

DOI: 10.7667/PSPC161021

基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式 变权重评估方法

周名煜, 谢宁, 王承民

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 为了对配电网运行方式进行准确的评估, 提出了一种考虑指标灵敏度的配电网运行方式变权重评估方法。利用主成分分析法对配电网指标进行初步分析, 根据分析结果利用最小二乘法计算灵敏度权重, 同时利用灰色关联分析法对指标数据序列和评估量化值序列进行分析从而得到灰色关联度权重。灵敏度权重反映了指标对评估结果的影响程度, 灰色关联度权重反映了指标数据序列与评估结果序列之间的关联程度, 最后利用变权重公式实现指标的综合赋权。利用该方法对一个城市配电网进行评估, 计算结果证明了该方法的有效性与可行性。

关键词: 配电网; 运行方式; 指标灵敏度; 主成分分析法; 灰色关联度; 变权重

Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation

ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to make accurate evaluation of the operation mode of the distribution network, this paper proposes a variable weight evaluation method of the distribution network operation mode considering the index sensitivity. The evaluation indexes are analyzed using principal component analysis method, and the sensitivity weights are calculated using least square method according to the above results. Besides, the index data sequences and evaluation value sequences are analyzed using grey correlation analysis method in order to figure out the grey correlation weights. The sensitivity weights reflect the influence that the indexes and their values have on the evaluation results, while the grey correlation weights reflect the correlation degree between index data sequences and evaluation results. The comprehensive weights are figured out according to the variable weight formula. An urban distribution network is analyzed using this method, and the result proves the effectiveness and feasibility of this method.

Key words: distribution network; operation mode; index sensitivity; principal component analysis method; grey correlation; variable weight

0 引言

电力系统主要由发电、输电、变电和配电四个部分组成, 其中配电系统是直接与用户连接的系统, 是向用户分配和供给电能的关键环节, 有数据统计表明电力系统中绝大部分停电事故是由配电网的故障所引起的, 因此保障配电网的安全可靠运行对于社会的生产和建设有着重要的意义。随着社会经济的不断发展和人民生活水平的不断提高, 对配电网的可靠性、安全性和经济性等方面提出了更高的要求, 因此有必要对配电网的运行方式进行全面评估。

配电网运行方式评估的重点在于两个方面: 1) 选取合适的运行方式指标来构建运行方式评估指标体系; 2) 利用合理的方法对选取的运行方式指标进行分析。配电网运行方式评估指标体系方面的研究正在逐步趋于完善, 建立的指标体系通常包括可靠性^[1]、安全性^[2]、经济性^[3]和电能质量^[4-5]等方面的指标, 随着智能配电网研究的不断成熟以及新能源的使用, 逐渐出现了一些新类型的评估指标, 例如清洁性指标^[6]、互动性指标^[7]、优质性指标^[8]以及协调适应性指标^[9]等。另一方面, 配电网运行方式指标的分析方法则是专家学者重点研究的内容, 其中

又可分为加权分析和非加权分析两类。加权分析常用的方法有层次分析法、德尔菲法和熵权法等, 文献[10]利用层次分析法对含分布式电源的配电网进行评估, 该方法简单易行, 但缺点是指标权重设置主观性太强; 文献[11]利用德尔菲法对判断矩阵进行修正, 该方法实际上与层次分析法原理相似, 仍然没有摆脱主观性强的缺点; 文献[12]利用熵权法对配电网规划方案进行评估, 该方法从数据本身的离散程度出发进行分析因此较为客观, 但是有可能并不符合指标本身的重要程度; 文献[13-14]综合利用多种方法进行综合赋权, 使得评估结果更为科学。非加权分析常用的方法主要有数据包络分析法^[15]、模糊综合评价法^[16-17]、TOPSIS 法^[18]和主成分分析法^[19]等, 以上方法的主要优点在于可以直接对指标数据进行分析, 而不需要计算具体的指标得分, 但是相比于加权分析法来说, 建模和计算非常复杂, 并且往往只能实现定性评估, 无法对评估结果进行进一步分析。

