575.
   LIU Zhenlin,LU Zhicheng,ZHANG Boyu, et al. Optimization Research on Seismic Safety Performance of UHV Porcelain Lightning Arrester Standardization[J].Power System Technology,2016,40(5):1570-1575.
- [4] 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.

Code for Seismic Safety Evaluation of Power Engineering:DL/ T 5494-2014[S].Beijing:China Planning Press,2014.

[5] 电力设施抗震设计规范:GB 50260-2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

Code for Seismic Design of Electrical Installations: GB 50260-2013[S].Beijing:China Planning Press, 2013.

- [6] 特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震装置安装与维护技术 规程:Q/GDW 11132-2013[S].北京:中国电力出版社.2014. Technical Specification for Seismic Design of Ultra-high Voltage Porcelain Insulating Equipments and Installation/Maintenance to Energy Dissipation Devices:Q/GDW 11132-2013[S]. Beijing;China Electric Power Press,2014.
- [7] 喻新强,孙强,朱岸明,等.复合绝缘材料在 750kV 变电站工程 中应用的关键技术[J].电力建设,2013,34(11):105-109.
   YU Xinqiang,SUN Qiang,ZHU Anming,et al.Key Technologies of Composite Insulating Materials Adopted in 750 kV Substation[J].Electric Power Construction,2013,34(11):105-109.
- [8] 李圣,卢智成,朱祝兵,等.变电站复合材料绝缘子的动力特性 与地震易损性研究[J].工程力学,2016,33(4):91-97.
   LI Sheng,LU Zhicheng,ZHU Zhubing, et al.Dynamic Properties and Seismic Fragility of Substation Composite Insulators
   [J].Engineering Mechanics,2016,33(4):91-97.
- [9] 程永锋,卢智成,刘振林,等.川藏联网工程符合材料电气设备 地震模拟振动台试验研究[J].电力建设,2015,36(3):49-58.
   CHENG Yongfeng,LU Zhicheng,LIU Zhenlin, et al. Expermental Study of Earthquake Simulation Shaking Table on Electrical Equipment of Composite Material for Sichuan - Tibet Interconnection Project[J]. Electric Power Construction, 2015,36(3):49-58.
- [10] 关志成,彭功茂,王黎明,等.复合绝缘子的应用及关键技术研究[J].高电压技术,2011,37(3):513-519.
   GUAN Zhicheng,PENG Gongmao,WANG Liming, et al. Application and Key Technical Study of Composite Insulations

[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 513-519.

- [11] 朱正一,贾志东,马国祥,等.复合绝缘子的应用及关键技术研究[J].高电压技术,2011,37(3):513-519.
   ZHU Zhengyi,JIA Zhidong,MA Guoxiang, et al. Application and Key Technical Study of Composite Insulators[J]. High
- Voltage Engineering,2011,37(3):513-519.
  [12] 程永锋,代泽兵,卢智成,等.高压电气设备的减震设计方法研究[J].高压电器,2013,49(9):69-79.
  CHENG Yongfeng,DAI Zebing,LU Zhicheng,et al.Study on Method of Seismic Design for Electrical Equipment with Energy Dissipation Devices in China[J].High Voltage Apparatus,2013,49(9):69-79.
- [13] 刘振林,卢智成,孟宪政,等.用于高压电气设备的剪切型铅减 震器性能影响研究[J].地震工程学报,2016,38(4):564-569.
   LIU Zhenlin,LU Zhicheng, MENG Xianzheng, et al.Research on Performance of Shearing Mode Lead Damper Applied to High-Voltage Electric Equipment[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(4):564-569.
- [14] 卢智成,代泽兵,孟宪政,等.特高压变电设备抗震振动台试验 方法研究[J].建筑结构,2013,43(增刊 1):1269-1272.
  LU Zhicheng,DAI Zebing, MENG Xianzheng, et al.Study on Seismic Shaking Table Test Method of UHV Substation Equipments[J].Building Structure, 2013, 43 (Supp1): 1269-1272.
- [15] 尤红兵,张郁山,赵凤新.电气设备振动台试验输入的合理确 定[J].电网技术,2012,36(5):118-124.
  YOU Hongbing,ZHANG Yushan,ZHAO Fengxin.Reasonable Determination of Input Waves for Shake-Table Test of Electrical Equipments[J].Power System Technology,2012, 36(5):118-124.
- [16] 中国电力科学研究院、特高压电气设备抗震评估与减震设计研究[R].北京:中国电力科学研究院,2012. China Electric Power Research Institute.Research Report on Seismic Evaluation and Energy Dissipation Design of UHV Electrical Equipment[R].Beijing: China Electric Power Research Institute,2012.
- [17] 程永锋,朱祝兵,邱宁,等.特高压电气设备抗震试验共振拍波 适用性及合理地震动输入研究[J].高电压技术,2015,41
  (11):3694-3701.
  CHENG Yongfeng,ZHU Zhubin,QIU Ning.Study on Seismic Experiment of Ultra High Voltage TDY1000 Capacitive Voltage Transformer [J]. High Voltage Engineering, 2015,41
- (11):3694-3701.
  [18] 钟珉,程永锋,代泽兵,等.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):571-576.
  ZHONG Min,CHENG Yongfeng,DAI Zebing,et al.Study on Grading Seismic Fortification Standards of Electrical Equipment at Transformer Substation[J].China Earthquake Engl-Neering Journal,2015,37(2):571-576.
- [19] IEEE Recommended Practice of Seismic Design of Substations:IEEE Std 693-2005[S].IEEE Power Engineering Society.2005.