

电力系统地震灾害预防技术综述

杨少勇¹, 赵建国²

(1. 英国华威大学 工学院, 考文垂 CV4 7AL; 2. 国家电网技术学院, 山东省 济南市 250002)

An Overview on Prevention Technology of Earthquake Disaster for Power Grids

YANG Shao-yong¹, ZHAO Jian-guo²

(1. School of Engineering, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK;

2. Technical College of State Grid Corporation of China, Jinan 250002, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Since the earthquake occurred in Tangshan, China in 1976, the research on earthquake disaster prevention for power grids obtains obvious progress, however due to the complexity of earthquake prevention, at present there is not yet mature research results in this field. Basic principle and methods to prevent earthquake damage in power system are analyzed and the damage of power grids due to the earthquakes occurred in Tangshan and Wenchuan in China as well as that due to the earthquake occurred in Osaka-Kobe in Japan are compared, then the experiences to prevent earthquake damage are summarized. Finally, how to implement earthquake prevention in power system projects is discussed.

KEY WORDS: earthquake prevention; disaster prevention; power system reliability; risk management

摘要: 唐山地震之后, 电力系统地震预防研究取得了极大进展, 但由于地震预防的复杂性, 目前还没有电力系统灾害预防研究的成熟成果。文中分析了电力系统地震预防的基本原则和方法, 比较了最近几次亚洲大地震(唐山、阪神和汶川)对电力系统的破坏情况, 总结了地震预防经验, 最后讨论了如何在电力系统工程中实施地震预防。

关键词: 地震预防; 防灾; 电力系统可靠性; 危险管理

0 引言

地震是人类社会面临的主要自然灾害之一, 因地震引起的断电会产生以下影响: 1) 断电妨碍基本的城市生活, 如日常用电、用水、通信和交通; 2) 断电可能造成严重的二次灾害, 如失去控制的配电系统会引起火灾; 3) 断电会使局势更难控制, 尤其是紧急状态下的医疗救护。地震对电力系统的破坏主要表现在以下 3 方面: 1) 结构性破坏, 主要由设备抗震能力不足造成; 2) 系统性破坏, 主要由系统设计缺陷和可靠性不够造成; 3) 社会功

能破坏, 即断电引起了社会功能紊乱^[1]。

电力系统设备数量庞大, 通过全面提高每个设备的抗震性能来改善整个系统的抗震能力是不可行的。科学的电力系统地震灾害预防方案对提高地震区城市的供电可靠性至关重要。

电力系统地震预防为跨学科技术难题, 涉及地质物理、电力系统、建筑、经济和管理等科学。历史记录表明, 城市电力系统地震预防工作还不完善。1976 年唐山大地震造成了华北电网解列, 唐山地区断电长达 1 个月之久^[2]; 2008 年汶川地震也极大破坏了震中区域的电力系统。

亚太国家多处于板块结合区, 属于地震多发区, 目前亚太国家已经携手研究地震危害及预防。日本在该领域投资了很多项目, 特别是 1995 年阪神地震后, 更加大了投资力度, 并鼓励与其他国家进行科研合作^[3]。美国政府在 1994 年北岭地震后, 也大力投资地震研究, 目前已出版了一系列指导抗震防灾^[4]的工程手册。

本文将从电力系统运行的角度分析地震对电力系统的破坏, 讨论如何开展电力系统防震救灾工作, 以为电力系统实施地震预防提供参考。

1 地震学基本知识

1.1 里氏震级

里氏震级是目前国际通用的地震震级标准^[5]。里氏震级根据地震仪记录的地震波幅值进行计算:

$$M_L = \log_{10} A - \log_{10} [A_0(\delta)]$$

式中: A 为地震波幅值; $A_0(\delta)$ 为与地震观测点和震中距离有关的经验函数。实际应用中, 通过所有观测点的里氏震级平均值进行校正可得到可靠的里氏震级。

1.2 地震烈度

地震烈度根据宏观的地震影响和破坏现象描述地震的强烈程度^[6]。影响烈度的因素有震级、距震源距离、地面状况和地层构造等。我国目前应用的地震烈度为改进的麦加利地震烈度(如表 1 所示),大致与麦加利地震烈度^[7]相当,分为 I~XII 度, V 度及以上才会造成破坏。

