

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.02.005

硬管母线连接的1 000 kV复合外套避雷器和互感器地震模拟振动台试验研究

孟宪政, 卢智成, 刘振林, 林 森, 孙宇晗

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为研究地震作用下硬管母线连接的特高压复合外套电气设备的地震效应,依据特高压电气设备抗震试验方法进行了硬管母线连接的1 000 kV复合外套避雷器和互感器组成的互连结构体系的地震模拟振动台试验。通过白噪声扫频及标准时程波地震试验,测定了设备的自振频率以及关键部位的应变、加速度响应。试验结果表明:互连结构体系沿管母轴线方向的耦合效应强于垂直管母轴线方向;输入目标峰值加速度越大,互连结构体系的非线性特性越明显;沿管母轴线方向的地震波激励引起的扭转振动中互感器设备的地震响应较为显著;采用减震设计可以显著减小设备的地震响应;支架加速度动力放大系数明显大于支架应变响应动力放大系数,兼顾电气设备抗震性能评估及支架结构设计经济性,采用1.4倍的支架应变响应作为支架动力放大系数较为合理,且具有较好的包络性。

关键词: 地震耦合效应; 特高压复合外套电气设备; 硬管母线; 振动台试验; 非线性特性; 支架动力放大系数

Study on Test of Seismic Simulation Vibration Stand for 1 000 kV Polymeric Housed Arrester and Instrument Transformer with Rigid Tube Bus Connection

MENG Xianzheng, LU Zhicheng, LIU Zhenlin, LIN Sen, SUN Yuhan

(China Electric Power Research Institute Limited Company, Beijing 100192, China)

Abstract: For studying the seismic effect of UHV polymeric housed electrical equipment with rigid tube bus connection under seismic action, the seismic simulation vibration stand test of interconnected structural system, consisting of 1 000 kV polymeric housed arrester and a instrument transformer with rigid tube bus connection, is performed in accordance with the seismic test method of UHV electrical equipment. The natural vibration frequency of the equipment and the strain and acceleration response of key parts are measured through white noise sweep and artificial standard time history wave seismic test. The test results show that the coupling effect of interconnects structure system along the direction of the tube-parent axis is stronger than that along the direction of the vertical tube-parent axis. The larger the acceleration of input target peak is, the more remarkable the nonlinear characteristics of the interconnected structure is, and the more remarkable the seismic response of the instrument equipment in the torsional vibration induced by seismic wave excitation along the axis of the pipe is. Adoption of damping design can reduce significantly the seismic response of equipment. The acceleration dynamic amplification factor of the bracket is obviously larger than the strain response dynamic amplification factor. Considering the seismic performance evaluation of the electrical equipment and the economy of the bracket structure design, it is reasonable to adopt the 1.4 times of the strain response of the bracket as the dynamic amplification factor of the bracket and it has a good envelop performance.

Key words: seismic coupling effect; UHV polymeric housed electrical equipment; tube bus; vibration stand test; nonlinear characteristic; dynamic amplification factor of the bracket

收稿日期:2021-09-16; 修回日期:2021-11-17

基金项目:国家重点研发计划资助(2018YFC0809400)。

Project Supported by National Key R&D Program of China(2018YFC0809400).

0 引言

特高压输电工程在解决中国能源分配不均、环境污染等问题方面举足轻重,为中国经济发展提供电力能源。特高压变电站作为输电工程的重要节点,在电力系统中对电压和电流进行变换,是接受及分配电能的重要场所,其安全运行关系整个输电系统。避雷器和互感器作为变电站中的重要保护电气设备,自身结构形状特殊,不仅又细又长,而且重量大、重心高,在地震中套管根部承受很大的弯矩,导致因套管强度不足而断裂。而且该类设备的固有频率在1~10 Hz范围内,与地震波的卓越频率相近,易于地震波发生共振,易损性较高^[1~5]。鉴于特高压工程的重要性,中国地震区划图和抗震分级结果对特高压电气设备的抗震性能要求更高^[6]。

变电站内的电气设备基本采用瓷质脆性材料,变形能力较差,破坏应力较低,而且设备之间通过导线或者管母线连接,在地震中设备之间容易产生拉扯,加重了电气设备的损坏程度。近年来中国发生的特大地震中,电气设备的损坏率很高。汶川地震中的安县220 kV变电站中,几乎所有的避雷器都有损坏,基本为根部折弯或断裂^[7]。庐山地震中,24座变电站和224条线路受到破坏和影响,共计626台变电设备损坏^[8]。

鉴于采用陶瓷脆性材料的电气设备在地震中损坏率过高的问题,越来越多的学者及设计人员倾向采用一种玻璃纤维环氧树脂材料(简称复合材料)作为电气设备的支撑及绝缘材料,复合材料具有机械强度高、抗冲击性能及延性好,具有优异的防震和防脆断性能^[9~11]。目前采用复合材料的电气设备已经部分应用于特高压变电站^[12]。

当前学者及科研人员针对采用复合材料的电气设备以及硬管母线连接的瓷质电气设备进行了一些抗震性能研究。2016年,李圣等开展了复合材料绝缘子的动力特性与地震易损性研究,复合材料绝缘子中套管与金属法兰的胶装连接段是抗弯承载力的薄弱部位,该段抗弯刚度明显小于套管刚度^[13]。2018年,谢强等开展了采用复合材料的±800 kV特高压直流穿墙套管振动台试验,研究了复合材料穿墙套管在不同地震动和加速度峰值下的地震响应^[14]。2014年,程永锋等针对硬管母线连接的1 000 kV避雷器和互感器进行了振动台试验,研究了采用瓷质材料的避雷器和互感器互连耦合结构的地震响应规律^[15]。但是对于采用硬管母线连接的复合材料电气设备的抗震性能研究相对较少,缺少复合材料

