

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181585

基于改进 AHP-TOPSIS 法的经济开发区配电网 综合评价指标体系和投资策略研究

徐斌¹, 马骏¹, 陈青¹, 李高俊杰², 胡钊²

(1. 国网安徽省电力有限公司六安供电公司, 安徽 六安 237006; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对处于发展前期、中期的经济开发区配电网发展水平的全面评价以及未来投资策略问题, 综合考虑评价的特点和指标的适用性, 构建了用于评价经济开发区配电网当前发展水平和前一年投资效益的综合评价指标体系。同时针对该评价体系提出了能够协调配电网经济性与安全性平衡发展并适用于单一样本评价的改进 AHP-TOPSIS 法。该方法基于改进 AHP 法获取权重, 利用改进 TOPSIS 法更直接明确地给出该评价指标体系中各指标的发展现状与水平。通过所建立的配电网评分标准和指标投资优先度评判标准分别进行指标评分和投资分析。实际应用结果表明, 该综合评价指标体系可以为经济开发区的建设发展路径和投资策略提供比较具体的实施方案, 可以更加合理、高效地促进经济开发区配电网的发展与完善。

关键词: 经济开发区配电网; 评价指标体系; 改进 AHP-TOPSIS 法; 协调系数; 投资优先度

Research on comprehensive evaluation index system and investment strategy of economic development zone distribution network based on improved AHP-TOPSIS method

XU Bin¹, MA Jun¹, CHEN Qing¹, LIGAO Junjie², HU Zhao²

(1. Lu'an Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power CO., LTD., Lu'an 237006, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the problem in conducting comprehensive evaluation and developing investment strategy of economic development zone distribution network in the early and middle stages of development, and considering the characteristics of the evaluation and the applicability of the indicators comprehensively, a comprehensive evaluation index system is constructed to evaluate the current development level of the distribution network of economic development zones and the investment benefit of the previous year. Meanwhile, an improved AHP-TOPSIS method which is applicable to evaluate single sample and can coordinate the balanced development of economy and security of distribution network is proposed. This method is based on the improved AHP method to obtain the weight, and the improved TOPSIS method is used to give the development status and level of each index in the evaluation index system more directly and clearly. Then, the index score and investment analysis are conducted respectively through the established rating standards of distribution network and the evaluation criteria of index investment priority. The practical application results show that the comprehensive evaluation index system can provide a relatively specific implementation plan for construction and development and investment strategy of the economic development zone, and can promote the development and improvement of the distribution network of the economic development zone more reasonably and efficiently.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: distribution network of economic development zones; evaluation index system; improved AHP-TOPSIS method; coordination coefficient; investment priority

0 引言

为推动我国经济发展, 加快电网建设和改革的

步伐, 许多城市经济开发区已经或正在实施电网建设工程项目。而对于正在逐步完善的经济开发区配电网, 其发展评价和投资建设还存在着较多问题。因此, 构建更加适合各地经济开发区配电网的评价体系并制定相应的投资决策, 以便对其发展现状作出更加合理的评估并根据评价结果实现效益最大化

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目
(2015AA050101)

投资是一个非常值得研究的问题^[1]。

配电网的评价指标体系随着配电网自身的不断发展也在逐步完善,传统的配电网评价主要从其可靠性^[2-3]、安全性^[4]和建设规模^[5-6]等方面进行单一评价,通过不断将各方面指标简单汇总构建成配电网综合评价体系^[7-9]。但是,对于处在发展前中期的配电网,这些评价体系的适用性不强,主要是对配电网发展水平和投资效益分别进行评价^[10-13],而将这两方面结合且考虑配电网发展经济性与安全性平衡来评价配电网发展水平从而指导未来投资的综合评价指标体系,尤其是针对发展水平不高的配电网的鲜见诸文献。此外,这些评价体系所需的很多指标数据在实际收集时难以获取。为此,本文基于发展前中期的配电网的发展现状,提出了一套能更加合理全面地评价发展前中期的配电网的综合评价指标体系。可以通过本文所提出的改进 AHP-TOPSIS 法实现同时对发展水平和投资效益进行综合评价。此外,还建立了配电网评分标准和指标投资优先度评判标准,可用以对配电网进行科学有效评价并制定投资策略。

1 经济开发区配电网综合评价指标体系

评价指标体系是由多个相互联系和相对独立的评价指标按照一定的层次结构建立而成的统一整体。本文针对处在发展建设前中期的经济开发区配电网所建立的评价指标体系,旨在合理评价其当前发展水平和前一年投资在当前阶段所产生的收益,进而找出急需投资且收益较大的薄弱环节以及需要进一步巩固加强的重要环节制定相应的优化投资策略,以促进经济开发区配电网更快更好地发展。为此,在指标选取时遵循独立性、代表性和可行性原则,即紧密结合经济开发区配电网的发展现状及其特点,充分兼顾经济性与安全性,并考虑到指标的可获取性。

