



引用格式:姜媛媛,张振振,薛生,等.改进组合赋权法的配电网隐患评估[J].科学技术与工程,2020,20(22):9030-9035

Jiang Yuanyuan, Zhang Zhenzhen, Xue Sheng, et al. Evaluation of distribution network hidden dangers by improved combination weighting method [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 9030-9035

改进组合赋权法的配电网隐患评估

姜媛媛, 张振振, 薛生, 郑晓亮, 张泓磊, 贾汉坤

(安徽理工大学电气与信息工程学院,淮南 232001)

摘要 针对配电网常见的安全隐患和传统组合赋权法中综合权重选取的组合系数依据不足的缺陷,提出统计偏差修正的层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)-反熵权法(anti-entropy weight method,AEWD)的组合赋权法综合评估模型。首先构建配电网隐患指标体系,分别使用层次分析法和反熵权法计算综合评估模型的主客观权重,然后根据统计偏差理论计算组合系数,进而计算出配电网隐患的风险值,最后以某地区配电网六个月的隐患记录进行实例分析。通过与传统组合赋权法对比证明了该模型合理有效且更具有泛用性。

关键词 配电网; 层次分析法; 反熵权法; 组合赋权法; 组合系数

中图法分类号 TM711; 文献标志码 A

Evaluation of Distribution Network Hidden Dangers by Improved Combination Weighting Method

JIANG Yuan-yuan, ZHANG Zhen-zhen, XUE Sheng, ZHENG Xiao-liang, ZHANG Hong-lei, JIA Han-kun

(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

[Abstract] A comprehensive evaluation model of the analytic hierarchy process (AHP) and anti-entropy weight method (AEWD) with correction of statistical deviation was put forward for the common security hidden dangers of distribution network and the defects of insufficient basis of combination coefficient selected in traditional combination weighting method. Firstly, the hidden dangers index system of distribution network was constructed, and the analytic hierarchy process and anti-entropy weight method were respectively used to calculate the subjective and objective weights of the comprehensive evaluation model. Then, the combination coefficient was calculated according to the theory of statistical deviation, and the risk value of hidden dangers of distribution network was calculated. Finally, the hidden dangers of distribution network in a certain region for six months were analyzed with an example. Compared with the traditional combination weighting method, this model is proved to be reasonable, effective and with wide application.

[Key words] distribution network; analytic hierarchy process; anti-entropy weight method; combination weighting method; combination coefficient

配电网风险评估一直是电气系统研究热点之一,梁朔等^[1]、孙顺祥等^[2]、Xiao等^[3]、林子钊等^[4]分别就配电网的设备、结构、安全措施以及系统运行等风险因素建立配电网风险评估模型。配电网隐患隐蔽性强且发生故障可能性比较高,一旦发生故障,会导致电路元件的损坏和电力系统的不稳定。建立配电网安全隐患综合评估模型旨在通过确定配电网存在的隐患,分析隐患产生的影响,进而计算出的综合权值,决策出影响配电网安全的主要隐患,可以为相关人员检测风险源,快速排查隐患提供帮助。

常见的评估方法有层次分析法^[5]、德尔菲

法^[6]、模糊分析法^[7]等主观权重计算方法和熵权法^[8]、主成分分析法^[9]、CRITIC 法^[10]等客观权重计算方法。主观权重风险评估方法较为简单,易于实施,但评估结果较为主观,精确性不够;客观权重风险评估结果更加科学、严密,但评估结果缺乏合理性。配电网范围广,需要考虑的安全因素众多,评估配电网安全难度较大,单一的评估方法不能准确评估配电网的安全隐患。为提高系统评价的科学性和准确性,近年来许多学者把主客观权重结合起来,提出主客观组合赋权的方法,杨家莉等^[11]提出了一种基于熵权法和变异系数法的组合赋权方法,并与 TOPSIS 模型结合综合评估节点电压暂降