电气设备在地震作用下因变形较大产生相互牵扯而引起地震响应变化的相关抗震研究成果,有必要对其抗震性能进行研究。

文中通过对采用硬管母线连接的1 000 kV复合外套避雷器和互感器进行联合振动台试验,研究互连体系电气设备的自频率特性以及在地震波作用下的地震响应规律。

1 试验概况

1.1 试验对象

试验对象为某1 000 kV空心复合绝缘子避雷器和互感器。避雷器设备总高度为11.12 m,质量为5 647 kg;避雷器套管节数为4节,套管编号从上至下依次为1~4;第4节套管根部外径为750 mm,内径为690 mm,第1节套管截面尺寸最小,第2、3节相同,第4节套管最大;套管弹性模量为21 GPa,额定机械负荷应力为100 MPa。互感器设备总高度为9.2 m,质量为2 548 kg。互感器套管节数为4节,套管编号从上至下依次为1~4;第4节套管根部外径为395 mm,内径为345 mm,截面尺寸相同的第1、2节套管小于截面尺寸相同的第3、4节套管;套管弹性模量为22 GPa,额定机械负荷应力为120 MPa。避雷器和互感器支架均为钢结构格构式支架,高度分别为7.05、8.5 m,硬管母线外径为200 mm,壁厚为10 mm,避雷器和互感器设备顶端分别采用固定金具和滑动金具与管母连接,避雷器和互感器设备之间跨度为8.5 m。互感器设备为抗震性能较弱设备,互感器底部与支架顶部采用7个铅金属减震器连接。避雷器设备和互感器设备分别位于2个同步振动的振动台上。

1.2 测点布置

空心复合绝缘子是避雷器和互感器设备主要的承载结构,最大应变往往发生在绝缘子套管的根部,在每节套管根部布置应变片;加速度计布置在振动台台面、支架顶部、每节空心复合绝缘子套管的顶部以及第4节套管根部。1 000 kV复合外套避雷器和互感器测点布置图见图1,每节套管根部布置4个应变片,每个加速度测点布置 x 、 y 方向两个加速度计,共使用32个应变片,28个加速度计。 x 方向为管母线轴线方向, y 方向为垂直管母线轴线方向。避雷器设备和互感器设备就位于两个同步振动的振动台上。

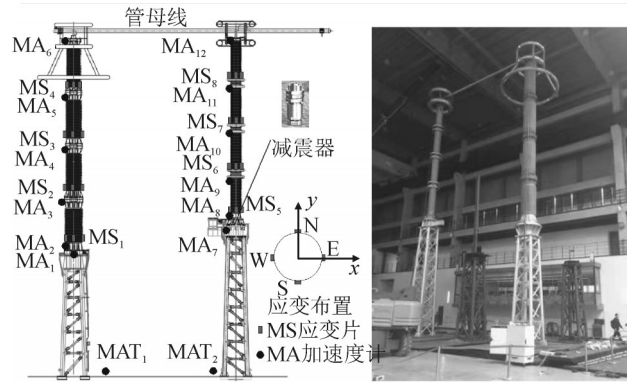


图1 互连结构体系测点布置图

Fig. 1 Measuring points arrangement of interconnected structural system

1.3 输入地震波

试验输入白噪声随机波频率范围为0.1~50 Hz, 加速度峰值为0.05g, 持续时间120 s, 用以测试互连设备的动力特性。

不同地震波具有不同的频谱特性, 在不同地震波作用下的同一设备的地震响应有时差异很大。因此, 振动台试验输入合理的地震动时程波是研究和评判电气设备抗震性能的重要前提。参照 IEEE 693—2005 等相关标准^[16-18], 通过对大量实际记录的地震动时程波的频谱特性和特高压电气设备动力特性的研究, 中国电力科学研究院有限公司和中国地震灾害防御中心共同提出了适用特高压电气设备的标准反应谱^[19-31], 该反应谱在电力设施抗震设计规范的地震影响系数曲线基础上增加了33 Hz 频率处的刚性点, 场地特征周期为0.9 s, 地震动力放大系数为2.5, 基本可以包络所有场地类别的特征周期, 具有较广泛的场地通用性。文[32]中将该人工地震波与典型的地震记录, 如 Elcentro 波和 Landers 波进行了对比分析研究, 研究结果表明, 人工地震波基本可以包络这两种地震记录波, 因此试验中选用人工波作为试验输入波形来研究设备在地震作用下的地震响应。地震影响系数曲线见图2。

