

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230724003

110 kV 干式空心并联电抗器振动台试验与易损性研究*

李吉超^{1,2}, 罗清宇^{3,4}, 张宏^{3,4}, 贺军^{3,4}, 李建赢³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 101149; 4. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 电抗器是变电站的重要设备之一, 上部线圈由底部陶瓷绝缘子支撑, 整体尺寸大、重心高。由于结构形式的特殊性, 其在地震作用下的动力响应较为复杂。本文对110 kV干式空心并联电抗器进行了振动台试验研究, 通过白噪声测定了电抗器的自振频率和阻尼比; 在0.15g和0.5g人工地震动输入下, 测量了电抗器关键部位的应变、加速度和位移响应, 分析了电抗器在地震作用下的动力响应规律, 探讨了电抗器的可能破坏模式, 进一步计算了电抗器的地震易损性曲线。研究表明: 电抗器的动力特性近似于单自由度体系, 一阶自振频率为3.3 Hz, 阻尼比为3.9%; 电抗器在地震作用下的变形主要发生在绝缘子以及绝缘子-线圈连接部位, 上部线圈可认为是刚体; 与绝缘子相比, 绝缘子-线圈连接部位的刚度较小, 变形更集中, 是电抗器的薄弱部位; 0.15g人工地震动试验后, 电抗器自振频率下降3.6%, 0.5g人工地震动试验后, 电抗器自振频率下降6.3%; 根据绝缘子实测应变, 考虑地震作用与其他荷载产生的总应力, 电抗器的安全系数为2.14, 仍然具有一定的安全储备; 基于试验结果计算电抗器的地震易损性, 抗震能力中值为0.965g, 对数标准差为0.4。

关键词: 干式电抗器; 振动台试验; 动力特性; 抗震性能; 变形模式; 易损性曲线

中图分类号: TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0050-09

Shaking Table Test and Seismic Fragility Analysis of 110 kV Dry Type Hollow Electrical Reactor

LI Jichao^{1,2}, LUO Qingyu^{3,4}, ZHANG Hong^{3,4}, HE Jun^{3,4}, LI Jianying³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. State Key Laboratory of Building Safety and Environment, Beijing 101149, China; 4. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: Electrical reactor (ER) is one of the most important equipment in substation systems. The upper coil is supported by the bottom ceramic insulator, leading to a large overall size and a high center of gravity. The dynamic response of an ER under earthquake is complex due to its special struc-

* 收稿日期:2023-07-24;修回日期:2023-11-18

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费(2020C03)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021EEEVL0310)、黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2020E023)资助

作者简介:李吉超(1990—),男,副研究员,博士。主要从事电力系统抗震韧性研究。E-mail:lijichao230@iem.ac.cn

通讯作者:罗清宇(1992—),女,工程师,硕士。主要从事抗震试验研究。E-mail:luoqingyu@cabrtech.com

ture. In this study, the seismic performance of a 110 kV dry type hollow ER was investigated using a shaking table test. The natural frequency and damping ratio of the ER were identified using white noise excitation. An artificial ground motion was used as the seismic excitation with amplitudes of 0.15g and 0.5g, respectively. The strain, acceleration, and displacement responses of the critical parts of ER were measured. The dynamic response pattern of ER was analyzed. The possible failure mode of ER was discussed. The fragility curve of ER was further calculated. The results show that ER performs like a single-degree-of-freedom system. The first-order natural frequency and damping ratio of ER are 3.3 Hz and 3.9%, respectively. The deformation of ER mainly occurs in insulators and insulator-coil connections, while the upper coil performs like a rigid body. Compared with insulators, the insulator-coil connections have smaller lateral stiffness and more concentrated deformation. Therefore, it is regarded as the weak point of ER. The frequency of ER decreases by 3.6% and 6.3% after the 0.15g and 0.5g seismic tests, respectively. Based on the measured strains of insulators, considering the total stress caused by seismic action and other loads, the ER exhibits some seismic capacity reserve with a safety factor of 2.14. The fragility curve of ER was calculated based on test results. The median capacity and the logarithmic standard deviation of ER are 0.965g and 0.40, respectively.

Keywords: dry type electrical reactor; shaking table test; dynamic properties; seismic performance; deformation pattern; fragility curves

0 引言

电抗器是变电站中的重要电气设备之一,是保证变电站稳定运行以实现变换电压、输送电能等功能的基础^[1-2]。电抗器由上部主体线圈和下部绝缘子支承组成,具有“头重脚轻”的结构特征,支柱绝缘子的刚度远低于电抗器主体,是电抗器的薄弱部位。同时绝缘子支撑多采用陶瓷脆性材料制作,强度较低,延性较差^[3]。因此,电抗器在以往的地震中遭受过大量破坏^[4-5],导致变电站^[6]甚至整个电力系统^[7]丧失功能,严重影响社会经济和人民生活正常运行^[8]。

