

吴萌,刘如山,刘金龙,等. 2024. 中国大陆变电站地震灾害损失评估研究[J]. 地震研究, 47(3): 441–451, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0032.

Wu M, Liu R S, Liu J L, et al. 2024. Assessment of the earthquake-caused damage to the transformer substations in Chinese mainland [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(3): 441–451, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0032.

# 中国大陆变电站地震灾害损失评估研究\*

吴萌, 刘如山✱, 刘金龙, 洪一翔

(中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 根据2014—2021年《中国电力年鉴》和各级政府电力部门官方网站资料,建立了全国变电站基础数据库。在损失评估研究模型中考虑了六氟化硫气体绝缘变电站以及敞开式空气绝缘变电站房屋建筑结构变化的影响。根据中国大陆5个地区的六氟化硫气体绝缘变电站数量占比,建立其比例模型。基于六氟化硫气体绝缘变电站高压开关设备原型结构的模拟地震振动台试验以及汶川地震案例给出其经验易损性模型。根据中国大陆4个地区的房屋建筑结构比例更新了敞开式空气绝缘变电站房屋建筑易损性模型,从而建立了新的地震损失研究模型。最后给出了中国大陆地区以县(区)为单位的变电站在遭受Ⅶ~Ⅹ度地震破坏时的灾害损失、损失密度及损失比图。

**关键词:** 变电站; 地震易损性; 损失评估; 电气设备; 房屋建筑; 中国大陆

**中图分类号:** P315.941 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)03-0441-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0032

## 0 引言

变电站是电力系统中非常重要的组成部分,一旦发生破坏,将直接影响社会生产和生活的方方面面。我国是地震灾害多发的国家,地震的发生不仅会造成变电站的直接损坏,还会影响灾区的生产生活以及灾后应急救援工作。2008年汶川地震中,大量电力设施遭到破坏,电网设施直接经济损失约71亿元,405万用户供电受到影响(中国地震局汶川地震应急指挥部,2008)。做好变电站的灾害损失评估工作,不仅有助于宏观把握电力系统自身抗震性能及其影响,还可有力支撑地震后的应急救援决策部署。

国外许多地震灾害风险较高的国家在防震减灾工作中都使用地震损失评估系统作为辅助工具。比如美国 Federal Emergency Management Agency (2003) 研发了 HAZUS97、HAZUS99、

HAZUS-MH 等系列评估软件系统,成为美国政府应用最广泛的地震应急基础平台。其使用的地震易损性数据依赖于 ATC 委员会的技术报告,早期易损性多由专家经验或问卷调查综合得出,后来随着相关研究的不断深入逐渐补充完善。其他国家或地区也相继研发了地震灾害评估系统,如日本的 ESS 以及 DIS 评估系统,俄罗斯的 EXTREMUM,挪威的 SELENA、欧盟的 NER-IES (Yeh et al., 2006) 等。日本的评估软件系统中关于电力系统的评估模型是日本电力集团公司研发的,有精准可靠的数据支撑。我国早期建有评估系统 EDEP (李树桢等, 1995) 和 LEEDLSFES1.0 (郭恩栋等, 2000),近年来研发了 HAZ-China (陈洪富, 2013),在地震应急工作中发挥了重要作用。

我国的生命线系统评估工作早期基本上依赖专家的经验判断,近年来,有学者研究了不同烈度下城市生命线系统震害损失与建筑物损失之间

\* 收稿日期: 2023-06-29.

基金项目: 国家重点研发计划项目课题 (2022YFC3003603); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项 (2021EEEVL0315).

第一作者简介: 吴萌 (1998-), 硕士研究生在读, 主要从事电力系统易损性研究. E-mail: 2950757280@qq.com.

✱通信作者简介: 刘如山 (1964-), 研究员, 博士生导师, 主要从事生命线工程抗震研究. E-mail: liurushan@sina.com.

的比例关系,建立了生命线系统总体经济损失快速评估方法(胡少卿等,2012)。刘金龙等(2012)根据1990—2006发生在中国的地震,统计了生命线系统损失占地震总体经济损失比例,并用于宏观判断地震后所有生命线系统损失。这些方法都是从宏观方面计算生命线系统的损失,对于电力系统并没有专门的损失评估模型(刘金龙等,2012)。

张中近(2017)给出了我国骨干电网设施地震经济损失评估模型。该模型基于2014年电力数据建立了基础数据库,并将所有变电站视为敞开式空气绝缘变电站(Air Insulated Switchgear, AIS)。近年来,随着我国电力建设的跨越式发展和对电力设施安全可靠性的要求不断提高,国家电网中变电站数量不断增加,变电站中钢混结构的房屋比例不断提高,特别是新建或改建了许多封闭式六氟化硫气体绝缘(Gas Insulated Substation, GIS)变电站,抗震能力大大提高,导致原有的地震损失评估模型已不再适用,需要更新变电站数据库和修正易损性模型。

本文将变电站分为AIS和GIS两大类,首先使用最新的电力行业年鉴资料分别确定了这两类变电站的各部分资产占比和造价,以及以县(区)

为单元的变电站总数量,并根据搜集到的我国五个典型地区的两类变电站占比,建立了全国县(区)的两类变电站数量占比模型;根据变电站数量、造价以及县(区)面积计算了全国各区县的变电站资产以及资产密度分布,然后建立了不同类型变电站易损性模型。在建立AIS变电站房屋结构易损性模型时使用最新的比例模型;结合试验以及地震案例建立了GIS变电站易损性模型。最后结合评估单元资产以及变电站易损性模型,通过计算给出了烈度为Ⅶ~Ⅹ度时,我国大陆各地区的变电站损失和损失密度分布以及损失比分布预测结果。

## 1 评估步骤

本文的中国大陆变电站地震损失评估研究方法总体分为三步。第一步,根据变电站造价、各部分资产比、数量以及GIS比例模型建立变电站基础数据、各县(区)资产及资产密度。第二步,建立变电站易损性模型。第三步,将变电站易损性模型结合变电站基础数据、各县(区)资产及资产密度,计算出各县(区)在不同烈度下的损失、损失密度及损失比。具体评估步骤如图1所示。