综合评价指标体系参照《电网建设项目经济评价办法》和《电力系统安全稳定导则》^[14]等相关标准,在经济效益和安全效益这两个一级指标的基础上新加入了对上述两个指标的增益进行评价的两个一级评价指标,从而构成一套适用性更强的经济开发区配电网综合评价指标体系,如图 1 所示。

该评价指标体系的一级指标层包含四个一级指标,分别为配电网经济效益指标、安全效益指标、经济增效指标和安全增效指标,前两者用于评价配电网当前的发展水平,后两者用于评价前一年投资在当前阶段所产生的效益,相较于只包含前两者仅考虑当前发展水平的传统评价指标体系,后两者的

加入有助于利用评价结果指导投资建设,从而使得整个评价指标体系更为全面、合理,这一点通过算例分析得到了证实。二级指标层涵盖 31 个二级指标,其中 16 个为配电网经济性和安全性的基础指标,15 个为相关的增效指标。借助这些不难获取的指标,可以对评价对象在经济性和安全性两个方面作出科学、合理、准确的评价。

2 改进 AHP-TOPSIS 评价方法

经济开发区配电网综合评价指标体系是面向单个经济开发区根据已建立的百分制评分标准进行评分的,同时为了更有效地指导投资,建立了相应的指标投资优先度评判标准。针对需要在评价过程中协调经济效益与安全效益的重要性以及对单个评价对象更合理地展示其各个指标的发展水平,本文分别对层次分析法(AHP 法)和优劣解距离法(TOPSIS 法)进行了改进并加以组合,得到了改进 AHP-TOPSIS 综合评价方法,作为经济开发区配电网综合评价指标体系的评价方法。

2.1 改进 AHP 法

AHP法^[15-16]的基本思想是将待决策问题按照一定的逻辑分类关系层层细分,由此构建一个多层次的指标体系框架,结合专家评分确定各层中指标间两两关联程度,以构建判断矩阵并进行一致性检验,最后根据判断矩阵求得各层指标在其所在层所占的权重。

传统的 AHP 法中的专家评分是分别针对各一级指标下二级指标的重要程度给出的,它们反映了各一级指标内部重要程度对比情况,而各一级指标下二级指标之间重要程度的对比仅取决于一级指标的权重。

本文在对经济开发区配电网进行评估时计及经济性与安全性指标的平衡或近平衡,因此,在初始赋权时对这两者取相同或较为相近的权重值,故而在对一级指标重要程度评分时经济效益指标 B1 与安全效益指标 B2 的评分值会相同或比较接近。因而一级指标的权重对各一级指标下二级指标之间重要程度的对比影响很小。但是,在这种情况下,很可能存在一级指标 B1 下各二级指标评分较为离散,而另一个一级指标 B2 下各二级指标评分较为集中,致使后续计算中 B1 和 B2 下重要程度本应相同或相近的二级指标的初始权重值相差较大,造成指标优先度评判时出现误判。同理,经济增效指标 B3 与安全增效指标 B4 也可能会出现上述问题。为此,本文对二级指标的初始权重进行两次处理。首先,构建协调系数,其方法为从所形成的各二级指标判

断矩阵中选出最大和最小的两个元素作为两个端点, 将各二级指标权重向量中元素值向这两个端点做“拉伸”处理。该过程是在不考虑各一级指标权重的情况下将所有二级指标的权重置于同一重要程度标度而非在不同重要程度尺度下进行对比。接着, 利用协调系数对各二级指标的初始权重进行调整得到中间权重。此时, 中间权重即为在同一重要程度标度下经处理的所有二级指标权重中加入各一级指标初始权重的影响而作出调整后的权重值。由于各一级指标的权重相同或较为接近时, 它们对其下二

级指标之间重要程度的对比影响很小, 因而并不会因各一级指标权重影响的加入使得所有二级指标权重发生较大变化。由于上述处理会间接导致此时所有二级指标中间权重之和不为 1, 因此需要对其进行处理使得权重之和为 1, 这时所得到的各二级指标的权重称为最终权重, 由此可以反向对各一级指标权重进行调整。上述改进既保证了各二级指标权重的合理性, 同时也使改进后的方法适用于考虑经济性与安全性指标平衡或近平衡下的一般情况。



图 1 经济开发区配电网综合评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system of economic development zone power distribution network