近年来,学者对不同电压等级、不同形式电抗器的抗震性能开展了一些研究。刘媛等^[9]采用ANSYS分析了66 kV干式空心并联电抗器的抗震性能,指出绝缘子根部是强度验算的关键;王锋等^[10]采用ANSYS对干式空心电抗器进行抗震分析,指出地震作用下电抗器的最大应力出现在线圈与绝缘子支架连接处;朱旺等^[11]采用ABAQUS分析了耦联效应对800 kV干式平波电抗器加速度响应的影响,底部支撑绝缘子采用斜向布置。

数值模拟是研究电抗器抗震性能的常用方法^[12],然而电抗器结构特殊,连接节点复杂,数值模拟中的简化和假定将影响计算结果的准确性,采用

振动台试验能够直观再现电抗器在地震作用下的动力响应。范书立等^[13]进行了特高压干式平波电抗器1:8缩尺模型振动台试验,结果表明绝缘子根部和顶部是电抗器的易损部位,然而缩尺模型将为试验带来一定误差。李建赢等^[14]进行了110 kV串联电抗器原型振动台试验,电抗器受力最大的构件为底部支柱,支柱采用玻璃钢材料制作,其破坏应力约为陶瓷材料的2倍。俞越中等^[15]对110 kV干式电抗器进行了振动台试验研究,绝缘子支撑采用复合材料,抗震性能优于陶瓷材料。

20世纪90年代,美国太平洋地震工程研究中心提出了概率地震易损性理论(probabilistic seismic fragility analysis,PSFA)^[16],将该理论用于电气设备抗震性能分析进而建立其地震易损性曲线,将为电力系统的抗震能力分析提供基础数据。目前,学者针对各类电气设备的抗震易损性开展了一系列研究,包括变压器^[17]、断路器^[18]、电流互感器^[19]、隔离开关^[20]等,而有关电抗器的地震易损性的研究非常少见。李吉超等^[21]统计了110~220 kV各类电气设备的地震易损性数据,也未包含电抗器的研究成果。

综上所述,目前针对电抗器的振动台试验研究较少,仍存在一些不足:缩尺模型试验由于相似比的限制存在一定误差;电抗器的支柱绝缘子大多采用破坏应力较高的玻璃钢材料或复合材料,针对陶

瓷绝缘子的研究较少;根据试验数据进一步分析电抗器地震易损性的研究更加有限。

本文对陶瓷绝缘子支撑的110 kV干式空心并联电抗器原型进行了地震模拟振动台试验,研究了电抗器的动力特性与响应规律,探讨了电抗器的可能破坏模式,进一步给出了电抗器的试验易损性模型。

1 振动台试验设计

1.1 电抗器介绍

电抗器的作用是增大短路阻抗、限制短路电流,同时还有补偿线路无功、抑制潜供电流、抑制纹波等功能。干式空心并联电抗器是电抗器的常见种类,其主体为空心线圈,下部通过多个绝缘子支撑,整体尺寸大、重心高,结构形式不利于抵抗地震作用。

110 kV干式空心并联电抗器如图1所示。电抗器总高度为6 656 mm,其中线圈高度3 200 mm,绝缘子高度1 500 mm。电抗器直径为3 620 mm,总质量19.2 t,底部通过12个柱状陶瓷绝缘子支撑。



图1 110 kV干式空心并联电抗器

Fig.1 110 kV dry type hollow shunt reactor

本次试验在中国建筑科学研究院抗震实验室进行,绝缘子通过连接板与振动台台面固定。振动台为三向六自由度地震模拟振动台,台面尺寸6 m×6 m;承载能力标准负荷60 t,最大负荷80 t;工作频率范围0.1~50 Hz。

1.2 试验需求谱

考虑到电抗器的对称性,本次试验采用单向加

载。试验需求谱(Required response spectrum, RRS)根据《高压支柱类电气设备抗震试验技术规程》^[22]确定,如图2所示。RRS的阻尼比为 $\xi=2\%$,水平向地面峰值加速度(Peak ground acceleration, PGA)为0.5g,平台段峰值为1.543g,卓越频率范围为1.25~10 Hz。根据需求谱生成人工地震动作为振动台输入,如图3所示。总时长44 s,强震动持续22 s,频率范围0.1~50 Hz。

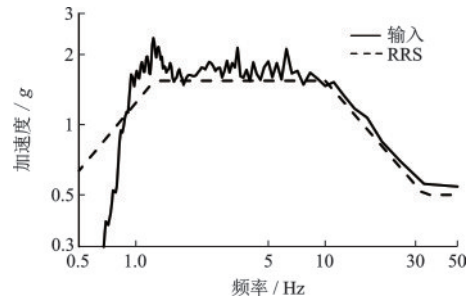


图2 X向0.50g试验需求谱

Fig.2 Required response spectrum of X-direction at 0.5g

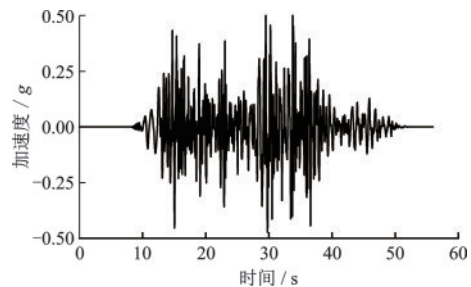


图3 X向0.50g试验人工地震动时程曲线

Fig.3 Artificial ground motion time history of X-direction at 0.5g

1.3 试验工况

振动台试验工况见表1,分为白噪声工况与地震工况。抗震试验前、后均输入白噪声进行电抗器的动态特性探查,加速度幅值为0.05g~0.07g,频率范围为0.5~50 Hz,持续时间均为60 s。试验过程中,实时记录电抗器各部位的加速度、应变响应。