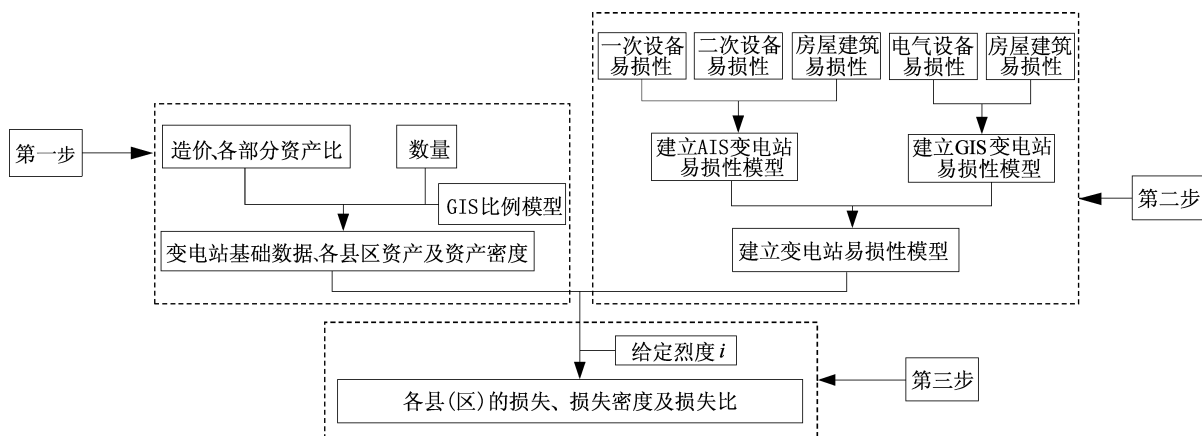


图1 中国大陆变电站地震损失评估步骤

Fig. 1 Procedures of assessing the seismic damage to the substation in Chinese mainland

## 2 变电站基础数据、资产及资产密度

### 2.1 变电站基础数据

#### 2.1.1 AIS 变电站各部分资产占比及造价

AIS 变电站的资产分为三类：一次设备、二次

设备和房屋建筑。其中一次设备是指直接生产、输送、分配和使用电能的高压设备,主要包括变压器、断路器、隔离开关、互感器(电流互感器、电压互感器)、母线、避雷器、电容器、电抗器等,置于室外;二次设备是指对一次设备和系统的运行状况进行测量、监视、控制和保护的设

它主要包括继电保护装置、自动装置、测控装置、计量装置、自动化系统以及为二次设备提供电源的直流设备等，放置于房屋建筑内。

不同电压等级的 AIS 变电站中三类资产的占比及造价见表 1。110 kV（66）电压等级的资产类别占比可近似用 110 kV 代替。AIS 变电站的造价采用 2021 年版《国家电网有限公司输变电工程多维立体参考价》（国家电网有限公司基建部，2021）数据，因缺少 35 kV 资料，所以本文利用 2014—2021 年 110 kV AIS 变电站造价（刘振亚，2014a；国家电网有限公司基建部，2021）求得 110 kV AIS 变电站的增长系数，将其作为 35 kV AIS 变电站的增长系数，并根据 2014 年 35 kV AIS 变电站造价（刘振亚，2014b）求得 2021 年变电站的造价。

表 1 AIS 变电站资产占比及造价（刘如山等，2017）  
Tab. 1 Cost of AIS substations and the proportion of the components of the substations (according to Liu *et al*, 2017)

变电站电压等级	资产类别占比			单座造价/万元
	一次设备	二次设备	房屋建筑	
35 kV	0.525	0.227	0.248	1 240.71
110 kV（66）	0.648	0.216	0.136	3 206
220 kV	0.679	0.195	0.125	7 196

2.1.2 GIS 变电站各部分资产占比及造价

GIS 变电站由电气设备和房屋建筑组成。AIS 变电站的一次设备安装于空气中，而 GIS 变电站的一次设备则安装在充满绝缘气体的密闭容器内，我国 GIS 变电站基本采用室内布置。此外，还有一种介于 AIS 和 GIS 变电站之间的变电站，其一次设备中只有断路器、隔离开关、接地开关、互感器等整体封闭于密闭容器，而其它诸如母线、避雷器等设备则敞开在空气中。本文将这种类型的变电站归为 GIS 变电站，其造价和易损性与 GIS 变电站一致。用 GIS 变电站的造价减去同等级电压下 AIS 变电站中二次设备和房屋建筑的造价即为 GIS 变电站一次设备的造价，从而得到 GIS 变电站各部分资产占比。GIS 变电站的造价依旧采用 2021 年版《国家电网有限公司输变电工程多维立体参考价》（国家电网有限公司基建部，2021）。可用 110 kV 和 220 kV 的 GIS 变电站与 AIS 变电站造价的平均比值作为 35 kV GIS 与 AIS 变电站的比值系数。

不同电压等级 GIS 变电站各部分资产占比以及造价见表 2。

表 2 GIS 变电站资产占比及造价  
Tab. 2 Cost of GIS substations and the proportion of the components of the substations

变电站电压等级	资产类别占比			单座造价/万元
	一次设备	二次设备	房屋建筑	
35 kV	0.693	0.147	0.16	1 261.87
110 kV（66）	0.674	0.186	0.14	3 677.2
220 kV	0.796	0.124	0.08	1 1220

2.1.3 GIS 变电站数量占比

全国典型地区包括华南 A、B 地区、西南 A、B 地区以及西北某地区。根据这 5 个典型地区的变电站情况，设定 GIS 变电站数量占比系数。这些地区两类变电站数量与占 GIS 变电站占比见表 3。不同经济发展水平以及人口规模的地区 GIS 变电站占比差别很大，大体可以分为高比例、中比例以及低比例三类。考虑不同城市的经济水平以及人口规模等因素，将北京、上海、深圳、重庆、广州、成都、天津、青岛、杭州、东莞、武汉设为 GIS 变电站数量高比例地区；黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、新疆、西藏、青海以及甘肃设为 GIS 变电站数量低比例地区；其余为中比例地区。高、中、低比例地区的 GIS 变电站占比分别为 60%、30% 和 15%。以此建立了全国各县（区）的 GIS 变电站占比模型，其分布如图 2 所示。

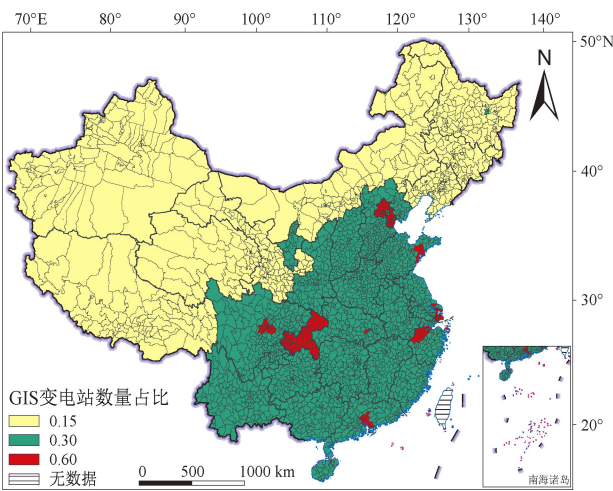


图 2 中国大陆 GIS 变电站数量占比分布图  
Fig. 2 Proportion of GIS substations in Chinese mainland