本文在上述配电网评估方法的基础上, 提出了一种考虑指标灵敏度的配电网运行方式量化评估方法。该方法考虑了每个指标对配电网运行方式水平的影响程度不同, 利用主成分分析法对配电网运行方式进行分析得到初步的评估量化值, 并对得到的评估量化值进行进一步分析得到指标的灵敏度权重, 同时利用灰色关联分析法对指标数据序列和由主成分分析法得到的评估量化值序列进行分析, 计算得到指标的灰色关联分析权重, 并且利用变权重公式计算指标的综合权重, 使得评价结果更加合理。最后利用提出的评估方法对一个城市配电网进行了具体分析, 计算结果表明该方法能够有效地对配电网运行方式进行量化评估, 并与其他评估方法进行了对比, 从评估结果可以直观地看出配电网运行方式的优劣, 为运行调度和优化提供参考和依据。

1 基于灵敏度和灰色关联度权重的确定

1.1 灵敏度权重的确定

将配电网的运行方式水平视作因变量, 各个评估指标视作自变量, 则可以将配电网的运行方式水平写成一个函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 y 为配电网运行方式水平, x_1, x_2, \dots, x_n 为各个指标的值, n 为评估指标的数目。当其中一个指标发生变化时, 例如当 x_1 增加了 Δx_1 时, 则可得 $y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2, \dots, x_n)$, 由于对电力系统而言, 在正常运行状态下其运行点不会发生很大变化, 因此 Δx_1 一般较小, 由此可以得到

$$k_1 = \frac{\Delta y}{\Delta x_1} = \frac{f(x_1 + \Delta x_1, x_2, \dots, x_n) - y}{\Delta x_1} \quad (1)$$

式中, k_1 表示当指标 x_1 变化 Δx_1 时对整体运行水平的影响程度。类似的, 对于其他指标也可以得到其对整体运行水平的影响程度的数值, 另外由于上文中提到电力系统正常运行状态下的运行点不会发生很大变化, 因此可以将配电网运行方式水平 y 视为在一定范围内的一个关于评估指标的多元线性函数, 即

$$y \approx k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n \quad (2)$$

将式(2)中的 $k_i (i=1, 2, \dots, n)$ 定义为第 i 个指标的灵敏度, 并且由上述分析可知, k_i 反映出了当指标 x_i 变化时对整体运行水平的影响程度, 因此其在一定程度上具有权重的意义, 本文将其称为灵敏度权重。配电网运行方式水平 y 的取值则采用主成分分析法来计算, 主成分分析法虽然能够很好地进行评估, 但是以往的研究并没有对最终产生的评估值进行进一步的处理, 本文提出的权重确定方法充分利用了主成分分析法所得到的量化评估结果, 并在此基础上实现了改进, 求解灵敏度权重的过程如下所述。

1) 利用主成分分析法求出配电网运行方式水平的量化值。设共有 n 个评估指标, 对待评估的配电网进行 m 次数据采样并计算相应的指标值, 得到原始指标数据矩阵 $\mathbf{D} = (d_{ij})_{m \times n}$ 。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

分别计算出矩阵 \mathbf{D} 中每一列元素的平均值和方差, 利用式(4)将原始数据化为标准正态分布的数据。

$$z_{ij} = \frac{d_{ij} - E(d_i)}{\sqrt{\text{Var}(d_i)}} \quad (4)$$

式中: $E(d_i)$ 为矩阵 \mathbf{D} 中第 i 列元素的平均值; $\text{Var}(d_i)$ 为矩阵 \mathbf{D} 中第 i 列元素的方差。由此可以得到标准正态分布的数据矩阵 $\mathbf{Z} = (z_{ij})_{m \times n}$, 利用式(5)计算矩阵 \mathbf{Z} 中每一列与其他列之间的相关系数。

$$\sigma_{ij} = \frac{\text{cov}(z_i, z_j)}{\sqrt{\text{Var}(z_i)\text{Var}(z_j)}} \quad (5)$$

式中: σ_{ij} 为相关系数; $\text{cov}(z_i, z_j)$ 为矩阵 \mathbf{Z} 中第 i 列元素和第 j 列元素的协方差。由此可以计算得到相关系数矩阵 $\mathbf{\Sigma} = (\sigma_{ij})_{n \times n}$, 设 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ 是矩

