

DOI: 10.7667/PSPC170039

## 基于多因素融合的电网高风险设备评估方法

吴润泽<sup>1</sup>, 陈文伟<sup>2</sup>, 邹英杰<sup>1</sup>, 唐良瑞<sup>1</sup>, 王瑞杰<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070)

**摘要:** 最大可能地降低设备风险是防止电力系统发生事故的有效途径。从分析设备风险的影响因素的角度出发, 综合设备重要度和设备隐患对设备风险的影响, 定义了设备风险影响度, 并提出了设备重要度指标和设备隐患指标, 建立了设备风险影响度计算指标体系。在该体系的基础上, 利用设备相对重要度矩阵和设备相对隐患矩阵构建设备风险影响度计算模型以获取设备的风险影响度, 以辨识出对电网可靠、稳定和安全运行具有巨大影响的高风险设备, 从而有针对性地对高风险设备进行重点关注, 对降低电力系统的总体风险水平具有重要意义。最后, 将该方法应用于山西晋城 220 kV 东沟变电站中主要设备的风险影响度计算。仿真结果验证了所提方法的有效性和可行性, 为进一步挖掘高风险设备提供了数据支撑。

**关键词:** 设备重要度; 设备隐患; 风险影响度; 指标体系

### Evaluation method of high risk equipment in power grid based on multiple factor fusion

WU Runze<sup>1</sup>, CHEN Wenwei<sup>2</sup>, ZOU Yingjie<sup>1</sup>, TANG Liangrui<sup>1</sup>, WANG Ruijie<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Guodiantong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** The maximum reduction of equipment risk is an effective way to prevent power grid accident. From the perspective of multiple factor analysis of equipment risk, considering impact of equipment importance and equipment hidden danger on equipment risk, equipment risk influence degree is defined, equipment importance indicators and equipment hidden danger indicators are proposed, and the index system of calculating equipment risk influence degree is established. On the basis of this system, the equipment relative importance matrix and equipment relative hidden danger are used to establish the calculation model of equipment risk influence degree. The risk influence degree of each equipment is obtained to identify high risk equipment that has an important impact on reliable, stable and safe operation of power grid. Therefore, it is of great significance to focus on the high risk equipment to reduce the overall risk level of power system. Finally, the method is applied to calculate risk influence degree of equipment in 220 kV Donggou substation in Jincheng. Simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed method, which provides data support for mining high risk equipment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507063) and Science and Tehnology Project of Headquarters of State Grid Corporation of China (No. B34681150152).

**Key words:** equipment importance; equipment hidden danger; risk influence degree; index system

## 0 引言

近年来, 在智能电网大力发展的同时, 电网运行过程面临潜在的风险因素是不容忽视的<sup>[1-2]</sup>。电网设备是电力系统的重要组成部分, 一旦设备出现故障或异常, 将会带来一定的经济损失和社会影响。研究和分析电力系统中大停电事故的原因, 发现极

少数薄弱环节的故障往往能够引发电网事故, 进而引发在电网中的级联传播, 最终导致更严重的电网事故<sup>[3-4]</sup>。因此, 高隐患或高风险设备对于电网安全、稳定和可靠运行至关重要。综合设备的重要度和高隐患程度, 正确评估设备风险以提高电网运行的可靠性, 对降低电网风险是有必要的<sup>[5]</sup>。针对风险较高的设备, 要加强维护和管理, 以提高设备运行的可靠性, 避免设备发生故障引起电网事故, 尽可能将事故影响限制在最低程度。

目前, 在电网风险评估领域, 所采用的研究理

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51507063); 国家电网总部科技项目(B34681150152)

念和技术手段主要采用考虑故障概率与损失后果的数学期望<sup>[6]</sup>。IEEE 标准 100-1992<sup>[7]</sup>的风险定义广泛应用于工程设备管理领域，指出风险为对不期望发生结果的可能性大小和后果严重性的度量，其表达式通常为概率和后果的乘积。文献[8]中主要考虑设备、人身环境、系统和社会 4 个方面的风险，其中设备风险主要影响因素为设备故障率和设备故障引起的不同后果。文献[9]建立了安全风险评估指标体系，从结构、技术、设备和管理 4 个方面的风险进行分析，其中设备风险主要从电力系统设备本身的可靠性方面来考察，主要分为关键一次设备风险和关键二次设备风险，每个设备风险的指标为具体的设备评估，例如变压器评估、输电线路评估等。

