

罗金盛, 张振. 地震灾害中的高压电气设备响应与易损性分析[J]. 灾害学. 2019, 34(1): 47-50. [ LUO Jinsheng and ZHANG Zhen. The game model analysis of automatic mechanism design and immune particle swarm algorithm[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 47-50. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.010. ]

# 地震灾害中的高压电气设备响应与易损性分析<sup>\*</sup>

罗金盛<sup>1</sup>, 张 振<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 在历次地震灾害中, 高压电气设备通常最容易遭受振动破坏。为了研究地震灾害中高压电气设备的易损性, 降低设备损坏带来的相应损失, 引入对数正态分布方法, 并在此基础上设计了设备损坏率计算方法, 实现设备损坏率与地震烈度的关系曲线拟合。针对高压电气系统中的变压器、断路器与隔离开关三种关键设备, 采用两种地震波共同对其进行地震位移响应分析, 根据实验结果曲线, 三类电气设备的位移响应均随着地震烈度呈增加趋势, 其中变压器的位移响应最显著; 根据设备易损性分析, 依次得到设备损坏率与烈度关系曲线、损坏率密度曲线, 结果进一步验证了在地震作用下, 变压器是最容易遭受损坏的设备, 引起其损坏的地震烈度最小, 然后依次是断路器和隔离开关。通过地震灾害中各种电气设备的响应与易损性, 可以有效提高设备的抗震性能。

**关键词:** 高压电气设备; 地震响应; 正态分布; 易损性

**中图分类号:** X43; TM50; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0047-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.010

高压电气设备是电力系统的重要组成部分, 维持着电力系统的正常运行。在发生地震灾害时, 高压电气设备也是电力系统中最容易遭受损坏的部分<sup>[1-2]</sup>, 其设备损坏不但会导致严重的经济损失, 还将影响到灾害救援和灾后重建活动。因此, 对于地震中高压电气设备响应与易损性的研究<sup>[3-5]</sup>, 有利于电气设备防震性能的研究和改善, 同时有助于灾后电力系统损坏程度的评估与抢修。

关于地震灾害中高压电气设备损坏性的研究, 美国 ATC 通过专家经验总结得到各类设备对应的易损性关系, 并已经应用在地震灾害的评估系统中。由于国内外的电气设备存在差异, 关于地震烈度的评定也不一致, 无法使用美国的易损性数据作为实际使用的依据, 因此, 近年来我国也在该领域进行了一定的研究工作。胡或婧等<sup>[6]</sup>针对地震中, 变压器和母线设备做了易损性研究; 刘振林等<sup>[7]</sup>利用分布函数, 分析了含有电瓷部件的设备损坏性; 杨长青等<sup>[8]</sup>根据汶川地震数据, 分析了加速度峰值对电气设备的影响, 并且提出了各种加速度情况时的设备损坏情况。在研究易损性与地震烈度关系时, 现有的地震灾害设备易损性分析, 通常是基于加速度峰值的, 其存在严重的离散性, 导致损坏性和烈度关系难以拟合, 二

者的关联缺乏合理性。为此, 本文从分布函数出发, 分析各类设备损坏率与地震关系的拟合曲线。由于电气设备损坏率的密度和地震波峰值加速度存在正态分布规律, 同时地震烈度和地震波峰值加速度的对数存在着近似线性规律, 因此, 本文在对数正态分布的基础上, 设计出设备损坏性分析公式, 实现损坏率与地震烈度的关系拟合, 并完成地震波作用下设备响应与易损性分析。

## 1 地震灾害中电气设备的响应与损坏性分析

由于高压电气系统中的设备通常包含瓷柱构件, 发生地震灾害时, 瓷柱构件的破坏是相应电气设备损坏的主要原因, 而变压器设备中还包含瓷套管、散热器、轮轨固定等易损部件, 随着地震烈度的增加, 将可能导致这些易损部件出现相应损坏<sup>[9]</sup>, 但是很难导致变压器本体线圈结构的损坏, 这使得变压器损坏带来的损失比较小, 同时也使得损坏性变得复杂。为了简化电气设备的易损概率统计分析方法, 将三类电气设备的损坏

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-06-15 修回日期: 2018-08-17

基金项目: 福建省泉州市科技计划资助项目(2015Z123)

