

电力应急体系的脆弱性评价研究

程正刚¹, 房鑫炎¹, 俞国勤², 包海龙²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海电力公司, 上海 200122)

摘要: 介绍了常见的脆弱性评价方法, 研究了应用综合指标法进行电力应急体系的脆弱性评价。结合综合指标和层次分析法实现体系脆弱性的定量评估。针对具体的上海市电力应急体系, 对其进行脆弱性评价, 得到一个表征上海市电力应急体系脆弱性的客观的量化数据。根据评估的结果, 给出上海市电力应急管理中存在的脆弱点, 对脆弱点的现状和存在原因进行了分析, 结合计算中的指标权重提出改善上海市电力应急体系的参考意见。

关键词: 应急; 应急管理; 脆弱性; 综合指标; 电力应急体系

Research of vulnerability assessment of power emergency system

CHENG Zheng-gang¹, FANG Xin-yan¹, YU Guo-qin², BAO Hai-long²

(1. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The paper introduces the conventional vulnerability assessment method and applies the comprehensive indexes method to evaluate the vulnerability of power emergency system. Then it combines with comprehensive indexes and the analytic hierarchy process to fulfill the quantitative evaluation of system vulnerability. Taking Shanghai power emergency system as an example, this paper evaluates its vulnerability with comprehensive indexes, and gets the objective and quantitative data which represent the vulnerability of Shanghai power emergency system. According to the result, the weak points of Shanghai power emergency management are listed out, the status quo and the reasons of the existence of the weak points are analyzed, then according to the index weight in calculation some proposals are also given for promoting this power emergency system.

Key words: emergency; emergency management; vulnerability; comprehensive index; power emergency system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0051-04

0 引言

近年来大停电事件和我国2008年春节期间的冰雪灾害给我国的应急管理敲响了警钟^[1-3], 从而也大力推进了电力应急管理的研究。文献[4-9]表明: 针对突发事件制定应急管理措施, 建立一个涵盖预警、应急反应、应急恢复和灾后总结等完整环节的高效的电力应急管理体系可以很好地降低突发事件带来的损失。运用当前先进的风险评估方法知道电力应急体系建设和完善, 可以很大地提高电力系统的应急能力。对电力应急体系风险评估中的关键参数——脆弱性参数进行评估, 可以对应急管理体系功能的发挥和体系的完善起到很大的指导作用。

1 脆弱性概念及其评估方法

应急体系, 是具体规定突发事件应急管理工作

的组织指挥体系与职责和突发事件的预防与预警机制、处置程序、应急保障措施以及事后恢复与重建措施等的系统。中国的国家应急体系建设, 核心可以归纳为“一案三制”。对于具体的电力应急体系, 其中的“一案”就是指电力系统所制定的分级分区的突发事件应急预案体系。“三制”是指电力应急体系之中的组织体制、运行机制和法制基础。

对电力应急体系进行风险评估, 主要的数学模型有:

$$R = H \cdot V \quad (1)$$

$$R = H \cdot V \cdot E \quad (2)$$

$$R = H \cdot V \cdot P \quad (3)$$

其中: R 表示的是灾害风险; H 表征的是出现灾害在一定区域内部所蕴含的破坏能量; V 为脆弱性参数; E 表示在一定区域内的人和财产的暴露程度; P 为预防灾害的准备能力。可以看出在各种应急体系

风险评估中都涉及到脆弱性参数的计算，本文将对电力应急体系的脆弱性参数评估进行探讨，为后续的电力应急体系风险评估做好铺垫^[10]。

根据一般定义，脆弱性是指由于系统（子系统、系统组分）对系统内外扰动敏感性以及缺乏应对能力而使系统结构和功能容易发生改变的一种属性，它是源于系统内部、与生俱来的一种属性^[9]。

根据脆弱性定性分析中的三个基本概念模型：*RH* 模型、*PAR*（压力与释放）模型和 *HOP* 模型，脆弱性通过灾害而被揭露，随着灾害系统结构和功能的不同而变化，人类活动可能放大也可能缩小脆弱性。它要受到暴露、承灾体自身性质、社会经济、政治因素等方面的影响，脆弱性主要影响因素有：暴露，是指出现在灾害打击范围内的人和财产，暴露的多少直接影响到最后灾害造成损失的情况，反映脆弱性；天生的弱点和敏感性，反映承灾体自身性质，如老人、小孩等人群的本身弱势；结构脆弱性，结构脆弱性和社会不利条件有关，比如城市过分拥挤，缺乏相关培训和教育以及灾害应急相关知识的普及；没有防备能力，灾害的测、报、防、抗、救、恢复、重建相关防御功能的完善程度；缺乏反应能力，是高度脆弱性的一个特征，强调灾害发生时大到政府小到具体灾害承受者的主动性和恢复能力。在后面制定评估指标时，直接按照该思想的指导进行。