表 3 全国 5 个典型地区变电站数量及不同类型变电站占比  
Tab. 3 Number of substations in five regions and proportion of different types of substations in Chinese mainland

地区	特点	变电站	AIS	GIS
		数量/ 座	变电站 (%)	变电站 (%)
华南 A 地区	经济发达, 人口稠密	105	29	71
华南 B 地区	经济发达, 人口稠密	17	24	76
西南 A 地区	经济一般, 人口密度中等	107	70	30
西南 B 地区	经济落后, 人口稀少	116	93	7
西北某地区	经济一般, 人口密度中等	52	81	19

2.2 全国变电站资产及资产密度分布

根据《2021 年中国电力年鉴》数据（中国电力年鉴编辑委员会，2022）以及国家电网、南方电网、全国各县（区）电力部门的官方数据，再结合本文 1.1 节、1.2 节关于造价的数据，以及 1.3 节关于 GIS 变电站占比模型，整理得到以全国

县（区）为单元的数据库。对于部分缺少直接的变电站数据的县（区），则根据地区总量和地区内其他县（区）总量，利用两级分配法（张中近，2017）计算得出。各个省份中不同变电站电压等级比例则根据 2014—2019 年的电力年鉴（中国电力年鉴编委会，2014—2020）给出的数据计算。

通过计算，全国以县（区）为单位的变电站资产以及资产密度分布如图 3 所示。县（区）的资产密度为县（区）资产总量与面积之比，各县（区）的面积均不考虑海域面积。由图 2 可以看出，变电站资产最高达到 30 亿元以上，东部县（区）的变电站资产大部分都在 2 亿元以上，高于西部县（区）。西部县（区）的资产多为 5 000 ~ 10 000 万元，少数在 5 000 万元以下。东部县（区）的资产密度高于西部县（区），其中大部分沿海城市的资产密度较高，大部分为 50 ~ 100 万元/km<sup>2</sup>，西部资产密度多为 0 ~ 20 万元/km<sup>2</sup>。

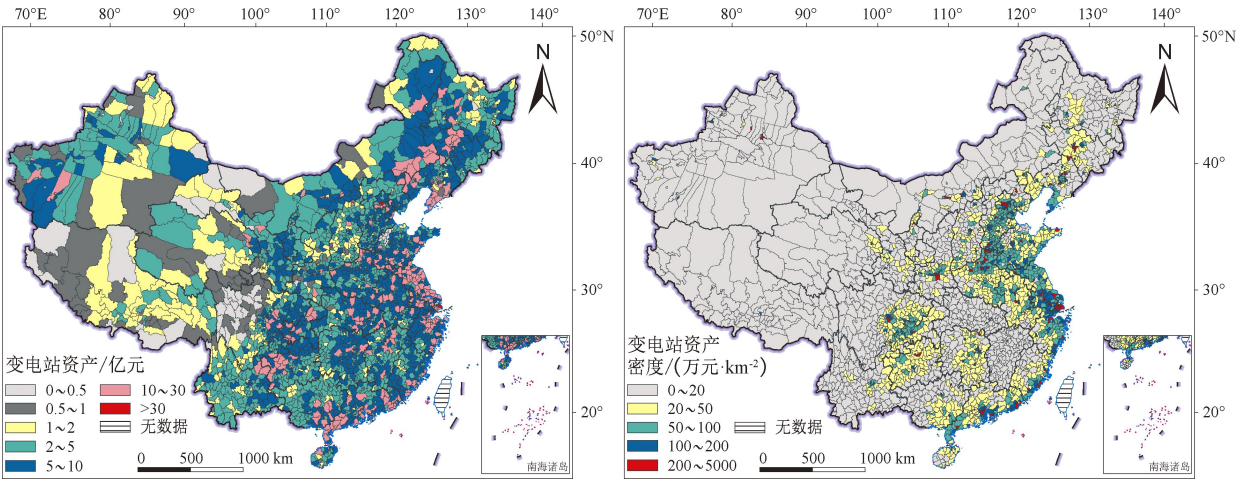


图 3 中国大陆变电站资产分布图 (a) 及变电站资产密度分布图 (b)

Fig. 3 Distribution of the asset of the substations (a) and density of the asset of the substations (b) in Chinese mainland

3 变电站的易损性模型

3.1 AIS 变电站易损性模型及房屋结构类型比例

由上文可知，AIS 变电站由一次设备、二次设备和房屋建筑三类设施组成，所以本文将 AIS 变电站易损性模型分成三类设施分别研究。刘如山等（2018）统计了汶川地震中 121 个 110 kV 及以上变

电站的变压器、电压互感器、电流互感器、断路器、隔离开关、避雷器 6 类高压电器设备在不同地震烈度下的破坏比，采用正态分布函数及其累积函数拟合了各类高压电气设备基于烈度的破坏概率密度曲线和破坏概率曲线，从而形成各类高压电气设备的易损性曲线。本文采用其成果作为一次设备的易损性模型。

一次设备在地震灾害中的破坏形式大体可分

为两种：一种是变压器设备的瓷套管破坏且遭受高烈度时还伴有油枕、散热器、轮轨固定装置破坏等，但是变压器主体部分不易破坏；另一种是其它设备的瓷构件产生裂纹或者直接折断。其中变压器的易损性大于其它一次设备，并且其它一次设备的易损性较为接近，所以一次设备的易损性模型又可分为变压器易损性模型以及其它一次设备易损性模型。其它一次设备易损性取其它一次设备破坏概率的平均值。根据朱瑞民等（2013）的研究可知变压器和其它一次设备的资产占比平均值分别约为 46% 和 54%，本文采用此统计值。其它一次设备一旦破坏就意味着需要更换新的瓷构件，所以设定破坏时的损失比为 100%。而变压器在遭受低烈度破坏时，瓷套管资产占整个变压器资产的比例很低。遭遇高烈度破坏时，其余装置也会发生破坏。所以本文设定设备在遭受Ⅶ度及以下的低烈度破坏时变压器的损失比为 15%，在遭受Ⅷ度及以上的高烈度破坏时损失比为 20%。其它所有一次电气设备的破坏概率统一采用式（1）的计算方法：

$$P_A(i) = \frac{1}{5}[P_b(i) + P_d(i) + P_a(i) + P_c(i) + P_p(i)]$$

(1)

式中： $P_b(i)$ 、 $P_d(i)$ 、 $P_a(i)$ 、 $P_c(i)$  以及  $P_p(i)$  分别为  $i$  烈度下断路器、隔离开关、避雷器、CT 以及 PT 的破坏概率。