第一作者简介: 罗金盛(1982-), 男, 江苏盐城人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电气控制、电力传动. E-mail: 18650801858@163.com

划分为两种状态, 不进行具体的损坏级别划分。通常一个高压电气系统中存在的某一类电气设备较多, 假定该系统所处地区地震烈度达到 I, 其系统中某一类电气设备损坏率为:

$$R = n/N_0 \quad (1)$$

式中:  $n$  表示系统中某类设备的损坏量;  $N$  表示系统中某类设备具有的总数量。对于任何一个高压电气系统, 如果将其中每一类电气设备的损坏率与地震的烈度关系描述出来, 有利于深入研究地震灾害中电气设备的易损性。为此, 本文从分布函数出发, 分析某类设备损坏率与地震关系的拟合曲线。在数学领域存在多种分布函数, 而选择哪种分布函数需要根据具体的问题来衡量, 在研究负荷损坏相关问题的时候, 通常使用正态分布或者韦伯分布。但是对于同一个问题, 随着个体样本和分析环境的变化, 可能出现严重的离散性或关注区, 为此有些问题采取多种分布进行联合调整, 当采用多分布拟合时, 难以合理找出何种趋势特征对应的分布规律, 也难以从有限样本中确定最佳的拟合方法, 增加了问题处理复杂度的同时, 有可能降低分析的可靠性。电气设备在地震波作用下, 其损坏率的密度和地震波峰值加速度存在正态分布规律, 同时地震烈度和地震波峰值加速度的对数存在着近似线性规律, 在研究高压电气设备, 如变压器、母线等设备的地震易损性时, 采用正态分布, 可以较好地体现出地震烈度和设备损坏概率之间的关系。为此, 本文采用对数正态分布描述地震烈度和设备损坏关系。假定一个随机变量  $x$ , 其服从正态分布, 则它满足的概率密度函数表示为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  表示该正态分布的标准差,  $\mu$  表示期望值。他们的表达式分别为:

$$\mu = \left( \sqrt{2 \ln v_a T_d} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln v_a T_d}} \right) \sigma; \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\sqrt{2 \ln v_a T_d}} \quad (4)$$

式中:  $v_a$  表示地震波作用下设备加速度的越零率,  $T_d$  表示地震波作用的时长。此时, 该正态分布的累积分布函数表示为:

$$F(x) = 0.5 + 0.5 \operatorname{erf} \left( \frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right); \quad (5)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (6)$$

分别求各类高压电气设备在不同烈度下破坏率的均值, 采用极值方式对样本进行抽取, 假定功能

函数表示为  $Z = g(x)$ , 当功能函数满足  $Z < 0$  条件时, 说明设备失效, 即损坏, 损坏率计算公式为:

$$P_f = \int I[g(x)] f(x) dx \quad (7)$$

式中:  $I[g(x)]$  代表功能函数  $g(x)$  的示性函数, 它的取值为:

$$I[g(x)] = \begin{cases} 1, & g(x) < 0; \\ 0, & g(x) \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

假定样本数是  $N$ , 则可以得到设备损坏率的矩估计公式为:

$$P'_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n I[g(x_i)] = \frac{n_f}{N} \quad (9)$$

式中:  $n_f$  代表功能函数  $Z$  小于零的次数, 由此可知, 损坏率的估计精度和选择的设备样本数量有关, 因此, 这里将样本的选择采用如下公式确定。

$$N = \frac{1 - P_f}{\delta^2 P_f} \quad (10)$$

式中:  $\delta$  表示变异系数, 其值由分布标准差与均值的比值来确定, 计算公式为:

$$\delta = \sigma/\mu \quad (11)$$

通过得到的累积分布函数与损坏率公式, 针对每个地震烈度下设备损坏平均值, 便能够实现各类电气设备易损性与地震烈度之间的关系拟合。

## 2 地震波作用下的电气设备响应与易损性分析

### 2.1 地震波作用下的电气设备响应分析

在高压电气系统中, 变压器、断路器和隔离开关三类设备是最容易在地震灾害中发生损坏的, 也是导致经济损失最为严重的电气设备, 因此, 对这三类电气设备的单体模型进行地震响应分析, 取得设备的损坏结果和受地震影响的规律性。