根据文献[11-12]的介绍，对脆弱性进行评估可以有不同的方法，大概分为：综合指数法、图层叠置法、脆弱性函数模型评价法、模糊物元评价法、危险度分析。本文根据第一种方法，采用表现电力系统各方面的脆弱性本质和应急管理能力的电力应急体系脆弱性评估的指标体系，进行具体电力应急体系的脆弱性评估。

2 评估采用的综合指标

2.1 综合指标介绍

进行电力应急体系脆弱性评估的一个重中之重就是确定采用的指标体系。完善的电力应急体系脆弱性评估指标可指导相关电力部门和人员对电力应急体系进行有针对性的规划、建设和改造。采用能很好反应电力应急体系在应对突发管理中所拥有的控制手段和资源等应急要素的完备性、协调性的指标体系，是电力应急体系技术评估所要解决的关键问题之一^[13]。

本文采用的指标如表1所列。

表 1 脆弱性评估的指标

Tab.1 Index of vulnerability assessment			
第一层指标	二层指标	指标权重	
法律基础	国家法律法规数量	0.043 5	
	地方法律法规数量	0.043 5	
组织机构	常设应急指挥机构	0.013 75	
	应急联动部门数量	0.013 75	
	电力专业队伍储备比率	0.013 75	
	电力专业人员训练频率	0.013 75	
	应急体系专职人员数量	0.013 75	
	应急专职人员训练频率	0.013 75	
	志愿者数量	0.013 75	
	应急体系升级研究和管理	0.013 75	
	灾害预防及预警	应急预案的数量	0.020 4
		应急预案的熟演练频率	0.020 4
火力发电厂存煤天数		0.020 4	
重要单位应急电源落实		0.020 4	
市民应急培训次数		0.020 4	
应急知识普及率		0.020 4	
应急联动监测的效率		0.020 4	
电网灾害监测能力		0.020 4	
电网危险源管理深入程度		0.020 4	
电网黑启动的准备		0.020 4	
灾害应急反应	事故抢修人员数量	0.030 6	
	应急资源分布合理性	0.030 6	
	灾害评估系统的启动时间	0.030 6	
	启动灾害应急系统时间	0.030 6	
	救援部门到达现场时间	0.030 6	
	财务经费投入百分比	0.021 75	
物资保障	应急通路保障程度	0.021 75	
	应急救援车数量	0.021 75	
	应急发电照明车数量	0.02175	
	多种通信方式的备有情况	0.018 6	
通信保障	联动数据交换带宽	0.018 6	
	应急数据库容量	0.018 6	
	应急通信呼叫容量	0.018 6	
	数据库实时补充更新能力	0.018 6	
应急指挥中心	信息接收后反应时间	0.02	
	指挥中心基础环境完备度	0.02	
	汇集多方面信息能力	0.02	
	辅助决策软件功能完善	0.02	
	中心电网调度的覆盖范围	0.02	
灾后总结	案例备份	0.142 5	
	经验总结的有无	0.142 5	
	预案修订频率	0.142 5	
信息发布	法律法规修改完善的能力	0.142 5	
	突发信息传递时间	0.018	
	政府部门分析时间	0.018	
	成立临时指挥部时间	0.018	
	突发事件对外发布时间	0.018	
	突发事件对外发布渠道	0.018	
	发布信息的有效覆盖面积	0.018	

表1所用指标均为表征系统结构性的静态指标, 不考虑具体应急行动案例进行时的动态变化的取值。第一层指标与第二层指标是分区对应, 没有采用分层对应, 以减少因单个指标对应多个第一层指标, 造成指标的过载从而加大计算误差。

2.2 指标的权重确定

权重是一个相对的概念, 是针对某一个指标而言的。某一指标的权重是指该指标在整体评价中的相对重要程度。权重表示在评价过程中被评价对象的不同侧面的重要程度的定量分配, 对各评价指标在总体评价中的作用进行区别对待。