表 1 改进的麦加利地震烈度
Tab. 1 Modified mercalli (MM) intensity scale

烈度	影响及破坏程度
I	无震感,仅仪器能记录到
II	静止,楼上的人有感觉
III	室内的人有感觉,振动如轻型卡车经过
IV	窗、门及室内器皿碰撞作响,振动如重型卡车经过
V	室外有感,睡眠者惊醒。挂画移动,不稳物品倾覆,钟停摆
VI	很多人惊慌逃出屋外,走路摇晃。建筑轻微破坏:挂画掉落,玻璃破碎,书籍落架,家具移动甚至倾倒
VII	站立不稳。家具损坏,C类建筑出现裂缝,D类建筑毁坏
VIII	烟囱、纪念碑、塔倒塌,重型家具移动。A类建筑无恙,B类建筑受一定程度损坏,C类建筑毁坏,部分倒塌。
IX	普遍恐慌。B类建筑遭相当破坏,C类建筑严重破坏,甚至倒塌。桁架结构变形,水库严重破坏,地下管道断裂
X	大多数建筑和桁架结构地基破坏,桥梁毁坏,水坝出现严重破坏,山体滑坡,铁轨轻微扭曲。
XI	铁轨严重变形,地下水管被完全破坏
XII	全面破坏,视线失常。物体被抛入空中

注: A类建筑的工艺、材料、设计良好,能抵抗外力; B类建筑设计良好,但未周密考虑抵抗外力; C类建筑工艺、材料一般,未加固,设计上未考虑水平方向力; D类建筑建筑材料差,工艺标准低,水平方向抗力弱。

某次地震中,人们往往强调震中的烈度,唐山大地震中,震中唐山的地震烈度达到了 XI 度,北京的地震烈度则是 VI 度^[8]。

2 城市电网地震预防原则及方法

地震预防措施可归结为 3 类^[4]: 1) 地震危害和系统易损性评估; 2) 防震减灾措施; 3) 震后对策。

地震预防方案实施流程如图 1 所示,根据我国国情,该方案加入了优先考虑文化价值和涉及人员伤亡的内容。

该方案中,需要对地震危害进行初步评估,获得符合实际且偏保守的直接损失估计,其结果有助于开展系统的易损性分析,并确定是否需要地震预防方案以及详细的地震危害评估。经初步评估,防灾任务就变得显而易见。

防震减灾是考虑地震危险性的电网规划问题,可以通过系统更新和扩建来提高设备抗震等级。防震减灾对于发展中国家和发达国家都很重要:前者需要建设新电网,后者需要更新现有电网^[9]。

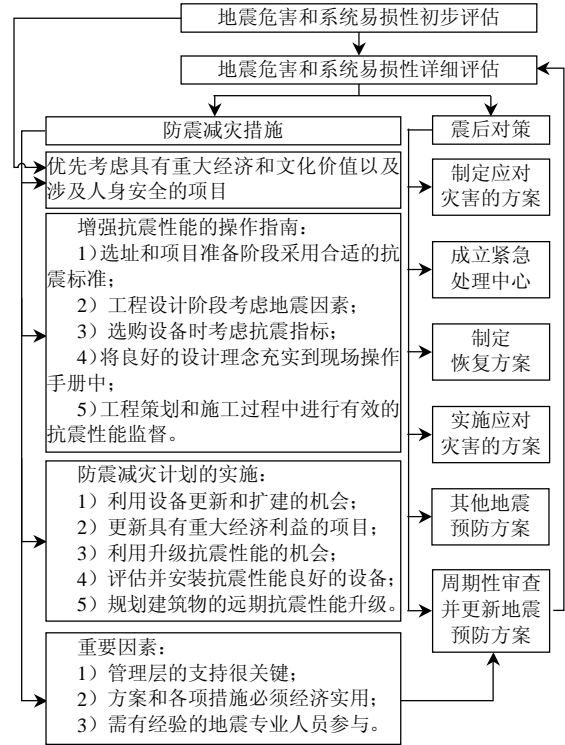


图 1 地震预防方案实施流程
Fig. 1 Flow chart of the implement of earthquake preparedness

震后对策是考虑地震危害的可靠性问题,着重研究地震对电网运行及控制的破坏及影响,对可能出现的重大电网破坏做出紧急计划安排,从而最大限度地减轻地震对电网运行的破坏程度和范围。

