

The Experimental Study on 220 kV Current Transformer Based on Seismic Simulation Shaking Table

Hao Wang¹, Huan Zhou¹, Yang Lu¹, Quanjun Zhu², Jianxing Ren¹

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

²Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing

Email: whouco@163.com, 1753580371@qq.com

Received: May 6th, 2020; accepted: May 21st, 2020; published: May 28th, 2020

Abstract

In earthquake disasters, substation electrical equipment is extremely vulnerable to damage. The current transformer is one of the important electrical equipments in the substation, and its damage directly affects the normal operation of regional power, so its seismic performance, and shock absorption performances should be analyzed. According to the current transformer condition in the actual earthquake, the seismic simulation and shock absorption test of the seismic simulation vibration table are carried out using real 220 kV current transformer equipment. A variety of seismic waveforms and different seismic intensities are considered together for experiment. What's more, the intensity of seismic simulation shaking table test can be up to 1 g, which can rarely be seen in China. By measuring the acceleration, displacement and stress parameters of key parts of the equipment, the seismic and shock absorption performances compared, and the dynamic characteristics and mechanical performance of the current transformer structure are also studied, then, the seismic performance of the equipment is comprehensively assessed. The experimental results demonstrate that the designed shock absorber has a good shock absorption effect for current transformer, especially for the top acceleration of current transformer.

Keywords

Current Transformer, Shaking Table Experiment, Seismic Test, Shock Absorption Test

220 kV 电流互感器振动台试验研究

王昊¹, 周欢¹, 陆杨¹, 朱全军², 任建兴¹

¹上海电力大学能源与机械工程学院, 上海

²全球能源互联网研究院, 北京

Email: whouco@163.com, 1753580371@qq.com

收稿日期：2020年5月6日；录用日期：2020年5月21日；发布日期：2020年5月28日

摘要

在地震灾害中，变电站电气设备极易遭受到破坏。而电流互感器作为变电站中重要的电气设备之一，其损害会直接影响到地区电力的正常运行，所以要对其抗震性能及减震性能进行试验研究。根据实际地震中的电流互感器状况，采用真实的220 kV电流互感器设备进行地震模拟振动台抗震和减震试验研究。试验考虑了多种地震波形、多种地震强度，特别是强度为高达1 g时国内鲜见的地震模拟振动台试验强度。通过实际测量设备关键部位的加速度、位移及应力参数，对比其抗震、减震性能，研究此电流互感器结构的动力特性和受力性能，综合评定设备的抗震性能。研究表明，所设计的减震器对电流互感器具有较好的减震效果，特别是对电流互感器的顶部加速度有很好的衰减效果，可以在电力设备中进行推广应用。

关键词

电流互感器，振动台试验，抗震试验，减震试验

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

国内外大量的地震灾害表明，地震对电气设备会造成不可估量的损害，严重时会导致电力系统中断，并影响受灾地区的救援工作[1][2]。我国是一个地震活动分布广、强度大、频率高的地震受灾国家，其灾害对社会经济发展影响巨大[3][4]。随着电气设备向更高电压等级发展，设备呈现较高、较重、更易受到破坏的趋势[5]，因此如何保证电气设备在地震中不发生损害至关重要。

近年来，国内学者对电气设备抗震及减震已进行一些研究。谢强[6]等建立变电站软母线连接的电气设备的数学模型，采用龙格库塔方法求解其地震响应。曹枚根[7]等以朝阳门地下变电站及其周围耦连建筑为对象，对变电站楼板进行振动与噪声的相关性分析。冯宇[8]等通过采用等安匝合成电源的电流互感器实现CT谐波特性测量方法。谢强[9]等以220 kV变压器套管体系为实验对象，进行振动台试验。柏文[10]等通过有限元对电流互感器抗震性能进行分析，并进行输入最高地震强度0.5 g时的减震试验。

对于电气设备的抗震和减震性能研究一般采用振动台试验和有限元仿真方法，对其进行实际分析。而针对高压电流互感器重心位置高，抗震性能较差的特点，对其易发生损害的关键点和部位进行抗震性能分析，目前的研究偏少，而现有的研究大多采用有限元仿真进行研究，很少采用振动台试验进行研究。