阵 Σ 的 n 个特征根, 对应的特征向量分别为 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$, 则可以利用式(6)和式(7)计算第 i 主成分的方差贡献率以及累计贡献率。

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (6)$$

$$\rho_i = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (7)$$

当 $\rho \geq 85\%$ 时, 保留前 s 个主成分, 并利用式(8)计算配电网运行方式水平的量化值。

$$y_i = \omega_1 z'_i \eta_1 + \omega_2 z'_i \eta_2 + \dots + \omega_s z'_i \eta_s \quad (8)$$

式中: y_i 为第 i 次数据采样的评估量化值; z'_i 为矩阵 Z 中第 i 个行向量, 即 $z'_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{in})$ 。

2) 根据上述计算得到的配电网运行方式水平的量化值, 利用最小二乘法计算各个指标的灵敏度权重。首先将原始数据矩阵 D 中的数据进行标准化处理, 若某个指标为正向指标, 即该指标越大越优, 则利用式(9)进行标准化。

$$g_{ij} = \frac{d_{ij} - \min_i(d_{ij})}{\max_i(d_{ij}) - \min_i(d_{ij})} \quad (9)$$

若某个指标为负向指标, 即该指标越小越优, 则利用式(10)进行标准化。

$$g_{ij} = \frac{\max_i(d_{ij}) - d_{ij}}{\max_i(d_{ij}) - \min_i(d_{ij})} \quad (10)$$

由此可以得到标准化数据矩阵 $G = (g_{ij})_{m \times n}$, 根据标准化数据矩阵 G 可以构造一个如式(11)的矩阵。

$$H = \begin{bmatrix} 1 & g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ 1 & g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & g_{m1} & g_{m2} & \dots & g_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

同样对主成分分析得到的评估量化值进行与式(9)相似的数据标准化处理, 设 y_i 经过标准化处理后的数值为 y'_i , 令 $Y = (y'_1, y'_2, \dots, y'_m)^T$, 则利用下式计算各个指标的灵敏度。

$$k = (H^T H)^{-1} H^T Y = (k_0, k_1, k_2, \dots, k_n)^T \quad (12)$$

式中: $k_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个指标的灵敏度; k_0 为常数。由此可知灵敏度权重的计算公式为

$$\alpha_i = \frac{|k_i|}{\sum_{j=1}^n |k_j|} \quad (13)$$

式中, α_i 为第 i 个指标的灵敏度权重。

1.2 灰色关联度权重的确定

对电力系统而言, 仍无法建立起非常精确的数学模型, 系统内部因素难以辨识或因素之间关系隐蔽, 因此可以利用灰色系统理论对其进行分析。灰色系统理论提出了一种新的分析方法—灰色关联度分析方法, 即根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间关联的程度, 它揭示了事物动态关联的特征与程度。

灰色关联分析法在电力系统中已经有了一些应用, 如文献[20]利用灰色关联分析法对输电网规划方案进行评估, 虽然其能够得出符合要求的结果, 但是只能体现出各方案之间的优劣而并不能给出合理的定量结果, 主要原因在于其以每个规划方案的指标值为数据序列进行比较, 导致只能得到各个方案之间的关联度。本文在对灰色关联分析法进行了研究的基础上, 以每个指标在不同采样序号下的指标值为数据序列进行灰色关联分析, 从而得出每个指标与评估结果的相似程度, 将其作为指标的灰色关联度权重, 具体计算过程如下所述。

1) 选取参考数列为 1.1 节中得到的标准化后的评估量化值 $(y'_1, y'_2, \dots, y'_m)$; 选取 n 个指标的数值作为比较数列, 其中第 i 个比较数列为 $(g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im})$ 。

2) 利用式(14)计算第 i 个比较数列和参考数列在第 j 次采样处的关联系数。

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|y'_j - g_{ij}| + \rho \Delta_{\max}} \quad (14)$$

式中: ξ_{ij} 为关联系数; Δ_{\min} 为两级最小差, $\Delta_{\min} = \min_j \min_i |y'_i - g_{ij}|$; Δ_{\max} 为两级最大差, $\Delta_{\max} = \max_j \max_i |y'_i - g_{ij}|$; ρ 为分辨系数, 通常取为 0.5。