3 地震对电力系统的破坏统计

3.1 唐山、阪神和汶川地震概况

大地震带来的损失很难完全避免,我们所能做的是尽可能减小损失。表 2 给出了唐山、阪神和汶川地震比较情况^[10-15]。由表 2 可知,唐山地震和阪神地震均发生在黎明,但前者死亡人数为后者的 40 多倍;汶川地震震区在人烟相对不密集的川西,且发生在下午,但死亡人数仍为阪神地震的 10 多倍。因此我国在地震预防领域与日本有相当的差距。

唐山地震后,京津唐电网结构如图 2 所示。震

表 2 唐山、阪神和汶川地震比较
Tab. 2 Comparison of Tangshan, Hanshin and Wenchuan earthquakes

地点	时间	震级	地震烈度	震源深度/km	死亡人数
唐山地震	1976-07-28T3:43	7.8	XI	12~16	275 000
阪神地震	1995-01-17T5:46	7.3	JMA7	13.3	6 436
汶川地震	2008-05-12T14:28	8.0	XI	10	69 227

注: JMA(Japan meteorological agency scale) 7 为日本气象厅地震烈度 7 级,大约相当于 MM 烈度 X~XI 级。

后唐山地区电厂全部退出运行,与唐山相连的输电线路跳闸,唐山、承德和秦皇岛成为网络孤岛。剩余4个城市的发电能力为0.99 GW,频率上升到51.28 Hz。所幸因地震所失负荷与发电机热备用容量相当,剩余系统没有失稳。地震前,唐山地区负荷为0.410 GW,地震1个月后,唐山地区负荷恢复到0.138 GW。断电给城市生活和震后救灾带来了极大困难^[10]。

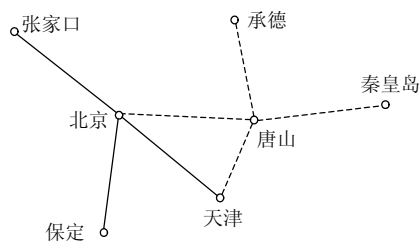


图2 1976年唐山地震后京津唐电网

Fig. 2 Tangshan power grid after the earthquake in 1976

Kansai 电力公司为神户、大阪、京都和奈良供电,年售电额为1404亿 kW·h,总装机容量和系统峰荷分别为37.796 GW和33.060 GW。地震前,该区域负荷为2.7 GW,因地震失去了1.76 GW的发电容量,造成了约20%的电网退出运行,地震后系统频率上升了0.45 Hz,2个500 kV变电站的母线电压上升了20 kV,地震后6 d 电力供应全部恢复^[16]。

3.2 地震对发电设施的破坏比较

唐山地震严重损坏了发电设施,老电厂损坏比较轻。容量为750 MW的陡河电厂地震时正在建设中,一期工程地震前已经并网发电,二期工程正在建设中。地震时两期厂房均发生倒塌,发电设备严重损坏,其中4~9号发电机组、3~9号锅炉和其他附属设备损坏,180 m高烟囱的顶部35 m掉落并砸坏了运煤栈桥。

1995年阪神地震发生时,Kansai 电力公司共有21个发电厂和64台机组,其中10个电厂共20台机组遭到破坏,特别是锅炉管道破坏严重。该次地震没有破坏核电站和水电站^[16]。

3.3 地震对输配电设施的破坏比较

地震前,唐山地区有82条输电线,电压等级为110、35 kV,该地区还有完工尚未投运的220 kV线路,总长度为1592 km,共有8004个杆塔。地震造成102个杆塔地基下陷,373个杆塔倾斜,8个杆塔倒地。35 kV瓷绝缘子大多出现裂缝,一些甚至完全爆裂。

唐山地区共有37座变电站,地震后33座变电站(1座220 kV变电站(共1座)、8座110 kV变电站(共

9座),24座35 kV变电站(共27座))故障。变电站户外瓷质高压设备遭到严重破坏:1个220 kV和9个110 kV少油断路器根部断裂(占总数18.8%);10个220 kV避雷器根部断裂(占总数80%);12个110 kV避雷器根部断裂(占总数30%);35 kV断路器大多为多油型,其中地震导致13个35 kV断路器发生倾斜、底部扭曲和变形(占总数8.9%);15台主变受损(占总数21%)。