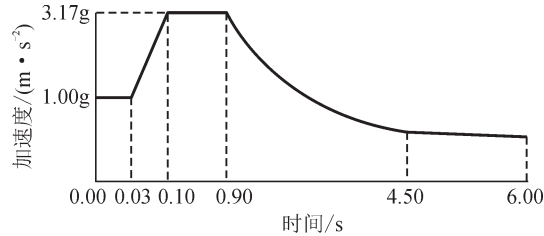


图2 地震影响系数曲线

Fig. 2 Seismic effect coefficient curve

以标准反应谱为需求谱(RRS)拟合而成的峰值加速度为1.0g(阻尼比取0.02)的标准时程波见图3。标准时程波对应的试验谱(TRS)与需求谱的对比见

图4。标准时程波的频谱特性基本包络标准反应谱, 标准时程波的卓越频率段波动较为平缓, 对于电气设备具有较为广泛的通用性。

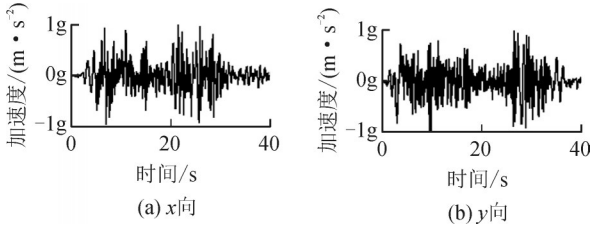


图3 标准时程波

Fig. 3 Artificial standard time history wave

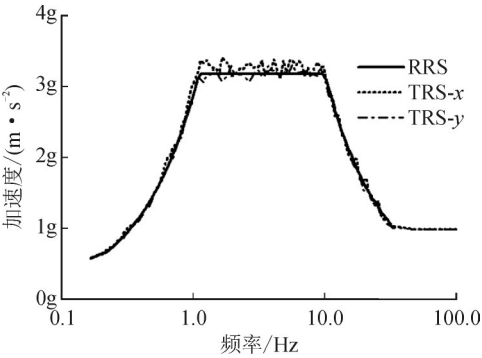


图4 试验谱与需求谱对比

Fig. 4 Comparison between required response spectrum and test response spectrum

1.4 试验工况

文中对互连结构体系分别输入x、y方向地震波激励, 输入目标峰值加速度分别为PGA=0.1g、0.2g、0.4g、0.5g。白噪声扫频时进行x、y双向扫频。地震波试验前后进行白噪声扫频, 观测设备外观及自振频率的变化, 确保设备地震波试验过程中没有损坏, 具体试验加载工况见表1。

表1 试验加载工况

Table 1 Loading cases of the test

加载工况	地震激励波	激励方向	目标峰值加速度/(m·s ⁻²)
1	白噪声	x+y	0.05g
2	标准时程波	x	0.10g
3	标准时程波	y	0.10g
4	白噪声	x+y	0.05g
5	标准时程波	x	0.20g
6	标准时程波	y	0.20g
7	白噪声	x+y	0.05g
8	标准时程波	x	0.40g
9	标准时程波	y	0.40g
10	白噪声	x+y	0.05g
11	标准时程波	x	0.50g
12	标准时程波	y	0.50g
13	白噪声	x+y	0.05g

2 试验结果分析

2.1 动力特性分析

多自由度系统频响函数在自振频率点的极点公式为^[33]

$$s_r = -\xi_r \omega_r + j\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2} = -\sigma_r + j\nu_r \quad (1)$$

式(1)中: s_r 为系统的极点; r 为系统模式阶次; ξ_r 为阻尼比; ω_r 为固有频率。由频响函数虚频曲线峰值对应的频率得到 ν_r , $\sigma_r = (\omega_2 - \omega_1)/2$, 其中 ω_1 , ω_2 为实频曲线正负峰值对应的频率, 最后计算求得系统频率和阻尼比。

以白噪声扫频所得避雷器和互感器设备关键测点及振动台面的加速度时程曲线, 做出各个测点相对于振动台台面测点加速度频响函数, 避雷器和互感器设备顶端加速度频响函数幅值谱($|H(\omega)|$)见图5。计算所得结构的动力特性见表2。试验后的结构自振频率降低了6.01%~7.34%, 阻尼比显著增加。互连结构体系在 x 向同步振动, y 向为互感器或避雷器的单独振动。互连结构体系沿 x 向的自振频率处于两个设备自振频率之间。通过频响函数虚频幅值得到互连结构体系的前三阶阵型图见图6。互连结构体系的前三阶阵型为水平向振动, 一阶阵型为互感器 y 向振动, 二阶阵型为避雷器和互感器设备 x 向同步振动, 三阶阵型为避雷器设备 y 向振动。

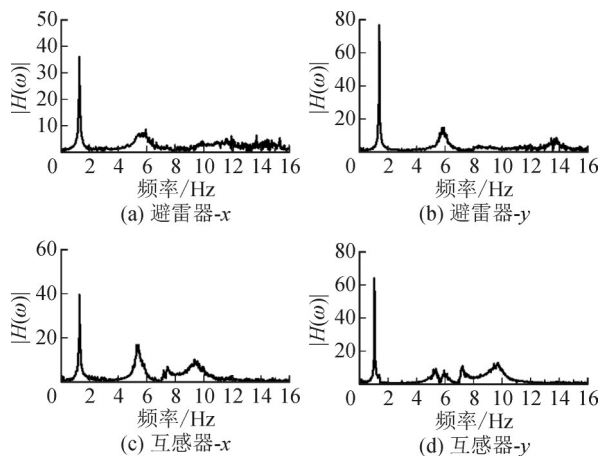


图5 设备顶端加速度频响函数幅值谱

Fig. 5 Amplitude spectra of acceleration frequency response functions at the top of equipment

表2 设备自振频率和阻尼比

Table 2 Frequency and damping ratio of equipment

工况名称	避雷器		互感器		避雷器		互感器1阶	
	1阶频率/Hz	1阶频率/Hz	1阶频率/Hz	1阶频率/Hz	1阶阻尼比/%	1阶阻尼比/%	1阶阻尼比/%	1阶阻尼比/%
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	1.297	1.422	1.297	1.063	1.20	1.66	1.22	2.20
13	1.219	1.329	1.219	0.985	2.56	1.80	2.58	3.19