本文以220 kV电流互感器作为研究对象，对其进行了抗震试验，以及输入地震强度高达1 g时的减震试验，并对试验结果进行分析。

2. 实验设计

2.1. 振动台设备

本实验采用美国MTS公司的三维六自由度地震模拟振动台试验系统。220 kV电流互感器，如图1所示。电流互感器各测点位置分布如表1所示，其中的减震位置即为安装减震器的位置。

电流互感器，总高度约为 3.650 m，总重约 500 kg。振动台面尺寸为 4.1×4.1 m，试验频率为 0.1~50 Hz，满负荷下的最大试件承重 20 t，减负荷下为 30 t，其中载荷 20 t 时水平 X 向最大加速度为 1.5 g、水平 Y 向和竖向为 1.0 g；满载 30 t 时水平 X 向、Y 向最大加速度 1.0 g，竖向 0.9 g。

Table 1. Measuring points of current transformer

表 1. 电流互感器各测点位置分布

测点编号	传感器位置/测量物理量
1	顶部/加速度
2	减震位置/加速度
3	顶部/位移
4	减震位置/位移
5	下法兰/应力

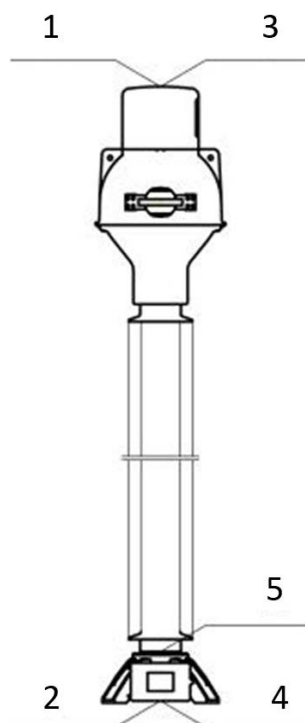


Figure 1. Current transformer

图 1. 电流互感器

根据电流互感器的实际参数，设计的减震器类型为阻尼弹簧减震器，在如下的实验条件下，测得其滞回曲线如图 2 所示。

实验条件：最大压缩力：8759 N；上屈服压缩力：8744 N；下屈服压缩力：7628 N；规定非压缩比例力：7628 N；规定总压缩力：12 KN；斜率：1729.8。

由图 2 可以看出，减震器的滞回曲线呈弓形，形状较为饱满，此结果反映出整体构件的塑形能力比较强，不易被外力影响使其变形，具有很好的抗震性能和耗能作用。

为了充分发挥减震器的作用，现采用 8 个减震器，在电流互感器与地震台的连接板的上下分别布置 4 个相同的减震器，如图 3 中的空心圆圈所示。图中的实心点表示地震试验台的连接位置。

