

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200953

基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究

姚忠胜¹, 钱虹², 吴文军¹, 余高富³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090;
3. 国网九江供电公司, 江西 九江 332000)

摘要: 利用区域配电网影响供电可靠性的因素, 对供电可靠性综合评价指标进行关联分析可为配电网供电可靠性提升优选提供依据。首先, 通过对各项供电可靠性指标进行相关性分析, 引入相关性影响系数, 对层次分析法和熵权法结合的组合赋权修正以确定供电可靠性综合评价指标。其次, 针对传统灰色关联分析的不足, 引入距离影响系数对供电可靠性影响因素进行关联分析, 计算出各影响因素对综合评价指标的关联度并排序。最后, 以实际数据进行验证, 结果表明该分析方法能有效地识别出供电可靠性薄弱地区以及对供电可靠性影响较大的因素, 对供电可靠性提升具有一定的参考价值。

关键词: 供电可靠性; 层次分析法; 熵权法; 综合评价; 改进灰色关联

Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation

YAO Zhongsheng¹, QIAN Hong², WU Wenjun¹, YU Gaofu³

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200090, China;
3. State Grid Jiujiang Electric Power Supply Company, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Correlation analysis between the comprehensive evaluation index of power supply reliability and influencing factors can provide effective evidence for power supply reliability promotion in a distribution network. First, the correlation influence coefficients are obtained through the correlation analysis of various power supply reliability indicators, and the comprehensive weight method combined with an analytic hierarchy process and improved entropy method are corrected by a correlation influence coefficient to determine comprehensive indicators. Second, a distance influence coefficient is introduced to overcome the shortcoming of traditional gray correlation analysis. Then the correlation degree of each influence factor is calculated to the comprehensive evaluation index and it is subsequently ranked. Finally, the actual data is used for verification, and the results show that the analysis method can effectively identify areas with weak power supply reliability and factors that have a greater impact on power supply reliability. This has a certain reference value for improving power supply reliability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of Shanghai (No. 19ZR1420700) and the Local Capacity Building Project of Shanghai Science and Technology Committee (No. 18020500900).

Key words: power supply reliability; analytic hierarchy process; entropy method; comprehensive evaluation; improved grey relation

0 引言

随着科技与经济的不断发展, 我国的电力能源

形式和电力网络面临着一定程度的转变, 新形式对供电公司供电可靠性提出了更高的要求^[1-2]。供电可靠性由多个指标共同表示^[3-4], 如何利用各项指标来构建综合指标体系, 以及基于该综合指标对区域配电网进行薄弱点分析, 查找出各影响因素对供电可靠性的影响程度成为了研究热点^[5-10], 通过影响因

基金项目: 上海市自然科学基金项目资助(19ZR1420700);
上海市科委地方能力建设项目资助(18020500900)

素对与供电可靠性综合指标的关联分析, 可为供电部门进行可靠性提升优选提供参考。

文献[5]采用主客观相结合的赋权方法来对供电可靠性各项指标赋权进行综合评价。文献[6]通过各类停电损失, 构建了电网大停电社会综合损失评估模型。文献[7]利用主成分分析法来对区域供电可靠性水平进行评估。以上研究针对电网停电对社会造成的损失构建了综合评价模型, 但对综合评价指标的影响因素并未做出关联分析。文献[8]利用改进熵权法和灰色关联分析法对配电网供电可靠性的影响因素做出分析。文献[9]利用综合灰关联度模型对单一供电可靠性指标的影响因素进行分析。文献[10]利用主客观综合赋权法结合灰色关联度模型来建立配电网可靠性提升对象优选模型。以上研究对供电可靠性的影响因素以及单一指标进行了关联性分析, 但并未考虑到多指标评价体系下的综合评估。