日本于1980年通过了针对170 kV以上变电站设备的防震标准(JEAG 5003),该标准要求电力设施能够经受住0.3 g(g为重力加速度)水平方向加速度在共振情况下维持运行3个周期,该水平相当于JMA烈度6度(相当于MM烈度VIII度^[17-18])。

阪神地震没有对500 kV主干电网造成大的破坏,但对275 kV及以下电网造成了较大破坏。该次地震中共有50个变电站、112条输电线受到了不同程度的破坏,其中有4座275 kV变电站和2座154 kV变电站受损严重,完全退出运行。

阪神地震对变电站的较大破坏有:17个主变移位,8个断路器漏油,22个隔离开关支撑部分断裂。另外,23条架空线路受到破坏,损坏主要集中在铁塔结构和绝缘子上^[16]。

断路器、隔离开关和避雷器的损坏比率分别为1.5%、2.0%和4.0%。损坏主要集中在尚未按照JEAG5003标准进行更新换代的旧设备上^[17]。

3.4 地震对控制、保护和通信设施的破坏比较

唐山地震中,设备损坏多由建筑物倒塌造成,如控制室倒塌砸坏98台控制柜,仪表和继电保护装置的损坏率达21.4%;开闭所房间倒塌损坏了83个6~10 kV开关柜,占6~10 kV开关柜总数的26.1%;9台直流设备被彻底损坏,占总数23%。唐山地震造成电网中调与东部电网彻底失去联系,电力系统载波通信系统在地震中遭到严重破坏^[10]。

阪神地震中,控制室只受到轻微损坏,室内的控制和保护设备破坏不大。高抗震标准的专用通信系统保证了震后迅速恢复供电。Kansai公司的微波通信系统连接了调度中心和所有的电厂和变电站,Kansai公司具有独立的微波和光缆电话系统,该系统在地震中未受到损坏,保证了通信的畅通^[16]。

3.5 唐山、阪神地震电力系统破坏情况统计

唐山和阪神地震对电力系统的破坏情况见表3。由表3可知,唐山电网在地震中完全陷于瘫痪,与外界的输电线均已断开,当地发电厂破坏殆尽;

表 3 唐山地震和阪神地震对电力系统破坏比较
Tab. 3 Damage comparison to power systems by Tangshan and Hanshin earthquakes

破坏情况	断电 区域/%	发电 设备/%	变电站 破坏/%	控制 室/%	断路 器/%
唐山地震	100	100	89	>20	18.8
阪神地震	20	31	20	很小	1.5
破坏情况	隔离 开关/%	避雷器/%	外界 通信/%	频率 变化/Hz	恢复 时间
唐山地震	26.1 (6~10 kV)	80(220 kV), 30(110 kV)	100	1.28	>1 月
阪神地震	2.0	4.0	很小	0.45	6 d

而阪神地震仅造成 20% 的供电区域断电。唐山地震中变电站几乎遭到了全面破坏, 而阪神地震对变电站的破坏只是局部的。唐山地震断电时间长达 1 个月, 而阪神地震后 6 d 就恢复了供电。虽然 2 次地震发生年代不同, 但由于唐山地区地震预防工作不足, 唐山地震带来的破坏是全面的、灾难性的。

3.6 汶川大地震电力系统破坏情况统计

对汶川大地震中四川电网破坏情况的初步调查表明, 地震对输电线的破坏不严重, 山体滑坡、泥石流和地基下陷造成了杆塔倾倒, 总体来说, 输电网破坏不严重^[19]。但由于震区复杂的地理环境和地震原因, 震中某些区域的断电长达 2 个月^[20]。

汶川大地震对电网的破坏主要集中在变电站设备上。大多数变压器破坏是由套管损坏引起的, 如表 4 所示, 一些 20 世纪 70 年代设计生产的变压器发生了移位。地震发生后, 国家投资 10 亿多元对四川等省出险水库进行临时性的抗震加固^[21]。

表 4 汶川地震中四川电网变压器损坏情况
Tab. 4 Transformer damages caused by Wenchuan earthquake in Sichuan power grid

