

基于模糊综合评价法的城市电网安全风险评价

基于城市电网安全性评价和风险管理理论，利用模糊综合评价法（FCE），对评价某个城市电网发生安全事故的风险级别的方法进行了定量化研究。结合模糊综合评价法的原理，探讨了城市电网安全风险评价二级指标体系及权重体系，并提出了应用作业条件危险性评价法（MES）评估某单一指标的事故风险级别。以华中地区某省会城市电网为例，采用近五年的安全事故数据，描述了城市电网安全风险评价的一般步骤，最终可得出电网的安全风险等级，并确定出影响最大的二级指标。根据评价结果，针对影响大的二级指标反映的问题制定整改措施，快速降低城市电网安全事故风险，保障电网的安全稳定运行。

郭雨松¹ 杨文杰² 郝宗良³ 于振^{1/1}. 国网智能电网研究院 2. 国网乌鲁木齐供电公司 3. 国网宁夏电力公司

0 引言

输电网及城市电网安全性评价是电网企业普遍推行的一项重要的安全管理工作。查评专家依据输电网安全性评价标准和城市电网安全性评价标准，对输电网或城市电网的安全状况与查评条款的符合性进行评价和打分，最后利用总体得分率定量衡量某一电网的安全性。查评结束后，针对发现的每个问题，及时制定落实整改措施，从而提高电网的安全稳定运行水平^[1]。电网安全性评价的结果基本能真实反映出电网的安全状况，但它更多地侧重对“物的不安全状态”（即电网物理健康水平）和安全规定的执行情况进行分析判断，而对“人的不安全行为”、电网建设质量及自然灾害等外界因素的影响缺乏评价，后者也是造成电网安全事故的重要原因^[2-3]。

电网安全性评价是电网安全风险管

理理论为指导，稳步推进安全风险管理体系建设，拓展和延伸电网安全性评价的内容，全面提高电网的安全风险防控水平^[4]。安全风险评价是运用系统安全工程等理论方法，对企业生产经营活动存在的安全隐患和可能构成的风险进行定性和定量分析，从而采取针对性的风险控制措施，达到安全风险的“可控、能控、在控”。文献[5]在分析输电网各种不安全因素的基础上，研究提出了输电网安全风险评价的云模型。文献[6]研究提出了基于效用理论的配电网风险评价体系。文献[7]运用事故树分析法、MES评价法和经验数据法，建立了无锡供电公司安全风险评价指标体系。

本文在城市电网安全性评价的基础上，综合考虑导致电网安全事故的各方面因素，将“人的不安全行为”、电网建设质量及自然灾害等外界因素纳入安全风险管理的范畴，提出了一种评价某个城市电网安全风险等级的方法，并确定出对评价等级影响最大的因素，为电网企业实行风险预警和风险控制提供理论支撑，提高电网的事故防范能力和企业安全风险管理水平。

1 城市电网安全风险评价模型

1.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法^[8-9]（Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE）根据模糊数学的隶属度理论，把定性评价转化为定量评价，即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。它具有结构清晰、系统性强的特点，能较好地解决模糊的、难以量化的问题，非常适合解决各种非确定性问



郭雨松/工程师

关键词/Keywords

模糊综合评价·
城市电网·
风险评价·
MES评估法·

题，已在经济管理领域得到了广泛的研究和应用。

采用模糊综合评价法进行风险评价的基本思路是：综合考虑所有风险因素的影响程度，并设置权重以区别各因素的重要性，通过构建数学模型，推算出风险的各种可能性程度，其中可能性程度高者为风险水平的最终确定值。在多层次模型中，采取逆向由较低层次向较高层次逐级评价。

1.2 评判集

目前，电网安全风险的级别还没有统一的划分标准，各个专家对电网安全风险大小的判断在很大程度上取决于自身的工作经验。文献[10]研究了供电生产风险，将风险模糊分为五个等级；文献[11]研究了我国智能电网风险评价，亦将风险模糊分为五个等级。

本文参考文献[10-11]风险等级的划分方法，将电网安全风险分为极低风险、较低风险、中等风险、较高风险和极高风险共五个评价级别，组成一个评判集，即 $P=\{\text{极低风险, 较低风险, 中等风险, 较高风险, 极高风险}\}$ 。