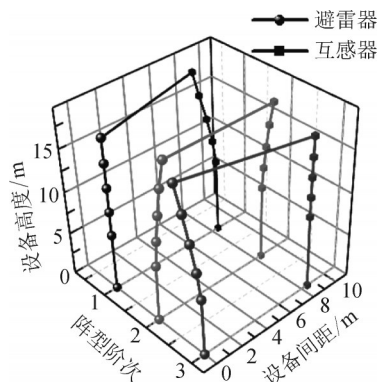


图6 互连结构体系前三阶阵型图

Fig. 6 First three vibration modes of interconnected structural system

2.2 加速度响应分析

为了研究互连结构的加速度动力响应, 定义加速度动力放大系数为各测点峰值加速度与振动台台面加速度峰值的比值, 主振方向各工况测点的加速度动力放大系数以及同一测点非主振方向与主振方向峰值加速度比值见图7。图7中主振方向为地震波激励方向, 非主振方向与地震波激励方向垂直; y 轴为设备高度, 下 x 轴为加速度动力放大系数, 上 x 轴为同一加速度测点非主振方向与主振方向峰值加速度比值。

由图7可知:

1) 随着输入目标峰值加速度的增加, 相同测点的加速度动力放大系数逐渐减小, 互连结构体系有明显的非线性特性。

2) 曲线在避雷器和互感器设备的顶端刚度最小的套管连接处以及避雷器设备与支架连接处有明显的拐点出现, 这是由于连接处结构刚度发生了突变, 刚度较柔的套管显著放大了结构的加速度响应; 互感器设备的加速度动力放大系数在支架高度以上增加的相对平缓, 而且随输入地震等级的增加有明显的减小, 可见减震器显著的减小了互感器设备的加速度响应。

3) 随着输入目标峰值加速度的增大, 台面非主振方向输出加速度占比逐渐减小(由 $PGA=0.1g$ 对应的15%减小到 $PGA=0.5g$ 对应的5%); x 向地震激励时, 避雷器和互感器设备 y 向加速度占比整体逐渐减小, 而 y 向地震激励时, 避雷器设备和互感器设备的 x 向加速度占比逐渐增大; x 向地震波激励下引起的 y 向的振动更加明显, 尤其对于互感器设备, 设备顶端的 y 向加速度占比达到了68%, 此时的结构有较大的 y 向的扭转振动, 振动更加复杂。

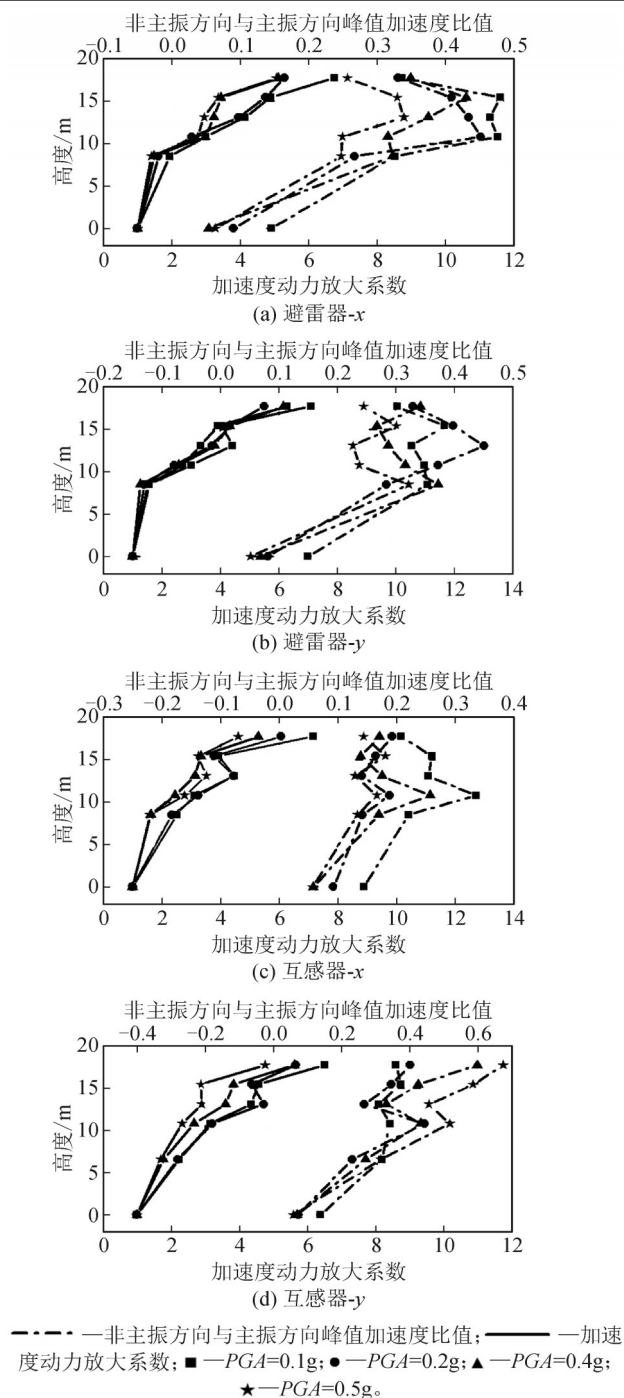


图7 加速度动力放大系数和非主振方向与主振方向峰值加速度比值曲线

Fig. 7 Acceleration dynamic amplification coefficient and the ratio of peak acceleration of non-main vibration direction to main vibration direction curve

2.3 应变响应分析

因振动台输出系统存在误差,台面输出加速度时程波与输入目标加速度时程波存在一定的差距,而且目标峰值加速度越大这种差异越明显。各工况台面输出加速度时程波对应的频谱曲线即台面输出谱(MOS)与需求谱(RRS)的对比见图8(a)-(d),PGA=0.4g、0.5g的台面输出谱在互连结构体系的自