3) 关联系数是描述比较数列与参考数列在某次采样时关联程度的一种指标, 由于每次采样都会产生一个关联系数, 因此信息显得过于分散, 不便于比较, 于是需要利用式(15)计算每个比较数列和参考数列之间的关联度。

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \quad (15)$$

式中, r_i 为第 i 个比较数列和参考数列之间的关联度。

4) 实际上 r_i 也表示第 i 个指标的数据和评估结果之间的关联度, 因此利用式(16)计算第 i 个指标的灰色关联度权重。

$$\beta_i = \frac{r_i}{\sum_{j=1}^n r_j} \quad (16)$$

式中, β_i 为第 i 个指标的灰色关联度权重。

2 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法

2.1 配电网运行方式评估指标体系

为了对配电网的运行方式进行量化评估, 本文构建了图 1 所示的配电网运行方式评估指标体系,

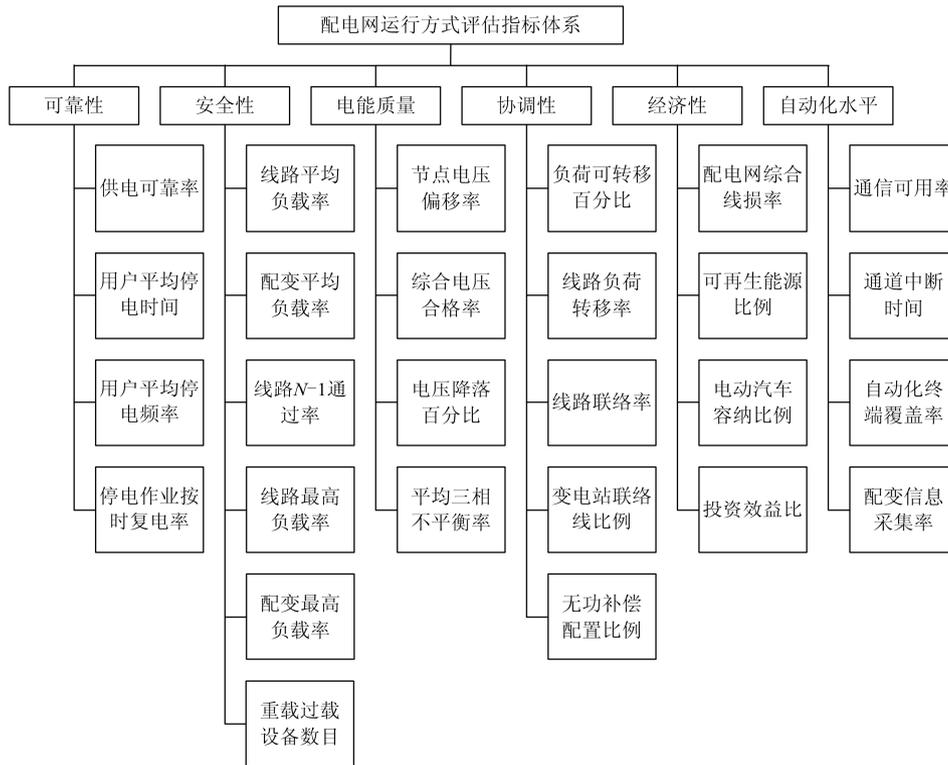


图 1 配电网运行方式评估指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of distribution network operation mode

3) 线路 $N-1$ 通过率

该指标反映整个配电网中所有线路对 $N-1$ 准则的满足程度, 以满足 $N-1$ 准则的线路占有线路总数的比例来计算。

4) 线路最高负载率

该指标反映整个配电网中线路负载率的最高水平, 可以间接反映出线路发生故障的可能性, 以所有线路负载率的最大值来计算。

5) 配变最高负载率

该指标反映整个配电网中配变负载率的最高水平, 可以间接反映出配变发生故障的可能性, 以所有配变负载率的最大值来计算。

6) 重载过载设备数目

涵盖了与配电网运行方式密切相关的可靠性、安全性、电能质量、协调性、经济性和自动化水平等多个方面。下面以安全性下的 6 个指标为例进行简单的介绍。

1) 线路平均负载率

该指标反映整个配电网中所有线路的负载率的平均水平, 以所有线路负载率的平均值来计算。

2) 配变平均负载率

该指标反映整个配电网中所有配变的负载率的平均水平, 以所有配变负载率的平均值来计算。

该指标反映整个配电网中线路和配变发生重载或过载的情况, 以所有处于重载和过载状态的线路和配变占有线路和配变的比例来计算。本文中以负载率超过 80% 的线路或变压器为重载过载设备。