1.3 城市电网安全风险评价指标体系

评价指标体系的建立是安全风险评价的核心环节，能否科学合理地建立指标体系直接关系到安全风险评价的质量。

电网安全风险因素可以逐级细化，例如：某次电网事故可归因为电网运行环境因素，可细化为自然灾害，再细化为雷击。为简化起见，本文构建了两个层级的因素指标。

导致电网安全事故的直接原因包括电网健康状况、电网建设质量、现场作业人员行为及电网的外部运行环境等。本文将电网安全风险归因为电网状况、建设质量、人员组织和运行环境共四个方面因素，即一级指标集 $U=\{\text{电网状况, 建设质量, 人员组织, 运行环境}\}$ 。

1.3.1 电网状况

文献[1]是依据国家、行业和国家电网公司所颁布的有关法律法规和导则、规程规定、反事故措施等编制而成，评价指标比较系统全面。因此，本文采用文献[1]中的电网、调度及二次系统、电气一次设备、安全供电及应急管理五个二级指标。一级指标“电网状况”对应的二级指标集 $U_1=\{\text{电网, 调度及二次系统, 电气一次设$

备, 安全供电, 应急管理}\}。

1.3.2 建设质量

文献[1]中没有涉及电网建设质量方面的内容，但根据文献[3]，电网建设质量引发事故次数约占到1/4，包括设计质量、施工质量和设备质量。一级指标“建设质量”对应的二级指标集 $U_2=\{\text{设计质量, 施工质量, 设备质量}\}$ 。

1.3.3 人员组织

人为失误，例如：调度人员的误调度、运维人员的误操作、作业人员的习惯性违章及检修施工现场组织管理不当等，都可能导致电网事故发生。一级指标“人员组织”对应的二级指标集 $U_3=\{\text{技能水平, 安全意识, 现场组织}\}$ 。

1.3.4 运行环境

根据文献[3]，电网外部运行环境因素引发电网事故的次数约占总事故次数的40%。运行环境包括外力破坏（山火、异物、偷盗等）、自然灾害（风、雨、雪、雷击、地震等）、电厂（火电、水电、核电、新能源电站等）。一级指标“运行环境”对应的二级指标集 $U_4=\{\text{外力破坏, 自然灾害, 电厂接入}\}$ 。

1.4 指标权重

根据各指标对整个系统安全性的影响大小，来确定各指标的权重，数值位于区间[0-1]且总和为1。本文采用近五年4个一级指标直接造成电网事故次数的比例，来确定一级指标权重集 W ；同理确定各二级指标集的权重集 $W_i(i=1, 2, 3, 4)$ 。文献[1]各章节分数是经过有关专家的充分考虑，根据其重要性进行分配的，因此，一级指标电网状况所属各二级指标的权重采用各章节分数占总分数的比例来确定，即 $W_1=\{0.17, 0.25, 0.43, 0.05, 0.1\}$ 。

1.5 模糊评价矩阵

对每个二级指标相对于评判集各元素的表现进行赋值，范围在区间[0-1]之间，且总和为1，组成该二级指标的评价集 $M_{ij}(j=1, 2, \cdots, 5)$ 。每个二级指标集所属各二级指标的评价集组成该二级指标集的模糊评价矩阵 M_i ，即

$$M_i=\begin{bmatrix} M_{i1} \\ M_{i2} \\ \vdots \\ M_{ij} \end{bmatrix}$$

(1)

1.6 评价结果

每个二级指标集的权重矩阵 W_i 与模糊评价矩阵 M_i 的乘积为该二级指标集所对应一级指标的评价结果 B_i ，即

$$B_i=W_iM_i \tag{2}$$

各一级指标的评价结果组成一级指标集的综合模糊评价矩阵 M ，即

$$M=\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_i \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1j} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{i1} & B_{i2} & \cdots & B_{ij} \end{bmatrix} \tag{3}$$

一级指标权重矩阵 W 与一级指标集的综合模糊评价矩阵 M 的乘积为整个系统的综合评价结果 B ，即

$$B=WM \tag{4}$$

对两个层级的指标进行综合评判的过程如下图所示。

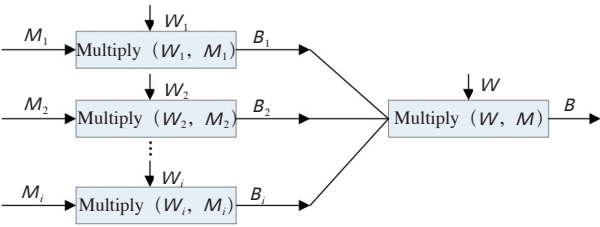


图 二层指标综合评判过程

2 二级指标风险评估

风险由两部分组成：一是风险事件出现的概率，二是风险出现后的严重程度。不确定性、危害性亦是电网安全事故风险的本质特征。作业条件危险性评价法（Measurement Exposure Sequence，MES）是一种对潜在危险性半定量评估的方法，能有效减少仅凭人的主观判断对评估结果的影响。MES评估法将风险可能性 L 和后果 S 的严重程度进行量化，两者的乘积反映风险程度 R 的大小^[12]，即