现有研究对供电可靠性综合评价和影响因素关联分析进行了深入的研究, 提出了切实可行的方法, 但其中也存在一些不足。首先, 供电可靠性综合评价常用主观赋权法和客观赋权法, 主观赋权法重视专家经验而忽视数据本身规律, 客观赋权法重视数据本身而忽略专家意见, 采用单一赋权方式难免考虑不周^[11-12]。另外, 供电可靠性指标之间存在一定的关联性, 传统的综合评价方法未考虑到指标之间相关性影响^[13], 倘若直接用赋权方法计算综合指标, 继而计算影响因素对综合指标的关联度容易与实际情况不符。其次, 传统灰色关联分析法在计算时仅考虑数列之间的几何相似程度, 未考虑数列之间的距离影响^[14], 忽略数列之间距离特征所造成的关联性差距, 可能导致影响因素与供电可靠性指标的关联度与实际不符。最后, 目前针对供电可靠性的影响分析多是一些单一指标, 未考虑到影响因素对综合指标的影响, 缺乏对供电可靠性综合指标提升的关联分析。

为弥补上述不足, 本文提出供电可靠性综合指标的构建, 并在此基础上进行影响因素的关联分析。首先利用层次分析法和熵权法对各供电可靠性指标赋权, 计算各指标之间的相关性影响系数对上述赋权进行修正得到最终赋权, 并依此计算出各区域的供电可靠性综合评价指标; 然后对传统灰色关联分析法引入距离影响系数, 构建改进灰色关联度分析模型, 对供电可靠性的综合评价指标进行关联度分析, 计算出各影响因素对综合评价指标的关联度; 最后以将关联度按大小排序, 得到对供电可靠性影响较大的因素。

1 综合评价指标的合成

供电可靠性单一指标往往不能反映出区域内供电可靠性的实际情况, 而多指标之间的意义和量纲不同, 很难统一起来共同体现供电可靠性状况。因此需要通过一定方式对各个指标进行赋权构建综合评价指标。本文利用层次分析法和熵权法组合赋权, 并引进相关性影响系数修正来计算供电可靠性综合评价指标, 借此来获得主客观赋权的优势并避免了不合理赋权对影响因素的关联性影响。

1.1 供电可靠性单一指标

配电系统的供电可靠性指标众多, 其中系统平均停电时间(SAIDI), 系统平均停电频率(SAIFI)和用户平均缺供电量(AENS)常常被用来计算综合停电损失^[3-4], 本文以这三个单一指标结合组合赋权方法计算供电可靠性综合评价指标。

1.2 层次分析法赋权

层次分析法是一种主观赋权法, 利用人的主观意识对各项因素两两进行重要度对比, 然后确定各项因素权重^[15-17]。可以利用专家经验来对供电可靠性指标进行重要度评价, 层次分析法对供电可靠性指标赋权的步骤如下。

1) 构造供电可靠性指标判断矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, a_{ij} 为比较尺度, 其值表示供电可靠性指标之间的相对重要性, 详见表 1。

表 1 比较尺度表

Table 1 Comparison scale

数值	含义
1	表示两个因素相比, 具有同样重要性
3	表示两个因素相比, 一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比, 一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比, 一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比, 一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值

2) 对判断矩阵进行一致性判别

当矩阵的一致性满足要求时, 才可以进行各评价指标的权重计算。一致性比例 CR 由式(2)、式(3)可得。

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中： λ 为 A 的最大特征值； n 为矩阵维度； RI 为平均随机一致性指标，取值见表2。当 $CR < 0.1$ 时，表示判断矩阵 A 的一致性满足要求，可进行层次分析法的权重计算，否则需要修改判断矩阵。

表2 平均随机一致性指标

Table 2 Index of average random consistency

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

3) 计算各指标的权重

$$w_{1j} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (4)$$

式中， w_{1j} 表示层次分析法在计算供电可靠性综合指标时单一指标 j 占有的权重。

1.3 熵权法赋权

熵权法属于客观赋权法，利用数据客观规律来进行赋权^[18-19]。本文利用供电可靠性各单一指标的数据计算各自的占有权重，其计算步骤如下。

1) 确定评价矩阵

$$B = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & x_{ij} & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： m 为评价指标数据的组数； n 为评价指标的个数； x_{ij} 表示第 i 个区域内第 j 个供电可靠性指标的值。