表1 试验工况

Table 1 Test schedule

工况	台面输入	PGA/g
1	白噪声	0.1
2~4	人工地震动(重复3次)	0.15
5	白噪声	0.1
6	人工地震动	0.5
7	白噪声	0.1

1.4 测量方案

试验中对电抗器关键部位的加速度、应变进行测量,传感器布置如图4所示,详细编号见表2。加速度传感器布置于电抗器主体线圈的顶部、底部,安装底板及绝缘子顶部。为判定结构是否发生扭转,线圈顶部的南北两侧均布置加速度传感器,分别为xTS和xTN。由于12个支撑绝缘子均匀对称分布,仅在奇数编号的支撑上布置应变片和加速度传感器。绝缘子根部通常是应力最大的部位,在此处沿x方向对向布置应变片,各绝缘子布置方式与图4中1号绝缘子相同。

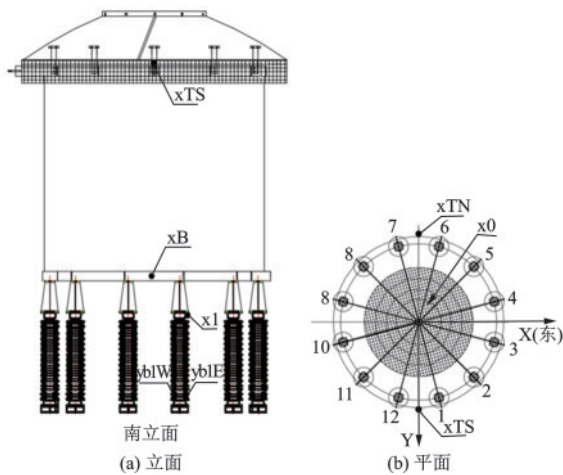


图4 测点布置示意

Fig.4 Layout of measurement: (a) elevation view (b) top view

表2 传感器布置

Table 2 Sensors arrangement

传感器位置	应变片	加速度传感器
1号支撑	1E、1W	x1
3号支撑	3E、3W	x3
5号支撑	5E、5W	x5
7号支撑	7E、7W	x7
9号支撑	9E、9W	x9
11号支撑	11E、11W	x11
线圈顶部	—	xTN、xTS
线圈底部	—	xB
安装底板	—	x0

2 试验结果

2.1 动力特性

白噪声输入时,电抗器线圈顶部与振动台台面

的传递函数如图5所示,在0~25 Hz内仅存在一个峰值(3.34 Hz)。电抗器的大部分质量集中在上部线圈,且线圈部分的刚度远大于电抗器其他部分,从整体来看,电抗器在单方向的动力特性可近似按照单自由度体系考虑。

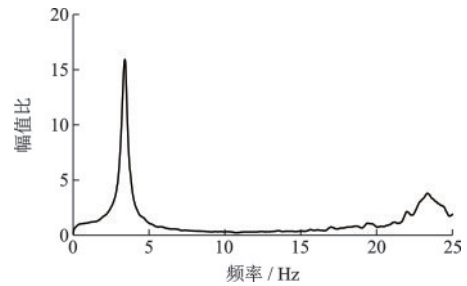


图5 第一次白噪声试验传递函数曲线

Fig.5 Transfer function curve of the first white noise test

电抗器的自振频率和阻尼比见表3所示,阻尼比利用半功率带宽法^[23]获得。可以看出,每次人工地震动试验后结构自振频率均有所降低,而阻尼比有所提高。与试验前相比,3次0.15g人工地震动试验后,频率下降3.6%,阻尼比增大15.4%;0.5g人工地震动试验后,频率下降6.3%,阻尼比增大20.5%。

表3 结构自振频率和阻尼比

Table 3 Frequency and damping ratio results

工况	自振频率/Hz	阻尼比/%
1	3.34	3.9
5	3.22	4.5
7	3.13	4.7

2.2 试验响应谱

为保证振动台输入满足规范要求,试验反应谱(Test response spectra, TRS)应包络需求反应谱。以0.5g输入为例,TRS与RRS的对比如图6所示,