振频率点对应的谱值落在需求谱之下,台面输出谱与需求谱存在较大的差异,为了减小这种差异,研究互连结构的地震响应规律,同时对互连结构的抗震性能进行更加准确的评估,本次试验对互连结构的地震响应进行调整,考虑到设备振动以一阶振型为主,调整的目标是将应变响应较大的避雷器设备自振频率点对应的台面输出谱值调整到需求谱的数值水平,调整后的台面输出谱见图8(e)-(h)。

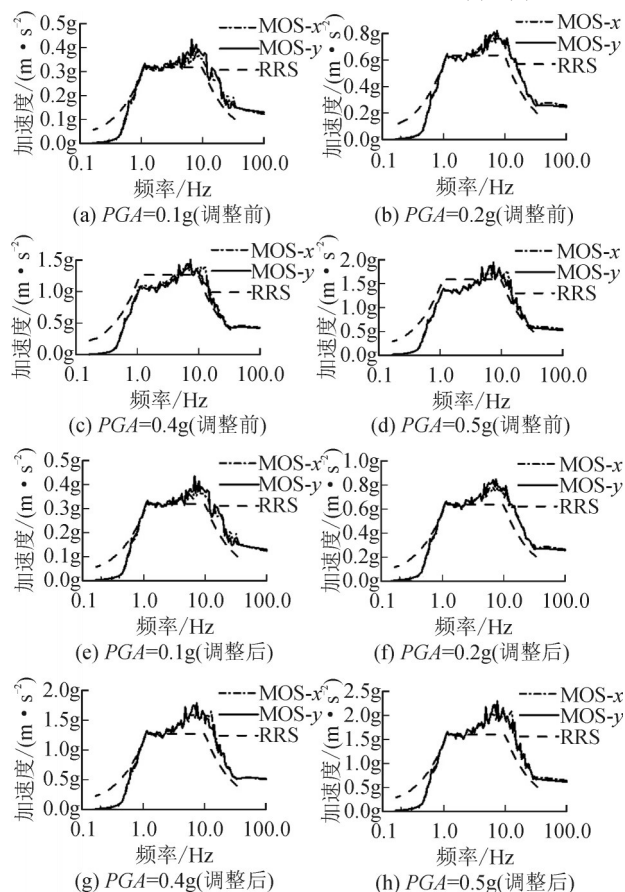


图8 调整前后的MOS与RRS对比

Fig. 8 Comparison of MOS and RRS before and after adjustment

套管根部应力是考核设备抗震性能的关键因素,试验过程中通过各关键应变测点得到应变峰值并按照台面输出谱的调整方式进行调整,互连结构体系调整前后的应变响应见图9。

由图8和图9可知:

- 1)高度越低,应变响应越大,而且随着输入目标峰值加速度的增加,根部的应变响应放大的越显著,结构形式存在进一步优化设计空间。
- 2)在不同等级地震波作用下的互连结构体系的应变响应呈现较为显著的非线性特性;互感器设备的应变响应在PGA=0.2g之后增加幅度显著变小,从PGA=0.4g和PGA=0.5g的应变结果来看,互感器的应变响应基本没变,甚至有所减小。减震器的设

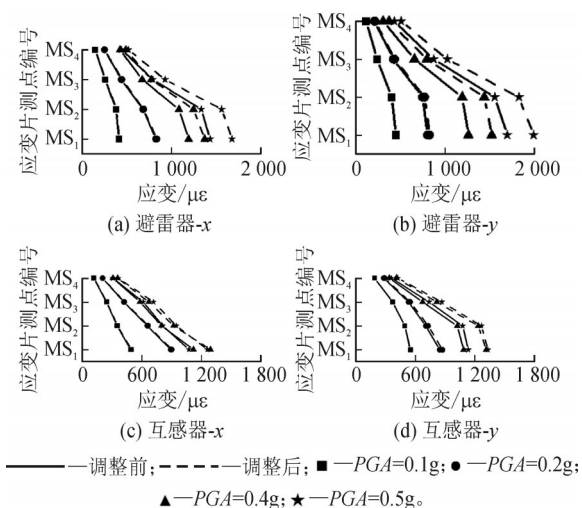


图9 调整前后的应变响应峰值

Fig. 9 Peak strain response before and after adjustment
计目标是在 $PGA=0.2g$ 时进入屈服状态,开始起到衰减设备地震响应的作用,从图9中可以看出,减震器的减震性能良好。

2.4 耦合效应分析

避雷器和互感器设备的动力特性不一致,导致在地震波作用下产生相互的牵扯作用,为了研究两个设备之间的耦合效应,做出各工况避雷器和互感器设备顶端实测加速度的频谱曲线见图10,通过加速度积分得到的设备顶端相对于台面的位移峰值见图11。