一般采用层次分析法来确定指标的权重。

层次分析法是一种定性定量分析相结合的多目标决策分析方法。它将人的思维过程数学化, 并把非常复杂的系统分析简化为各指标之间成对比较判断和简单排序计算, 先构筑指标递增层次结构, 用1~9标度对同一层次中的指标对于层次中某一准则的重要性进行两两比较, 构造两两比较判断矩阵, 然后计算单一准则下指标的相对权重, 再对判断矩阵进行一致性检验, 最后计算个层次指标对系统指标的合成权重, 该方法克服了直接打分求权重的弊端且比较客观, 但是随着判断矩阵维数的增大而出现前后貌端判断, 差错率很高, 难以满足一致性检验的要求。

因此根据该方法的优点, 本文对第一层次指标采用层次分析法确定指标权重, 对于第二层采用均等权重, 然后进行两层权重的叠加得到表1所列的权重值。部分根据已有文献对系统结构学的指标权重分配, 确定9个第一层指标法律基础、组织机构、灾害预防及预警、灾害应急反应、物资保障、通信保障、应急指挥中心、灾后总结和消息发布的权重分别为: 0.087、0.110、0.204、0.153、0.087、0.093、0.10、0.057和0.108^[14]。

2.3 指标的赋值

对于每个具体的指标, 根据当前国内电力系统现状, 首先找到指标的基本上下界, 采用归一化手段对单个指标进行基本的脆弱性归算, 使得每个指标的最后取值在0与1之间, 0表征就是系统的该指标是稳健与安全的, 1与之相反。

以应急知识普及率为例, 计算方法如式(4):

$$\begin{cases} 0-0.2: x \geq 60\% \\ 0.2-0.4: 40\% \leq x \leq 60\% \\ 0.4-0.6: 10\% \leq x \leq 20\% \\ 0.6-1: x \leq 10\% \end{cases} \quad (4)$$

2.4 脆弱性评估计算模型

电力应急体系脆弱性评估通过以上二级指标的赋值和对应的权重实现, 指标的赋值为 I_i , 其中指标的权重为 W_i , 计算模型表达式为:

$$V = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (5)$$

3 上海电力应急体系脆弱性评估

根据当前获取的数据和网上上海市电力的相关动态信息, 对具体指标赋值, 其结果为: $I=[0.12, 0.16, 0, 0, 0.067, 0, 0, 0, 0.1, 0, 0.05, 0.1, 0, 0, 0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0, 0.1, 0.1, 0.3, 0.05, 0.125, 0.1, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0, 0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.077, 0, 0, 0, 0.1]$ 。

采用该指标数值与上文中的具体指标的权重行向量 W 相乘。公式为:

$$V = W \cdot I^T \quad (5)$$

结果为系统脆弱性为 $V=0.0703$ 。当前社会学采用的脆弱性算法对社会进行的脆弱性评价结果显示, 作为整个社会应对灾害时脆弱性基本上在0.1以上, 以上计算结果无疑表明上海市电力应急体系还是相对强壮的, 在抵御各项突发事件上走在社会先进水平, 领先于平均的水平。

计算单独每个指标对脆弱性结果的贡献的百分比数值, 得到一个比率的向量 P 。

$P=[7.43\%, 9.9\%, 0, 0, 1.81\%, 0, 0, 0, 1.96\%, 0, 1.45\%, 2.9\%, 0, 0, 0, 2.9\%, 2.9\%, 2.9\%, 2.9\%, 0, 4.35\%, 4.35\%, 13.06\%, 2.18\%, 5.44\%, 3.09\%, 3.09\%, 0, 0, 0, 0, 0, 2.65\%, 2.65\%, 2.84\%, 2.84\%, 2.84\%, 2.84\%, 0, 0, 0, 2.03\%, 2.03\%, 2.56\%, 1.97\%, 0, 0, 0, 2.56\%]$ 。

向量 P 中, 每一个数据表示的是在上海市电力应急体系中的对应于指标体系中的某一个具体指标在整个系统脆弱性中所占的比例, 其大小反应了该指标的脆弱性所带来的系统脆弱性的比重大小。因此该数值越大, 就表明该指标所列内容对当前上海市电力应急体系脆弱性的贡献越大。从其中我们可以看到对电力应急体系脆弱性贡献程度最大的四个具体指标分别为: 国家法律部法规数量、地方法律法规数量、灾害评估系统启动时间、救援部门到达现场时间。