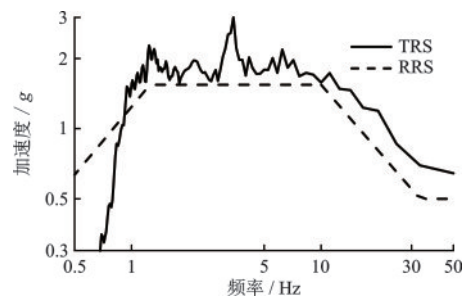


图6 X向0.5g试验反应谱(TRS)与需求反应谱(RRS)对比

Fig.6 Comparison between TRS and RRS of X-direction at 0.5g

可以看出, TRS在大于结构基频0.7倍的频率段均很好的包络RRS,表明台面的实际输入满足规范反应谱的要求。

2.3 加速度响应

0.5g地震动输入下,电抗器顶部xTN的加速度时程曲线如图7所示,响应峰值为1.107g,是地面输入(0.582g)的1.9倍。不同PGA输入下,电抗器各部位加速度峰值相对于台面输入的动力放大系数如图8所示。电抗器各部位的加速度响应随着高度增加而不断增加,分布趋势在0.15g和0.5g输入下保持一致,而0.5g输入时电抗器的动力放大系数明显降低。电抗器上部线圈的刚度较大,加速度响应变化不明显,可近似认为是刚体。与绝缘子顶部相比,线圈底部的动力放大系数明显提高,表明绝缘子顶部与电抗器线圈底部之间的连接刚度较弱,是电抗器的薄弱部位。

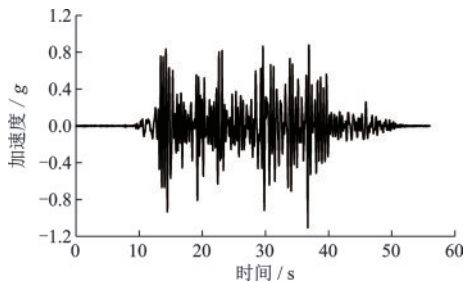


图7 电抗器顶部xTN的加速度响应

Fig.7 Acceleration response of xTN at top of ER

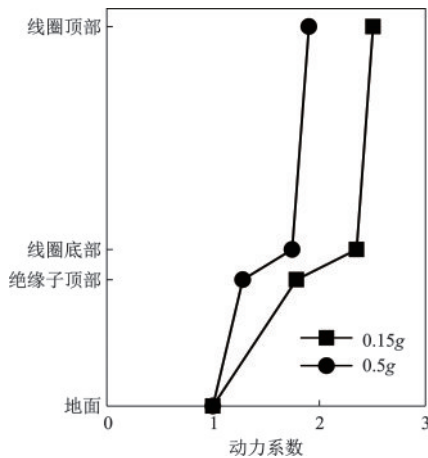


图8 加速度动力放大系数

Fig.8 Acceleration amplification factor

2.4 位移响应

由于条件限制,本文进行试验时未直接测量电抗器不同部位的位移响应,因此采用加速度积分的

方式。首先对加速度时程进行高通滤波,截止频率为0.2 Hz,避免低频成分造成基线漂移现象。滤波后通过二次积分得到测点的绝对位移时程,如式(1)、式(2)所示。以电抗器顶部测点xTN为例,其绝对位移时程曲线如图9所示,响应峰值为76.26 mm。

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt \quad (1)$$

$$d(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (2)$$

式中, $a(t)$ 为测点的绝对加速度时程; $v(t)$ 为测点的绝对速度时程; $d(t)$ 为测点的绝对位移时程。

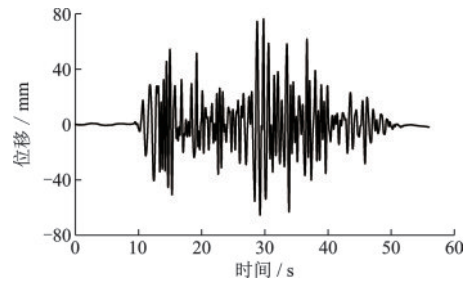


图9 电抗器顶部xTN的位移响应

Fig.9 Absolute displacement response of xTN at top of ER

电抗器结构相对于台面的位移反应随高度的变化如图10所示,测点位置分别为台面、绝缘子顶部、电抗器线圈底部和线圈顶部。由于篇幅所限,xTN测点位移的计算过程以附录形式给出。电抗器线圈的刚度较大,因此顶部、底部的位移反应基本相同,这与加速度反应是一致的。电抗器的变形主要集中于下部的绝缘子和绝缘子-线圈连接部位。电抗器底部地震输入从0.15g提高到0.5g时(3.33倍),绝缘子顶部相对于台面的位移,即绝缘子变形分别为7.77 mm和27.55 mm(3.54倍),绝缘子-线圈连接部位的变形为4.6 mm和12.37 mm(2.69倍),