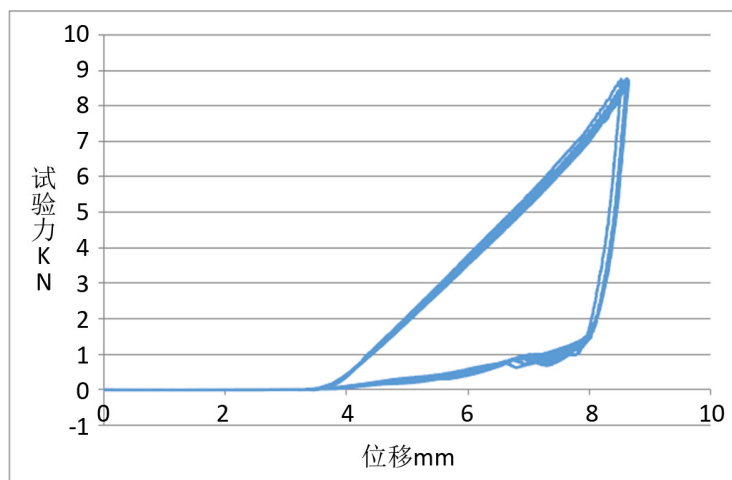


Figure 2. Hysteresis curve of shock absorber

图2. 减震器的滞回曲线

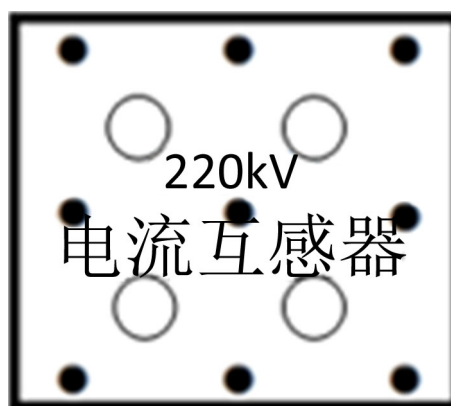


Figure 3. Layout of shock absorbers on test bench

图3. 减震器在实验台上的布置方式

2.2. 试验输入地震波

地震波的输入对于地震模拟振动台实验至关重要, 本次实验根据 GB50011-2010 和 GB50260-2013 的标准要求选择合适的地震波[11][12]。选用 3 种波形作为地震模拟振动试验的输入波形, 选择与试验地点较近的人工波(即兰州波)、以及国际上地震模拟比较通用的 El-Centro 波和 Taft 波, 在设备水平方向上加振。

2.3. 试验工况

在抗震试验中, 考虑到若是模拟地震强度过高, 即: 加载的加速度值过高的话, 电流互感器有可能会出现问题, 因此, 在抗震试验时加载的加速度值没有选择过高, 分别根据不同的地震加速度 0.1 g、0.2 g、0.4 g, 测得在不同波形下抗震的实验数据。

在减震试验中, 在振动台上加入减震设备, 对电流互感器进行减震试验, 考虑到由于减震器的存在, 可以承受的加载加速度应该会比较, 暂定不同的地震加速度 0.1 g、0.2 g、0.4 g、0.6 g、1 g, 具体的能够达到的加速度, 需要根据在试验过程中的具体情况进行调整, 从而得出不同波形下减震的实验数据。

综合考虑输入的地震波形和模拟地震加速度, 可以得到具体的抗震实验工况, 如表 2 所示, 共包含 14 种工况。类似地, 可以得到减震试验工况, 如表 3 所示, 共包含 21 种工况。

Table 2. Working conditions of seismic test
表 2. 抗震试验工况表

工况	波形	加速度
1	白噪声(WN1)	
2	人工波	0.1 g
3	人工波	0.1 g
4	EI 波	0.1 g
5	Taft 波	0.1 g
6	白噪声(WN2)	
7	人工波	0.2 g
8	EI 波	0.2 g
9	Taft 波	0.2 g
10	白噪声(WN3)	
11	人工波	0.4 g
12	EI 波	0.4 g
13	Taft 波	0.4 g
14	白噪声(WN4)	

3. 模态测试结果及分析

出于电流互感器实验的准确性以及安全性等因素的考虑,本次实验利用白噪声作为输入波形进行模态实验,并在抗震和减振两种状态下,每次改变模拟地震强度之前,均对电流互感器的第一阶固有频率进行测量。

输入白噪声的频率范围 0.1~50 Hz, 加速度半峰值 0.03 g, 持续时间为 120 s。在抗震试验过程中,进行了四组电流互感器白噪声模态实验,分别为在电流互感器安装完毕,但是试验尚未开始之前、加载的加速度在 0.1 g 时的抗震试验之后、加载的加速度在 0.2 g 时的抗震试验之后以及加载的加速度在 0.4 g 时的抗震试验之后,测得的电流互感器的第一阶固有频率,如表 4 所示。

Table 3. Working conditions of shock absorption test
表 3. 减震试验工况表

工况	波形	加速度
1	白噪声(WN1)	
2	人工波	0.1 g
3	EI 波	0.1 g
4	Taft 波	0.1 g
5	白噪声(WN2)	
6	人工波	0.2 g
7	EI 波	0.2 g
8	Taft 波	0.2 g
9	白噪声(WN3)	
10	人工波	0.4 g
11	EI 波	0.4 g
12	Taft 波	0.4 g

Continued

13	白噪声(WN4)	
14	人工波	0.6 g
15	EI 波	0.6 g
16	Taft 波	0.6 g
17	白噪声(WN5)	
18	人工波	1.0 g
19	EI 波	1.0 g
20	Taft 波	1.0 g
21	白噪声(WN6)	

Table 4. The first natural frequency (Hz) of current transformer under seismic test**表 4.** 电流互感器抗震试验第一阶固有频率(Hz)

设备工况	WN1	WN2	WN3	WN4
220 kV 电流互感器	试验前	0.1 g	0.2 g	0.4 g
	6.95	6.88	6.76	6.71

从表 4 中可以看出四次抗震试验在逐渐提高加载加速度的情况下, 电流互感器的第一阶固有频率变化不大。在电流互感器的减振试验中, 其模态试验测得的第一阶固有频率结果, 如表 5 所示。