首先从国家层次来看, 我国的应急还处在一个逐步发展和完善的过程中, 基本上是原因型的部门间联动应急, 虽然有紧急状态法案, 但是专门的应

对突发事件与为控制国家稳定打击各种入侵和社会危害活动的紧急状态还是有很大不同，而且针对常态下的应急预防问题涉及到具体行业标准的制定，规划过程中应急考虑等诸多问题需要具体考虑，还有待完善。由于国家相关具体应急的完善程度不是很高，地方相对能依赖并进而制定地方电力应急以及其他方面应急的法规的能力也就相对降低，当前我国正处于法制化阶段，大力加强包括应急管理在内的法律的编制研究，是一个持续的长久的挑战。

灾害评估系统启动时间在其中所占的比率最大，这是因为对于突发事件本身就具有突发性和快速性，它的发展变化很难把握，这样要对其进行评估尤其是进行相关的动态评估，从目前的技术和装备水平上来说还是明显不足的。

救援部门到达现场时间的脆弱性主要体现在上海市本身的繁荣发展上，因为城市较大和相对繁荣，也就决定了其城市对道路、电力等各种生命线工程的依赖程度的大幅提高，而且突发事件一般都会引发次生灾害，使得救援部门到达现场需要克服各种临时性的物资紧缺、调度延时、临时性的道路拥挤或者是通道的破坏等，这样就大大延误了救援部门到达现场开展救援工作的时间。

对于上海市电力应急体系，我们可以看到基本上没有出现由于个别权重特别大的指标造成的木桶效应，这也可以看出作为中国的龙头城市的上海，包括电力在内的城市各项基础建设都比较完善，城市管理理念也处于比较先进的水平，其脆弱性体现的主要方面基本上就是国家体制和改革过程中的正常问题以及作为大城市的本身脆弱性。因此深化包含电力应急在内的相关学科的研究，强化政府机能改革和开放，才能逐步提高上海市的电力应急体系坚强程度，降低其脆弱性^[15-16]。

4 结束语

电力应急体系可以减少突发事件对电力系统造成的损失。综合考虑电力应急体系的特点，本文采用确定的电力应急体系脆弱性评估指标，根据当前获取的资料对上海市电力应急体系进行了初步的脆弱性评估。并且根据脆弱性评估的结果给出电力应急体系加强体系建设、增强突发事件应对能力和提高体系鲁棒性的一些参考建议。根据该文获得的脆弱性结果，我们还可以根据电力突发事件在上海市造成的历年损失，结合各项灾害的气象或相关部门检测到的预警数据进行灾害损失预评估，指导应急物资的调度和储备，也可以进行上海市电力应急相关的风险评估，采用完善的现代风险管理策略，提

高电力应急体系的综合能力，以最小的经济投入实现最大的电力安全收益。

参考文献

- [1] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003 国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (3): 1-4.
GAN De-qiang, HU Jiang-yi, HAN Zhen-xiang. Pondering on several worldwide great blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (3): 1-4.
- [2] 薛宇胜. 综合防御由偶然故障化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (18): 1-5.
XUE Yu-sheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster-lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (18): 1-5.
- [3] 刘有飞, 蔡斌, 吴素农. 电网冰灾事故应急处理及反思[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (8): 10-13.
LIU You-fei, CAI Bin, WU Su-nong. Emergency management for the ice disaster in power grids and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (8): 10-13.
- [4] 沈殿凤, 朱正磊. 电网安全管理现状及美加停电事件的启示[J]. 电力安全技术, 2005, 7 (2): 8-9.
SHEN Dian-feng, ZHU Zheng-lei. The status of the power system management and the inspiration of blackout in the United States and Canada. U.S.-Canada power system[J]. Electric Safety Technology, 2005, 7 (2): 8-9.
- [5] 张建华, 尚敬福, 赵炜炜, 等. 中国区域电网应急管理机制建设的建议[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (4): 40-44.
ZHANG Jian-hua, SHANG Jing-fu, ZHAO Wei-wei, et al. Suggestions on construction of emergency management mechanism for Chinese regional power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (4): 40-44.
- [6] David Watts. Security & vulnerability in electric power system[C]. //NAPS 2003, North American Power System Symposium. Rola, Missouri(US): 2003: 559-566.
- [7] Korolev S I, Guselnikov A V. About principles of situational management of power supplies in emergency operation[C]. //Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. APEIE: 2004: 268-268.
- [8] LI Hao, Rosenwald G W, Jung J, et al. Strategic power infrastructure defense[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93 (5) : 918-933.
- [9] Emrich C T. Social vulnerability in United States metropolitan areas: improvements in hazard vulnerability [D]. Florida: University of South Carolina, 2005.