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF0301000);国家自然科学基金青年基金(51604011);安徽省高校省级自然科学研究重大项目(KJ2019ZD12)

第一作者: 姜媛媛(1982—),女,汉族,安徽颍上人,博士,教授。研究方向:供电系统安全评估。E-mail:jyll672@163.com。

严重程度;曾鑫等^[12]结合了熵权法和层次分析法,综合考虑了电力系统结构和状态脆弱性,提出了一种输电线路脆弱度评估方法;唐佳等^[13]提出了一种改进层次分析法和变异系数组合赋权法,用以评估复合绝缘子老化状态。但上述文献对组合系数的选取比较主观,缺乏科学性,而且选值固定限制了模型的广泛应用能力。

基于以上分析,结合当前配电网的实际运行情况和典型的配电网隐患信息,提出改进层次分析法-反熵权法的组合赋权法。该方法克服了单一赋权方法的不足,兼顾了主观评价和客观理论的优点。通过统计偏差理论计算出的组合系数科学有效,可以根据实际的应用场景得到合适的评估结果,具有广泛适用性。

1 配电网隐患指标体系

在配电网运行中,设备侧、结构侧、系统侧和安全措施侧都容易产生隐患。设备侧常见的隐患主要是由于设备的老化,线路长时间暴露在空气中导致设备锈蚀、温度异常的情况;设备沾染污秽会导致绝缘能力降低,出现放电现象;结构侧常见的隐患主要是由于杆塔,输电线距生活区的安全距离不足、安装位置和空间结构存在缺陷,杆塔出现固定不牢固、倾斜、弧垂不满足运行要求的现象,这些现象一旦遇到严重天气问题就会发生配电网故障;系统侧常见的隐患主要涉及电气距离不能满足要求、三相不平衡,发生故障时电压会发生偏移;安全措施不到位是产生隐患最多的部分,常见于安全标识错误或无标识导致对存在危险辨认不清,或者是在配电室旁杂物堆积引发火灾。据此,从设备因素,结构因素,系统因素和安全措施因素选取典型指标构建配电网隐患层次化指标体系,如表1所示。

综合评价配电网隐患的风险值,选取评估指标的定量属性:隐患统计次数,设备平均投入年限,隐患分布范围。从隐患统计次数考虑,隐患发生次数表示该隐患发生概率,其值随着时间的变化而变化,其值越大,代表该指标发生的可能性也就越高,对配电网安全的影响也就越大;从设备投入年限考虑,工程实践结果证明了设备故障率并不是一成不变的,度过稳定运行期,设备的故障率随着设备投入时间的增大而增大;从隐患分布范围考虑,由于各地区气候、地势、发展情况不同,存在的隐患也不同,当某项隐患在多个地区都检测到,表示该隐患具有易发性,引发故障的可能性比较大。

表1 配电网隐患的层次化指标体系

Table 1 The hierarchical index system of hidden dangers in distribution network

目标层	准则层	指标层
配电网 隐患评估	设备因素(B ₁)	温度异常(C ₁)
		导线上有异物(C ₂)
		松动(C ₃)
		污秽(C ₄)
		锈蚀(C ₅)
	结构因素(B ₂)	固定不牢固(C ₆)
		弧垂不满足运行要(C ₇)
		倾斜(C ₈)
	系统因素(B ₃)	距树木距离不够(C ₉)
		电气距离不能满足要求(C ₁₀)
	安全措施因素(B ₄)	三相不平衡(C ₁₁)
		杂物堆积(C ₁₂)
		安装位置偏移(C ₁₃)
		无标识或缺少标识(C ₁₄)