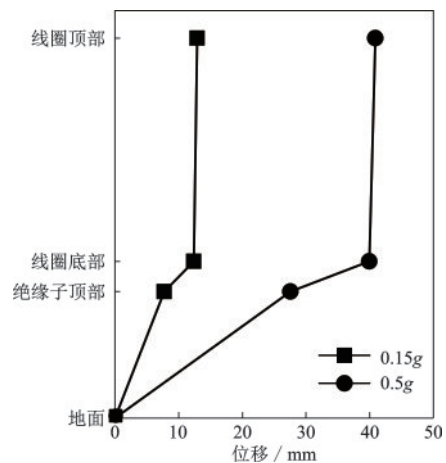


图10 位移随高度变化曲线

Fig.10 Displacement at various heights

考虑到试验与积分误差,电抗器的变形模式在不同强度地震输入下基本保持一致。与绝缘子部分相比,绝缘子-线圈连接部位的刚度相对较小,变形更集中。

2.5 应变响应

0.5g地震输入下,绝缘子根部的峰值应变为135~212 $\mu\epsilon$,如图11所示。绝缘子的应变与其所处位置相关,1、3、5号绝缘子东侧应变大于西侧,7、9、11号绝缘子则相反,由图2可知,绝缘子根部外侧的应变更大。

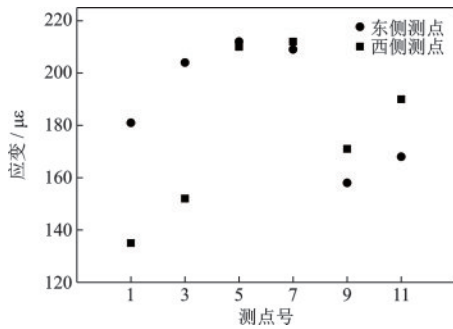


图11 电抗器各应变测点的峰值应变

Fig.11 Maximum strain value at measuring points

进一步可根据式(3)计算绝缘子的安全系数^[17],地震应力根据实测应变计算,陶瓷的弹性模量取 1.08×10^5 MPa,由重力荷载、0.25倍风荷载、设备内部压力、导线实际拉力和运行荷载等产生的附加应力约为7.5 MPa。0.5g人工地震动作用下,绝缘子的安全系数最小值为2.14,满足规范要求(1.67),表明设备具有一定的安全储备。

$$k = \frac{\sigma_v}{\sigma_{tot}} \quad (3)$$

式中, k 为安全系数; σ_v 为绝缘子材料破坏应力值; σ_{tot} 为地震作用与其他荷载产生的总应力。

3 试验易损性

3.1 易损性含义

易损性曲线(函数), $F_{ds}(edp)$,描述的是在不同等级的工程需求参数下设备达到或超过某个特定的损伤状态的条件概率^[24-25],如式(4)所示。其中,EDP(Engineering demand parameter)表示工程需求参数,DS(Damage state)表示损伤状态。易损性曲线通常采用对数正态分布描述(式(5)),根据抗震能力中值 x_m 和对数标准差 β 确定, $\Phi(\bullet)$ 为标准正态(高斯)累计分布。

$$F_{ds}(edp) = P[DS \geq ds | EDP = edp] \quad (4)$$

式中, $F_{ds}(edp)$ 表示易损性曲线;EDP表示工程需求参数;DS表示损伤状态。

$$F_{ds}(edp) = \Phi\left(\frac{\ln(edp/x_m)}{\beta}\right) \quad (5)$$

式中, x_m 为抗震能力中值; β 为对数标准差; $\Phi(\bullet)$ 为标准正态(高斯)累计分布。

3.2 计算方法

本文采用K. Porter等^[26]提出的方法计算电抗器的试验易损性,如式(6)至式(8)所示,相关参数根据表4确定。其中, $F_{dm}(r_i)$ 为设备在需求为 r_i 时的失效概率, r_i 为试件每个工况经历的峰值加速度; r_{max} 为试件经历的最大峰值加速度, r_d 为试件出现一定损伤时的最小加速度, r_a 为 r_d 和 $0.7r_{max}$ 的较小值。

$$S = (0.5M_C + 0.1M_B) / (M_A + M_B + M_C) \quad (6)$$

式中, S 为主观失效概率; M_A 为试件未发生损伤且 $r_i \geq r_a$ 的工况数量; M_B 为试件出现损伤但未将出现破坏的工况数量; M_C 为试件出现损伤且即将出现破坏的工况数量。

$$z = \Phi^{-1}(F_{dm}(r_m)) \quad (7)$$

式中, z 为保证率; r_m 为EDP的中值,当 $M_B + M_C = 0$ 时 $r_m = r_{max}$,否则 $r_m = 0.5(r_{max} + r_a)$ 。

$$x_m = r_m \exp(-z\beta) \quad (8)$$

式中, x_m 为抗震能力中值; β 为对数标准差,取0.4。

表4 试验易损性参数确定

Table 4 Determination of experimental fragility parameters

条件	$F_{dm}(r_m)$	z	$\exp(-z\beta), \beta=0.4$
$M_A \geq 3$ 且 $S=0$	0.01	-2.326	2.54
$M_A < 3$ 且 $S \leq 0.075$	0.05	-1.645	1.93
$0.075 < S \leq 0.15$	0.10	-1.282	1.67
$0.075 < S \leq 0.3$	0.20	-0.842	1.40
$S > 0.3$	0.40	-0.253	1.11