(下转第 86 页 continued on page 86)

[7] 童明光, 刘万福, 张恩源, 等. 电力市场环境系统安全的定价研究[J]. 电网技术, 2004, 28 (6): 31-36. TONG Ming-guang, LIU Wan-fu, ZHANG En-yuan, et al. Research on electricity pricing considering system security under electricity market[J]. Power System Technology, 2004, 28 (6): 31-36.

[8] 余贻鑫, 赵义术, 刘辉, 等. 基于实用动态安全域的电力系统安全成本优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 13-18. YU Yi-xin, ZHAO Yi-shu, LIU Hui, et al. Power system security cost optimization based on practical dynamic security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 13-18.

[9] 张保会, 王立永, 谭伦农, 等. 市场环境下电力系统安全可靠措施的经济当量[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (24): 41-46. ZHANG Bao-hui, WANG Li-yong, TAN Lun-nong, et al. Economic equivalent of the power system security and reliability measure in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24): 41-46.

[10] Biskas P N, Bakirtzis A G. Decentralised security constrained DC-OPF of interconnected power systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151 (6): 747-754.

[11] Arroyo J M, Galiana F D. Energy and reserve pricing in

security and network-constrained electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (2): 634-643.

[12] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.

[13] 刘皓明, 李卫星, 倪以信, 等. 计及静态安全约束的跨区域双边交易最大交易量实用计算方法[J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 1-5. LIU Hao-ming, LI Wei-xing, NI Yi-xin, et al. A practical method for calculating maximum transaction volume of bilateral transaction in multiregional electricity market considering static security constraints[J]. Power System Technology, 2003, 27 (9): 1-5.

[14] Chen H, Liu J. Practices of system security pricing[C]. //2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008: 1-4.

收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2009-11-24

作者简介:

曹伟斌 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场; E-mail: caoweibin@sjtu.edu.cn

宋依群 (1970-), 女, 副教授, 主要从事电力系统分析及电力市场研究。E-mail: yqsong@sjtu.edu.cn

(上接第 54 页 continued from page 54)

[10] 王绍玉, 唐桂娟. 综合自然灾害风险管理理论依据探析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18 (2): 33-38. WANG Shao-yu, TANG Gui-juan. Exploratory analysis of theoretical basis for integrated natural disaster risk management[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18 (2): 33-38.

[11] Ezell B C. Toward a system-based vulnerability assessment methodology for water supply system[C]. // Risk-based Decisionmaking, 2002: 91-103.

[12] Bucle P, Marsh G, Smale S, et al. Assessing resilience & vulnerability: principles strategies & actions[M]. Emergency Management Australia, 2001.

[13] 赵炜炜, 张建华, 尚敬福, 等. 电网大面积停电应急评价指标体系及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 27-31. ZHAO Wei-wei, ZHANG Jian-hua, SHANG Jing-fu, et al. Power system large scale blackout emergency evaluation index system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 27-31.

[14] 王明, 叶青山, 王得道. 电力系统自然灾害应急系统评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (13): 57-60. WANG Ming, YE Qing-shan, WANG De-dao. The development of natural disaster response capacity for

power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (13): 57-60.

[15] 范明天, 刘思革, 张祖平. 城市供电应急管理研究与展望[J]. 电网技术, 2007, 31: 38-41. FAN Ming-tian, LIU Si-ge, ZHANG Zu-ping. A research and review on the emergency management of power supply in urban power network[J]. Power System Technology, 2007, 31: 38-41.

[16] 黄声. 上海市综合减灾管理体制研究-以上海市民防办公室承担减灾职能为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2005. HUANG Sheng. Study of Shanghai's comprehensive management of calamity system[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.

收稿日期: 2009-10-22; 修回日期: 2010-08-05

作者简介:

程正刚 (1984-), 男, 研究生, 从事电力系统应急以及继电保护装置方面研究; E-mail: zcheng173@sjtu.edu.cn

房鑫炎 (1963-), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统继电保护及系统安全方面研究; E-mail: xyfang2000@sjtu.edu.cn

俞国勤 (1962-), 男, 长期从事电力系统运行与管理工