在电网运行过程中，电网设备风险发生的原因很复杂，只考虑设备故障率和设备故障引起的后果这两方面因素的影响对于正确评价电网设备风险具有一定的局限性。本文针对电网设备发生告警、故障可能对电网造成不同程度的风险，定义了设备风险影响度，同时兼顾设备重要度和设备隐患对设备风险的影响。提出了设备风险影响度指标体系，通过设备风险影响度计算模型，得到每个设备的风险影响度，以辨识出高风险或高隐患设备，对提高设备可靠性和电力系统的抗风险能力具有指导作用。

### 1 设备风险影响度计算指标体系

设备是电力系统的基本组成元素之一，其运行状态直接影响电网的运行状态。事实证明，设备故障常常是导致停电的直接原因和事故扩大的关键因素，因此设备风险是电网风险评估的核心之一<sup>[10-11]</sup>。2011 年，某沿海城市中共发生 1838 次故障停电事故，其中设备故障或隐患导致停电的事故占大多数<sup>[12]</sup>。因此，从设备的角度出发，分析设备风险的影响因素对于提高电网运行可靠性具有一定的意义。

电网中的设备功能和地位存在差异，同时设备发生告警、故障对电网运行造成的影响程度也不一样，对电网风险的影响也不完全相同。基于以上两点，本文从设备的重要度和设备隐患两个方面来分析设备告警、故障对电网造成的影响，将该影响程度进行量化后定义为设备风险影响度。即设备风险影响度为设备发生告警、故障或异常后对电网造成潜在风险的可能性大小，设备风险影响度越高，表明该设备发生告警、故障或异常后对电网的影响越严重，导致设备风险越高。

本文定义的风险影响度主要侧重设备故障风险，不同重要性的设备发生告警所产生的影响，受设备本身在电网中的地位和设备故障事件的影响，

本文只是对设备隐患风险进行分析，对海量告警信息进行高风险设备挖掘，而不是针对电网安全风险的计算。设备风险影响度属于电网安全风险的一个子集，不等价于电网安全风险。

本文在分析电网事故原因和电网运行经验的基础上，将设备风险影响因素进行归纳和分类，提出设备风险影响度计算指标体系，如图 1 所示。该体系同时考虑了设备重要度和设备隐患的影响因素，并在该体系的基础上建立了设备风险影响度的计算模型，以此辨识出高风险设备，高风险的设备应该优先重视和安排检修，其次是注意中等程度风险的同时关注低风险。

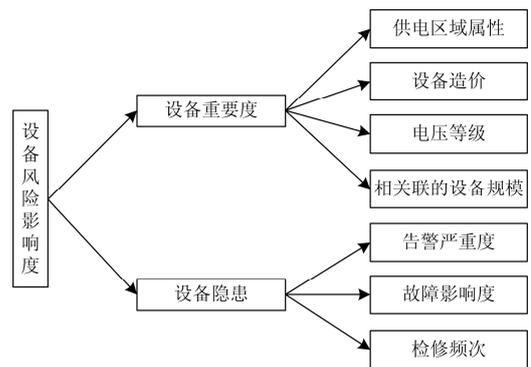


图 1 设备风险影响度计算指标体系

Fig. 1 Index system of equipment risk impact indicator

从图 1 可以看到，设备风险影响度指标体系分为两个方面，设备重要度和设备隐患。对于设备风险来说，设备隐患是造成设备风险的重要因素，但是设备本身的重要程度对设备风险的影响程度也是不容忽视的，如果设备 A 的隐患小于设备 B 的隐患，而设备 A 的重要度大于设备 B 的重要度，则设备 A 的风险影响度可能大于设备 B 的风险影响度，所以本文在考虑设备隐患的同时关注了设备重要度对于设备风险评估的重要性。