2) 数据规范化处理

由于每个评价指标的量纲不同，在进行计算之前需要将各个指标下的数据进行规范化处理。

(1) 对于正向指标

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (6)$$

(2) 对于负向指标

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (7)$$

当一个供电可靠性指标越大被认定为供电可靠性越高时，则认为该指标为正向指标，反之，则认为该指标为负向指标。

3) 计算指标的信息熵

信息熵是对不确定性的一种度量，信息熵越大其离散程度越大。因此，可以利用信息熵来衡量某单一指标对综合指标的权重。

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (8)$$

$$e_j = -K \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (9)$$

式中： $K = \frac{1}{\ln m}$ ； e_j 表示指标 j 的信息熵，当 y_{ij} 为0时，默认 $y_{ij} \ln y_{ij}$ 为0。

4) 计算各指标的权重

$$w_{2j} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \quad (10)$$

式中， w_{2j} 表示熵权法在计算供电可靠性综合指标时单一指标 j 占有的权重。

1.4 相关性影响系数

本文在综合权重的计算中引入相关性影响系数进行综合评价指标的计算。

$$\rho_{i,j} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)}\sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (11)$$

$$\eta_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\rho_{ij}| - 3}{\sum_{i=1}^m |\rho_{ij}| - 1} \quad (12)$$

式中： X 表示指标 i 的数列； Y 表示指标 j 的数列； ρ_{ij} 表示指标 i 和 j 的皮尔逊相关系数^[20-21]； η_j 表示指标 j 的相关性影响系数。

1.5 综合指标的确立

利用层次分析法、熵权法和相关性影响系数，结合归一化组合赋权法^[22-23]计算综合权重，并计算供电可靠性综合指标。

$$w_j = \frac{\sqrt{w_{1j} \cdot w_{2j} \cdot \eta_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{w_{1j} \cdot w_{2j} \cdot \eta_j}} \quad (13)$$

$$x''_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\max(x_j)} \quad (14)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x''_{ij} \quad (15)$$

式中： w_j 表示指标 j 的综合权重； x''_{ij} 表示第 i 组数据第 j 个指标归一化的值； y_i 表示第 i 个区域的供电可靠性综合指标，指标越大，代表供电可靠性越好。

2 改进灰色关联度分析

影响配电网供电可靠性的因素可以归纳为九类^[8]：1) 电缆化率；2) 绝缘化率；3) 联络水平；4) 配电变压器平均负载率；5) 平均分段数；6) 带电作业指数；7) 线路平均负载率；8) 配电自动化水平；9) 中

压电网平均故障修复时间。这些因素在不同程度上影响着配电网的供电可靠性, 分析出其对综合指标的关联度, 可以为配电网改进方向提供参考。

灰色关联分析是对影响因素和行为结果之间相似性的量化分析^[24-28]。利用比较数列与参考数列之间的相似程度来判断他们的关联水平, 可用来处理具有不确定元素间的关联关系。本文提出考虑距离因素影响的改进灰色关联度分析方法, 步骤如下。

1) 确定分析数列

本文中的参考数列为供电可靠性的综合指标数列, 用 X_0 表示, 比较数列为供电可靠性的各项影响因素数列, 用 $X_1 - X_n$ 表示。

$$C = \begin{bmatrix} x_0(1) & x_1(1) & \cdots & x_n(1) \\ x_0(2) & x_1(2) & \cdots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & x_i(j) & \vdots \\ x_0(m) & x_1(m) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (16)$$