此外, 该方法将现有 AHP 法中由多位专家使用 1~9 层次分析标度确定各层指标两两间的重要程度比较值^[17], 改为由多位专家先给各层指标重要程度进行评分, 再由此求出各层指标两两间的重要程度比较值, 这样在处理指标较多的情况时操作更为便捷, 比较值更容易确定。

根据上述改进思路得到改进 AHP 法, 其包含以下步骤:

1) 专家评分和构建判断矩阵

设有 p 位专家分别按 1~9 之间的分值对指标的重要程度评分, 指标越重要对应的分值越高。评分标准如表 1 所示。

表 1 专家评分标准

Table 1 Criteria for expert rating

重要程度	分数
特别重要	8~9
比较重要	5~7
一般重要	3~4
不重要	1~2

设第 i 位 ($i=1,2,\dots,p$) 专家对指标 C1 的评分分别为 G_1, G_2, \dots, G_p , 则指标 C1 的最终评分为

$$G_{C1} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p G_i \quad (1)$$

得到各指标的评分后, 建立目标层下各一级指标的判断矩阵和各一级指标下属的各二级指标的判断矩阵。例如, 在得到指标 C1、C2、 \dots 、C9 的评分后可建立指标 B1 下属各二级指标的判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} C1 & 1 & G_{C1}/G_{C2} & \cdots & G_{C1}/G_{C9} \\ C2 & G_{C2}/G_{C1} & 1 & \cdots & G_{C2}/G_{C9} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C9 & G_{C9}/G_{C1} & G_{C9}/G_{C2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2) 检验判断矩阵的一致性

为了保证判断矩阵的合理性, 避免其中出现不必要的逻辑混乱, 需对其进行一致性检验, 一致性指标的计算公式为

$$CR = \left(\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \right) / RI \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; RI 为平均随机一致性指标。一般认为, 当 $CR < 0.1$ 时判断矩阵的一致性是可以接受的, 当 $CR \geq 0.1$ 时则需要对判断矩阵进行修改, 保证矩阵可通过一致性检验。

3) 求解各指标的初始权重

根据上述步骤得到的判断矩阵即可求解其各自的权重向量, 判断矩阵权重向量的计算式为

$$A\mathbf{W} = \lambda_{\max}\mathbf{W} \quad (4)$$

式中: A 为判断矩阵; \mathbf{W} 为判断矩阵的权重向量, 其形式为 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$, m 为判断矩阵中的指标个数。

由式(4)可得到一级指标判断矩阵的权重向量 $\mathbf{W}_1 = (w_{B1}, w_{B2}, w_{B3}, w_{B4})^T$ 、一级指标 B1 下属各二级指标判断矩阵的权重向量 $\mathbf{W}_{21} = (w_{C1}, w_{C2}, \dots, w_{C9})^T$ 以及 \mathbf{W}_{22} 、 \mathbf{W}_{23} 和 \mathbf{W}_{24} 等。因此得到各二级指标的初始权重 $\mathbf{W}_2 = (w_{B1}\mathbf{W}_{21}, w_{B2}\mathbf{W}_{22}, w_{B3}\mathbf{W}_{23}, w_{B4}\mathbf{W}_{24})^T$, 记为 $\mathbf{W}_2 = (w_1, w_2, \dots, w_{31})^T$ 。

4) 协调系数的计算

由于经济效益指标 B1 和安全效益指标 B2 重要程度评分相近, 以这两个一级指标为例进行说明。

首先, 从这两个一级指标下二级指标判断矩阵的权重向量 \mathbf{W}_{21} 、 \mathbf{W}_{22} 中分别选出其元素的最大值 $w_{\max i}$ 和最小值 $w_{\min i}$, $i=1,2$ 。接着, 从 $w_{\max i}$ 和 $w_{\min i}$ 中再分别选出最大值 $w_{\max} = \max_i(w_{\max i})$ 和最小值 $w_{\min} = \min_i(w_{\min i})$ 。

协调系数定义: 第 i 个一级指标下第 j 个二级指标的协调系数 V_{ij} 为

$$V_{ij} = \begin{cases} \frac{w_{\max}}{w_j} & w_j = w_{\max i} \\ \left[(w_j - w_{\min i}) \frac{\Delta w}{\Delta w_i} + w_{\min} \right] \frac{1}{w_j} & w_{\min i} < w_j < w_{\max i} \\ \frac{w_{\min}}{w_j} & w_j = w_{\min i} \end{cases} \quad (5)$$