### 2 设备风险影响因素分析

#### 2.1 设备重要度

在本文中，设备重要度是指设备在保障整个电力系统正常工作时所处的地位的重要程度，某类设备出现故障或异常时导致整个系统不能正常工作的时速性越快、时长性越长及造成损失越大等，该类设备的重要度就越高。设备重要度越高，说明设备对电网运行产生的影响越严重。在分析设备在电网中的功能和地位的前提下，根据电网运行和专家经验，提出设备重要度的影响因素，主要有以下 4 个。

1) 电压等级。电网中同类设备电压等级越高，

该设备在电网中就越重要。电压等级可以衡量设备故障或发生异常对人员环境的安全性影响, 如高压线掉落可能造成森林火灾, 发生在居民区可能出现人员伤亡等重要灾害, 这里人员不仅指设备操作人员, 还指普通用电公民。

2) 设备造价。设备造价是从经济角度衡量设备重要度的指标之一。设备造价在一定程度上表征了该类设备在电力系统中的地位, 设备造价越高, 表明该设备在电力系统中的地位越高, 进而说明该设备本身越重要。

3) 供电区域属性。设备所在的供电区域不同, 其设备的重要性也不同, 设备所处的供电区域越重要, 其设备本身也越重要<sup>[13-14]</sup>。处于供电区域等级高的设备, 一旦发生故障引起停电将可能造成人员伤亡、较大的环境污染、较大的政治影响、较大的经济损失和社会公共秩序严重混乱。依据行政级别和负荷密度将供电区域划分为 A+、A、B、C、D、E 共 6 类<sup>[15]</sup>。

4) 相关联的设备规模。设备发生故障或异常时可能会引起与其关联的设备也失效甚至故障或损坏, 从而造成维修工作量和成本的增加。所以可以用受影响的设备数量来表征故障或异常设备对相关设备的影响。

## 2.2 设备隐患

设备发生告警、故障或异常对电网正常运行将产生一定的影响, 进而增加电网风险, 增大电网事故发生的可能性。本文提出的设备隐患影响因素主要有以下 3 个。

### 1) 告警严重度

在本文中, 定义告警严重度为设备告警发生后的告警级别的加权求和, 表征设备告警的严重程度, 其表达式如式(1)所示。

$$AR = \sum_{i=1}^k a_i X_i \quad (1)$$

式中:  $a_i$  为告警类型对应的数据等级;  $X_i$  表示某告警类型发生的频次;  $k$  为告警类型数目。因此,  $AR$  越大表示该设备的告警严重程度越大, 说明该设备发生告警引起的后果越严重。告警级别表征了告警事件的严重程度。

### 2) 故障影响度

在本文中, 故障影响度定义为设备发生故障后引起的设备事件的等级加权求和, 表征设备发生故障的严重程度。故障影响度融合了设备发生故障后的严重程度和设备故障发生的频次。其表达式如式(2)所示。

$$FR = \sum_{i=1}^k f_i N_i \quad (2)$$

式中:  $f_i$  为设备故障引起的事故类型的数据等级, 表示事故类型的严重程度, 数据等级值越高, 设备故障引起的后果越严重;  $N_i$  为某故障类型发生的频次;  $k$  为设备事故类型数目。因此,  $FR$  越大, 该设备的故障严重程度越大, 说明该设备发生故障引起的后果越严重。根据电力事故等级划分标准, 将设备事故(事件)分为 7 种等级。设备事故等级指设备发生故障造成的事故等级, 事故等级的不同反映了设备发生故障后引起的后果严重性不同。

### 3) 检修频次

设备检修次数包括计划检修次数和非计划检修次数, 检修频次是指设备在相同时间里的检修次数, 在一定程度上可以反映设备在这段时间里的设备隐患大小, 检修频次越高, 说明设备在这段时间里可能存在较大的隐患。电网设备中的计划检修主要以电网运行经验和相应类别设备的运行规律为依据, 在故障未发生时, 对设备进行检修, 以排除或削弱设备运行过程中的某些故障因素, 进而降低由设备造成的电网风险。非计划检修主要指设备故障检修, 指设备在发生失效或故障时进行的检修。