电压等级/kV	泄漏	移位	套管损坏
500	2	0	1
220	18	4	14
110	20	3	54

汶川地震中, 很多开关碎裂并掉落, 断路器和隔离开关损坏主要是由瓷性开关材料和较高的重心造成, 如表 5 所示。

表 5 汶川地震中四川电网开关损坏情况
Tab. 5 Switch damages caused by Wenchuan earthquake in Sichuan power grid

设备类型	断裂掉落	变形	泄漏	结构破坏	其他	总和
气体绝缘 开关	252 kV	0	2	0	2	4
断路器	252 kV	15	0	5	1	23
	126 kV	22	2	1	6	31
隔离 开关	252 kV	29	5	0	6	40
	126 kV	42	5	0	4	51

3.7 地震灾害原因分析

3 次地震均造成极大灾害, 原因有:

1) 电力系统的抗震标准不够是造成唐山和汶川地震损失大、断电时间长的最直接原因之一。

唐山地区抗震标准过低。唐山地区的防震水平是按照烈度 VI 度来规划的, 远远低于地震的实际烈度 XI 度^[10], 建筑物因抗震水平不足引起的倒塌造成很多室内电力设施(如发电设备等)的损坏。

汶川地区的抗震标准为烈度 VII 度, 而地震实际烈度达到了 XI 度^[22]。由地震历史纪录可知, 川西为强地震区, 1933 年茂县地震中震中距汶川仅有 50 km^[23]。

与以上 2 地震相比, 阪神地震造成的损失要小得多, 基本没有建筑物倒塌造成电力设施损坏的情况。

2) 唐山电网可靠性低, 结构不合理, 即不符合 N-1 原则。该电网中, 唐山和北京 2 个节点中任何一个退出运行都能造成系统解列, 即丧失 100% 输电线路。唐山电网和调度中心之间通信系统的可靠性不够, 地震后通信困难给电网运行和震后救援工作带来了极大困难。唐山电网及通信系统的可靠性问题在阪神和汶川地震中都没有出现。

3) 阪神地震和汶川地震中的损坏设备集中在旧设备上。如何利用更新和扩建电网的时机提高电网的抗震性能是一个很复杂的问题, 现代计算方法也不能恰当地衡量地震这种小概率、高风险的偶然事件造成的损失, 同时也就无法科学地指导电力系统的更新和扩建^[24]。遗憾的是, 汶川地区没有在配电网改造中淘汰掉 20 世纪 70 年代的设备。

4 预防地震的经验和方法

4.1 电力设备预防地震措施

4.1.1 变电站设备

变压器是变电站中最贵重也是最重要的设备, 地震对变压器的主要破坏方式有: 移位、套管泄漏、避雷器故障、散热片及油枕漏油^[4]。

设备固定部件应能够承受足够的应力, 以确保不发生移位。设计和选取该类部件时, 要考虑从底座到设备的受力分布和地震时地面加速度带来的扭力和张力, 所用螺栓和垫片等都要遵循相关设计安装标准^[4]。

要充分考虑脆性导体(如常用于母线联接的铸铝部件)的柔韧性是否满足要求, 以免地震时出现脆

裂。地震中大多数损坏的变电站设备都为瓷性器件,除了材料的因素,设备重心过高也是重要因素^[3]。

4.1.2 输配电设备

输配电杆塔的损坏主要与土壤和地基的结构有关。输电杆塔应尽可能地避开陡坡,处于山脊和陡坡边缘的输电杆塔地基的设计应该留有充分的安全裕度,水畔和跨河的杆塔应考虑土壤的液化化和横向移动^[4]。

4.1.3 发电设备

强度不够的厂房,固定不牢的控制柜,液体存储罐、备用电源和汽轮机支架与地板之间的连接都可能给发电设备带来安全问题。发电厂开关问题和变电站设备问题类似^[4]。

核电站均遵循严格的设计和安装标准。阪神地震中,没有核电站遭受重大破坏的报告^[16]。

4.1.4 系统控制系统

系统控制中心必须在震后仍能保持运行,这与民用建筑不同,后者只需要按照建筑标准建设并在地震中确保人民生命安全即可。控制中心问题多为设备固定不牢和支撑结构受损,如加热、通风和空调系统损坏,计算机地板变形,紧急备用电源故障等。防灾方案应包括对控制中心建筑的更新或者重建,以确保地震中的关键系统控制功能畅通^[4]。