变电站的二次设备种类较多，资产占比相对较小，受地震破坏的影响因素较为复杂，对每个设备的易损性研究较为困难。刘如山等（2017）根据汶川地震中 114 个变电站样本拟合出了室内设备的经济损失比 - 烈度曲线作为室内设备整体的易损性曲线。本文使用该研究成果来评估中国大陆的二次设备易损性。 $i$  烈度下二次设备的损失比为：

$$R_s(i) = 0.038i^2 - 0.4674i + 1.4416$$

(2)

汶川震害统计资料显示，变电站的房屋结构与电压等级有很大的相当性，35 kV 以及 110 kV 变电站的房屋大多数为砖混结构，而 220 kV 及以上变电站的房屋则以钢混结构为主。随着我国社

会经济的高速发展，汶川地震时变电站的房屋建筑结构比例与当前全国各地的实际情况不相同。笔者搜集了我国 4 个地区的部分 35 kV 以及 110 kV 共计 233 座变电站房屋结构信息，其中 39% 为砖混结构、53% 为钢混结构、8% 为钢结构，钢混结构的房屋比例大大提高。由于钢结构的占比较少，所以本文设定 35 kV 以及 110 kV 变电站的房屋 40% 为砖混结构、60% 为钢混结构。

孙柏涛等（2014）以四川省为例给出了高烈度设防（Ⅷ度及以上）以及低烈度设防（Ⅶ度及以下）的砖混结构和钢混结构在不同烈度下的易损性矩阵（表 4、5）。本文采取这两个易损性矩阵作为本次中国大陆地区变电站房屋建筑的易损性矩阵。

表 4 钢混结构易损性矩阵(高烈度设防/低烈度设防)

Tab. 4 Steel – concrete structure vulnerability matrix (high intensity fortification/general intensity fortification)

破坏等级	易损性（%）			
	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	85/81	50/44	25/15	2/1
轻微破坏	13/15	43/46	34/36	7/5
中等破坏	2/4	6/8	25/25	26/14
严重破坏	0	1/2	14/20	45/55
毁坏	0	0	2/4	20/25

表 5 砖混结构易损性矩阵(高烈度设防/低烈度设防)

Tab. 5 Brick – concrete structure vulnerability matrix (high intensity fortification/general intensity fortification)

破坏等级	易损性（%）			
	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	68/50	30/22	12/8	2/1
轻微破坏	22.5/36	38/37	22/13	4/3
中等破坏	9/13	25/30	28/24	12/11
严重破坏	0.5/1	6/9	33/42	55/50
毁坏	0	1/2	5/13	27/35

根据康然等（2022）对高烈度区变电站抗震设防目标与设计方法的研究，普通变电站房屋建筑是否为高烈度设防可直接按照目标区设防烈度确定，220 kV 枢纽变电站房屋建筑则提高一度设防。一般情况下会把处在环网上的 220 kV 变电站判定为枢纽变电站。但由于每个地区 220 kV 变电



站是否处在环网的信息未知,为安全起见,本文将其视为普通变电站,房屋设防烈度的选取依然按照目标地区设防烈度选取。房屋建筑的损失比则根据地震现场工作标准《地震现场工作第4部分:灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—20)来取值,取值结果见表6。

表6 房屋建筑损失比取值

Tab. 6 The loss ratio of buildings

破坏等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
损失比 (%)	5	15	45	100	100

### 3.2 GIS 变电站易损性模型

目前,国内外对于GIS变电站的研究大多集中在GIS变电站设备的安装、故障检修以及运行维护与管理方面,而对GIS变电站的地震易损性研究较少,由于缺乏实际震害资料,GIS变电站的地震易损性研究难以开展。杨涛等(2016)进行了GIS变电站高压开关设备原型结构的模拟地震振动台试验,发现在0.4 g地震动激励下,该设备的抗震性能满足规范要求。GIS变电站的房屋建筑大多采用钢混结构,不仅提高了房屋的抗震性能,还大大提高了二次设备的抗震性能,从而使电气设备的易损性大幅度降低。所以本文将GIS变电站的易损性分为两部分进行研究,一部分为电气设备,另一部分为房屋建筑。本文考虑杨涛等(2016)的实验结果和实际汶川震害资料,根据专家经验给出了电气设备的烈度与损失比之间的关系(表7)。对于房屋建筑,则使用AIS变电站中关于钢混结构房屋的易损性矩阵来做研究。

表7 GIS 变电站电气设备损失比

Tab. 7 The loss ratio of the electrical equipment of GIS substations

烈度	VII	VIII	IX	X
损失比 (%)	0	0	2	10

## 4 变电站的损失计算

### 4.1 县(区) AIS 变电站损失评估

$i$  烈度下 AIS 变电站一次设备的损失为:

$$L_{AP}(i) = \sum_{j=1}^3 N_A(j) C_A(j) E_p(j) [0.46P_T(i)R_T(i) + 0.54P_A(i)] \quad (3)$$

式中:  $i$  为烈度等级,  $i=7、8、9、10$  代表Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度、Ⅹ度;  $j$  为电压等级, 1、2、3 分别表示 35 kV、110 (66) kV 和 220 kV 的电压等级;  $N_A(j)$  为  $j$  电压等级下 AIS 变电站的数量;  $C_A(j)$  为  $j$  电压等级下 AIS 变电站的造价;  $E_p(j)$  为  $j$  电压等级下一次设备的资产占比, 按照表1取值;  $P_T(i)$  为变压器的破坏概率;  $R_T(i)$  为变压器的损失比。

$i$  烈度下二次设备的损失为:

$$L_{AS}(i) = \sum_{j=1}^3 N_A(j) C_A(j) S_p(j) R_s(i) \quad (4)$$

式中:  $S_p(j)$  为  $j$  电压等级下二次设备的资产占比, 按照表1选取。

$i$  烈度下房屋建筑的损失为:

$$L_{AB}(i) = \sum_{j=1}^3 N_A(j) C_A(j) B_A(j) \sum_{m=1}^5 P_B(i, m) R_B(m) \quad (5)$$

式中:  $B_A(j)$  为房屋建筑在  $j$  等级变电站的资产占比;  $P_B(i, m)$  为房屋结构易损性矩阵, 根据房屋结构类型及设防烈度在表4、5中取对应值;  $R_B(m)$  为破坏等级为  $m$  时房屋结构财产损失比。

### 4.2 县(区) GIS 变电站损失评估

$i$  烈度下 GIS 变电站电气设备的损失为:

$$L_{GE}(i) = \sum_{j=1}^3 N_G(j) C_G(j) E_E(j) R_E(i) \quad (6)$$

式中:  $N_G(j)$  为  $j$  电压等级下 GIS 变电站的数量;  $C_G(j)$  为  $j$  电压等级下 GIS 变电站的造价, 按照表2选取;  $E_E(j)$  为  $j$  电压等级下 GIS 变电站电气设备资产占比, 按照表2选取;  $R_E(i)$  为  $i$  烈度下电气设备的损失比。