## 3 设备风险影响度计算模型

基于设备风险影响度指标体系, 本文建立设备风险影响度计算模型, 其表达式如式(3)。

$$RI_i = DI_i \times DH_i \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

式中:  $RI_i$  表示设备  $i$  的风险影响度;  $DI_i$  表示设备  $i$  的重要度;  $DH_i$  表示设备  $i$  的隐患。设备重要度和设备潜在隐患的计算方法相同, 在本文中, 以设备重要度的计算为重点来阐述其算法的主要步骤。

传统的设备重要度评价中专家评分具有较强的主观性, 不同的设备在同一设备重要度指标的值不相同, 并将该指标下的值作为客观评价因素代替主观评分, 能够克服主观评分带来的不确定性。

根据设备告警、故障和运行的信息对其进行处理。选取设备重要度指标集  $K = \{I_n\}, n=1,2,\dots,N1$ ,  $N1$  为设备重要度指标集的个数。本文中,  $N1=4$ ,  $I_1$  为供电区域属性,  $I_2$  为设备造价,  $I_3$  为电压等级,  $I_4$  为相关联的设备规模。将设备集  $D = \{d_i\} (i=1,2,\dots,N, N$  为设备数目,  $d_i$  表示设备标识)不能量化的设备重要度指标的值映射到其相对应的数据等级, 可量化的重要度指标本身为其对应的数据等级, 构成指标数据等级值序列  $s_i(I_n)$ , 表示设备  $d_i$

在指标  $I_n$  下的数据等级值。通过设备重要度指标数据等级值序列, 计算指标  $I_n$  下的设备相对重要度矩阵  $A^{(I_n)}$ , 其表达式如式(4)。

$$A^{(I_n)} = \begin{matrix} & d_1 & d_2 & \cdots & d_N \\ \begin{matrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11}^{(I_n)} & a_{12}^{(I_n)} & \cdots & a_{1N}^{(I_n)} \\ a_{21}^{(I_n)} & a_{22}^{(I_n)} & \cdots & a_{2N}^{(I_n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^{(I_n)} & a_{N2}^{(I_n)} & \cdots & a_{NN}^{(I_n)} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

式中:  $a_{ij}^{(I_n)}$  表示设备  $d_i$  在指标  $I_n$  下相对于设备  $d_j$  是否重要, 重要用 2 表示, 不重要用 0 表示, 与  $d_j$  同等重要, 用 1 表示。 $a_{ii}^{(I_n)}$  不具有实际意义, 应取对结果无影响的数值, 令  $a_{ii}^{(I_n)} = 0$ 。当  $i \neq j$  时

$$a_{ij}^{(I_n)} = \begin{cases} 2 & s_i(I_n) > s_j(I_n) \\ 1 & s_i(I_n) = s_j(I_n) \\ 0 & s_i(I_n) < s_j(I_n) \end{cases} \quad (5)$$

对同一指标  $I_n$  下的设备相对重要度矩阵的向量元素进行求和, 得到  $I_n$  下的设备  $d_i$  的相对重要度  $a_i^{I_n} = \sum_{j=1}^N a_{ij}^{(I_n)}$ , 该矩阵用来衡量在指标  $I_n$  下的设备相对重要度。设备重要程度本身主观性较大,  $a_i^{I_n}$  仅仅描述了一个指标  $I_n$  下的相对重要度, 为了合理科学地计算设备重要度, 需要综合全部重要度指标下的设备相对重要度。因此在考虑设备重要度各指标的相互重要程度时, 利用层次分析法<sup>[16]</sup>赋予各指标不同的权重。首先, 构造设备重要度指标的判断矩阵, 然后求出最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量  $W$ , 即得到权重向量  $(w_1, w_2, \dots, w_{N1})$ 。如式(6)所示, 对  $W$  作归一化处理, 并通过一致性检验, 得到设备重要度指标的合理相对权重。

$$w'_i = w_i / \sum_{i=1}^{N1} w_i \quad (6)$$

向量  $W' = [w'_1, w'_2, \dots, w'_{N1}]$  为设备重要度指标归一化后的相对权重。将设备  $i$  的重要度指标加权求和就可以得到这个设备的综合相对重要度  $a_i^{\text{sum}}$ , 如式(7)所示。