其中, w_j 为第 i 个一级指标下第 j 个二级指标对应的权重向量中的元素, $\Delta w_i = w_{\max i} - w_{\min i}$ 表示第 i 个一级指标下二级指标权重向量中元素的极差, $\Delta w = w_{\max} - w_{\min}$ 表示权重向量 \mathbf{W}_{21} 、 \mathbf{W}_{22} 中所有元素的极差。

为便于后续计算时表示, 将协调系数 V_{ij} 按对应的二级指标顺序进行排列后改写为 V_j , 即第 $j(j=1,2,\dots,16)$ 个二级指标所对应的协调系数。同理计算经济增效指标 B3 和安全增效指标 B4 下各二级指标权重协调系数。

5) 求解各指标的最终权重

将第 j 个二级指标的协调系数与其初始权重相乘可得到其中间权重, 即

$$w'_j = w_j V_j \quad (6)$$

此时 $\mathbf{W}'_2 = (w'_1, w'_2, \dots, w'_j, \dots, w'_{31})^T$, 由于可能存在

$\sum_{j=1}^{31} w'_j \neq 1$ 的情况, 因此作如下修正, 即

$$w''_j = w'_j / \sum_{j=1}^{31} w'_j \quad (7)$$

由此可得第 j 个二级指标的最终权重 w''_j , 且

$\sum_{i=1}^{31} w''_j = 1$ 。再将第 i 个一级指标下所有二级指标的最终权重相加, 即可得到第 i 个一级指标调整后的最终权重 w'_{Bi} 。

2.2 改进 TOPSIS 法

传统的 TOPSIS 法^[18-19]适用于多个评价对象的优劣程度比较。该方法将原始数据作归一化处理, 找出评价对象的最优值和最劣值, 进而得到各评价对象与最优值的接近程度, 以此得到各评价对象的优劣程度。

传统的 TOPSIS 法仅适用于多个评价样本的评估, 可以较好地反映多个样本间的优劣程度, 但是并不适用于本文对单个配电网评估的情况, 且其最优值与最劣值的选取方式也不适用于本文综合评价指标体系下的配电网评估。此外, 传统的 TOPSIS

法不在同一直线上计算实际值与最优值的接近程度会导致计算结果存在不够客观等问题。因此,本文在文献[20]的基础上,对单个评价对象的指标最优值与最劣值的选取进行了优化,改进了各指标实际值与最优值接近程度的计算方法。相较于其他方法,改进后的 TOPSIS 法可以通过定量计算分析目标经济开发区的发展水平和薄弱环节,更加直观、清晰地指导投资,制定有效的投资策略。此外,通过指标投资优先度评判标准可以得到优化投资方案。改进 TOPSIS 法的计算步骤如下。

1) 建立评估初始矩阵

根据评价对象的样本数据得到评价指标体系中各指标第 y 年的实际值,选取各指标在第 y 年投资前的预期(或最优)值作为最优值,各指标在第 $y-1$ 年的实际值作为最劣值,将这些值代入 TOPSIS 法计算,其结果可以评判第 $y-1$ 年的投资在第 y 年所获得的收益效果,以及评价对象在第 y 年的发展情况。

利用上述值建立用于评估被评对象的初始矩阵,即

$$C_{3 \times n} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ c_{31} & c_{32} & \cdots & c_{3n} \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \quad (8)$$

式中: n 为二级指标个数; A_1 、 A_2 和 A_3 分别为评价指标的实际值、最优值和最劣值向量。

2) 决策矩阵规范化

利用式(9)对初始矩阵进行规范化处理,得到规范决策矩阵 $C' = (c'_{ij})_{3 \times n}$,其中

$$c'_{ij} = c_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^3 c_{ij}^2}, \quad i=1,2,3; \quad j=1,2,\dots,n \quad (9)$$

3) 构造加权规范矩阵

加权规范矩阵 $Z = (z_{ij})_{3 \times n}$ 的计算式为

$$z_{ij} = w_j^m c'_{ij} \quad (10)$$

式中, $i=1,2,3$; $j=1,2,\dots,n$ 。

4) 确定最优值向量和最劣值向量

加权规范矩阵中的第 2 行 $Z_+ = (z_{21}, z_{22}, \dots, z_{2n})$ 和第 3 行 $Z_- = (z_{31}, z_{32}, \dots, z_{3n})$ 分别为最优值向量和最劣值向量。

5) 计算各指标实际值、最优值和最劣值两两之间的距离及比值

第 j 个二级指标三个值两两之间的距离分别为

$$d_{j+} = |z_{1j} - z_{2j}|, d_{j-} = |z_{1j} - z_{3j}|, d_j = |z_{2j} - z_{3j}|。$$