2 改进组合赋权法综合评估模型

2.1 层次分析法-反熵权法的组合赋权法

建立配电网隐患综合评估模型可以有效辨识隐患的风险度,发现各个隐患发生所在位置,从而提高配电网隐患防范措施。本文提到的评估方法包括层次分析法、反熵权法和组合赋权法。组合赋权法将主观和客观权重结合起来,根据不同组合系数得到不同评估结果,可以广泛适用于配电网评估场景。根据组合赋权函数可以计算不同组合系数的组合赋权值,表示为

$$W = f(\omega, Z) \quad (1)$$

式(1)中:W为组合赋权值,由层次分析法计算出的主观权重集 ω 和反熵权法得到的客观权重集Z通过组合赋权函数计算得到。

$$Z = g(N, Y, F) \quad (2)$$

式(2)中:Z是客观权重集,由隐患统计次数N、设备平均投入年限Y和隐患分布范围F通过反熵权法计算得到。

对上述几种评估方法进行比较,比较结果如表2所示。

表2 评估方法比较结果

Table 2 Comparison of assessment methods

评估方法	层次分析法	反熵权法	组合赋权法
是否充分考虑风险因素	是	是	是
是否充分利用获得的数据	否	是	是
主观性影响	较大	无	较小
方法的复杂度	一般	一般	较复杂

由表2可知:层次分析法和反熵权法在评估配电网隐患都存在一定的缺陷,组合赋权法通过复杂的计算得到精确结果的同时减小了主观性,适合配

电网综合分析。

2.2 综合指标权重的计算

对配电网隐患进行综合评估,需要对配电网综合评估模型的多项指标进行分析,由于每项指标对配电网运行影响不同,在配电网安全运行指标体系中风险度也相应不同。使用综合指标计算方法,计算每个指标的风险度并进行排序。

2.2.1 主观权重的确定

层次分析将配电网运行的隐患分解为不同的层次结构,对各层次间的相互关系进行分析,从而计算主观权重,具体步骤如下:

(1) 构建判断矩阵

对配电网隐患的层次化指标体系中准则层和指标层采用九标度评估尺度^[14]分别构建判断矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3)$$

式(3)中: a_{ij} 表示为元素 a_i 和 a_j 两两比较得到的评估值,具备以下特征:

$$\begin{cases} a_{ij} = 1, & \text{当 } i = j \text{ 时} \\ a_{ij} = 1/a_{ji}, & \text{当 } i \neq j \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 计算权重子集

使用方根法计算每个判断矩阵的权重,设判断矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$,计算权重的具体步骤为

$$\bar{\omega}_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

将 $\bar{\omega}_i$ 归一化处理:

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i} \quad (6)$$

式(6)中: $0 \leq \omega_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, i = 1, 2, \dots, n$ 。

(3) 一致性检验

对构建的判断矩阵进行一致性检验,具体步骤为

$$CI = \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{A}) - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

式中:CI为一致性指标;CR为一致性比例; $\lambda_{\max}(\mathbf{A})$ 是矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值; n 为判断矩阵的行列数。当 $CR < 0.1$ 时,该判断矩阵满足一致性检验。

2.2.2 客观权重的确定

反熵权法基于熵权法,在处理指标权重上做出改进^[15]。使用反熵权法处理量化指标,对各评价对

象进行赋权,计算客观权重的具体步骤如下:

(1) 数据标准化

设有 m 个指标, n 个评估对象,可以得到评价矩阵 \mathbf{X} 的 $m \times n$ 矩阵:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (9)$$

指标均符合极小期望,即采用式(10)对式(9)进行标准化处理,得到标准化矩阵 \mathbf{Y} 。

$$y_{ij} = \frac{x_{imax} - x_{ij}}{x_{imax} - x_{imin}} \quad (10)$$

式(10)中:矩阵中 x_{ij} 表示第 i 个指标的第 j 个评估对象的数据; y_{ij} 为标准化矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$ 中第 i 行 j 列的元素; x_{imax} 为矩阵 \mathbf{X} 第 j 列数值最大的元素; x_{imin} 为矩阵 \mathbf{X} 第 j 列数值最小的元素; $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$ 。

(2) 求各评估对象反熵

熵是一种度量,用以评估事物的不确定性,熵值越大代表事物的不确定性越大。反熵的定义如下:

$$E_j = - \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(1 - p_{ij}) \quad (11)$$