$$a_i^{\text{sum}} = \sum_{n=1}^{N1} w'_n \times a_i^{(I_n)} \quad (7)$$

为避免设备重要度计算的结果之间的差异过大或过小, 本文采用线性均值归一化法。

$$f(z) = \frac{Bz}{z} \quad (8)$$

式中:  $z$  为待归一化的变量;  $\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z(i)$ ;  $B$  为调节因子, 是一个常数, 用于根据实际需要来调节归一化后的数据范围, 在本文中, 取  $B = 1/\max(z)$ , 使得计算得到的设备重要度的取值范围为  $(0, 1]$ 。将  $a_i^{\text{sum}}$  代入上式中, 得到归一化重要度值:  $DI_i = f(a_i^{\text{sum}})$ 。同理, 按照上面的方法, 计算出设备  $i$  的设备潜在隐患  $DH_i$ , 则代入式(3)可得到设备  $i$  的风险影响度值。

综上所述, 对于定性的指标, 等级划分具有一定的主观性, 其定量的描述主要体现差异性。

## 4 实例分析

本文提出的设备风险影响度是识别出高风险设备的基础, 因此从设备的角度降低了电网风险的总体水平。运用本文提出的方法, 通过实例分析来验证该方法的合理性和有效性。在实例分析中, 选取山西晋城 220 kV 东沟变电站中的主要设备计算其设备风险影响度, 共 11 种设备, 即  $N=11$ 。根据电网运行和专家经验, 对不能量化的指标划分等级, 采用“影响极小、轻微、一般、严重、很严重”等语义项进行描述。对等级进行评分量化, 建立指标的数据等级, 分值范围为 1~10 分。表 1 至表 5 为本文中提到的不能量化的指标数据等级。

首先, 根据设备重要度指标对设备信息数据进行处理, 得到设备重要度指标数据等级值, 如表 6 所示。

表 1 电压等级分级标准

Table 1 Voltage grading standard

指标名称	分级	语义描述	数据等级
电压等级/kV	500 及以上	很严重	9
	220~500	严重	7
	110~220	一般	5
	10~110	轻微	3
	10 及以下	影响极小	1

表 2 设备造价分级标准

Table 2 Equipment cost classification standard

指标名称	分级	语义描述	数据等级
设备造价/ 万元	1000 及以上	很严重	9
	500~1000	严重	7
	100~500	一般	5
	10~100	轻微	3
	10 及以下	影响极小	1

表 3 供电区域划分表

Table 3 Power supply area division table

供电区域	A+	A	B	C	D	E
语义描述	很严重	严重		一般	轻微	影响极小
数据等级	9	7		5	3	1

表 4 电网设备告警级别

Table 4 Alarm level of grid equipment

序号	告警分类	严重程度	语义描述	数据等级
1	事故	紧急	很严重	9
2	异常	重要	严重	7
3	越限	次要	一般	5
4	变位	一般	轻微	3
5	告知	一般	影响极小	1

表 5 设备事故等级

Table 5 Equipment accident level

事故类型	特别重大、重大和较大事故	一般事故、一级事件	二级事件	三级事件	其他
语义描述	很严重	严重	一般	轻微	影响极小
数据等级	9	7	5	3	1

表 6 设备重要度指标数据等级值

Table 6 Data level value of equipment importance indicator

设备类型	设备名称	设备重要度影响因素信息或数据等级值			
		供电区域	设备造价	电压等级	相关联的设备规模
变压器	T1	A+/9	9	110 kV/3	7
变压器	T2	A/7	9	220 kV/5	9
输电线路	L1	A/7	3	110 kV/3	5
输电线路	L2	B/7	3	220 kV/5	5
母线	B1	C/5	7	110 kV/3	3
母线	B2	B/7	7	10 kV/1	3
断路器	CB1	A+/9	9	110 kV/3	5
断路器	CB2	A/7	9	220 kV/5	5
电压互感器	PT1	B/7	5	110 kV/3	7
电压互感器	PT2	C/5	5	10 kV/1	7
隔离开关	S1	E/1	1	110 V/3	3