Table 5. The first natural frequency (Hz) of current transformer under shock absorption test**表 5.** 电流互感器减振试验第一阶固有频率(Hz)

设备/工况	WN1	WN2	WN3	WN4	WN5	WN6
220 kV 电流互感器	试验前	0.1 g	0.2 g	0.4 g	0.6 g	1.0 g
	5.74	5.37	4.45	4.84	5.35	5.3

由表 5 可以看出, 在六种工况下, 电流互感器的固有频率随着加载加速度的逐渐增大, 呈现出先减小后增加的趋势, 此种现象表明整个电流互感器减震系统并没有大的损伤。在 0.1 g 和 0.2 g 的工况下, 第一阶固有频率略有减小可能是由于减震位置的螺栓处出现非常微小松动, 使得其刚度略有减小导致; 而在后面几种加载加速度逐渐提高的工况下, 减震器会发挥作用, 从而引起固有频率略有上升, 但是也达不到加载之前的第一阶固有频率的量值。总而言之, 无论是固有频率值的减小还是增大, 均不显著。

由表 4, 表 5 对比可以看出, 减震情况下的设备的固有频率比抗震情况下有所减小, 从而可以看出安装减震器之后对系统的整体特性有所影响, 会使得电流互感器减震系统的刚度略有下降, 但其影响程度在可以接受的范围之内。

4. 电流互感器顶部响应分析

4.1. 顶部位移结果及分析

实验选取电流互感器顶部位置为主要观测点之一, 为分析设备的地震响应, 对不同的实验波形进行分析比较。

在抗震情况下分别取加速度为 0.1 g、0.2 g、0.4 g, 在减震情况下分别取加速度为 0.1 g、0.2 g、0.4 g、0.6 g、1 g, 根据顶部测点位置, 三种地震波形输入时, 无论是在抗震工况还是减震工况下, 对电流互感器的顶部位移的影响均不显著。下面仅以 El-Centro 波形为例, 分析 El-Centro 波作用下的顶部位移的抗震、减震峰值情况如图 4 所示。

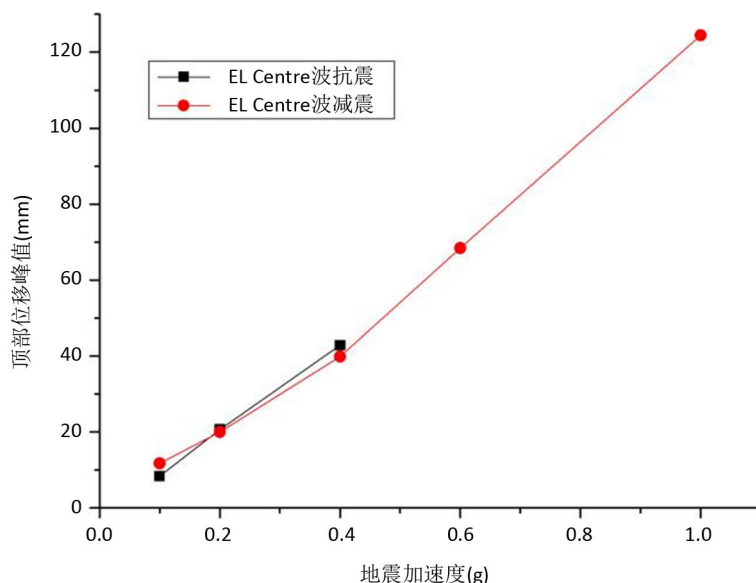


Figure 4. Peak displacement of seismic & shock absorption using El-Centro wave
图 4. El-Centro 波输入时，顶部位移的抗震减震峰值

从图 4 中可以看出在 El-Centro 波情况下，电流互感器的减震效果并不理想，El-Centro 波随着加速度的增加，效果均不显著。因此，减震器对 220 kV 电流互感器顶部位移的减震作用虽然不明显，但是增加加载加速度后，还是存在着顶部位移微小的减弱的折线部分。