4.1.5 通信系统

地震后,除了要保障系统调度和保护运行,通信系统还担负着系统紧急检查和抢修的工作。无线设备在救灾中非常重要,阪神地震中电力系统的迅速恢复在很大程度上归功于具有强抗震标准的私有通信系统^[16]。

4.1.6 附加设施和功能

服务中心、货存控制系统、备件仓库以及紧急管理中心的建筑都需要进行地震易损性估计,以保证地震后能够运行。地震防灾计划要考虑该类建筑的更新换代,系统的紧急反应计划必须有一个紧急管理中心^[4]。

4.2 系统级预防措施

4.2.1 电源系统的设计

经得起地震考验的电力系统不光要有坚固的设备,还要有完善的系统级预防措施。这要求系统具有充分的裕度、灵活性和能力来获得必要信息,并实施各种震后恢复措施。

为防止雷电等原因引起断电,一般都考虑采取多路电源供电,以下措施可进一步确保地震时电源

供给的可靠性^[25]: 1) 供电设施应具有充足的抗震能力; 2) 适当分散电力来源; 3) 应形成多回路的电网,每条回路应来自不同的电源。

经验表明,双回路的电力系统在强地震后仍能维持运行^[25],而单回路系统(如唐山电网)地震后当地电力系统易陷于瘫痪。

4.2.2 增强抗震型电力系统设计

一般输电变电站位于市郊,但如果在市区建设输电变电站,则配电变电站的电源就会变得多样化,系统电源的可靠性将得到大幅度提高^[25]。以上措施可使网络造价极大升高,但可靠性也随之提高,增强抗震型电力系统设计如图3所示。

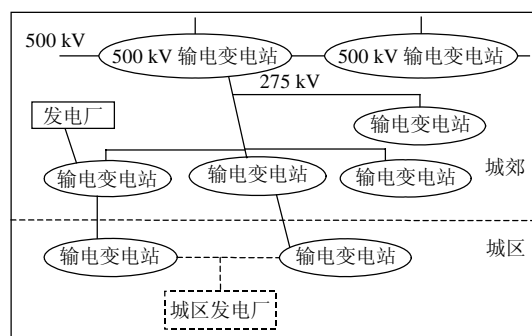


图3 增强抗震型电力系统

Fig. 3 Strengthened power system design against disasters

4.2.3 考虑城市整体规划的电力系统

电力系统规划应该考虑城市的环境和发展。电力系统的日常运行和其他生命线系统紧密相关,如燃煤电厂需要良好的交通系统保证煤的供应,自来水公司需要电力来保证供水等。地震后各种生命线系统之间的相互合作至关重要。

4.2.4 可靠的通信和信息系统

卫星和飞行器作为传统通信的重要补充,已经在救灾中发挥了举足轻重的作用^[9,25-26]。汶川地震后,由于山体滑坡和洪水,震中区域和外界通信断绝,卫星、直升机和运输机极大地支持了抢救工作。

4.2.5 震后应急管理组织

Kansai公司规定,一旦供电区域发生强度大于日制6级的地震,每个员工应立即赶到日常的办公地点;另外,每个员工要在最近的电力公司部门注册,以防地震发生后无法赶到日常工作地点,可就近投入工作。在公司总部,2个经理负责与外界的通讯,以备夜间或者节假日的突发灾难。

突发性灾难来临时,公共电话系统往往会被打爆。因此,需要采取其他措施来加强通信,如设置专用的电话线、传真和手机等^[25]。

4.2.6 机动性措施

灾难面前, 为保证系统的机动性, 需要配备以下车辆^[25]: 1) 通信车, 具有可移动的通行设施; 2) 供水车; 3) 发电车, 必要时要求发电车能提供 50、60 Hz 2 种电力; 4) 紧急备用车辆(如救护车和救火车)。

有时需要直升机、轮船和卫星来进行灾后的抢救和抢修。必要时需要与有关公司协作, 以保证抗震救灾的顺利开展。

5 讨论

就地震本身来讲, 很难制定一个精确的地震区划图。从 1966 年的邢台地震起到 1976 年唐山地震, 华北地区总共发生了 4 次 7 级以上地震^[10], 以上地震表明华北地区的地壳活动相当活跃, 但是这些地壳活动并没有在地震学界形成一致的结论。