第 i 个一级指标三个值两两之间的距离分别为

$$D_{i+} = \|z_{1j} - z_{2j}\| = \sqrt{\sum_{j \in J_i} (z_{1j} - z_{2j})^2}$$

$$D_{i-} = \|z_{1j} - z_{3j}\| = \sqrt{\sum_{j \in J_i} (z_{1j} - z_{3j})^2}$$

$$D_i = \|z_{2j} - z_{3j}\| = \sqrt{\sum_{j \in J_i} (z_{2j} - z_{3j})^2}$$

式中, J_i 为第 i 个一级指标下二级指标编号集合。

二级指标的三个值之间的关系为 $d_{j+} + d_{j-} = d_j$;而一级指标的三个值之间的关系不一定满足 $D_{i+} + D_{i-} = D_i$,例如,若第 i 个一级指标下有 j 个二级指标,则一级指标的实际值、最优值和最劣值在 j 维坐标系中表示为 $Z_1(z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1j})$ 、 $Z_2(z_{21}, z_{22}, \dots, z_{2j})$ 和 $Z_3(z_{31}, z_{32}, \dots, z_{3j})$,由于这三个

点存在不共线的可能,故而会导致诸如 $\frac{D_{i+}}{D_i} = \frac{|Z_1 Z_2|}{|Z_3 Z_2|}$

并不能真实反映实际值与最优值之间距离相对于最劣值与最优值之间距离的大小。因此,本文在计算三个距离两两间比值前先将点 Z_1 与 Z_2 的连线以及点 Z_1 与 Z_3 的连线分别投影至点 Z_2 与 Z_3 的连线上再进行计算,即

$$\frac{D'_{i+}}{D_i} = \frac{D_{i+} \cos \theta}{D_i} = \frac{D_{i+} \cdot \frac{D_{i+}^2 + D_i^2 - D_{i-}^2}{2D_{i+} D_i}}{D_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{i+}^2 - D_{i-}^2}{D_i^2} + 1 \right) \quad (11)$$

式中, θ 为向量 $\overline{Z_1 Z_2}$ 与 $\overline{Z_3 Z_2}$ 的夹角。类似可以得出其余两个比例关系。

6) 建立评分标准作出评价

最优趋近度定义:第 i 个一级指标的最优趋近度为

$$S_i = \frac{D'_{i+}}{D_i} \quad (12)$$

式(12)为第 i 个一级指标实际值与最优值距离和最劣值与最优值距离比值的大小,反映了评价指标体系中第 i 个一级指标的实际值与最优值的接近程度。 S_i 值越小,则说明该指标的实际值越接近最优值,发展水平越高,反之两者越远离,发展水平越低。此外,最优趋近度的大小还可以反映该指标的当前发展水平较前一年的提升程度, S_i 值越小说明较前一年发展水平而言该指标当前发展得越好。

根据最优趋近度所建立的一级指标评分标准如表 2 所示。

表 2 一级指标评分标准

Table 2 Grade criteria of first-level index

最优趋近度 S_i	评价分数	评价等级
$0.0 \leq S_i \leq 0.2$	90~100	优秀
$0.2 < S_i \leq 0.5$	80~90	良好
$0.5 < S_i \leq 1.0$	70~80	中等
$1.0 < S_i \leq 3.0$	60~70	合格
$S_i > 3.0$	0	不合格

根据该评分标准可以计算出评价对象各一级指标的得分，它们更直观地反映各一级指标的发展现状。根据这些得分以及各一级指标调整后的权重，可以计算出评价对象整体的综合得分，即

$$P = \sum_{i=1}^4 w'_{Bi} p_{Bi} \quad (13)$$

式中： w'_{Bi} 为第 i 个一级指标经过调整后的权重； p_{Bi} 为第 i 个一级指标的得分。

3 投资策略分析

各一级指标的评分可以反映评价对象经济性和安全性的发展水平。为了寻求经济性和安全性的重要环节和薄弱环节实现投资优化，需要对各二级指标的投资优先度进行分析。

对于各二级指标，若按照一级指标那样定义最优趋近度 s_j ，则 $s_j = \frac{d_{j+}}{d_{j-}} = \frac{|z_{1j} - z_{2j}|}{|z_{2j} - z_{3j}|} = \frac{|c'_{1j} - c'_{2j}|}{|c'_{2j} - c'_{3j}|}$ ，此时权重 w''_j 将失去意义，故在 s_j 基础上加入各二级指标权重，这时二级指标仅包括经济效益指标和安全效益指标两个一级指标下的各二级指标。

加权最优趋近度定义：第 j 个二级指标的加权最优趋近度为

$$t_j = \alpha \frac{s_j}{s_{\max}} + (1 - \alpha) \frac{w''_j}{w''_{\max}} \quad (14)$$