地震波的构成通常比较复杂, 为了有效模拟真实的地震环境, 采用 ElCentro 与 Taft 两种波<sup>[10]</sup>, 同时它们各自又存在东西与南北方向的分量, 地震波的峰谷振荡会造成设备的加速度破坏, 图 1 为地震波时程曲线。

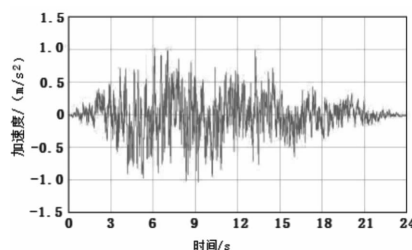


图 1 地震波时程曲线

采用 ANSYS 瞬态分析各种设备的地震响应,

高压电气设备存在的法兰盘连接点、瓷柱根部等位置由于受力集中,因此这些部位更容易产生损坏,出现大位移时程。图2为在地震波作用下三类高压电气设备的位移响应曲线。

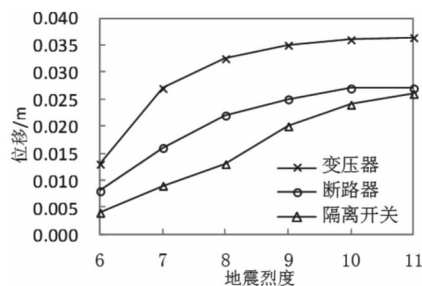


图2 位移响应曲线

根据两种地震响应曲线,当地震波持续作用时,三类电气设备的位移响应均随着烈度增加呈上升趋势,其中变压器质量最重,在地震过程中更容易导致支撑部件和连接部件等的损坏。从位移响应曲线也可以看出,位移响应由高到低依次为变压器、断路器、隔离开关,在都利用电瓷部件固定,软母线连接的情况下,位移响应越明显,表明受地震影响越严重,损坏概率越大。

## 2.2 地震波作用下的电气设备易损性分析

利用正态分布累积函数以及损坏率计算公式,求得三类电气设备对应的损坏率和地震烈度关系,计算出正态分布的期望值和标准差如表1所示。

表1 正态分布的参数计算列表

设备类型	$\mu$	$\sigma$
变压器	7.76	1.20
断路器	8.75	1.16
隔离开关	9.54	1.41

于是得到变压器、断路器和隔离开关三类设备对应的损坏率和地震烈度关系如图3所示。

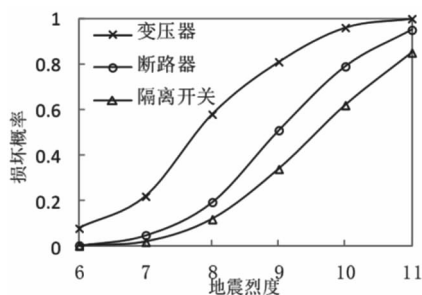


图3 原始样本及损坏率烈度曲线

一般处于烈度为7度或8度的地震带的高压电气系统较多,烈度为9度以上较少,这样就决定了位于9度以上地震带的曲线回归会存在一定的偏差,位于9度以下烈度的曲线准确性相对高一些。通过计算,三类电气设备的地震损坏率曲线拟合

性能在0.935~0.976范围内,对比图3所示曲线,本文方法其具有较好的拟合性能。另外,根据图3曲线分析得到:

(1)地震烈度越大,各类设备的损坏率越高,损坏率上升趋势越快。

(2)变压器比其余两类设备受地震烈度影响较严重,更容易损坏,它们的易损顺序依次是变压器、断路器、隔离开关。烈度达到7时,变压器的损坏率接近20%,其余两类设备损坏率不超过5%,烈度达到8度时,变压器的损坏率在50%~60%之间,其余两类设备损坏率不超过20%,烈度达到9度时,变压器的损坏率大约是80%,其余两类设备损坏率大约是50%和30%左右。