$i$  烈度下房屋设建筑的损失为:

$$L_{GB}(i) = \sum_{j=1}^3 N_G(j) C_G(j) B_G(j) \sum_{m=1}^5 P_B(i, m) R_B(m) \quad (7)$$

式中:  $B_G(j)$  为  $j$  电压等级下 GIS 变电站房屋建筑的

资产占比,按照表2选取。

#### 4.3 县(区)内变电站总体损失计算

变电站的总体损失为 AIS 变电站和 GIS 变电站损失的和,损失比则为总损失与变电站总资产值之比。

$i$  烈度下变电站总体损失为:

$$L(i) = L_A(i) + L_G(i) = L_{AP}(i) + L_{AS}(i) + L_{AB}(i) + L_{GE}(i) + L_{GB}(i) \quad (8)$$

式中:  $L_A(i)$  为 AIS 变电站的损失;  $L_G(i)$  为 GIS 变电站的损失。

县(区)内变电站总资产为:

$$P = P_A + P_G = \sum_{j=1}^3 [N_A(j)C_A(j) + N_G(j)C_G(j)] \quad (9)$$

式中:  $P$  为县(区)内所有变电站总资产;  $P_A$  为所有 AIS 变电站总资产;  $P_G$  为所有 GIS 变电站总资产。

$i$  烈度下县(区)的变电站损失比为:

$$R(i) = \frac{L(i)}{P} \quad (10)$$

## 5 不同烈度下各县(区)变电站损失、损失密度、损失比分布

基于中国大陆变电站基础数据、资产及资产密度,给出了各县(区)变电站在 VII ~ X 度下的损失、损失密度及损失比结果,分别如图 4 ~ 6 所示。图 4 反映的是不同烈度下各县(区)变电站的总体损失,而我国县(区)的面积大小不一,特别是西部一些县(区)面积远大于东部,所以需要评估不同烈度下各县(区)变电站的损失密度。损失比则不考虑各县(区)变电站的资产,仅考虑各县(区)在不同烈度下变电站损失重置造价

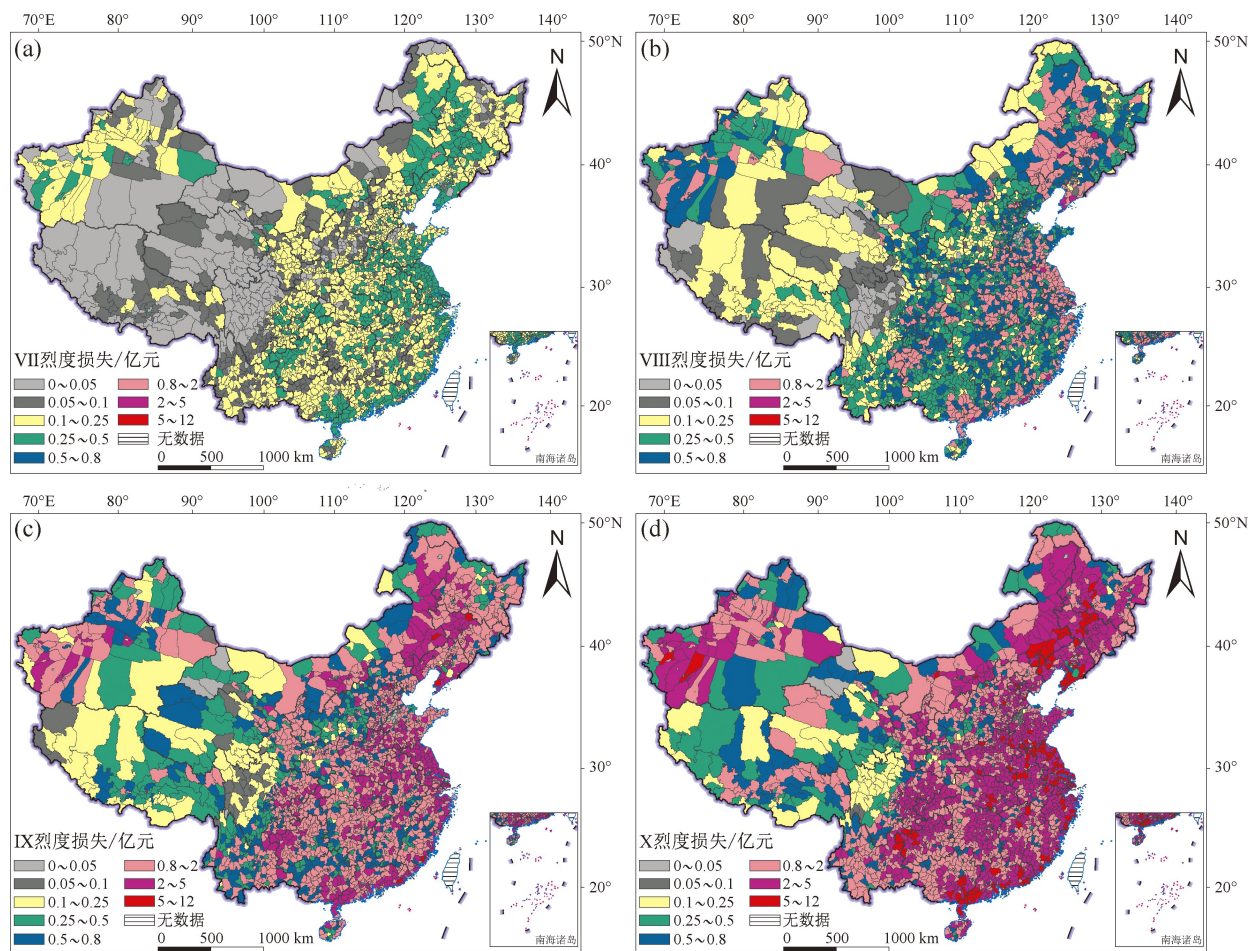


图4 中国大陆各县(区)变电站Ⅶ度(a)、Ⅷ度(b)、Ⅸ度(c)以及Ⅹ度(d)损失分布图

Fig. 4 Distribution of the losses of the substations subjected to Intensity VII (a), Intensity VIII (b), Intensity IX (c), and Intensity X (d) in the counties and districts in Chinese mainland

占原变电站资产的比值来评估。

由图 4 可以看出,随着烈度的增大,各个县(区)的变电站损失在逐步增大。东部地区的损失高于西部地区,西部地区中有少量县(区)的损失较高。烈度为Ⅶ度时,东部地区的损失为 2 500 ~ 5 000 万元,西部地区为 0 ~ 500 万元。烈度为Ⅷ