式中： α 为权重系数，且 $0 \leq \alpha \leq 1$ ，其值根据实际情况选取； $s_j = \frac{d_{j+}}{d_{j-}}$ 为第 j 个二级指标的最优趋近度， s_{\max} 和 w''_{\max} 分别为所有二级指标中最优趋近度和权重的最大值。

在加权最优趋近度的基础上，加入第 j 个二级指标当前实际值相对于前一年实际值的增量的绝对值，即 $|\Delta_j|$ ，本文所建立的二级指标投资优先度评判标准如表 3 所示。通过 $|\Delta_j|$ 可以知道前一年对第 j 个二级指标投资后当前收益情况。利用 t_j 和 $|\Delta_j|$ 的计算结果对各二级指标投资优先度进行评判可以为评价对象制定优化投资方案。

表 3 二级指标投资优先度评判标准

Table 3 Evaluation criteria of second-level index investment priority

加权最优趋近度 t_j	增量 $ \Delta_j $	饱和程度	投资收益	投资优先度
$0.75 \leq t_j \leq 1.0$	$ \Delta_j \geq 20\%$		收益高	A+
	$10\% \leq \Delta_j < 20\%$	饱和程度低，急需投资	收益中等	A
	$ \Delta_j < 10\%$		欲收益明显则需要较大投资	A-
$0.45 \leq t_j < 0.75$	$ \Delta_j \geq 15\%$		收益高	B+
	$5\% \leq \Delta_j < 15\%$	饱和程度中等，需要优先投资	收益中等	B
	$ \Delta_j < 5\%$		欲收益明显则需要较大投资	B-
$0.2 \leq t_j < 0.45$	$ \Delta_j \geq 10\%$		收益中等	C
	$0 \leq \Delta_j < 10\%$	饱和程度较高，可考虑适量投资	欲收益明显则需要大量投资，故考虑做适量投资以维持当前发展水平	D
$0.0 \leq t_j < 0.2$	/	饱和程度很高，可考虑少量投资	即使大量投资也无明显收益，故应该做少量投资以维持当前发展水平	E

4 算例分析

应用本文所提出的方法对某一经济开发区配电网现状作出评价，并为其制定优化投资策略。同时，利用本文所提评价指标体系与只考虑当前发展水平的传统评价指标体系分别对五个不同发展情况的经济开发区配电网进行评价，并对比评价结果。

4.1 权重计算

按照 2.1 节中的方法，根据多位专家的评分得

到一级和二级指标的初始权重，应用协调系数对二级指标的初始权重进行调整，进而得到一级和二级指标的最终权重，如表 4 和表 5 所示。

4.2 评分计算

以经济效益指标下各二级指标计算为例，计算步骤如下。

1) 构建评估初始矩阵 C

表 4 二级指标的相关计算数据

Table 4 Related calculation data of second-level index

二级指标	初始权重	最终权重	实际值	最优值	最劣值
变压器容载比 C1	0.025 6	0.024 4	1.800	1.600	2.000
欠载变压器占比 C2	0.012 8	0.012 2	0.045	0.000	0.095
单位变压器变电容量 C3	0.019 2	0.018 3	0.115	0.110	0.119
单位变电容量供电量 C4	0.019 2	0.018 3	1.009	1.100	0.891
单位线路供电量 C5	0.019 2	0.018 3	0.044	0.050	0.040
单位固定资产供电量 C6	0.016 0	0.015 3	0.005	0.007	0.005
投资收入比 C7	0.028 8	0.027 5	0.017	0.015	0.025
固定资产净值收益率 C8	0.016 0	0.015 3	0.300	0.400	0.200
同塔双回线路占比 C9	0.009 6	0.009 2	0.489	0.500	0.400
N-1 通过率 C10	0.027 3	0.027 5	0.750	1.000	0.500
重载变压器占比 C11	0.012 1	0.009 2	0.045	0.000	0.095
电压合格率 C12	0.027 3	0.027 5	1.000	1.000	0.900
输电线路平均无故障运行时间 C13	0.024 2	0.023 8	8 378	8 760	8 226
变压器平均无故障运行时间 C14	0.024 2	0.023 8	8 746.19	8 760	8 740.93
供电可靠性 C15	0.027 3	0.027 5	0.998	1.000	0.998
瓶颈线路数 C16	0.024 2	0.023 8	1.000	0.000	1.000
新增变压器投资 C17	0.056 7	0.054 0	3.000	3.000	0.000
欠载变压器占比变化量 C18	0.028 4	0.027 0	-0.050	-0.095	0.000
新增线路投资 C19	0.042 6	0.040 5	6.770	7.000	0.000
投资收入比变化量 C20	0.063 8	0.060 8	-0.009	-0.010	0.000
新增单位变电容量供电量 C21	0.042 6	0.040 5	12.088	13.000	10.000
新增单位线路供电量 C22	0.042 6	0.040 5	0.143	0.150	0.130
新增固定资产净值收益率 C23	0.035 5	0.033 8	0.080	0.100	0.060
同塔双回线路占比变化量 C24	0.021 3	0.020 3	-0.020	0.050	-0.050
N-1 通过率变化量 C25	0.054 5	0.060 8	0.250	0.500	0.000
重载变压器占比变化量 C26	0.024 2	0.020 3	-0.050	-0.095	0.000
电压合格率变化量 C27	0.054 5	0.060 8	0.000	0.000	-0.100
输电线路平均无故障运行时间变化量 C28	0.048 5	0.052 7	152	534	0
变压器平均无故障运行时间变化量 C29	0.048 5	0.052 7	5.26	19.07	0.00
供电可靠性变化量 C30	0.054 5	0.060 8	0.001	0.002	0.000
瓶颈线路数变化量 C31	0.048 5	0.052 7	1.000	-1.000	2.000