3.3 易损性曲线

本文进行了3次0.15g和1次0.5g峰值加速度的振动台试验,设备均未发生破坏。可知 $M_A=1$, $M_B=M_C=0$, $S=0$ 。根据表4的第二条,对数标准差 β 为0.40, $\exp(-z\beta)$ 为1.93, $r_m=r_{max}=0.5g$ 。根据式(4),设备抗震能力中值 x_m 为0.965g,易损性曲线如图12所示。

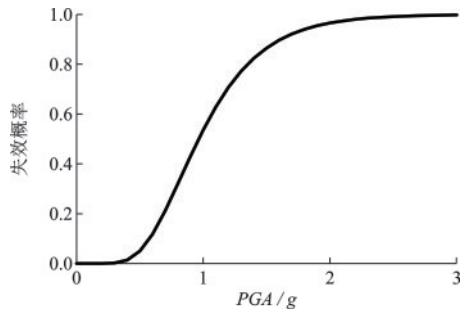


图12 电抗器试验易损性曲线

Fig.12 Tested fragility curve of the reactor

需要指出, K.Porter 计算易损性的方法适用于试验体未发生损坏的情况, 但具有较强的主观性, 试件没有出现破坏的情况下, 认为在最大需求(或0.7倍)下的失效概率较低, 对数标准差则采用经验值^[27]。本次试验中, 0.5g 输入下陶瓷的安全系数高于2.14, K.Porter 的计算结果可能低估了设备的抗震性能。可以预计, 即使进行多次0.5g 试验, 绝缘子也未必发生破坏, 此时将按照表4第一条进行计算, 抗震能力将提高。

4 结 论

本文对110 kV 干式电抗器进行了振动台试验研究, 测定了电抗器的自振频率与阻尼比, 进行了三向抗震性能试验并计算易损性曲线, 主要结论如下:

(1) 电抗器的动力特性近似于单自由度体系, 一阶自振频率为3.3 Hz, 阻尼比为3.9%。

(2) 0.5g 地震动输入下, 基于应变响应计算电抗器绝缘子支撑的安全系数为2.14, 仍具有一定的安全储备。

(3) 电抗器上部线圈整体刚度大, 很难在地震中发生破坏。电抗器的变形主要发生在绝缘子和绝缘子-线圈连接部位, 其中后者的刚度相对较小, 变形更集中, 是电抗器的薄弱部位。

(4) 电抗器的抗震能力中值为0.965g, 对数标准差为0.4。通过试验确定地震易损性方法的主观性较强, 由于地震输入强度有限, 电抗器的抗震性能可能被低估, 仍需要补充更多的试验或开展数值模拟进行研究。

参考文献:

[1] 李亚琦, 李小军, 刘锡荟. 电力系统抗震研究概况[J].

世界地震工程, 2002, 18(4): 79-84.

Li Y Q, Li X J, Liu X H. A summary on the seismic analysis in the electrical system[J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(4): 79-84. (in Chinese)

[2] 韩先才, 孙昕, 陈海波, 等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4371-4386.

Han X C, Sun X, Chen H B, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386. (in Chinese)

[3] 杨春侠, 赵晓宇, 揭双全, 等. 大型电气设备瓷套管地震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2022, 38(1): 167-174. Yang C X, Zhao X Y, Jie S Q, et al. Seismic fragility analysis of porcelain bushing for large electrical equipment [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(1): 167-174. (in Chinese)

[4] Xie Q, Zhu R Y. Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.

[5] Goodno B J, Gould N C, Caldwell P, et al. Effects of the January 2010 Haitian earthquake on selected electrical equipment [J]. Earthquake Spectra, 2011, 27(Sup1): 251-276.

[6] 刘如山, 张美晶, 邹玉斌. 汶川地震四川电网震害及功能失效研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(增1): 200-211.

Liu R S, Zhang M J, Wu Y B. Damage and failure study of Sichuan electric power grid in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(Sup1): 200-211. (in Chinese)

[7] 刘恢先. 唐山大地震震害(二)[M]. 北京: 地震出版社, 1986: 497-505.

Liu H X. Damage caused by Tangshan earthquake (2) [M]. Beijing: Seismological Press, 1986: 497-505. (in Chinese)

[8] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 421-423.

Wang X F. Modern power system analysis [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2003: 421-423. (in Chinese)

[9] 刘媛, 董明, 吴雪舟, 等. 66kV 干式空心并联电抗器抗震特性仿真分析[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 1-6.

Liu Y, Dong M, Wu X Z, et al. Simulation analysis on anti-Seismic characteristics of the 66 kV dry type hollow shunt reactor [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 1-6. (in Chinese)

[10] 王锋, 宓传龙, 张磊. 基于 ANSYS 的干式空心电抗器抗震分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 67-71.