2.2 配电网运行方式变权重评估方法

通过上文中所述的方法可以计算出每个指标的灵敏度权重和灰色关联度权重, 则可以利用式(17)计算出每个指标的综合权重。

$$\gamma_i = \theta_1 \alpha_i + \theta_2 \beta_i \quad (17)$$

式中: γ_i 为第 i 个指标的综合权重; θ_1 和 θ_2 分别为灵敏度权重和灰色关联度权重所对应的权重, 且满足 $\theta_1 + \theta_2 = 1$ 。

由于确定的综合权重值并不会随着指标值的变化而改变, 因此将其称为常权重, 而常权重的缺点在于当某个指标值出现异常时往往对评估结果的影响并不是很大, 而变权重使得指标权重可以随着指标值的变化而变化, 当某个指标值相对于其他指标值而言明显偏小时, 其变权重则会较之前明显增大, 这使得最终的评估值也会较之前变小, 更加符合实际情况, 因此本文利用文献[21]提出的均衡系数变权重公式来计算每个指标的变权重, 计算公式为

$$\varphi_i = \frac{\gamma_i Val_i^{\varepsilon-1}}{\sum_{j=1}^n \gamma_j Val_j^{\varepsilon-1}} \quad (18)$$

式中: φ_i 为第 i 个指标的变权重; Val_i 为第 i 个指标的得分; ε 为均衡系数, 且满足 $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。

最后可以利用式(19)得到配电网运行方式评估结果。

$$R = \sum_{i=1}^n \varphi_i Val_i \quad (19)$$

式中: R 为配电网运行方式评估结果; Val_i 为第 i 个指标的得分; φ_i 为第 i 个指标的变权重。

综上所述, 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法的步骤如下:

- 1) 对于待评估的配电网, 对每个指标进行 m 次数据采集, 并根据公式计算出对应的 n 个指标的数值和得分;
- 2) 将指标数据转化为正态分布数据, 利用主成分分析法计算得到初步的评估量化值, 并对指标数据进行标准化, 结合主成分分析法得到的评估量化值利用最小二乘法确定各个指标的灵敏度权重;
- 3) 根据步骤 2) 中得到的标准化数据以及标准化后的量化评估值, 利用灰色关联分析法确定各个指标的灰色关联度权重;
- 4) 根据步骤 2) 中得到的灵敏度权重和步骤 3) 中得到的灰色关联度权重, 计算每个指标的综合权重, 并进一步确定变权重;
- 5) 根据步骤 4) 得到的变权重以及步骤 1) 中计算得到的每个指标的得分, 得出配电网运行方式评估结果。

上述配电网运行方式评估方法的流程图见图 2。

3 算例分析

本文选取了某个城市的配电网来验证该分析方法的有效性与实用性, 该城市配电网的馈线数共有 6114 条, 配变近 70 000 台, 由于规模较大, 因此本文中选取该市中 5 个规模相近的区域进行算例分析,