4.2. 顶部加速度结果及分析

根据顶部测点位置分析在人工波、El-Centro 波和 Taft 波工况下的顶部加速度的频谱峰值情况如图 5 所示。

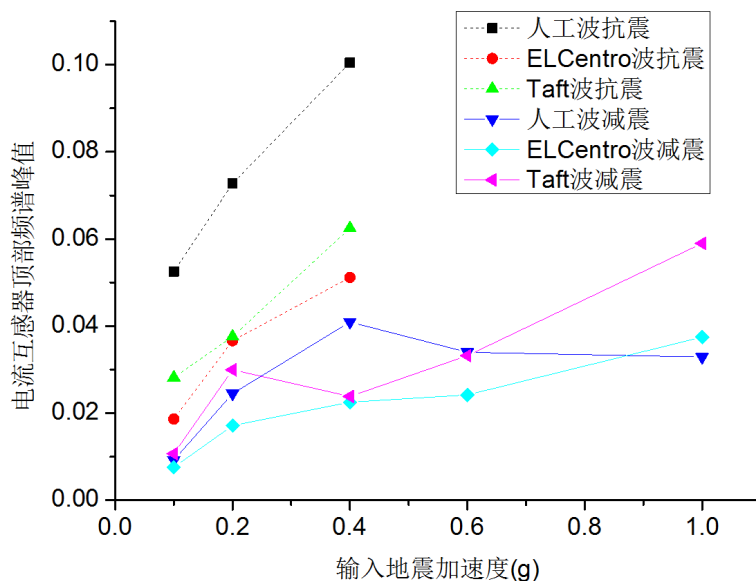


Figure 5. Top acceleration seismic shock absorption spectrum peak under different working conditions
图 5. 不同工况下顶部加速度抗震减震频谱峰值

从图 5 中可以看出，在人工波、EL-Centro 波和 Taft 波三种波形输入的情况下，减震器对电流互感器

有明显的减震效果，顶部加速度出现明显减弱。

对于人工波，在抗震试验中，其频谱峰值比另外两种波形要高许多。但是在减震器的作用下，在 0.1~0.4 g 的范围内，顶部加速度频谱峰值下降显著。在 0.6~1 g 范围内，顶部加速度频谱峰值不但没有增加，反而比减震试验 0.4 g 时的频谱峰值有明显下降，此结果表明在人工波输入的情况下，地震输入强度越高，减振效果越显著。

对于 El-Centro 波，在抗震试验中，其频谱峰值比另外两种的均要低。在减震器作用下，在 0.1~0.4 g 范围内，顶部加速度频谱峰值下降也比较显著。在 0.6~1 g 范围内，顶部加速度频谱峰值比减震试验 0.4 g 时的频谱峰值仅仅略有上升。

对于 Taft 波，在抗震试验中，其频谱峰值位于另外两种波形的中间，在减震器作用下，在 0.1~0.4 g 范围内，顶部加速度频谱峰值在 0.2 g 时下降较少，但是在 0.1 g 和 0.4 g 时下降显著。在 0.6~1 g 范围内，顶部加速度频谱峰值有较大升高，特别在 1 g 时显著升高，但仍未超过 0.4 g 时抗震的频谱峰值。

因此，可以看出减震器对该电流互感器在输入不同地震波形及不同地震强度的工况下，均体现了比较显著的减震效果。

5. 电流互感器减震位置响应分析

电流互感器的减震位置的响应在抗震试验和减振试验中，可以显示出安装减震器前后的响应变化情况，从而表明减震器是否起作用。为了便于描述减震位置的响应，引入无量纲的加速度放大系数[13]，其定义为：减震位置加速度与地震台加速度之比。在抗震工况下，放大系数的大小显示出电流互感器与地震试验台的连接板在地震波输入时的效果，如表 6 所示；而在减振工况下，放大系数的大小可以显示出电流互感器与地震台的连接板与减震器在地震波输入下的效果，如表 7 所示。

根据表 6，在抗震工况下，不同地震输入波形对电流互感器的加速度放大系数的影响不同，在人工波输入和 Taft 波输入时，随着输入地震加速度的增加，放大系数有所下降，表明减振位置的加速度响应增加比地震加速度的增加慢，相对来说，比较安全。而对于 El-Centro 波输入，随着输入地震加速度的增加，放大系数有所增加，表明随着地震加速度的增加，减振位置的加速度响应也会增加，但是增加幅度较小。

Table 6. The amplification factor of acceleration of shock absorption position under different working conditions