式(11)中: $p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}$,如果 $p_{ij} = 1$,则定义 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 1} p_{ij} \ln(1 - p_{ij}) = 0$; $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 。

(3) 计算各评估对象权值

各评估对象权值可以采用式(12)计算:

$$\theta_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (12)$$

通过上述计算可得到各评估对象权值 $\theta_j = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 。

(4) 求指标评分

设各指标初值集合 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$,把求得的评估对象权重 ω_j 与各指标的初值相乘,便可以得到各指标的评分 Z_i :

$$\bar{Z}_i = \sum_{j=1}^n \theta_j x_{ij} \quad (13)$$

由式(14)将评分归一化:

$$Z_i = \frac{\bar{Z}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{Z}_i} \quad (14)$$

式(14)中: $0 \leq Z_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n Z_i = 1, i = 1, 2, \dots, m$ 。

归一化得到的权重就是所求指标的客观权重。

2.2.3 综合权重的确定

利用层次分析法计算出的主观权重集和反熵权法计算出的客观权重集分别为

$$\omega_B = \{\omega_{B_1}, \omega_{B_2}, \omega_{B_3}, \omega_{B_4}\} \quad (15)$$

$$\omega_C = \{\omega_{C_1}, \omega_{C_2}, \dots, \omega_{C_{14}}\} \quad (16)$$

$$Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{14}\} \quad (17)$$

式中: ω_B 为层次分析法计算出的准则层权重子集, ω_C 为层次分析法计算出的指标层权重子集, Z 为反熵权法计算出的客观权重集。为了准确计算配电网综合评估模型的权重, 综合考虑指标的主观性和数据计算结果的合理性, 根据求得的组合系数, 定义配电网指标综合权重满足:

$$\min[\mu_i(W_i - \omega_i)^2 + (1 - \mu_i)(W_i - Z_i)^2] \quad (18)$$

式(18)中: $\sum_{i=1}^n W_i = 1, W_i > 0, 1 \leq i \leq m; \mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$ 为组合系数集, 反映了主客观权重对评价结果的影响程度, 组合系数越大表示主观权重对系统的影响越大。

根据统计偏差理论, 求得组合系数值如下:

(1) 计算第 i 行各元素的偏差 μ_{ij} , 具体步骤如下:

$$\mu_{ij} = \sum_{t=1}^n |y_{ij}\omega_{B_\delta} - y_{it}\omega_{B_\delta}| \quad (19)$$

(2) 计算第 i 个指标的组合系数为 μ_i , 具体步骤如下:

$$\mu_i = \sum_{i=1}^n \mu_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n |y_{ij} - y_{it}| \omega_{B_\delta} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \delta = 1, & 1 \leq i \leq 5 \\ \delta = 2, & 6 \leq i \leq 9 \\ \delta = 3, & 10 \leq i \leq 11 \\ \delta = 4, & 12 \leq i \leq 14 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, y_{ij}$ 为反熵权法进行标准化处理得到的标准化矩阵 Y 各元素; ω_{B_δ} 为层次分析法计算得到的准则层各权重。