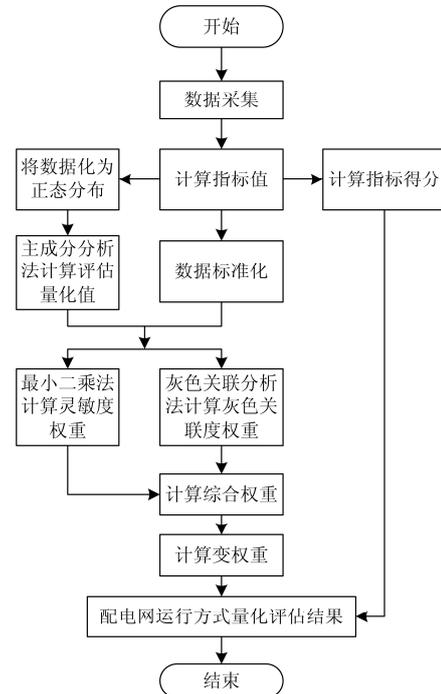


图 2 配电网运行方式评估方法流程图

Fig. 2 Evaluation method flow chart of distribution network operation mode

仍以安全性指标为例进行计算过程的说明, 安全性指标数据见表 1 所示。

表 1 安全性指标数据

Table 1 Security index values

安全性指标	指标值				
	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5
线路平均负载率	47.03%	51.79%	49.36%	54.81%	53.77%
配变平均负载率	55.75%	56.05%	50.98%	54.11%	52.78%
线路 N-1 通过率	93.97%	91.85%	95.06%	92.27%	96.93%
线路最高负载率	97.10%	93.55%	90.32%	96.77%	92.79%
配变最高负载率	84.65%	87.13%	79.13%	81.18%	77.57%
重载过载设备数目	3.18%	5.94%	2.74%	4.57%	2.25%

各个指标的得分采用百分制计算, 为了避免出现得分过低的情况, 因此设定指标最低得分为 60 分, 最高得分为 100 分, 中间的得分采用线性插值公式计算, 安全性指标的得分标准见表 2 所示。

在计算灵敏度权重和灰色关联度权重的过程中, 利用主成分分析法计算评估量化值时需要先将线路平均负载率、配变平均负载率、线路最高负载

率、配变最高负载率和重载过载设备数目这四个指标的值转化为正向指标值, 即采用 100% 减去指标值的方法, 这样才能使主成分分析法得出的结果变得正确。计算得到的灵敏度权重、灰色关联度权重和综合权重见表 3 所示, 在计算综合权重时, 取式 (17) 中的 $\theta_1 = \theta_2 = 0.5$ 。

表 2 安全性指标得分计算标准

Table 2 Calculating standards of security index scores

安全性指标	60 分对应指标值	100 分对应指标值
线路平均负载率	60%	0
配变平均负载率	60%	0
线路 N-1 通过率	60%	100%
线路最高负载率	100%	0
配变最高负载率	100%	0
重载过载设备数目	10%	0

表 3 安全性指标权重计算结果

Table 3 Calculating results of security index weights

安全性指标	灵敏度权重	灰色关联度权重	综合权重
线路平均负载率	0.144	0.180	0.162
配变平均负载率	0.200	0.156	0.178
线路 N-1 通过率	0.015	0.168	0.092
线路最高负载率	0.008	0.155	0.081
配变最高负载率	0.326	0.180	0.253
重载过载设备数目	0.307	0.161	0.234

由于表 3 中的数据是由四舍五入得到的, 因此可能会出现指标权重之和不等于 1 的现象, 但这对最后的评估结果几乎没有影响。由表 3 中的综合权重计算结果可以看出, 虽然灵敏度权重和灰色关联度权重都是客观权重, 但是显然灰色关联度权重差距很小而灵敏度权重差距较大, 这主要是由于指标数据之间的变化差异并不算很大, 因此计算得到的灰色关联度权重差异也并不大, 这也体现出了灵敏度权重的优点, 即能够正确反映出指标变化对评估结果的影响。根据表 3 中的权重值以及指标值, 可以计算得到安全性指标的变权重, 计算结果见表 4 所示。

表 4 变权重计算结果

Table 4 Calculating results of variable weights

安全性指标	变权重				
	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5
线路平均负载率	0.166	0.166	0.170	0.171	0.173
配变平均负载率	0.190	0.187	0.188	0.187	0.190
线路 N-1 通过率	0.080	0.079	0.080	0.080	0.080
线路最高负载率	0.088	0.085	0.087	0.087	0.088
配变最高负载率	0.264	0.260	0.262	0.258	0.261
重载过载设备数目	0.212	0.223	0.213	0.217	0.210