然后根据层次分析法构造判断矩阵, 根据式(6)得到最大特征向量  $\lambda = 4.0728$ , 归一化后的权重向量  $W' = [0.1552, 0.4978, 0.2753, 0.0716]$ , 一致性指标  $CR = 0.0270 < 0.1$ , 满足一致性检验, 权重计算合理。将表 7 中的数据等级值序列代入到式(4)、式(5)和式(7)中, 得到设备的综合相对重要度矩阵  $A$ 。

$$A = [a_1^{sum}, a_2^{sum}, \dots, a_{11}^{sum}]^T = \begin{bmatrix} 15.5853, 16.2819, 6.8733, 8.5251, 9.1129, \\ 8.4274, 15.0841, 16.3202, 7.4386, 6.1970, 0.1432 \end{bmatrix}^T$$

将  $A$  中的各个分量分别代入式(8)中, 得到归一化后的设备重要度值。同理按照上面的方法, 计算出设备的潜在隐患, 再根据式(3)可得到设备风险影响度, 结果如表 7 所示, 根据表 7 的结果得到图 2。

图 2 的结果显示, 设备 G1 的风险影响度最高, 表明变压器发生故障对电网风险造成的影响最大, 所以在电网设备风险管控和设备维修中对变压器的关注度应最高, 说明该设备发生故障或失效对电网造成的影响最大, 这和实际情况相符, 验证了本文方法的正确性。相对于风险影响度高的设备, 隔离

表 7 设备风险影响度计算结果

Table 7 Calculation result of equipment risk influence

设备名称	设备重要度值	设备隐患值	设备风险影响度值
T1	0.9550	1.0000	0.9550
T2	0.9977	0.9288	0.9266
L1	0.4212	0.4653	0.1960
L2	0.5224	0.4653	0.2431
B1	0.5584	0.3644	0.2035
B2	0.5164	0.3644	0.1882
CB1	0.9243	0.5317	0.4915
CB2	1.0000	0.9478	0.9478
PT1	0.4558	0.8054	0.3671
PT2	0.3797	0.8054	0.3058
S1	0.0088	0.0862	0.0008

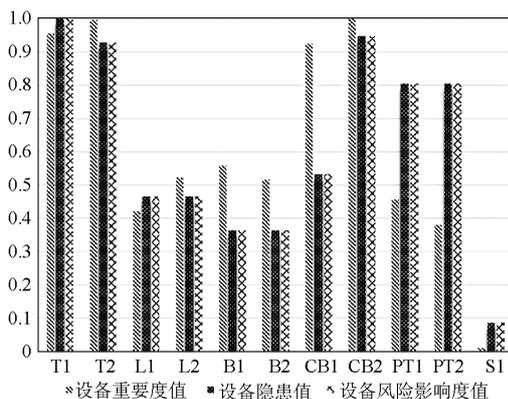


图 2 设备风险影响度计算结果柱状图

Fig. 2 Histogram of equipment risk influence

开关 S1 在设备管理中的紧迫性则较低。另外，从图 2 可以看到，设备 L1 的隐患和设备 L2 的隐患相等，但是设备风险影响度不相等，其和设备重要度有关，验证了本文提出的设备风险影响度计算模型，评估设备风险时不止要考虑设备故障概率及其损失的后果，更应该综合考虑设备的重要程度，以全面分析设备发生故障对电网造成的影响，为设备检修和评估电网风险提供参考依据。设备风险影响度的计算将为进一步挖掘高风险设备奠定一定的基础。

## 5 结论

本文在分析设备风险影响因素的基础上，同时考虑设备重要度和设备隐患，定义了设备风险影响度，提出电网设备风险度计算指标体系，建立设备风险影响度计算模型。用于对电网中的设备进行风险评估，找出电网中的高风险设备，实现从设备风险角度有效地降低电网出现重大事故的可能性。本文所提出的设备风险影响度计算指标体系中综合考