- Wang F, Mi C L, Zhang L. Seismic analysis on ANSYS-based dry air core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4): 67-71. (in Chinese)
- [11] 朱旺,任阿阳,薛志航,等. ±800kV干式平波电抗器抗震性能分析[J]. 四川电力技术, 2022, 45(6): 16-21, 79. Zhu W, Ren A Y, Xue Z H, et al. Seismic performance analysis of ±800 kV dry-type smoothing reactor [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(6): 16-21, 79. (in Chinese)
- [12] 王明君,唐廷轩,何军. 220 kV变压器-套管体系抗震性能数值模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(3): 526-534. Wang M J, Tang T X, He J. Numerical simulation and analysis of seismic performance of high voltage transformer-bushing systems[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3): 526-534. (in Chinese)
- [13] 范书立,陈健云,李静. 特高压干式平波电抗器的抗震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2013, 26(2): 226-231. Fan S L, Chen J Y, Li J. Experimental research on seismic behavior of ultra-high voltage dry type smoothing reactor[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(2): 226-231. (in Chinese)
- [14] 李建赢,陈铁,贺军,等. 地震模拟振动台试验与基于ANSYS分析的串联电抗器抗震分析研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(4): 164-169. Li J Y, Chen T, He J, et al. Seismic simulation shaking table test research and ANSYS-based seismic analysis of series reactors[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2022, 44(4): 164-169. (in Chinese)
- [15] 俞越中,苏扩军,吴桂军,等. 110 kV复合材料干式电抗器抗震性能振动台试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(增2): 262-266. Yu Y Z, Su K J, Wu G J, et al. Shake table test research on seismic performance of 110kV composite material dry type of reactor[J]. Building Structure, 2016, 46(Sup2): 262-266. (in Chinese)
- [16] Porter K A. An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Applications of Statistics and Probability (ICASP9) in Civil Engineering. San Francisco, USA: [S. l.], 2003: 973-980.
- [17] 李晓璇,谢强. ±800 kV换流变压器地震易损性分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 244-251. Li X X, Xie Q. Seismic vulnerability analysis of ±800 kV converter transformer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 244-251. (in Chinese)
- [18] Shinozuka M, Dong X, Chen T C, et al. Seismic performance of electric transmission network under component failures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(2): 227-244.
- [19] Gardini G, Fregonese R, Gobbi M E, et al. Probabilistic assessment of electric power grids vulnerability under seismic action: a case study [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9(10): 999-1018.
- [20] Paolacci F, Giannini R. Seismic reliability assessment of a High-Voltage disconnect switch using an effective fragility analysis [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2009, 13(2): 217-235.
- [21] 李吉超,尚庆学,罗清宇,等. 基于双对数正态分布的瓷型电气设备[J]. 工程力学, 2024, 41(2): 125-136. Li J C, Shang Q X, Luo Q Y, et al. Double logarithmic distribution based seismic fragility analysis of porcelain electrical equipment [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(2): 125-136. (in Chinese)
- [22] 高压支柱类电气设备抗震试验技术规程: Q/GDW 11391—2015[S]. 北京:国家电网公司, 2015.
- [23] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 2006: 266-296. Hu Y X. Earthquake engineering[M]. Beijing: Earth-Pressquake, 2006: 266-296. (in Chinese)
- [24] 王鼎,王晓文,冯德成,等. 基于蒙特卡洛模拟的城市道路网络地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 558-567. Wang D, Wang X W, Feng D C, et al. Seismic fragility analysis of urban road network based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 558-567. (in Chinese)
- [25] 蒋家卫,高权宝,陈国兴,等. 基于IDA方法地下结构易损性的地震动记录规模选取[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1144-1152. Jiang J W, Gao Q B, Chen G X, et al. Quantification of ground motion record sets scale in the IDA method for vulnerability analysis of underground structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1144-1152. (in Chinese)
- [26] Porter K, Kennedy R, Bachman R. 2007. Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering[J]. Earthquake Spectra, 23(2): 471-489.
- [27] 李吉超,李海洋,尚庆学,等. 110 kV电流互感器振动台试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 135-141. Li J C, Li H Y, Shang Q X, et al. Study on shaking table test of 110 kV current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 135-141. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)

附录

台面的加速度记录如图 A.1(a)所示,积分位移如图 A.1(b)所示,存在明显的位移漂移现象。滤波后的加速度响应如图 A.1(c)所示,积分位移如图 A.1(d)所示。

测点 xNT 的加速度记录如图 A.2(a)所示,积分位移如图 A.2(b)所示,存在明显的位移漂移现象。滤波后的加速度响应如图 A.2(c)所示,积分位移如图 A.2(d)所示。

测点 xNT 和台面的绝对位移之差即为测点 xNT 的相对位移,如图 A.3 所示,滤波前存在明显的漂移现象,滤波后漂移现象消除,最大位移响应为 40.91 mm。