表 6. 不同抗震工况下减震位置的加速度放大系数

	地震加速度	放大系数
人工波	0.1 g	1.25
	0.2 g	1.10
	0.4 g	1.09
El-Centro 波	0.1 g	1.11
	0.2 g	1.19
	0.4 g	1.32
Taft 波	0.1 g	1.18
	0.2 g	1.17
	0.4 g	1.13

根据表 7，在减振工况下，随着输入地震波的不同，减振位置的加速度放大系数与抗震工况的放大

系数相比,影响不完全相同。对于人工波而言,随着输入地震加速度的增加,带有减震器的电流互感器的减振位置放大系数基本是减小的,尽管在 1 g 时略有增加,但总体来说,此时有一定的减振效果。对 El-Centro 波而言,随着输入地震加速度的增加,带有减震器的电流互感器的减振位置放大系数基本是减小的,尽管在 0.2 g 的时候略有增加,但也具有一定的减振效果。而对于 Taft 波而言,随着输入地震加速度的增加,带有减震器的电流互感器的减振位置放大系数变化没有规律,但是在输入地震加速度为 1 g 时,对减振位置的加速度有一定抑制作用。

Table 7. The amplification factor of acceleration of shock absorption position under different working conditions
表 7. 不同减震工况下减震位置的加速度放大系数

	地震加速度	放大系数
人工波	0.1 g	1.17
	0.2 g	1.13
	0.4 g	1.09
	0.6 g	0.98
	1 g	1.01
El-Centro 波	0.1 g	1.22
	0.2 g	1.26
	0.4 g	1.15
	0.6 g	1.11
	1 g	0.93
Taft 波	0.1 g	1.23
	0.2 g	1.11
	0.4 g	1.29
	0.6 g	1.43
	1 g	1.07

综合比较表 6 和表 7,得出:在不同地震作用下,其加速度放大系数均分布在 1 左右,未见其明显差异。减震时放大系数较抗震时放大系数略有减小,但有部分却比抗震放大系数还略微大,可以看出仅仅从减震装置来看,并没有起到明显的减震作用。产生这种情况的原因,可能是由于能量主要集中在低频段,所以难以采用常规办法进行减震。随着输入地震加速度的增加,其放大系数减小比较显著,说明其在较高加速度时减震效果更为明显。

6. 电流互感器下法兰位置处应力分析

在各种抗震工况及减震工况下,根据将测试的应变响应转换为应力响应,则得电流互感器的下法兰位置处的应力响应结果如图 6 所示。

图 6 中可以直观的看出,大部分情况下电流互感器在 Taft 波的应力响应数值要比其他波形下的应力响应数值要大。抗震时 El-Centro 波的应力响应数值最小,减震时人工波的应力响应数值最小,说明在人工波时的减震性能最好。在输入地震加速度为 1 g 的 Taft 波激励时,电流互感器下法兰处的应力响应数值最大,但未发生明显损坏。由此可得,此型号的电流互感器在强烈地震中是安全的,不易发生损坏。

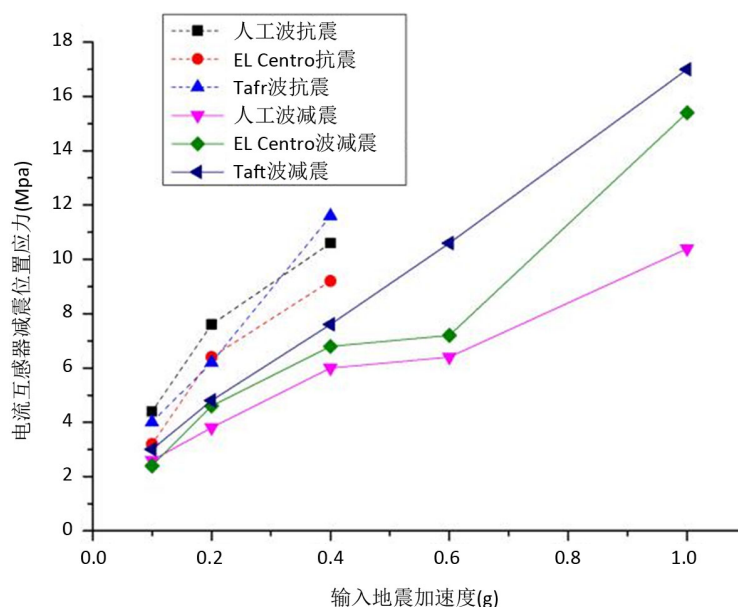


Figure 6. Stress test results for equipment under various conditions
图 6. 各种工况下设备的应力测试结果