2.3 配电网隐患的综合评估模型

基于上文所述对各项评估指标进行组合赋权的方法, 建立配电网隐患综合评估模型, 该模型计算配电网隐患各指标的综合权重值具体流程如图 1 所示。

3 实例分析

3.1 样本数据

选取某地区隐患检查统计数据, 该数据包含了六个月份发现隐患的基本情况, 包括发现隐患所属电压等级, 发现日期, 发现单位, 缺陷内容等三十余

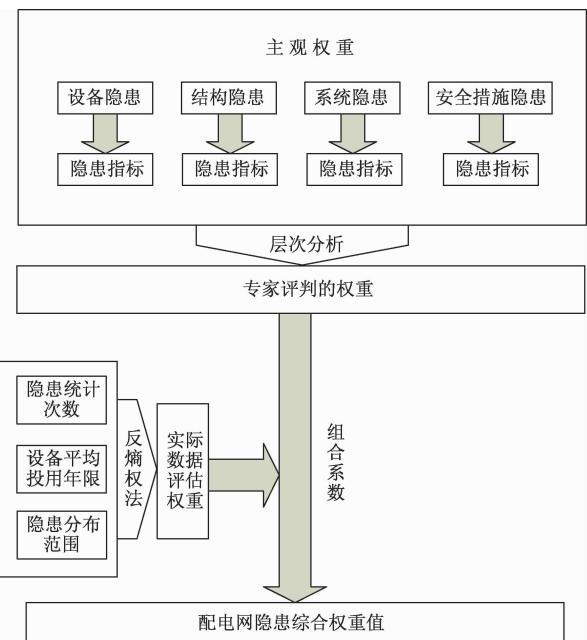


图 1 配电网综合评估模型流程图

Fig. 1 Flow chart of distribution network comprehensive evaluation model

项内容。选取 10 kV 配电网的隐患统计信息如表 3 所示, 该数据集具有代表性, 有利于验证模型的优劣。对选取的数据进行处理和计算, 定量分析设备使用年限、隐患发现次数和隐患分布范围, 根据抢修记录并对数据进行筛选统计和计算。运用上述方法分别对配电网隐患各项指标进行计算, 可以得到综合评估模型的分析结果。

表 3 10 kV 配电网隐患统计

Table 3 Statistic of hidden dangers of 10 kV distribution network

配电网隐患指标	统计次数	设备平均投用年限	隐患分布范围/市
温度异常	78	6.06	5
导线上有异物	837	7.59	8
松动	16	5.3	4
污秽	591	9.4	9
锈蚀	55	6.85	10
固定不牢固	43	4.58	5
弧垂不满足运行要求	123	5.99	1
倾斜	47	6.02	6
距树木距离不够	1 608	10.54	28
电气距离不能满足要求	7	9.71	1
三相不平衡	15	10.87	1
杂物堆积	70	7.39	5
安装位置偏移	185	11.03	13
无标识或缺少标识	157	8.08	6

3.2 计算结果与分析

按照建立的层次化指标体系, 根据式(3)~式(8)计算各层次化指标体系各准则层的主观权值如

表4所示,根据式(10)计算标准化矩阵如表5所示。为了更加直观地比较各指标的得分情况,计算得到配电网隐患层次化指标体系的主客观权重如表6所示。

表4 准则层判断矩阵
Table 4 Criterion layer judgment matrix

指标	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	权重
B ₁	1	2	5	3	0.48
B ₂	1/2	1	3	2	0.27
B ₃	1/5	1/3	1	1/2	0.09
B ₄	1/3	1/2	2	1	0.16
一致性检验	CI = 0.0048; CR = 0.0054 < 0.1, 满足一致性检验				

表5 标准化矩阵
Table 5 Standardized matrix

指标	隐患统计次数	设备平均投用年限	隐患分布范围/市
C ₁	0.956	0.771	0.851
C ₂	0.482	0.533	0.741
C ₃	0.994	0.888	0.889
C ₄	0.635	0.253	0.704
C ₅	0.970	0.648	0.667
C ₆	0.978	1	0.852
C ₇	0.928	0.781	1
C ₈	0.975	0.777	0.815
C ₉	0	0.076	0
C ₁₀	1	0.205	1
C ₁₁	0.995	0.025	1
C ₁₂	0.962	0.564	0.852
C ₁₃	0.889	0	0.556
C ₁₄	0.906	0.457	0.815

表6 配电网隐患层次化指标体系主客观权重
Table 6 Distribution network hidden dangers hierarchical index system subjective and objective weights