矩阵 C 中 m 表示数据维度, n 表示影响因素的个数, $x_i(j)$ 表示第 i 个影响因素数列的第 j 个数。

2) 变量的无量纲化

由于参考数列以及各种比较数列的量纲不一, 采用该数除以自身数列平均值的方法消除量纲不同的影响。

$$x'_i(j) = \frac{x_i(j)}{\bar{x}_i} \quad (17)$$

3) 计算差值矩阵

利用式(21)和矩阵 C 计算供电可靠性影响因素和供电可靠性综合指标的差值。

$$\Delta(j) = |x'_0(j) - x'_i(j)| \quad (18)$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_1(1) & \Delta_2(1) & \cdots & \Delta_n(1) \\ \Delta_1(2) & \Delta_2(2) & \cdots & \Delta_n(2) \\ \vdots & \vdots & \Delta(j) & \vdots \\ \Delta_1(m) & \Delta_2(m) & \cdots & \Delta_n(m) \end{bmatrix} \quad (19)$$

选取矩阵中的最大值 Δ_{\max} 和最小值 Δ_{\min} 。

4) 计算关联系数

$$\xi_i(j) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta(j) + \rho \Delta_{\max}} \quad (20)$$

式中: $\xi_i(j)$ 为关联系数; ρ 为分辨系数, 取值范围为(0, 1), 通常取值 0.5。

5) 计算各项指标的距离影响系数

利用影响因素数列与供电可靠性综合指标数列的均方误差求取它们之间的距离影响系数。

$$\sigma_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m (x'_i(j) - x'_0(j))^2 \quad (21)$$

$$w_i = \frac{1}{e^{\sigma_i}} \quad (22)$$

式中: σ_i 为对比数列与参考数列之间的均方误差; w_i 为距离影响系数。

6) 计算关联度

利用距离影响系数结合关联系数的平均值求得影响因素与供电可靠性综合指标的关联度 r_i 。

$$r_i = \frac{1}{n} w_i \sum_{j=1}^m \xi_i(j) \quad (23)$$

3 实例分析

以某地区 8 个实际的供电区域为例进行分析。以平均停电频次(SAIFI)、系统平均停电时间(SAIDI)及平均缺供电量(AENS)等单一供电可靠性指标计算综合评价指标。以电缆化率(X1)、绝缘化率(X2)、联络水平(百分率)(X3), 配电变压器平均负载率(X4), 平均分段数(X5), 带电作业指数(百分率)(X6), 线路平均负载率(X7), 配电自动化水平(百分率)(X8)和中压电网平均故障修复时间(X9)作影响因素进行供电可靠性关联分析。

3.1 综合指标的确定

配电网供电可靠性单一指标数据如表 3 所示。

表 3 供电可靠性单一指标数据

区域	SAIFI	SAIDI	AENS
区域 1	0.89	10.01	3.52
区域 2	0.86	7.07	3.28
区域 3	1.03	8.92	3.09
区域 4	0.89	9.51	3.04
区域 5	1.06	9.39	3.39
区域 6	1.70	6.67	3.23
区域 7	1.10	9.49	3.28
区域 8	1.76	6.33	3.48

利用表 3 数据, 结合第 2 节原理分别计算各指标相应的权值及系数, 并计算出综合权重, 结果如表 4 所示。

表 4 供电可靠性指标权值及系数表

	SAIFI	SAIDI	AENS
层次分析法	0.54	0.16	0.30
熵权法	0.26	0.42	0.32
相关性影响系数	2.21	2.63	5.97
综合权重	0.29	0.17	0.54

利用综合权重可求得各区域的供电可靠性综合指标, 结合影响因素数据制作供电可靠性关联数据表如表 5 所示。由表 5 可知, 区域 8 的供电可靠性最好, 区域 2 的供电可靠性最差, 在 8 个区域内属于供电可靠性薄弱地区, 最需要及时整改。