由表 4 中的变权重计算结果可以看出, 由于 5 个区域之间安全性指标得分相差并不是很大, 因此各个指标的变权重差距也并不大, 实际上当存在数值异常的指标时变权重会具有较好的识别能力, 使得最终的评估结果更加符合实际。利用表 4 中的变权重结合安全性指标值, 可以计算出 5 个区域的安全性得分, 利用相同的方法还可以计算出另外几类指标的得分, 计算结果见表 5 所示。

表 5 各类指标得分计算结果

Table 5 Calculating results of all types of index scores

区域	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5
安全性得分	72.20	69.10	73.86	70.68	73.67
可靠性得分	85.09	89.92	94.13	92.75	96.02
电能质量得分	74.55	76.38	81.07	78.92	80.19
协调性得分	82.74	85.79	92.11	90.48	92.06
经济性得分	73.29	73.01	69.26	71.37	71.43
自动化水平得分	82.43	80.19	74.82	85.67	77.16

从表 5 中的计算结果可以看出, 各个区域各类指标得分差别较大, 安全性和可靠性得分较高的地区经济性得分则较低, 综合 6 个方面的指标很难判断出区域配电网之间的优劣, 因此仍然采用本文提出的方法进行第二轮计算, 最终得到的各个区域的配电网运行方式综合得分见表 6 所示。

表 6 配电网运行方式评估结果

Table 6 Evaluation results of distribution network operation mode

区域	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5
配电网运行方式得分	77.43	78.00	79.92	80.66	80.47

由表 6 可以看出, 该地区配电网的运行方式总体来说处于中等水平, 具体来说区域 4 和区域 5 要优于另外几个区域, 结合表 5 的计算结果可以看出, 各区域配电网在可靠性和协调性方面的得分较高, 表明各区域在电网规划方面的工作完成的比较理想, 但在安全性和经济性方面仍然存在一定的问题, 下一步需要针对一些细节(如负荷均衡和设备投资等)采取相应的对策, 以实现配电网运行方式的全面优化。

上述评估结果也体现出了综合赋权的必要性, 灵敏度权重反映了不同指标对评估结果的影响程度, 灰色关联度权重反映了指标数据序列与评估结果序列之间的关联程度, 变权重公式能够很好地把异常指标值的影响纳入到综合评价中, 使得得到的配电网运行方式量化评估结果更加科学合理。另外本文所提出的方法还具有一定的可扩展性, 当指标数目较多时甚至可以增加指标的层数, 每层指标值均可以利用本文提出的方法来进行分析, 还可以实

现不同类型指标之间的分析与比较,从而为运行方式的调度和优化提供参考和依据。

4 结论

本文提出了一种考虑指标灵敏度的配电网运行方式变权重评估方法,该方法在考虑到每个指标对配电网运行方式水平的影响程度不同的基础上,利用主成分分析法的初步评估量化结果结合最小二乘法计算得到指标的灵敏度权重,同时利用灰色关联分析法对指标数据序列和由主成分分析法得到的评估量化值序列进行分析,计算得到指标的灰色关联分析权重,最后利用变权重公式实现了指标的综合赋权,使得评价结果更加合理。算例表明所提出的方法可以对配电网的运行方式水平进行准确评估,为运行方式的优化提供参考和依据。