度时,东部地区的损失为 5 000 ~ 8 000 万元,西部地区为 1 000 ~ 2 500 万元。烈度为Ⅸ度时,东部地区的损失为 0.8 ~ 2 亿元,西部地区为 2 500 ~ 5 000 万元。烈度为Ⅹ度时,东部地区的损失为 2 ~ 5 亿元,并且有较多县区损失高达 5 ~ 12 亿元,西部地区为 5 000 ~ 8 000 万元。

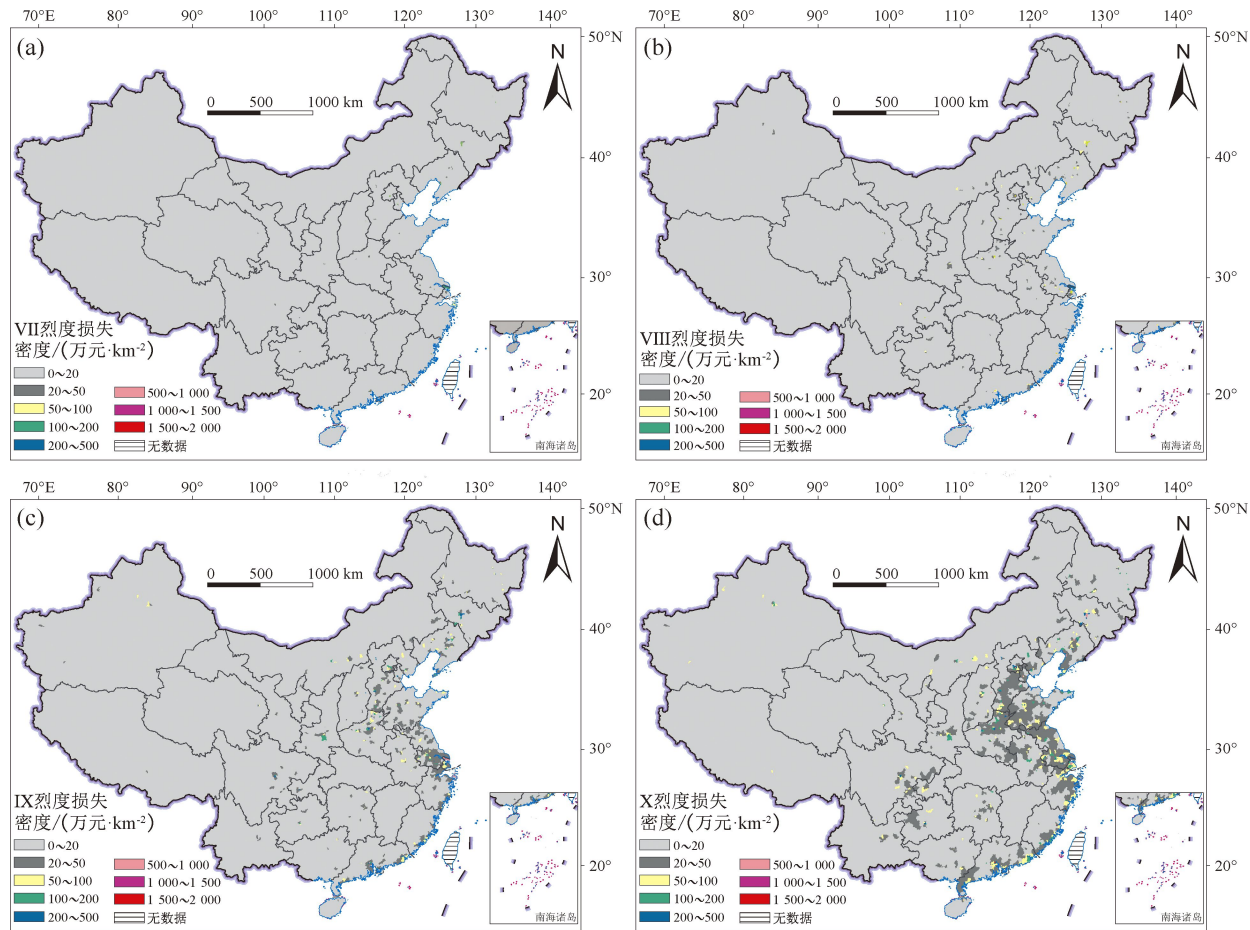


图 5 中国大陆各县(区)变电站Ⅶ度(a)、Ⅷ度(b)、Ⅸ度(c)以及Ⅹ度(d)损失密度分布图

Fig. 5 Distribution of the loss density of substations subjected to Intensity VII (a), Intensity VIII (b), Intensity IX (c), and Intensity X (d) in the counties and districts in Chinese mainland

由图 5 可以看出,随着烈度的增加,各县(区)损失密度也在增加。烈度为Ⅶ度时,全国的损失密度均在 0 ~ 20 万元/ $\text{km}^2$ ,个别县(区)为 20 ~ 50 万元/ $\text{km}^2$ 。烈度为Ⅷ度时,东部地区有少部分县(区)损失密度为 20 ~ 50 万元/ $\text{km}^2$ 。烈度为Ⅸ度时,东部地区有较多部分县(区)损失密度为 20 ~ 50 万元/ $\text{km}^2$ 。烈度为Ⅹ度时,东部地区大部分县(区)损失密度为 20 ~ 50 万元/ $\text{km}^2$ ,最高达 1500 ~ 2000 万元/ $\text{km}^2$ ,只有少部分县(区)损失密度为 50 ~ 100 万元/ $\text{km}^2$ 。由图 6 可

以看出,随着烈度的增大,各县(区)损失比也在增大。烈度为Ⅶ度时,全国的损失比均在 0 ~ 0.05。烈度为Ⅷ度时,我国北部县(区)损失比为 0.10 ~ 0.15,南部县(区)损失比为 0.05 ~ 0.10。烈度为Ⅸ度时我国北部县(区)损失比为 0.25 ~ 0.30,南部县(区)损失比为 0.20 ~ 0.25,中部有些县(区)为 0.12 ~ 0.20。Ⅹ度时,我国北部县(区)损失比为 0.45 ~ 0.50,南部县(区)损失比为 0.40 ~ 0.45,中部有些县(区)的损失比为 0.30 ~ 0.35。