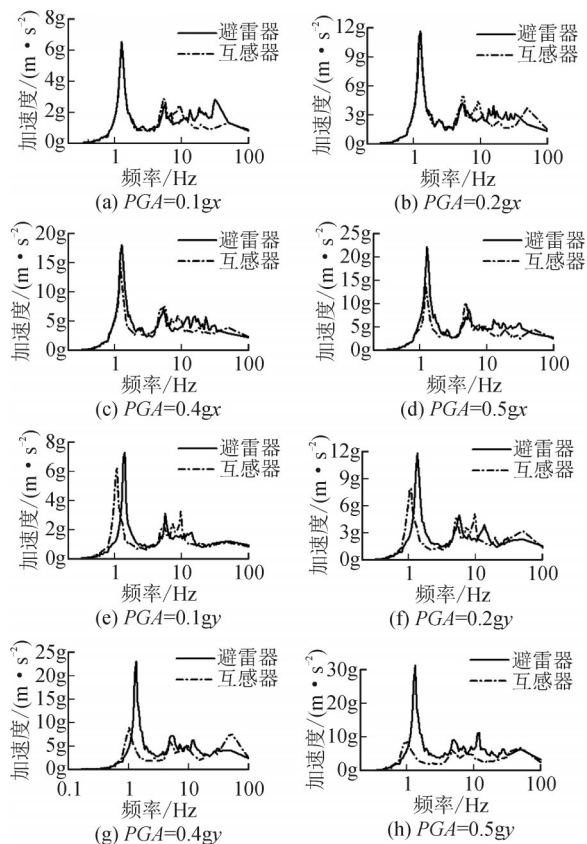


图10 设备顶端加速度频谱曲线

Fig. 10 Acceleration spectrum curve at the top of equipment

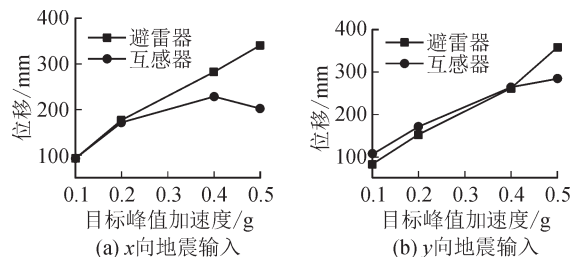


图11 设备顶端相对于台面的位移峰值

Fig. 11 Peak displacement of equipment top relative to mesa

由图10和图11可知:

1)x向地震作用下,目标峰值加速度 $PGA=0.1g$ 、 $0.2g$ 两个设备的顶端位移响应及加速度频谱特性基本一致,两个设备通过硬管母连接基本上是同步振动,即地震作用没有引起互感器设备顶端滑动金具与硬管母的滑动位移,这是因为硬管母与滑动金具之间存在一定的夹紧力和摩擦力的作用。随着目标峰值加速度的增加,两个设备的顶端位移峰值以及加速度响应频谱曲线差异逐渐增大,此时滑动金具产生滑动位移。由于减震器的作用,互感器顶端位移响应的非线性更加显著, $PGA=0.5g$ 的位移响应相对于 $PGA=0.4g$ 的位移响应显著减小,减震器对于减小设备的位移响应具有较好的效果。

2)y向地震作用下,目标峰值加速度 $PGA=0.1g$ 、 $0.2g$ 避雷器设备的顶端位移响应小于互感器设备,此时互感器设备拉扯避雷器设备,而且两个设备之间产生扭转振动,随着输入加速度的进一步增大,由于减震器的作用,互感器设备的顶端位移响应增加的幅度减小,此时避雷器设备拉扯互感器设备。

3)随着目标峰值加速度的增加,x向地震作用下的避雷器自振频率处的频谱曲线峰值增加幅度减小,y向地震作用下的避雷器自振频率处的频谱曲线峰值基本线性增加,所以互连结构在x向耦合效应较强,y向的耦合效应相对弱很多。

2.5 互连结构体系支架加速度及应变响应动力放大效应分析

支架加速度动力放大系数为支架顶端加速度与振动台台面加速度峰值的比值,支架应变响应动力放大系数为单体设备(不带支架)与带支架设备套管应变响应峰值的比值。互连结构体系支架加速度动力放大系数见图12。

通过振动台试验得到避雷器单体设备(不含支架)的目标峰值加速度 $PGA=0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.5g$ 并考虑1.4倍的支架动力放大系数的设备地震响应结果,按照自振频率点对应的台面输出加速度时程波谱值调整到需求谱数值水平的方式对各工况的应

变响应进行调整,得到最终的避雷器单体设备(不含支架)的应变响应见图13,避雷器支架应变响应动力放大系数见图14。

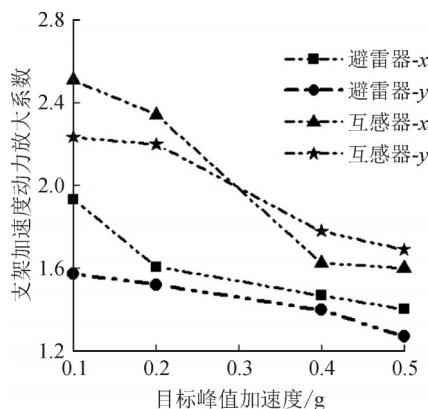


图12 支架加速度动力放大系数

Fig. 12 Acceleration dynamic amplification factor of bracket

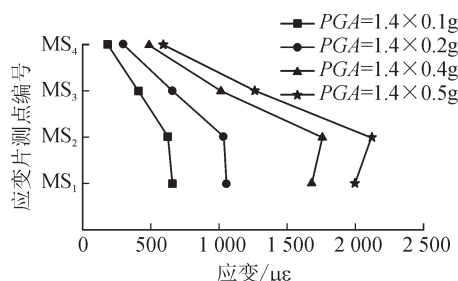


图13 避雷器单体设备应变峰值

Fig. 13 Peak strain of arrester unit equipment

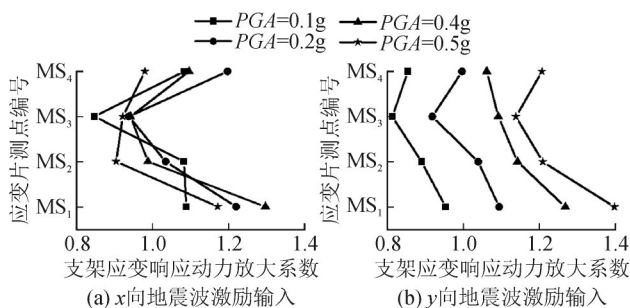


图14 避雷器支架应变响应动力放大系数

Fig. 14 Strain response dynamic amplification factor of arrester bracket

由图12~14可知:

1) 支架加速度动力放大系数的范围为1.27~2.34,支架对于加速度响应放大明显,远大于低压等级支架加速度响应放大系数1.2。互感器支架加速度动力放大系数随着输入加速度等级的增大减小的幅度更加显著,这是由于互连结构体系之间的耦合效应导致的结果。

2) 互连结构体系避雷器设备的支架应变响应动力放大系数范围为0.814~1.398,当设备不具备带支架进行振动台抗震性能试验时,采用1.4倍的支架动力放大系数是合理的,具有较好的包容性。

x 向地震波激励下,由于两个设备之间的耦合作用较强,相互拉扯,避雷器设备根部套管支架应变响应动力放大系数随目标峰值加速度的增加先增大后减小,而 y 向地震波激励下,两个设备之间耦合作用较弱,避雷器设备支架应变响应动力放大系数逐渐增大。

3) 互连结构体系设备支架加速度动力放大系数要显著大于支架应变响应动力放大系数,如果采用支架加速度动力放大系数对支架进行结构设计,将造成支架刚度的过大,浪费材料,而应变响应是设备在地震中损坏的关键因素,因此兼顾设备抗震性能的提升以及支架设计的经济性,支架动力放大系数宜采用应变响应动力放大系数。

3 结论

文中通过硬管母线连接的1 000 kV复合外套避雷器和互感器地震模拟振动台试验研究,得出的主要结论如下:

1) 互连结构体系试验后的结构自振频率降低了6.01%~7.34%;互连结构体系沿管母轴线方向的耦合效应较强,垂直管母轴线方向耦合效应较弱。

2) 输入目标峰值加速度越大,相同测点的加速度动力放大系数越小,互连结构体系有明显的非线性特性;沿管母轴线方向的地震波激励引起的扭转振动响应最大,扭转振动中互感器设备的地震响应尤为显著;安装减震器的互感器设备的地震响应显著减小。

3) 输入目标峰值加速度较小时,由于硬管母线的连接作用,互感器拉扯避雷器设备,随着输入目标峰值加速度的增加,由于安装减震器的互感器设备地震响应增加的幅度显著减小,避雷器设备拉扯互感器设备。

4) 支架加速度动力放大系数显著大于支架应变响应动力放大系数,而且考虑应变响应是设备损坏的关键因素,并兼顾支架结构设计经济性,支架动力放大系数宜采用应变响应动力放大系数;在对支架进行结构设计或者单体设备不具备带支架进行振动台试验时考虑1.4倍支架动力放大系数较为合理,可以兼顾电气设备抗震性能评估及支架结构设计经济性。

参考文献:

- [1] 程永锋,朱全军,卢智成. 变电站电力设施抗震措施研究现状与发展趋势[J]. 电网技术,2008,32(22):84-89.
CHENG Yongfeng, ZHU Qianjun, LU Zhicheng. Progress