虑了设备重要度和设备隐患，克服了传统设备风险计算中只考虑故障率及其引起后果的缺陷，充分地发掘出深层次、隐性的风险因素，能够前瞻性地对电网设备科学管理和规划提供决策。在设备风险影响度的具体计算过程中，本文通过构建设备重要度指标集和设备潜在隐患指标集，并对不能量化的指标集进行相同的语义描述，采用一种相对客观的方法，使设备风险影响度的计算结果更加科学合理，为电网稳定、可靠、安全运行提供良好的数据支撑。论文的后续工作可以进一步研究高风险设备的挖掘方法，实现高风险设备的挖掘需要利用恰当的数据挖掘算法，将设备风险影响度作为数据挖掘的前提条件，以获取高风险设备，进一步提升设备风险预警能力，提高电网运行的可靠性。

## 参考文献

- [1] 孙强, 张义斌, 韩冬, 等. 多因素、多维度的智能电网风险评估[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 51-55.  
SUN Qiang, ZHANG Yibin, HAN Dong, et al. Multifactorial and multidimensional risk evaluation of smart grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 51-55.
- [2] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [3] ARQUERO A, ALVAREZ M, MARTINEZ E. Decision Management making by AHP (Analytical Hierarchy Process) through GIS data[J]. IEEE Latin America Transactions, 2009, 7(1): 101-106.
- [4] 宋杰, 谢海宁, 杨增辉, 等. 基于多源异构数据挖掘的配电网故障信息统计分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 141-147.

- SONG Jie, XIE Haining, YANG Zenghui, et al. Statistical analysis of the distribution fault based on multiple source and isomerism data mining technology[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 141-147.
- [5] VAIMAN M, BELL K, CHEN Y, et al. Risk assessment of cascading outages: methodologies and challenges[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 631-641.
- [6] 程晓荣, 张兰, 岳娇. 基于粗糙集属性约简的评估模型在电力通信网风险评估中的应用及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 44-48.
- CHENG Xiaorong, ZHANG Lan, YUE Jiao. Application and implementation of the assessment model based on rough set attribute reduction in power communication network risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 44-48.
- [7] The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms: IEEE standard 100—1992[S].
- [8] 输变电设备风险评估导则(试行)[S]. 北京: 国家电网公司, 2013.
- Risk assessment guidelines for power transmission and transformation equipment (trial implementation)[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2013.
- [9] 杨以涵, 艾琳, 姜彤, 等. 基于效益风险函数的电磁环网风险评估与控制[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 65-70.
- YANG Yihan, AI Lin, JIANG Tong, et al. Risk assessment and control of electromagnetically coupled power loop based on benefit risk function[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 65-70.
- [10] 王博, 游大海, 尹项根, 等. 基于多因素分析的复杂电力系统安全风险评估体系[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 40-45.
- WANG Bo, YOU Dahai, YIN Xianggen, et al. A security risk assessment system of complicated power grid based on multiple factor analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 40-45.
- [11] 王伟, 毛安家, 张粒子, 等. 市场条件下电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 68-73.
- WANG Wei, MAO Anjia, ZHANG Lizi, et al. Risk assessment of power system transient security under market condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 68-73.
- [12] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-42.
- HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.
- [13] 杨雯. 配电网故障停电风险评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- YANG Wen. Research on power cut risk of distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [14] 崔建磊, 文云峰, 郭创新, 等. 面向调度运行的电网安全风险管理系统(二)风险指标体系、评估方法与应用策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 92-97.
- CUI Jianlei, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Design of a security risk management system for power dispatching and operation part two risk index, assessment methodologies and application strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 92-97.
- [15] 周莉梅, 屈高强, 刘伟, 等. 配电网供电区域划分方法与实践应用[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 242-248.
- ZHOU Limei, QU Gaoqiang, LIU Wei, et al. Methods and practical application of power supply area division for distribution[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 242-248.
- [16] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150.
- YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150.

收稿日期: 2017-01-06; 修回日期: 2017-05-21

作者简介:

吴润泽(1975—), 女, 副教授, 研究方向为电力系统通信与信息技术; E-mail: 81627271@qq.com

陈文伟(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为数据挖掘及其在智能电网中的应用; E-mail: 572451718@qq.com

邹英杰(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力通信网可靠性. E-mail: 2298109129@qq.com

(编辑 魏小丽)