指标	主观权重	客观权重
C ₁	0.107 773	0.012 657
C ₂	0.185 237	0.121 223
C ₃	0.031 351	0.003 591
C ₄	0.101 747	0.087 347
C ₅	0.057 078	0.010 492
C ₆	0.022 475	0.007 471
C ₇	0.095 058	0.018 476
C ₈	0.042 947	0.008 386
C ₉	0.111 235	0.234 115
C ₁₀	0.029 405	0.002 507
C ₁₁	0.058 811	0.003 808
C ₁₂	0.089 643	0.011 707
C ₁₃	0.022 410	0.029 711
C ₁₄	0.044 821	0.024 317

表4计算结果表明,设备因素在准则层判断矩阵中计算的权重是最大的,表示专家经验认为该因素在配电网中起最重要作用。

对表6中主观权重和客观权重值从小到大排序,通过计算出来的指标结果得知,层次分析法和反熵权法得到的结果并不完全一致,这是由于评估方法本身的因素造成的。层次分析法计算的主观权重结果表明,最可能发生配电网隐患故障是由于导线上有异物,权重为0.185 237。而反熵权法计算的客观权重结果可知,距树木距离不足是配电网发生故障最主要的原因,权重为0.234 115。

根据求得的主客观权重,依据式(19)~(21)计算各组合系数 $\mu = \{0.358, 0.501, 0.205, 0.872, 0.622, 0.161, 0.238, 0.215, 0.083, 0.281, 0.344, 0.249, 0.558, 0.282\}$ 。

通过式(18)表示的综合评估函数即可求得综合权重值。对层次分析法、反熵权法、选取组合系数为0.5的组合赋权法和改进组合赋权法计算出的权值结果进行排序,对比结果如表7所示。

表7 评估方法结果排序
Table 7 Rankings of evaluation method results

配电网 隐患指标	主观权重 排序	客观权重 排序	传统组合 赋权排序	改进组合 赋权排序
温度异常	3	7	4	4
导线上有异物	1	2	2	2
松动	11	13	12	14
污秽	4	3	3	3
锈蚀	8	9	8	5
固定不牢固	13	11	14	13
弧垂不满足运行要求	5	6	5	6
倾斜	10	10	11	11
距树木距离不够	2	1	1	1
电气距离不能满足要求	12	14	13	10
接地电阻不合格	7	12	9	12
杂物堆积	6	8	6	7
安装位置偏移	14	4	10	9
无标识或缺少标识	9	5	7	8

根据计算出的结果可知:主观权重和客观权重共同决定了综合权重的评分高低,综合评估模型得到的结果在保证计算结果准确性的同时兼具了结果的合理性。改进组合赋权法和传统组合赋权法排序基本一致,证明了改进组合赋权法的有效性。主观经验认为系统因素的隐患风险值较高,但由于系统隐患发生次数较少,客观数据计算出的风险值较小;安装位置偏移发生次数较多,但主观经验认为造成的危害较小;根据计算的组合系数计算出综合权重,得到的排序介于主客观权重的排序之间,符合配电网的实际情况。另外,传统的组合赋权法确定组合系数需要经过大量实验结果和经验总结,才能得到合理的组合系数,而本文所提组合赋权法通过统计数据就可以直接计算出科学的组合系数,

评价模型简单便捷,根据不同的场景可以得到不同的评估结果,可广泛适用配电网评估。

4 结论

从影响配电网安全运行的隐患出发,构建了包含设备因素、结构因素、系统因素和安全措施因素的配电网隐患指标体系,建立改进组合赋权法综合评估模型。首先使用层次分析法构建配电网隐患层次化指标体系,计算出综合评估模型的主观权重;接着使用反熵权法根据数据所包含的信息计算综合评估模型的客观权重;最后依据组合赋权函数计算的综合权重。通过实例分析得到如下三个结论。