当输入加速度为最大值 1 g 时, 其下法兰位置的最大应力响应数值为 17.0 MPa, 没有超过容许应力响应数值, 下法兰处未发生损坏。电流互感器的下法兰位置的应力响应数值, 在减震工况下比抗震工况下, 即在输入地震加速度为 0.1 g, 0.2 g 和 0.4 g 时, 图中的响应数值下降明显。因此, 减震器对设备减弱其应力有着有效的作用, 特别是作用在输入地震加速度为 1 g 时的人工波, 结果极为明显。

7. 结论

结合现有的抗震设计规范与标准, 通过对 220 kV 电流互感器振动台实验的分析与研究, 得出以下几点结论:

1) 第一阶固有频率随着加载加速度的提升, 有适度的下降, 符合试验要求。电流互感器在试验中未发生明显损害, 说明实验满足其精度要求。可能存在些微弱的影响, 但依旧在试验可控范围之内。

2) 实验中电流互感器顶部位移减振效果不显著, 但也未出现较大偏移偏差。在分布较广的人工波情况下, 设备在整个加速度范围内都有明显的减震效果。因此, 其加入减震器后效果更加明显, 此结果表明加入减震器能有效降低地震对设备的损害程度。

3) 对电流互感器的下法兰处而言, 在较低的加速度时减震器的减震效果明显, 而随着加速度的增大, 其应力响应数值会有显著的增大, 说明底部随地震强度的增大更易发生损害。因此, 提高底部的刚度有利于降低电力设备在较大地震中的损害程度, 这在工程实际中, 需要加以关注。

4) 本次减震实验地震加速度高达 1 g, 目前国内很少达到, 在这种情况下更能体现对电流互感器进行减振研究的有效性, 为今后电力设备的抗震、减震提供了一定的参考价值。

5) 电流互感器有些测点的部位减震效果并不是特别理想, 比如减震位置为顶部位置, 减震时的位移明显比抗震时要略高。对此需要再后续研究中设计不同的减震器对这些部位进行单独研究其问题, 例如可以采用机械优化设计等方法进行更深入的研究。

致 谢

本文在国家电网科技项目资助下完成, 在此表示衷心感谢。

基金项目

国家电网科技项目(SGRI-WD-71-15-010)。

参考文献

- [1] Bai, W., Dai, J., Zhou, H., *et al.* (2017) Experimental and Analytical Studies on Multiple Tuned Mass Dampers for Seismic Protection of Porcelain Electrical Equipment. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, **16**, 803-813. <https://doi.org/10.1007/s11803-017-0416-7>
- [2] Ma, G.L. and Xie, Q. (2018) Seismic Analysis of a 500-kV Power Transformer of the Type Damaged in the 2008 Wenchuan Earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **32**, Article ID 04018007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001145)
- [3] 柳永玉, 王均梅, 王晓琪, 等. 500 kV 电流互感器抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 219-223.
- [4] Kitayama, S., Lee, D., Constantinou, M.C., *et al.* (2017) Probabilistic Seismic Assessment of Seismically Isolated Electrical Transformers Considering Vertical Isolation and Vertical Ground Motion. *Engineering Structures*, **152**, 888-900. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.009>
- [5] 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(9): 69-73.
- [6] 谢强, 王亚非. 软母线连接变电站电气设备的地震响应分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 86-92.
- [7] 曹枚根, 莫娟, 莫海枢, 等. 地下变电站结构振动与噪声相关性及预估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5998-6005.
- [8] 冯宇, 王晓琪, 汪本进, 等. 采用等安匝合成电源的电流互感器谐波特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3154-3160.
- [9] 谢强, 马国梁, 朱瑞元, 等. 变压器-套管体系地震响应机理振动台试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5500-5510.
- [10] 柏文, 戴君武, 宁晓晴, 等. 电流互感器抗震性能及减震振动台试验[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 1-6.
- [11] 王亚勇, 戴国莹. 《建筑抗震设计规范》的发展沿革和最新修订[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 7-16.
- [12] 田利, 李宏男. 基于《电力设施抗震设计规范》的地震动随机模型参数研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1): 17-22.
- [13] 毛天尔, 曾双双, 栾极, 等. 抗震设计反应谱的动力放大系数[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(1): 89-92.