$$R=LS \tag{5}$$

2.1 风险可能性分级

本文用电网事故风险发生的频率来表示风险可能性，并对各个频率赋予分值，如表1所示。

表1 风险可能性分级标准

可能性级别	分值
可能每5年以上发生某类风险	1
可能每1~5年发生某类风险	2
可能每年发生某类风险	3
可能每季度发生某类风险	4
可能每月发生某类风险	5

2.2 风险严重性分级

本文依据文献[13]中的电网事件分级标准作为风险严重性分级标准。根据近年来各供电企业电网安全事故发生情况，四级及以上电网事故发生次数极少，故本文将一至四级电网事件合并成同一级别。分别对每个风险严重性级别赋予分值，如表2所示。

表2 风险严重性分级标准

严重性级别	分值
八级电网事件	1
七级电网事件	2
六级电网事件	3
五级电网事件	4
一至四级电网事件	5

2.3 风险分级标准

由式（5）可知，计算风险可能性与严重性两两乘积，构成半定量风险评估矩阵。将风险程度 R 的大小分成五个等级，用不同底纹来区分，与评判集 P 中的5个元素一一对应，如表3所示。

表3 半定量风险评估矩阵

严重性 可能性	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
L_1	1	2	3	4	5
L_2	2	4	6	8	10
L_3	3	6	9	12	15
L_4	4	8	12	16	20
L_5	5	10	15	20	25

本文规定电网事故风险分级标准：

- 1）当 $1\leq R\leq 3$ 时，为极低风险，如表3横线部分所示。
- 2）当 $3<R\leq 6$ 时，为较低风险，如表3上斜线部分所示。
- 3）当 $6<R\leq 10$ 时，为中等风险，如表3下斜线部分所示。
- 4）当 $10<R\leq 16$ 时，为较高风险，如表3竖线部分所示。
- 5）当 $16<R\leq 25$ 时，为极高风险，如表3网格线部分所示。

3 案例分析

本文以华中地区某省会城市开展电网安全风险评价为例进行分析。

采用2009~2013年的该城市电网事故数据，按照上文所述的方法确定一级指标权重集及各二级指标集的权重集。由于文献[13]在2012年才开始

正式施行，因此要对2011年及以前年份发生的电网事故重新判断事故等级。经统计分析，得

$$\begin{aligned} W &= \{0.32, 0.24, 0.06, 0.38\}, \\ W_1 &= \{0.17, 0.25, 0.43, 0.05, 0.1\}, \\ W_2 &= \{0.16, 0.28, 0.56\}, \\ W_3 &= \{0.21, 0.67, 0.12\}, \\ W_4 &= \{0.58, 0.34, 0.08\}. \end{aligned}$$

邀请10位专家按照MES评估法分别对每个二级指标进行风险评估，然后对10个评估结果进行统计，并作归一化处理。归一化后的数值表示该二级指标分别对于评判集各元素的隶属度，如表4所示。

表4 U_i 各二级指标风险评估结果

二级指标	项目	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
U_{11}	人数	3	4	2	1	0
	归一化	0.3	0.4	0.2	0.1	0
U_{12}	人数	2	1	5	2	0
	归一化	0.2	0.1	0.5	0.2	0
U_{13}	人数	3	4	2	1	0
	归一化	0.3	0.4	0.2	0.1	0
U_{14}	人数	0	5	3	2	0
	归一化	0	0.5	0.3	0.2	0
U_{15}	人数	0	2	2	4	2
	归一化	0	0.2	0.2	0.4	0.2

由上表及式(1)，得二级指标集 U_1 的模糊评价矩阵 M_1

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

同理，得二级指标集 U_2 、 U_3 、 U_4 的模糊评价矩阵

$$\begin{aligned} M_2 &= \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix} \\ M_3 &= \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \\ M_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(2)，得一级指标“电网状况”的评价结果

$$\begin{aligned} B_1 &= W_1 M_1 = [0.17 \ 0.25 \ 0.43 \ 0.05 \ 0.1] \\ &\begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix} \\ &= [0.23 \ 0.31 \ 0.28 \ 0.16 \ 0.02] \end{aligned} \quad (8)$$