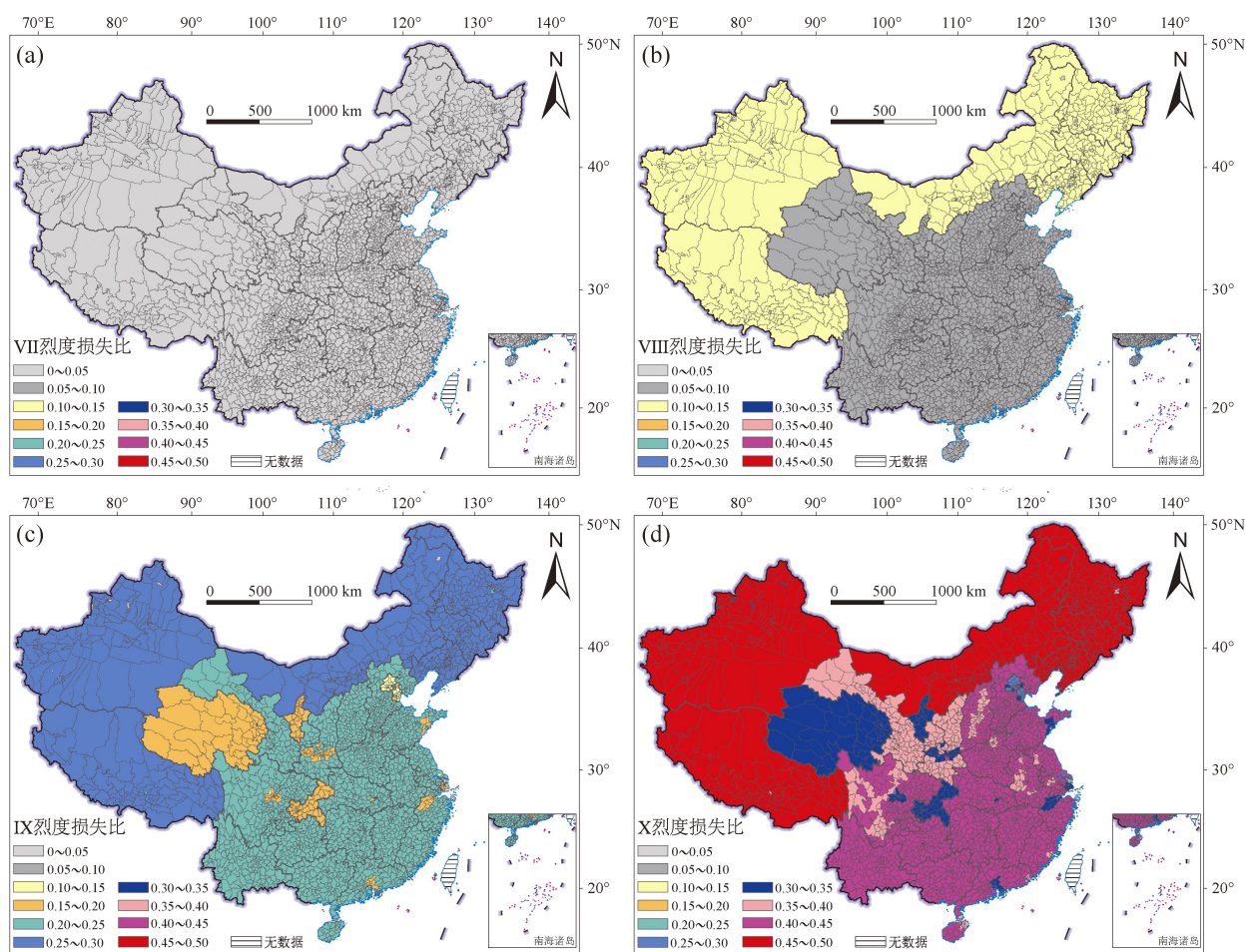


图6 中国大陆各县(区)变电站Ⅶ度(a)、Ⅷ度(b)、Ⅸ度(c)以及Ⅹ度(d)损失比分布图

Fig. 6 Loss ratio of substations subjected to Intensity VII (a), Intensity VIII (b), Intensity IX (c), and Intensity X (d) in the counties and districts in Chinese mainland

## 6 结论

本文更新了全国各县(区)变电站基础数据、资产及资产密度,并在变电站易损性模型中考虑GIS变电站以及AIS变电站房屋建筑结构变化的影响,从而建立新的地震损失评估模型,并且从损失、损失密度及损失比3个方面给出了中国大陆各个县(区)的研究成果,基于综合评估结果给出以下结论:

(1) GIS高压开关设备原型结构的模拟地震振动台试验以及实际汶川地震资料表明AIS变电站和GIS变电站的易损性差异较大,并且根据收集到的近期五个地区的GIS变电站占比数据,GIS变电站在变电站损失评估研究中不可忽视。

(2) 变电站的房屋建筑结构随着时代的发展

已经发生了很大的改变,AIS变电站的房屋结构模型也要随之更新。

(3) 中国大陆各县(区)变电站损失分布特征、损失密度分布特征与损失比分布特征各不相同。从损失来看,东部县(区)大于西部县(区)。从损失密度来看,东部沿海县(区)大于其他县(区)。从损失比来看,北部县(区)大于南部县(区)。这三个方面研究成果不仅可以为地震风险分析与地震保险工作提供参考,也可以为电力行业的相关部门进行地震应急预案的编制和震后应急救援决策的制定提供参考。

本文中有些县(区)没有直接变电站数据,是通过二级分配法计算得来,今后需进一步收集直接的数据补充到数据库中。GIS占比的分配方法也同样需要随着相关数据的丰富进一步完善。并且本文只评估了35 kV、110(66) kV以及220 kV