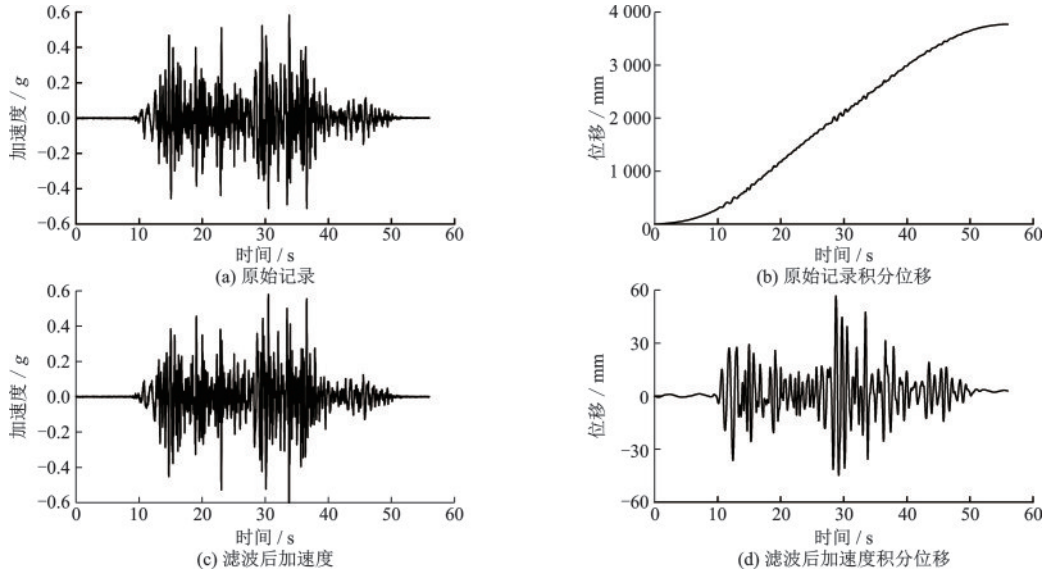


图 A.1 台面加速度及积分位移

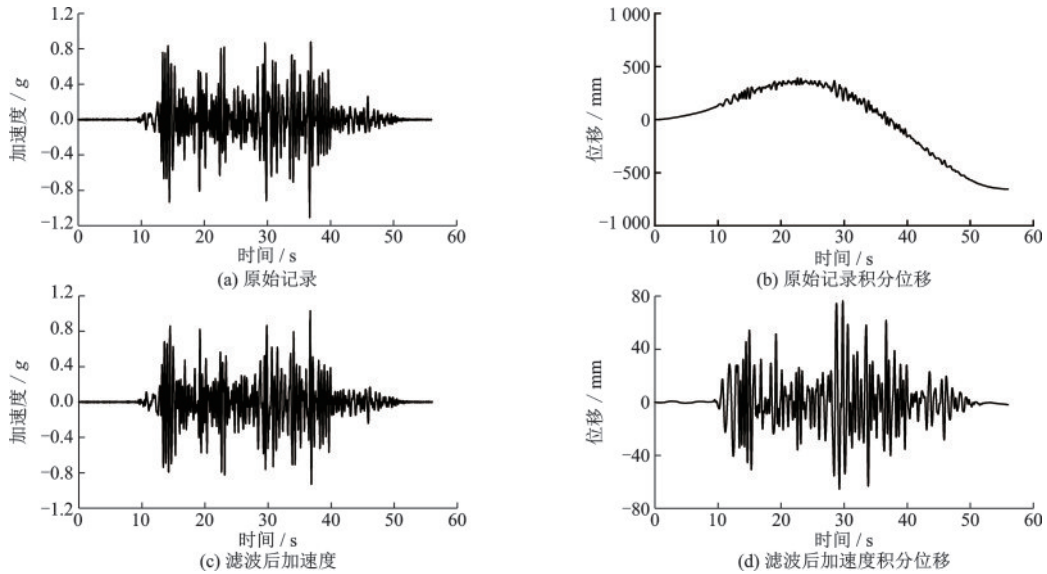


图 A.2 测点 xNT 加速度及积分位移

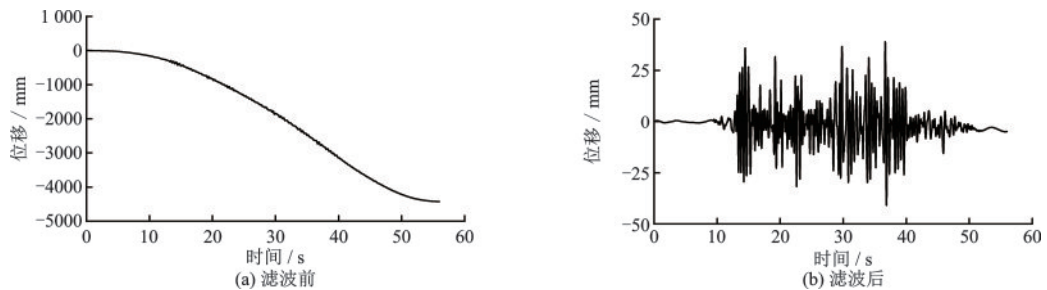


图 A.3 测点 xNT 的相对位移