表 5 一级指标的相关计算数据

Table 5 Related calculation data of first-level index

评价对象	一级指标	初始权重	最终权重	D_{i+}	D_i	应用文献[20]方法的计算值			应用本文方法的计算值		
						最优趋近度 S_i	评分 P_i	总分 P	最优趋近度 S_i	评分 P_i	总分 P
配电网综合评价体系 A1	配电网经济效益指标 B1	0.166 7	0.158 7	0.007 1	0.016 0	0.442 9	81.90 (良好)	80.57	0.412 1	82.93 (良好)	82.31
	配电网安全效益指标 B2	0.166 7	0.163 0	0.018 0	0.021 4	0.841 7	73.17 (中等)		0.802 6	73.95 (中等)	
	配电网经济效益指标 B3	0.333 3	0.317 5	0.024 0	0.077 0	0.312 4	86.25 (良好)		0.204 9	89.84 (良好)	
	配电网安全效益指标 B4	0.333 3	0.360 7	0.084 8	0.140 5	0.603 5	77.93 (中等)		0.539 4	79.21 (中等)	

$$C = \begin{bmatrix} 1.800 & 0.045 & 0.155 & 1.009 & 0.044 & 0.005 & 0.017 & 0.300 & 0.489 \\ 1.600 & 0.000 & 0.110 & 1.100 & 0.050 & 0.007 & 0.015 & 0.400 & 0.500 \\ 2.00 & 0.095 & 0.119 & 0.891 & 0.040 & 0.005 & 0.025 & 0.200 & 0.400 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0.5750 & 0.4307 & 0.5782 & 0.5804 & 0.5666 & 0.5250 & 0.4965 & 0.5571 & 0.6067 \\ 0.5111 & 0.0000 & 0.5536 & 0.6329 & 0.6433 & 0.6926 & 0.4420 & 0.7428 & 0.6207 \\ 0.6389 & 0.9025 & 0.5994 & 0.5124 & 0.5150 & 0.4947 & 0.7471 & 0.3714 & 0.4966 \end{bmatrix} \begin{matrix} Z_0 \\ Z_+ \\ Z_- \end{matrix}$$

2) 根据式(9)和式(10)将矩阵 C 归一化并求出相应的加权规范矩阵 Z , 从而得到最优值向量 Z_+ 和最劣值向量 Z_- 。

3) 由 Z_+ 和 Z_- 计算得到 $D_{i+}=0.0071$, $D_i=0.0160$, S_i 为 0.412 1, 进而得到经济效益指标的评分值 P_i 为 82.93, 等级为良好。以此类推可以得到余下三个

一级指标的评分值, 最终得到该经济开发区配电网综合评价得分 $P = 82.31$ 。

由表 5 可知, 若利用只考虑当前发展水平的传统评价指标体系只能得到配电网经济效益指标 B1 和配电网安全效益指标 B2, 由此仅能看出该经济开发区配电网经济效益水平比安全效益水平高, 因此, 需要在安全效益方面增加投资。而相较于传统评价指标体系, 本文新建立的指标评价体系添加了配电网经济增效指标 B3 和配电网安全增效指标 B4, 由这两项的计算结果可以看出经济投资收效甚好, 同时, 非常需要优化安全效益投资方案, 增加安全投资效益。