城市生命线工程间互相关联, 往往使灾难更加复杂化。尽管阪神地震后 6 d 后就恢复了供电^[16,25], 但阪神地震还是反映了很多问题, 如地震引起了 200 多起火灾, 多数是由电力和煤气供应引起的故障: 49% 由电力系统故障引起, 28% 由煤气供应故障引起, 10% 与二者都有关^[27]。以上问题反映了城市规划的不合理, 该类问题引起了后来研究者和政策制定者的反思。

经济性和可靠性具有对立统一关系。一般来说, 城市电网的高投入意味着高可靠性。地震发生时, 电力公司的通信能力和机动性在救援工作中很重要。但对于地震这种小概率、高风险的问题, 目前无法给出一个准确的数学模型, 1994 年的美国北岭地震中需要支出的赔偿相当于保险业之前 25 a 总收入的 4 倍^[28]。

6 结论

地震区划图是规划和实施制定各种工程项目的基礎。很多地区缺少长时间的地震历史记录资料, 应开展古地震研究, 弥补缺失的地震资料; 也可从断裂带的规模及长度的统计资料入手, 利用断裂规模来估计断裂带的地震上限, 提高大型工程地震危险性评价结果的准确性、可靠性和科学性^[21]。

地震区城市电力系统的规划设计^[29-33]应考虑防震和震后救灾的顺利开展。地震发生时将电力系统损失减到最小; 地震发生后应能保证系统的尽快恢复, 以确保震后电力系统在救灾中发挥应有的作用。前者需要科学地协调经济性和可靠性的关系,

并应充分利用城市电网更新和扩建机会, 这对仍在快速发展的我国城市配电网来说, 具有非常重要的现实意义。后者要求城市电力系统和其他城市生命线系统相协调, 避免在地震发生时造成二次灾害和连锁反应。从救灾角度来讲, 保持城市电网在灾害发生时的通信能力和机动性, 对于控制灾害的扩大和保证救灾工作的顺利开展至关重要。

参考文献

- [1] Shiozaki Y, Nishikawa E, Deguchi T. Lessons from the great Hanshin earthquake[M]. Kyoto: Creates-Kamogawa Publishers, 2005: 6.
- [2] 赵成刚. 生命线地震工程[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 167.
- [3] Shumuta Y, Yang S Y, Tohma J, et al. Long-term infrastructure renewal and new construction planning with a focus on power lifelines-part I: framework[C]. 3rd EQTAP International Workshop, Manila, Philippine, 2000.
- [4] Chen W F, Scawthorn C. Earthquake engineering handbook[M]. Florence: CRC Press, 2003: 23-25.
- [5] USA Department of the Interior, USA Geological Survey. The richter magnitude scale[EB/OL]. [2009-10-27]. <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/richter.php>.
- [6] A Department of the Interior, USA Geological Survey. Earthquake glossary- intensity[EB/OL]. [2009-06-03]. <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=intensity>.
- [7] W H Freeman and Company. Modified mercalli intensity scale [EB/OL]. [2003-10-15]. <http://www.abag.ca.gov/bayarea/eqmaps/doc/mmi.html>.
- [8] 杨理华, 陈国林. 唐山地震的宏观烈度分布[J]. 地震工程与工程振动, 1981, 2(1): 2-7.
Yang Lihua, Chen Guolin. Intensity distribution of the Tangshan earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1981, 2(1): 2-7(in Chinese).
- [9] Yang S, Fan M, Hu X. Optimization planning of urban power system based on the assessment of seismic risk[C]. International Conference on Electrical Engineering, Xi'an, China, 2001.
- [10] Liu H, Housner G W, Xie L, et al. The great Tangshan earthquake of 1976[M]. California: California Institute of Technology, 2002: 444-872.
- [11] Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Great Hanshin earthquake restoration[EB/OL]. [2001-12-27]. http://www.kkr.mlit.go.jp/en/topics_hanshin.html.
- [12] 陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告[R]. 北京: 中国地震局地球物理所, 2008.
- [13] Bardet J P, Oka F, Sugito M, et al. The great Hanshin earthquake disaster[R]. Los Angeles: University of Southern California, 1995.
- [14] 日本内閣府. 我が国で発生する地震[EB/OL]. [2007-6-30]. http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_gaiyou/gaiyou_top.html.
- [15] 新华网. 5 月 12 日四川汶川发生里氏 8.0 级特大地震[EB/OL]. [2009-05-12]. http://news.xinhuanet.com/world/2009-05/12/content_11370800.htm.
- [16] Noda M. Disaster and restoration of electricity supply system by Hanshin-Awaji earthquake[C]. APEC Seminar on Earthquake Disaster Management of Energy Supply Systems, Taipei, China, 2001.
- [17] Fan M T, Yang S Y, Hu X H. Long-term infrastructure renewal and new construction planning with a focus on power lifelines:

- comparison of Tianjin and Kobe[C]. Joint Seminar on Urban Disaster Management, Beijing, China, 2000.
- [18] 日本气象厅. 震度と加速度[EB/OL]. [2003-09-26]. <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/comp.htm>.
- [19] 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): T1-T6.
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): T1-T6(in Chinese).
- [20] 吴锦瑜, 徐寿松. 汶川大地震震中映秀镇恢复电网供电[EB/OL]. [2008-07-24]. <http://finance.baidu.com/guonei/2008-07-24/181311160974.html>.
- [21] 马文涛, 李海鸥, 杨主恩, 等. 汶川 Ms 8.0 地震对四川省水电路工程场地安全性评价结果的检验[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 797-803.
Ma Wentao, Li Haiou, Yang Zhuen, et al. Verifying the reservoir seismic safety assessments in Sichuan province with the Ms8.0 Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 797-803(in Chinese).
- [22] 中国地震局. GB 18306—2001 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 地震出版社, 2001.
- [23] 网易. 1933 年四川茂县发生 7.5 级大地震始末[EB/OL]. [2008-05-13]. http://www.cq.xinhuanet.com/news/2008-05/13/content_13245050.htm.
- [24] Bommer J, Abrahamson N. Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates? [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(6): 1967.
- [25] Noda M. Robust electric power supply system against disasters[C]. APEC Seminar on Earthquake Disaster Management of Energy Supply Systems, Taipei, China, 2001.
- [26] Schiff A. Hyogoken-Nanbu (Kobe) earthquake of January 17, 1995: lifeline performance[M]. Reston, VA: Amer Society of Civil Engineers, 1999: 224-235.
- [27] Murosaki Y. The great Hanshin earthquake and fire[J]. Journal of Disaster Research, 2007, 2(4): 298-302.
- [28] Personal Insurance Federation of California. 2005 Insurance Reference Manual[EB/OL]. [2005-08-12]. http://pifc.org/insurance_manual/09_earthquake_northridge_factshandling.html.
- [29] 伍磊, 袁越, 季侃, 等. 微型电网及其在防震减灾中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 32-36.
- Wu Lei, Yuan Yue, Ji Kan, et al. Microgrid and its application in earthquake prevention and disaster reduction[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 32-36(in Chinese).
- [30] 曹枚根, 周福霖, 徐忠根, 等. 大跨越输电塔线体系减震控制分析研究[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 45-51.
Cao Meiyin, Zhou Fulin, Xu Zhonggen, et al. Research on seismic control of large crossing transmission towers for transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 45-51(in Chinese).
- [31] 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 Qunjun, 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 (in Chinese).
- [32] 岳茂光, 李宏男, 王东升, 等. 行波激励下输电塔-导线体系纵向地震反应分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 145-150.
Yue Maoguang, Li Hongnan, Wang Dongsheng, et al. Longitudinal response of the power transmission tower-cable system under traveling seismic wave excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 145-150(in Chinese).
- [33] 田利, 李宏男, 黄连壮. 多点激励下输电塔-导线体系的侧向地震反应分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 108-114.
Tian Li, Li Hongnan, Huang Lianzhuang. Longitudinal response of a power transmission tower-cable system under multi-support excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 108-114 (in Chinese).



杨少勇

收稿日期: 2010-01-23.

作者简介:

杨少勇(1976—), 男, 博士, 研究领域涉及电力电子、超低温电子、电力系统故障分析、电力系统电磁暂态、灵活交流输电系统及配电网规划等, E-mail: sxy188@googlemail.com;

赵建国(1955—), 男, 博士, 教授, 研究领域涉及灵活交流输电系统、电网调度自动化和电力市场等。

(编辑 徐梅)