- and development trend on seismic measures of electric power equipments in transformer substation[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 84-89.
- [2] 张 军, 齐立忠, 李科文, 等. 电瓷型高压电气设备的抗震试验及有限元分析[J]. 电力建设, 2011, 32(7): 6-10.
ZHANG Jun, QI Lizhong, LI Kewen, et al. Shock test and finite element analysis of porcelain high-voltage electrical equipment[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(7): 6-10.
- [3] 丁 璨, 丁奕灵, 袁 召, 等. 160 kV 机械式直流断路器抗震特性分析[J]. 广东电力, 2021, 34(12): 104-110.
DING Can, DING Yiling, YUAN Zhao, et al. Antiseismic analysis of 160 kV mechanical DC circuit breaker[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(12): 104-110.
- [4] 赖炜煌, 谢 强, 李晓璇, 等. 悬吊式滤波电容器单体与耦联状态抗震性能对比分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 71-78.
LAI Weihuang, XIE Qiang, LI Xiaoxuan, et al. Comparative analyses on seismic performance of suspended capacitor in standalone and coupled states[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 71-78.
- [5] 张文强, 郝际平, 解 琦, 等. 国内外电瓷型高压电气设备瓷套管连接设计比较研究[J]. 电瓷避雷器, 2010(2): 15-20.
ZHANG Wenqiang, HAO Jiping, XIE Qi, et al. Comparative study on porcelain insulators design for high-voltage electric equipment at home and abroad[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(2): 15-20.
- [6] 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]. Electric Power Construction, 2015, 37(2): 571-576.
- [7] 于永清, 李光范, 李 鹏, 等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 1-6.
YU Yongqing, LI Guangfan, LI Peng, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by wenchuan earthquake[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 1-6.
- [8] 尤红兵, 赵凤新. 芦山 7.0 级地震及电力设施破坏原因分析[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 100-104.
YOU Hongbing, ZHAO Fengxin. M7.0 earthquake in lushan and damage cause analysis of power facilities[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(8): 100-104.
- [9] 周庆庆, 龚兴国, 李 青, 等. 复合绝缘材料在 750 kV 变电站中应用的关键技术[J]. 电力建设, 2013, 34(11): 105-109.
ZHOU Qingqing, GONG Xingguo, LI Qing, et al. Key technologies of composite insulating materials adopted in 750 kV substation[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(11): 105-109.
- [10] 李 雍, 朱 轲, 邱雪梅, 等. 220 kV 复合绝缘材料横担防雷性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 234-239.
LI Yong, ZHU Ke, QIU Xuemei, et al. Study on lightning protection performance of 220 kV composite insulating material[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 234-239.
- [11] 吴光亚, 蔡 炜, 苏雪源. 复合硅橡胶材料在外绝缘领域的应用[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 56-57.
WU Guangya, CAI Wei, SU Xueyuan. The development and application of the silicon rubber composite material[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5): 56-57.
- [12] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 1 100 kV 复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3224-3230.
SUN Yuhang, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Study on earthquake simulation shaking table test of 1 100 kV composite external insulation bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3224-3230.
- [13] 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.
- [14] 谢 强, 何 畅, 杨振宇, 等. ± 800 kV 特高压直流穿墙套管地震模拟振动台试验研究[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 140-146.
XIE Qiang, HE Chang, YANG Zhenyu, et al. Shaking table tests on ± 800 kV UHV DC wall bushing[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 140-146.
- [15] 程永锋, 邱 宁, 卢智成, 等. 硬管母线连接的 1 000 kV 避雷器和电容式电压互感器抗震性能振动台试验[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3882-3887.
CHENG Yongfeng, QIU Ning, LU Zhicheng, et al. Shake table test on seismic performance of 1 000 kV arrester and capacitor voltage transformer Interconnected by Tube Bus [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3882-3887.
- [16] Recommended practice for seismic design of substations: IEEE Std 693—2005[S]. 2005.
- [17] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 19-21.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 19-21.
- [18] 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013: 12-15.
Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013: 12-15.
- [19] 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.
- [20] 孟宪政, 代泽兵, 卢智成, 等. 500 kV 避雷器抗震性能振动台试验研究[J]. 电力建设, 2014, 35(1): 35-39.
- MENG Xianzheng, DAI Zebing, LU Zhicheng, et al. Shaking table test for seismic performance of 500 kV arrester[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(1): 35-39.
- [21] 刘天舒, 苏昊, 潘超. 交直流混杂环境下三相变压器绕组振动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 61-68.
- LIU Tianshu, SU Hao, PAN Chao. Research on winding vibration of a three-phase transformer under an AC/DC hybrid environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 61-68.
- [22] 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.
- [23] 程永锋, 王海菠, 卢智成, 等. 特高压电抗器-套管体系抗震性能及本体动力放大作用计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6109-6117.
- CHENG Yongfeng, WANG Haibo, LU Zhicheng, et al. Seismic performance and calculation method of dynamic amplification of body research of UHV reactor-bushing system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6109-6117.
- [24] 万书亭, 冉斌, 王志欢. 基于振动响应多维联合特征的瓷支柱绝缘子故障识别方法[J]. 广东电力, 2020, 33(9): 18-26.
- WAN Shuting, RAN Bin, WANG Zhihuan. Fault identification method of porcelain post insulator based on combined characteristics of multi dimensional vibration response[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(9): 18-26.
- [25] 徐永干, 冉恒, 苟鑫, 等. 基于广义S变换和QPSO-SVM的水电机组振动故障诊断方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 38-44.
- XU Yonggan, RAN Heng, GOU Xin, et al. Vibration fault diagnosis for hydroelectric generating unit based on generalized S transform and QPSO-SVM[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 38-44.
- [26] 戴锋, 高爽, 宋博, 等. 基于有限元的干式空心电抗器振动特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5): 104-109.
- DAI Feng, GAO Shuang, SONG Bo, et al. Study on vibration characteristic of dry-type air-core reactor based on finite element method[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5): 104-109.
- [27] 张学娟, 孟天男, 井永腾, 等. 变压器绕组振动特性的电磁-机械场仿真与试验[J]. 变压器, 2021, 58(4): 20-25.
- ZHANG Xuejuan, MENG Tiannan, JING Yongteng, et al. Electromagnetic-mechanical field simulation and experiment of transformer winding vibration characteristic[J]. Transformer, 2021, 58(4): 20-25.
- [28] 武立平, 马维青, 程胤璋, 等. 基于振动信号指标能量的变压器机械故障检测[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 126-131.
- WU Liping, MA Weiqing, CHENG Yinzhang, et al. Transformer mechanical fault diagnosis based on index energy of vibration signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 126-131.
- [29] 屈斌, 张利, 王永宁, 等. 基于振动信号的GIS机械松动与局部放电诊断方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 98-106.
- QU Bin, ZHANG Li, WANG Yongning, et al. Study of mechanical looseness and partial discharge diagnoses of GIS based on vibration signals[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 98-106.
- [30] 孙宇晗, 程永锋, 王晓宁, 等. 1 100 kV 气体绝缘封闭开关复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2179-2187.
- SUN Yuhang, CHENG Yongfeng, WANG Xiaoning, et al. Study on earthquake simulation shaking table test of 1 100 kV gas insulated switchgear composite external insulation bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2179-2187.
- [31] 刘振林, 程永锋, 卢智成, 等. 安装剪切型铅减震器的特高压标准化避雷器地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2595-2602.
- LIU Zhenlin, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Shake table test on UHV standardization lightning arrester installed with shear-type lead dampers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2595-2602.
- [32] 程永锋, 朱祝兵, 卢智成, 等. 高压电器设备抗震试验关键技术研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014.
- CHENG Yongfeng, ZHU Zhubing, LU Zhicheng, et al. Key technologies research on seismic test of high voltage electrical equipment[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2014.
- [33] 李德葆. 关于复模态理论的数学方法、物理概念及其与实模态理论统一性的证明[J]. 清华大学学报, 1985, 25(3): 26-37.
- LI Debao. Some general concepts of complex mode theory[J]. Journal of Tsinghua University, 1985, 25(3): 26-37.
- 孟宪政(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事结构抗震研究工作(E-mail: mxzysd@163.com)。