(1) 将客观权重和主观权重组合,建立了更加适合配电网的安全评估模型。

(2) 与单一评估方法相比,建立的综合评估模型更加具有准确性和有效性。

(3) 与传统组合赋权法相比,得到的组合系数更加合理,具有广泛适用性。

参 考 文 献

- 1 梁朔,秦丽文,李春华,等. 基于风险评估的配电设备状态检修决策方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1): 47-52.
Liang Shuo, Qin Liwen, Li Chunhua, et al. A decision method for maintenance of distribution equipment based on risk assessment [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(1): 47-52.
- 2 孙顺祥,李晓明,张繁碧,等. 基于网络结构重要度和安全隐患脆弱度的配电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 107-113.
Sun Shunxiang, Li Xiaoming, Zhang Fanbi, et al. Identification of distribution network vulnerable lines based on network structure importance and security vulnerability [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 107-113.
- 3 Xiao J, Zhang B, Luo F. Distribution network security situation awareness method based on security distance [J]. IEEE Access, 2019, 7: 37855-37864.
- 4 林子钊,潘凯岩,周名煜,等. 考虑实时和潜在因素的城市配电网风险评估模型和方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 48-55, 104.
Lin Zizhao, Pan Kaiyan, Zhou Mingyu, et al. Risk assessment model and method for urban distribution network considering real time and potential factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 48-55, 104.
- 5 李林汉,田卫民,岳一飞. 基于层次分析法的京津冀地区水资源承载能力评价[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 139-148.
Li Linhan, Tian Weimin, Yue Yifei. Evaluation of water resources carrying capacity in Jing-Jin-Ji region based on Analytic hierarchy process [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24): 139-148.
- 6 李滨,刘铸峰,黄柳军,等. 县级电网线损管理综合对标评价[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3871-3880.
Li Bin, Liu Zhufeng, Huang Liujun, et al. Comprehensive evaluation of grid line loss management at county level [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3871-3880.
- 7 李春敏,肖先勇,张逸,等. 工业用户电压暂降损失风险的模糊综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 50-56.
Li Chunmin, Xiao Xianyong, Zhang Yi, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of industrial user voltage sag loss risk [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 50-56.
- 8 黄大荣,陈长沙,孙国玺,等. 电力变压器故障的客观熵权识别及诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 206-211.
Huang Darong, Chen Changsha, Sun Guoxi, et al. Objective entropy weight identification and diagnosis of power transformer faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 206-211.
- 9 孙义豪,李秋燕,丁岩,等. 基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 30-36.
Sun Yihao, Li Qiuyan, Ding Yan, et al. A comprehensive evaluation method for county power grid based on principal component analysis and system clustering [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 30-36.
- 10 杨光盛,崔幼,宣玉华,等. 基于CRITIC和理想点法的计量设备运行质量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 62-69.
Yang Guangsheng, Cui You, Xuan Yuhua, et al. Evaluate the operation quality of measuring equipment based on CRITIC and ideal point method [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 62-69.
- 11 杨家莉,徐永海. 基于组合赋权与TOPSIS模型的节点电压暂降严重程度综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 88-95.
Yang Jiali, Xu Yonghai. A comprehensive evaluation method of node voltage sag severity based on combined weighting and TOPSIS model [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 88-95.
- 12 曾鑫,杨琦,任建文. 基于组合赋权法的输电线路脆弱性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 44-48.
Zeng Xin, Yang Qi, Ren Jianwen. Transmission line vulnerability assessment based on combination weighting method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 44-48.
- 13 唐佳,刘启胜,刘静雯,等. 基于模糊综合评价的复合绝缘子老化状态评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(5): 451-456.
Tang Jia, Liu Qisheng, Liu Jingwen, et al. Evaluation of aging condition of composite insulator based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(5): 451-456.
- 14 王毅,丁力,侯兴哲,等. 基于层次分析法的加权力线窃电检测方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 96-103.
Wang Yi, Ding Li, Hou Xingzhe, et al. Detection method of power line larceny based on analytic hierarchy process [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 96-103.
- 15 张海瑞,韩冬,刘玉娇,等. 基于反熵权法的智能电网评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 24-29.
Zhang Hairui, Han Dong, Liu Yujiao, et al. Evaluation of smart power grid based on anti-entropy weight method [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 24-29.