变电站的损失成果, 220 kV 以上的变电站虽在各各县(区)的数量较少, 但属于重要电力设施且抗震措施较高, 因此也需要开展专门的研究。

本文中涉及到国界的插图均已送相关部门审查并获通过。受理号: 国审受字(2023)第05211号; 审图号: GS(2024)0054号。

### 参考文献:

- 陈洪富, 孙柏涛, 陈相兆, 等. 2013. 基于云计算的中国地震灾害损失评估系统研究[J]. 地震工程与工程振动, 33(1): 198–203.
- Chen H F, Sun B T, Chen X Z, *et al.* 2013. Research on China earthquake loss estimation system based on cloud computing[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 33(1): 198–203. (in Chinese)
- 郭恩栋, 冯启民, 高惠瑛, 等. 2000. 生命线工程震害损失快速评估系统[J]. 世界地震工程, 16(6): 17–21.
- Guo E D, Feng Q M, Gao H Y, *et al.* 2000. Fast evaluation systems for earthquake damage and losses of lifeline engineering[J]. World Earthquake Engineering, 16(6): 17–21. (in Chinese)
- 国家电网有限公司基建部. 国家电网有限公司输变电工程多维立体参考价(2021年版)[EB/OL]. (2022–01–14)[2023–06–29] <https://max.book118.com/html/2020/0304/8027002113002100.shtm>.
- Infrastructure department of the state grid corporation of China. Multidimensional and stereoscopic reference price by the state grid corporation of China(2021)[EB/OL]. (2022–01–14)[2023–06–29] <https://max.book118.com/html/2020/0304/8027002113002100.shtm>.
- 胡少卿, 郭恩栋, 戴君武, 等. 2012. 基础设施工程地震直接经济损失评估方法[J]. 世界地震工程, 28(4): 137–141.
- Hu S Q, Guo E D, Dai J W, *et al.* 2012. Assessment method of earthquake direct economic loss of infrastructure engineering[J]. World Earthquake Engineering, 28(4): 137–141. (in Chinese)
- 康然, 吴培红, 谢丰蔚, 等. 2022. 高烈度区户内变电站抗震设防目标与设计方法研究[J]. 工程抗震与加固改造, 44(5): 158–165.
- Kan R, Wu P H, Xie F W, *et al.* 2022. Research on the seismic precautionary criterion and design method of substations in high seismic intensity zonations[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 44(5): 158–165. (in Chinese)
- 李树桢, 贾相玉, 朱玉莲. 1995. 震害评估软件 EDEP-93 及其在普洱地震中的应用[J]. 自然灾害学报, 1(4): 39–46.
- Li S Z, Jia X Y, Zhu Y L. 1995. Earthquake damage evaluation software EDEP-93 and its use in Pu'er Earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 1(4): 39–46. (in Chinese)
- 刘金龙, 林均岐, 陈希. 2012. 生命线系统地震灾害损失评估方法研究[J]. 自然灾害学报, 21(6): 50–56.
- Liu J L, Lin J Q, Chen X. 2012. Study on loss assessment methodology for lifeline system under earthquake disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 21(6): 50–56. (in Chinese)
- 刘如山, 舒荣星, 熊明攀. 2018. 变电站高压电气设备易损性研究[J]. 自然灾害学报, 27(1): 9–16.
- Liu R S, Shu R X, Xiong M P. 2018. Vulnerability study for high voltage electrical equipment in substations[J]. Journal of Natural Disasters, 27(1): 9–16. (in Chinese)
- 刘如山, 张中近, 熊明攀, 等. 2017. 基于设施易损性的变电站地震经济损失快速评估[J]. 应用基础与工程科学学报, 25(3): 604–614.
- Liu R S, Zhang Z J, Xiong M P, *et al.* 2017. Rapid earthquake loss estimation for substations based on vulnerability of their components[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 25(3): 604–614. (in Chinese)
- 刘振亚. 2014a. 国家电网公司输变电工程通用造价 110kV 变电站分册[M]. 北京: 中国电力出版社.
- Liu Z Y. 2014a. State Grid Corporation of China power transmission and transformation project general cost 110kV substation volume[M]. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 刘振亚. 2014b. 国家电网公司输变电工程通用造价 35kV 变电站分册[M]. 北京: 中国电力出版社.
- Liu Z Y. 2014b. State Grid Corporation of China power transmission and transformation project general cost 35kV substation volume[M]. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 孙柏涛, 陈洪富, 闫培雷, 等. 2014. 南北地震带房屋建筑抗震能力分区特征研究——以四川省为例[J]. 土木工程学报, 47(S1): 6–10.
- Sun B T, Chen H F, Yan P L, *et al.* 2014. Research on zoned characteristics of building seismic capacity along North-South Seismic Belt: taking Sichuan province as an example[J]. China Civil Engineering Journal, 47(S1): 6–10. (in Chinese)
- 杨涛, 王社良, 刘伟, 等. 2016. GIS 高压电气设备抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 32(1): 146–155.
- Yang T, Wang S L, Liu W, *et al.* 2016. Experimental study on seismic performance of high voltage electrical equipment GIS[J]. World Earthquake Engineering, 32(1): 146–155. (in Chinese)
- 张中近. 2017. 电力设施地震经济损失快速评估[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Zhang Z J. 2017. Rapid evaluation of the economic loss of the earthquake electric power facility caused by earthquakes[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 中国地震局汶川地震应急指挥部. 2008. 汶川大地震灾害评估报告[R]. 北京: 中国地震局.
- China earthquake administration Wenchuan earthquake emergency headquarters. 2008. Wenchuan earthquake disaster assessment report[R]. Beijing: China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 中国电力年鉴编辑委员会. 2022. 2021 年中国电力年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社.
- Editorial board of China electric power yearbook. 2022. China electric power yearbook 2021[M]. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)

- Chinese)
- 中国电力年鉴编辑委员会. 2014—2020. 2014—2019 年中国电力年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社.
- Editorial board of China electric power yearbook. 2014 – 2020. China electric power yearbook 2014 – 2019 [M]. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 中国电力年鉴编辑委员会. 2022. 2021 年中国电力年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社.
- Editorial board of China electric power yearbook. 2022. 2021. China electric power yearbook 2014—2019[M]. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 朱瑞民, 邓泽官, 刘如山, 等. 2013. 大震电力系统灾害损失评估新技术研究[R]. 北京: 国网北京经济技术研究院.
- Zhu R M, Deng Z G, Liu R S, *et al.* 2013. The new technology study on disaster loss assessment of power system in large earthquake [R]. Beijing: State Power Economic Research Institute. (in Chinese)
- GB/T 18208. 4—2005, 地震现场工作: 第 4 部分: 灾害直接损失评估[S].
- GB/T 18208. 4—2005, Post – earthquake field works – Part 4: Assessment of direct loss[S]. (in Chinese)
- Federal Emergency Management Agency. 2003. Multi – hazard loss estimation methodology (HAZUS – MH) technical manual [R]. Washington, D C.
- Yeh C H, Loh C H, Tsai K C. 2006. Overview of Taiwan earthquake loss estimation system[J]. Natural Hazards, 37(1 – 2): 23 – 37.

## Assessment of the Earthquake – caused Damage to the Transformer Substations in Chinese Mainland

WU Meng, LIU Rushan, LIU Jinlong, HONG Yixiang

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

### Abstract

According to the *China Electric Power Statistical Yearbook* (2014 – 2021) and the data from the official websites of the electricity departments at all levels, a nationwide fundamental database of the transformer substations in Chinese mainland is established. The influence of the gas insulated substations and the variation of the substation's structure was involved in the damage assessment model. According to the proportion of the gas insulated substations in 5 regions in Chinese mainland, a model of the proportion of the nationwide gas insulated substations is established. Based on the simulated shaking table test of the high – voltage switchgear prototype structure of the gas insulated substation, and the results from the case study of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake in 2008, an empirical vulnerability model of the gas insulated substation is given. Based on the proportions of the structure of the air insulated switchgear substations in 4 regions in Chinese mainland, the vulnerability model of the air insulated switchgear substations was updated, resulting in making a new assessment model of earthquake – caused losses. Finally, the earthquake – caused loss, the loss density and the loss ratio of the transformer substations subjected to the Intensity VII – X earthquakes in the counties and districts in Chinese mainland are given.

**Keywords:** transformer substation; vulnerability; damage assessment; electrical equipment; buildings; Chinese mainland