参考文献

- [1] 李晓辉,徐晶,李达,等.基于层次分析的配电网可靠性评估指标体系[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(3):69-74.
LI Xiaohui, XU Jing, LI Da, et al. Index system of reliability evaluation for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2009, 21(3): 69-74.
- [2] 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.
- [3] 冯欣桦,黎洪光,郑欣,等.计及不确定性的配电网闭环点安全性与经济性评估[J].电力系统保护与控制,2015,43(10):30-37.
FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.
- [4] 何吉彪,程浩忠.含微网配电网规划中的电能质量综合评估[J].电网技术,2012,36(8):209-214.
HE Jibiao, CHENG Haozhong. Comprehensive power quality assessment on distribution network planning containing micro-grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 209-214.
- [5] 李玲玲,刘敬杰,凌跃胜,等.物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J].电工技术学报,2015,30(12):383-391.
LI Lingling, LIU Jingjie, LING Yuesheng, et al. Power quality comprehensive evaluation based on matter-element theory and evidence theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 383-391.
- [6] 王晓晶,陈星莺,陈楷,等.智能配电网清洁性评估指标研究[J].中国电机工程学报,2013,33(31):43-50.
WANG Xiaojing, CHEN Xingying, CHEN Kai, et al. Research on cleaning evaluation indices of smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 43-50.
- [7] 徐科,刘明志,张军,等.世界一流城市电网评价指标体系[J].电力建设,2015,36(11):51-57.
XU Ke, LIU Mingzhi, ZHANG Jun, et al. Index system for world-class urban power network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 51-57.
- [8] 蒋亚坤,李文云,赵莹,等.粗糙集与证据理论结合的电网运行优质性综合评价[J].电力系统保护与控制,2015,43(13):1-7.
JIANG Yakun, LI Wenyun, ZHAO Ying, et al. Evaluation of power quality performance based on rough set and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 1-7.
- [9] 肖峻,崔艳妍,王建民,等.配电网规划的综合评价指标体系与方法[J].电力系统自动化,2008,32(15):36-40.
XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianmin, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40.
- [10] 陈炽野,文亚凤,刘自发,等.含有多种分布式电源的配电网综合评估方法[J].电力建设,2015,36(1):128-135.
CHEN Chiye, WEN Yafeng, LIU Zifa, et al. Comprehensive evaluation method of distribution network including various types of distributed generation[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 128-135.
- [11] 羌丁建,寿挺,朱铁铭,等.高压配电网规划评价指标体系与综合评价模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(21):52-57.
QIANG Dingjian, SHOU Ting, ZHU Tieming, et al. An evaluation index system and comprehensive evaluation model on high-voltage distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 52-57.
- [12] 顾洁,秦玥,包海龙,等.基于熵权与系统动力学的配电网规划动态综合评价[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):76-83.
GU Jie, QIN Yue, BAO Hailong, et al. Comprehensive and dynamic evaluation of the distribution network

- planning based on entropy weight and system dynamics[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 76-83.
- [13] 吴桂联, 张林垚, 胡臻达. 中低压配电网整体规划方案综合评估[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 64-69.
WU Guilian, ZHANG Linyao, HU Zhenda. Overall planning comprehensive evaluation of medium-lower voltage distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 64-69.
- [14] 顾雪平, 王大江, 梁海平, 等. 电力系统扩展黑启动方案动态综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 44-52.
GU Xueping, WANG Dajiang, LIANG Haiping, et al. Dynamic comprehensive assessment of power system extended black-start plans[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 44-52.
- [15] 韦钢, 吴伟力, 刘佳, 等. 基于 SE-DEA 模型的电网规划方案综合决策体系[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 12-16, 27.
WEI Gang, WU Weili, LIU Jia, et al. Comprehensive judgment for power system planning alternatives based on SE-DEA model[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 12-16, 27.
- [16] 王伟, 张粒子, 麻秀范. 基于模糊综合评价的结构元中压配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 42-46.
WANG Wei, ZHANG Lizi, MA Xiufan. Medium-voltage distribution systems planning with fuzzy comprehensive evaluation and configuration-unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 42-46.
- [17] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [18] 崔和瑞, 梁丽华, 王立红. 基于熵权 TOPSIS 分析的配电网可靠性评估指标体系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 172-175.
CUI Herui, LIANG Lihua, WANG Lihong. Reliability evaluation index of distribution system based on entropy-weight TOPSIS method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S1): 172-175.
- [19] 高新华, 严正. 基于主成分聚类分析的智能电网建设综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2238-2243.
GAO Xinhua, YAN Zheng. Comprehensive assessment of smart grid construction based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2238-2243.
- [20] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81.
LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [21] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64, 74.
LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 1997, 17(4): 58-64, 74.

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2016-09-09

作者简介:

周名煜(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析、电力系统经济运行、电力市场; E-mail: starcraft1996@126.com

谢宁(1974—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统安全与稳定、电力系统经济运行、智能电网; E-mail: xiening@sjtu.edu.cn

王承民(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统节能与经济运行、电力系统规划。E-mail: wangchengmin@sjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)