按照上法同样可求出一级指标“建设质量”、“人员组织”和“运行环境”的评价结果

$$\begin{aligned} B_2 &= [0.064 \ 0.276 \ 0.352 \ 0.252 \ 0.056] \\ B_3 &= [0.063 \ 0.287 \ 0.291 \ 0.359 \ 0] \\ B_4 &= [0.016 \ 0.09 \ 0.234 \ 0.51 \ 0.15] \end{aligned} \quad (9)$$

由式(3)，得一级指标集 U 的综合模糊评价矩阵

$$M = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.31 & 0.28 & 0.16 & 0.02 \\ 0.064 & 0.276 & 0.352 & 0.252 & 0.056 \\ 0.063 & 0.287 & 0.291 & 0.359 & 0 \\ 0.016 & 0.09 & 0.234 & 0.51 & 0.15 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(4)，可求取整个系统的综合评价结果

$$\begin{aligned} B &= W M = [0.32 \ 0.24 \ 0.06 \ 0.38] \\ &\begin{bmatrix} 0.23 & 0.31 & 0.28 & 0.16 & 0.02 \\ 0.064 & 0.276 & 0.352 & 0.252 & 0.056 \\ 0.063 & 0.287 & 0.291 & 0.359 & 0 \\ 0.016 & 0.09 & 0.234 & 0.51 & 0.15 \end{bmatrix} \\ &= [0.09882 \ 0.21686 \ 0.28046 \ 0.32702 \ 0.07684] \end{aligned} \quad (11)$$

上式即是对该城市电网的安全风险按五个等级评价时的结果分布情况。根据模糊数学最大隶属度原则，可知，该城市电网处于较高风险水平。由评价结果向前追溯，影响最大的二级指标为 W_{41} ，即外力破坏。因此，在后续开展电网风险管控工作的过程中，应着重加强输电线路防外破措施的部署落实，如做好电力设施保护宣传教育、加大线路巡视力度及安装成熟的监控报警装置等。

4 结束语

根据城市电网安全事故历史数据，应用模糊层次分析法建立城市电网安全风险评价模型，结合MES评估法，能够定量得出某个城市电网所处的安全风险级别，从而为电网企业在管理措施、

技术措施、工作标准等方面提出风险控制措施提供依据。结合该电网所处地区的经济社会发展情况，对高风险电网企业提出整顿要求，重点整顿权重重大、风险级别高的二级指标，快速将电网安全事故风险降低到可接受的水平。

本文提出的城市电网安全风险评价方法尚不完善，还需要在以下几个方面进一步研究：一是电网安全风险分为几个级别最能符合电网企业的安全管理实际；二是城市电网安全风险评价指标体系如何构建能够更加全面、科学；三是二级指标风险评估方法中的分值和分级标准如何设置更加合理。

参考文献

[1] 国家电网公司. 城市电网安全性评价 (2011年版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 1-161.

[2] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 130-133.

[3] 国家电网公司安全监察质量部. 国家电网公司2011年安全生产事故报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 10-18.

[4] 国家电网公司. 电网安全风险管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 58-59.

[5] 马丽云. 基于云理论的输电网安全风险评价研究

[D]. 上海: 上海电力学院, 2012.

[6] 杨媛媛, 杨京燕, 黄镇. 配电网风险性评价体系及其应用[J]. 现代电力, 2011, 28(4): 18-23.

[7] 陈黎军. 供电企业安全风险评价指标体系的建立与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.

[8] 范道津, 陈伟珂. T风险管理理论与工具[M]. 天津: 天津大学出版社, 2010: 97-106.

[9] 田雨平. 电力企业安全风险管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 155-158.

[10] 赵伟, 周敏, 王德. 供电生产风险模糊综合评价研究[J]. 山西财经大学学报, 2007, 29(1): 15-16.

[11] 曾鸣, 陈英杰, 胡献忠, 等. 基于多层次模糊综合评价法的我国智能电网风险评价[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 0536-0538.

[12] 宋大成. 风险评价方法——MES法[J]. 中国职业安全卫生管理体系认证, 2002(5): 34-35.

[13] 国家电网公司. 国家电网公司安全事故调查规程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 7-19.

作者简介

郭雨松 (1983-), 男, 工程师, 从事输电网运行技术工作。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**
(编辑: 崔文静)