(3)同一类设备,在地震烈度相同时,损坏程度也具有一定的离散型,也就是说相同烈度下,有的隔离开关已经损坏,有的则正常运行。

为了体现电气设备在各种地震烈度作用下的损坏分布情况,根据设备损坏率和地震烈度关系,得到损坏率密度曲线(图4)。其中曲线峰值为该电气设备能承受的理论地震烈度,曲线的宽窄代表在设备安装的环境、方式等因素不同的情况下,导致设备损坏时,所对应的地震烈度呈现的离散程度。根据图4中密度曲线分析可知,变压器、断路器和隔离开关三类电气设备最大损坏率密度对应的地震烈度依次是8、9、9.5度,即各自曲线的峰值,当烈度超过峰值后,设备损坏数量将呈现快速增长。据此可知,三类电气设备中,变压器最容易在地震灾害中遭受损坏,然后依次是断路器和隔离开关,因此在高压电气系统中,根据电气设备易损性分析,提高变压器的抗震性能是最重要和有效的,其余设备抗震性能依据易损性分析和实际要求进行相应改善。

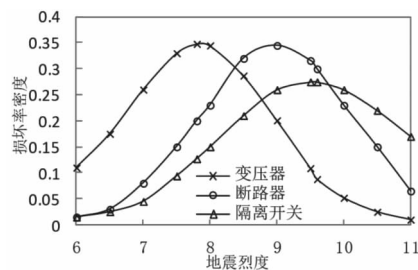


图4 损坏率密度曲线

## 3 结束语

为了有效分析地震灾害中,高压电气设备的响应与易损性,采用对数正态分布统计方法,并结合所设计的设备损坏率计算公式,实现设备损

坏率与地震烈度的关系曲线拟合,通过地震波作用下设备的位移响应结果,三类电气设备的位移响应均呈增加趋势,变压器的位移响应最明显,响应速度由高到低依次为变压器、断路器、隔离开关。根据设备易损性分析,依次得到设备损坏率与烈度关系曲线、损坏率密度曲线,结果也验证了在地震作用下,变压器是最容易遭受损坏的设备,引起其损坏的地震烈度最小。由于高压电气设备是电力系统中的关键组成,因此研究地震灾害中的高压电气设备的响应和易损性,有利于引导电气设备抗震性能的评估和改进,降低设备损坏导致的相应损失。

## 参考文献:

- [1] GB50260-2013 电力设施抗震设计规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [2] 邱宁, 程永锋, 钟珉, 等. 1000kV 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.
- [3] 刘敏. GIS 高压电气设备抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [4] 刘如山, 张美晶, 王翔鹰, 等. 基于设防烈度和震害统计的变电站震害快速评估法[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 152-159.
- [5] 刘春城, 王重阳. 基于 TMD 阻尼器高压电气设备地震响应及振动控制[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(35): 244-250.
- [6] 胡彧婧, 谢强. 管母线连接变电站电气设备的地震易损性分析[J]. 电力建设, 2010, 31(7): 22-28.
- [7] 刘振林, 代泽兵, 卢智成. 基于 Weibull 分布的瓷型电气设备地震易损性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1076-1081.
- [8] 杨长青. 基于地震动参数高压电气设备的易损性分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- [9] 李杰, 王鼎. 工程随机地震动物理模型的参数统计与检验[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 81-88.
- [10] 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.

# Response and Vulnerability Analysis of High Voltage Electrical Equipment in Earthquake Disasters

LUO Jinsheng<sup>1</sup> and ZHANG Zhen<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In all the previous earthquake disasters, high voltage electrical equipment is usually the most vulnerable to vibration damage. In order to study the vulnerability of high-voltage electrical equipment in earthquake disaster and reduce the corresponding losses caused by equipment damage, the lognormal distribution method is introduced, and the calculation method of equipment damage rate is designed based on this method. The seismic displacement response of transformer, circuit breaker and disconnector in high voltage electrical system is analyzed by using two kinds of seismic waves. According to the experimental results, the displacement response of three kinds of electrical equipment increases with the seismic intensity, and the displacement response of transformer is the most significant. According to the analysis of equipment vulnerability, the curve of equipment damage rate and intensity and the curve of damage rate density are obtained in turn. The result further verifies that the transformer is the most vulnerable equipment to be damaged under earthquake, and the seismic intensity causing the damage is the smallest, followed by circuit breakers and disconnectors. Through the response and vulnerability of various electrical equipment in earthquake disaster, the seismic performance of the equipment can be effectively improved.

**Key words:** high voltage electrical equipment; seismic response; normal distribution; vulnerability