表 5 供电可靠性关联数据

Table 5 Reliability associated data of power supply

区域	X1	X2	X3	X4	X5
区域 1	51.33	68.11	80.34	0.00	2.86
区域 2	56.51	70.17	82.05	7.92	3.96
区域 3	61.41	72.56	88.35	21.59	4.06
区域 4	64.82	76.25	95.00	53.91	4.15
区域 5	75.53	94.75	85.61	0.00	3.49
区域 6	78.31	95.00	88.67	27.03	4.53
区域 7	80.15	95.00	95.00	51.52	4.53
区域 8	85.08	95.00	95.00	65.50	4.53

区域	X6	X7	X8	X9	综合指标
区域 1	2.38	23.90	34.63	289.75	0.858
区域 2	21.99	26.05	34.55	280.25	0.764
区域 3	35.39	28.18	35.49	269.80	0.794
区域 4	38.60	31.97	34.73	265.05	0.774
区域 5	2.76	31.89	36.65	274.55	0.855
区域 6	27.89	33.67	36.55	264.10	0.89
区域 7	39.28	32.54	37.60	251.75	0.846
区域 8	53.64	34.07	37.50	240.35	0.932

3.2 关联性分析

为充分验证本文所提方法的有效性, 将单一指标与影响因素的关联分析和其他方法作对比。设置 A 组以系统平均停电频次作评价指标进行关联度分析, B 组以系统平均停电时间作评价指标进行关联度分析, C 组以平均缺供电量作评价指标进行关联度分析, D 组为未考虑相关性影响的综合指标结合改进传统灰色关联度进行分析, E 组为考虑相关性影响的综合指标结合传统灰色关联度进行分析, 各组结果如表 6 所示。

表 6 各组的关联性分析结果

Table 6 Association analysis results of each group

	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组	本文方法
X1	0.802	0.812	0.833	0.857	0.869	0.842
X2	0.785	0.825	0.848	0.877	0.891	0.867
X3	0.741	0.848	0.900	0.902	0.868	0.896
X4	0.484	0.540	0.514	0.497	0.249	0.248
X5	0.756	0.805	0.841	0.850	0.834	0.833
X6	0.569	0.656	0.595	0.594	0.415	0.413
X7	0.781	0.834	0.868	0.898	0.899	0.889
X8	0.736	0.838	0.942	0.935	0.901	0.933
X9	0.713	0.854	0.929	0.880	0.825	0.870

由表 6 可知, 本文所提方法下各影响因素排行为 X8>X3>X7>X9>X2>X1>X5>X6>X4, A 组排行为 X1>X2>X7>X5>X3>X8>X9>X6>X4, B 组排行为 X9>X3>X8>X7>X2>X5>X1>X6>X4, C 组排行为 X8>X9>X3>X7>X2>X5>X1>X6>X4。在这四种方法下, 配电变压器平均负载率和带电作业指数均为关联度最低的两个影响因素。A、B、C 组关联性最高的影响因素分别是电缆化率、中压电网故障平均修复时间和配电自动化水平, 且三组间各影响因素的关联度差别较大。可见, 供电可靠性单一指标与影响因素的关联度排序差别较大, 在采取供电可靠性提升措施时, 难有较全面的方案。而本文所提方法对各可靠性指标均有考虑, 可评价出各影响因素对供电可靠性的影响情况, 为配电网供电可靠性提升措施提供参考。

D 组排行 X8>X7>X2>X1>X3>X5>X9>X6>X4, 其中 X9 的排行靠后, 明显与实际不符。E 组排行为 X8>X3>X7>X9>X2>X1>X5>X6>X4, 其中 X1 和 X3 以及 X7 和 X8 的值过于接近, 在进行供电可靠性提升优选时难以抉择。综上所述, 本文方法可以有效计算出各影响因素的关联度, 更适合为配电网供电可靠性提升优选提供参考。

4 结论

面对现有配电网供电可靠性研究的不足, 本文提出了一种基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究, 主要工作和结论有:

1) 提出了一种考虑相关性的主客观综合评价指标, 用于计算供电可靠性综合指标, 可利用该指标对各区域的供电可靠性水平进行综合评价, 分析出急需改进的供电区域;

2) 提出了一种考虑距离影响的改进灰色关联分析方法, 利用该方法可以得出影响因素对供电可靠性综合评价指标的关联程度, 为配电网供电可靠性提升优选时提供参考;

3) 与传统的方法对比, 本文提出的分析方法考虑了供电可靠性指标之间的相似性, 集聚了主观赋权法和客观赋权法的优点, 在进行关联分析时弥补了传统灰色关联分析法的不足。计算结果表明, 该方法可以帮助电网相关部门掌握各区域的供电可靠性水平, 更适合为供电可靠性提升优选提供有效依据。

参考文献

- [1] 刘满君, 程林, 黄道姗, 等. 基于运行可靠性理论的高可靠性供电路径搜索方法[J]. 电工技术学报, 2019,

- 34(14): 3004-3011.
- LIU Manjun, CHENG Lin, HUANG Daoshan, et al. The high reliability supply path searching method based on the operational reliability theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3004-3011.
- [2] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [3] 供电系统供电可靠性评价规程: DLT 836.1—2016[S].
- [4] WANG Cheng, ZHANG Tianyu, LUO Fengzhao, et al. Fault incidence matrix based reliability evaluation method for complex distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6736-6745.
- [5] 林锐涛, 林哲昊, 周勤兴, 等. 电力用户停电影响指标体系及综合评估方法[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2350-2360.
- LIN Ruitao, LIN Zhehao, ZHOU Qinxing, et al. Impact index system for the power outage of power users and its comprehensive assessment method[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2350-2360.
- [6] 刘自发, 张在宝, 杨滨, 等. 电网大停电社会综合损失评估[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2928-2940.
- LIU Zifa, ZHANG Zaibao, YANG Bin, et al. Evaluation of great blackout social comprehensive loss of power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2928-2940.
- [7] 肖白, 刘亚伟, 施永刚, 等. 基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 7-12.
- XIAO Bai, LIU Yawei, SHI Yonggang, et al. Power supply reliability assessment of mid-voltage distribution network based on principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 7-12.
- [8] 南钰, 宋瑞卿, 陈鹏, 等. 基于改进熵权-灰色关联法的配电网可靠性影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 101-107.
- NAN Yu, SONG Ruiqing, CHEN Peng, et al. Study on the factors influencing the reliability analysis in distribution network based on improved entropy weight gray correlation analysis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 101-107.
- [9] 安佳坤, 贺春光, 韩璟琳, 等. 基于配网特征指标的网格式可靠性评估方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 1-8.
- AN Jiakun, HE Chunguang, HAN Jinglin, et al. Grid reliability evaluation method based on distribution network characteristic indexes[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 1-8.
- [10] 莫一夫, 张勇军. 基于变权灰关联的智能配电网用电可靠性提升对象优选[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 26-34.
- MO Yifu, ZHANG Yongjun. Optimal object selection of power utilization reliability promotion for smart distribution grid based on weighted grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 26-34.
- [11] FENG Fei, HU Xiaosong, LIU Kailong, et al. A practical and comprehensive evaluation method for series-connected battery pack models[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(2): 391-416.
- [12] WANG Pengjia, WANG Hongjun, CHEN Xiumei. Research on reliability comprehensive evaluation method of five-axis CNC machine tools based on AHP and extension theory[J]. The Journal of Engineering, 2019(23): 8599-8603.
- [13] HAN Wenhua, LU X S, ZHOU Mengchu, et al. An evaluation and optimization methodology for efficient power plant programs[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(2): 707-716.
- [14] 吴云, 雷建文, 鲍丽山, 等. 基于改进灰色关联分析与蝙蝠优化神经网络的短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 67-74.
- WU Yun, LEI Jianwen, BAO Lishan, et al. Short-term load forecasting based on improved grey relational analysis and neural network optimized by bat algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 67-74.
- [15] HUANG E, ZHANG S, LEE L H, et al. Improving analytic hierarchy process expert allocation using optimal computing budget allocation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(8): 1140-1147.
- [16] TIAN Guangdong, ZHANG Honghao, ZHOU Mengchu, et al. AHP, gray correlation, and TOPSIS combined approach to green performance evaluation of design alternatives[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(7): 1093-1105.
- [17] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.
- ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on

- improved extension analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 31-38.
- [18] 汪群峰, 金佳佳, 米传民, 等. 基于灰关联深度系数的评价指标客观权重极大熵配置模型[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 235-240.
- WANG Qunfeng, JIN Jiajia, MI Chuanmin, et al. Maximum entropy configuration model of objective index weight based on grey correlation deep coefficient[J]. Control and Decision, 2013, 28(2): 235-240.
- [19] LIU Huchen, WANG Li'en, LI Zhiwu, et al. Improving risk evaluation in FMEA with cloud model and hierarchical TOPSIS method[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(1): 84-95.
- [20] DITZLER G, POLIKAR R, ROSEN G. A bootstrap based Neyman-Pearson test for identifying variable importance[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(4): 880-886.
- [21] 郭辉, 杨国清, 姚李孝, 等. 基于综合相似日和功率相关性的光伏电站预测功率修正[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(9): 52-58.
- GUO Hui, YANG Guoqing, YAO Lixiao, et al. Correction of predictive power of PV plants based on integrated similar days and power correlations[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(9): 52-58.
- [22] 邹阳, 何倩玲, 蔡金锭. 基于组合赋权-双基点法的变压器油纸绝缘状态综合评估[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4400-4408.
- ZOU Yang, HE Qianling, CAI Jinding. Comprehensive evaluation of transformer oil-paper state based on combined weight-double base point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4400-4408.
- [23] 赵金锋, 董沫如, 胡西民, 等. 基于组合权重的电力客户满意度模糊综合评价[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 48-52.
- ZHAO Jinfeng, DONG Moru, HU Ximin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power customer satisfaction based on combination weight[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 48-52.
- [24] XU Lipin, MA Haoyi, REN Dezhi. Reliability analysis of tractor multi-way valves based on the improved weighted grey relational method[J]. The Journal of Engineering, 2019(13): 86-92.
- [25] HAN Min, ZHANG Ruiquan, QIU Tie, et al. Multivariate chaotic time series prediction based on improved grey relational analysis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(10): 2144-2154.
- [26] 周依希, 李晓明, 瞿合祚, 等. 基于 AHP-灰色关联度的复杂电网节点综合脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 86-93.
- ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo, et al. Node integrated vulnerability assessment of complex power grid based on AHP-gray relational degree method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 86-93.
- [27] 刘军, 张彬彬, 赵婷. 基于模糊评价的风电场有功功率分配算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 786-794.
- LIU Jun, ZHANG Binbin, ZHAO Ting. Research on wind farm active power dispatching algorithm based on fuzzy evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 786-794.
- [28] 张秋雁, 宋强, 张俊玮, 等. 基于扩展面板大数据的电力经济特征提取新方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2): 64-70, 78.
- ZHANG Qiuyan, SONG Qiang, ZHANG Junwei, et al. A novel feature extraction method in power economic assessment research based on extraction panel data[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2): 64-70, 78.

收稿日期: 2020-10-07; 修回日期: 2021-02-13

作者简介:

姚忠胜(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网供电可靠性和智能电网; E-mail: 1301646239@qq.com

钱虹(1967—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统智能控制和故障诊断; E-mail: qianhong.sh@163.com

吴文军(1968—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。 E-mail: Wwj680421@126.com

(编辑 姜新丽)