表 5 中给出了由文献[20]和本文方法计算得到

表 6 二级指标的投资优先度

Table 6 Investment priorities of second-level index

二级指标	加权最优趋近度 t_j	增量 $ \Delta_j $	投资优先度
变压器容载比 C1	0.694 4	0.100 0	B-
欠载变压器占比 C2	0.460 9	0.522 7	B+
单位变压器变电容 C3	0.602 6	0.035 3	B-
单位变电容供电量 C4	0.551 3	0.132 6	B
单位线路供电量 C5	0.632 3	0.100 1	B
单位固定资产供电量 C6	0.701 2	0.061 2	B-
投资收入比 C7	0.589 4	0.335 4	B+
固定资产净值收益率 C8	0.527 8	0.500 0	B+
同塔双回线路占比 C9	0.222 9	0.221 9	C
N-1 通过率 C10	0.750 0	0.500 0	B+
重载变压器占比 C11	0.405 3	0.522 7	C
电压合格率 C12	0.500 0	0.111 1	B
输电线路平均无故障运行时间 C13	0.791 0	0.018 5	A-
变压器平均无故障运行时间 C14	0.795 4	0.000 6	A-
供电可靠性 C15	0.867 0	0.000 6	A-
瓶颈线路数 C16	0.933 3	1.000 0	A-

4.4 投资策略

由各一级指标的评分结果可以看出该经济开发区当前的经济效益指标比安全效益指标相较于前一年的有了更好的发展且与最优值更为接近, 前一年投资的收益也达到了较高的期望值。此外, 根据各二级指标投资优先度评判结果可以看到安全效益指标下的二级指标投资优先度均较高。接下来, 该经济开发区在巩固经济效益指标发展水平的同时需要进一步加大对安全效益指标的投资并提高安全效益指标的投资收益。

1) 在安全效益指标投资方面, 资金应该优先分配在提高变压器、输电线路的平均无故障运行时间, 减少瓶颈线路数和巩固提高供电可靠性上, 其次用于提高其 N-1 通过率, 适量投资其余指标使其维持当前水平即可。

2) 在经济效益指标投资方面, 资金应该优先分

配在减少欠载变压器占比、提高固定资产净值收益率和投资收入比上, 其次用于将变压器容载比调整到更合适的值以减少不必要的开支, 以及改进单位变电容量和供电量以尽可能使配电网的经济效益最大化。

4.3 二级指标投资优先度计算

根据表 4 中的数据可以计算得到各二级指标的最优趋近度, 将这些值和最终权重值代入式(14)并取 $\alpha=0.5$, 即可得到各二级指标的加权最优趋近度, 再利用它们和各二级指标增量即可根据表 3 中的判断标准得到各二级指标的投资优先度, 如表 6 所示。

4.5 评价指标体系对比分析

分别利用只考虑当前发展水平、仅含 B1 和 B2 的传统评价指标体系以及本文所建立的评价指标体系对选取的五个经济开发区配电网进行评分, 评分结果如表 7 所示。

由表 7 可知, 由于添加了投资增效的指标 B3 和 B4 以及对这两者权重的加大, 本文所建立的评价指标体系评分计算结果相较于传统评价指标体系, 使得当前发展水平评分较低但投资增效评分较高的经济开发区 A 配电网的总分高于当前发展水平评分较高但投资增效评分较低的经济开发区 C 配电网的总分, 经济开发区 B 配电网的总分也有所提高。

表 7 五个经济开发区配电网评分结果

Table 7 Rating of distribution networks in 5 economic development zones

	经济开 发区 A	经济开 发区 B	经济开 发区 C	经济开 发区 D	经济开 发区 E
指标 B1 评分	73.92	82.34	87.56	75.61	86.30
指标 B2 评分	75.20	77.64	85.16	74.51	85.72
指标 B3 评分	86.39	81.55	79.48	78.42	91.46
指标 B4 评分	84.23	80.72	78.82	76.85	88.57
传统评价 指标体系 下总分	74.57 (中等)	79.96 (中等)	86.34 (良好)	75.05 (中等)	86.01 (良好)
本文评价 指标体系 下总分	81.80 (良好)	80.73 (良好)	81.44 (良好)	76.76 (中等)	88.65 (良好)

本文建立的评价指标体系从投资增效上找到了经济开发区 B 和 C 配电网的优势, 评分结果说明这两个开发区的配电网虽然发展水平一般但十分值得进一步投资, 这个结论是传统评价指标体系所无法得出的, 这充分体现了本文所建立的评价指标体系可以更加全面、合理地指导投资。

5 结论

本文结合配电网经济性和安全性的相关标准以及处于发展前中期的经济开发区的实际情况, 选取了更适合评价对象的评价指标集, 从而构建了经济开发区配电网综合评价指标体系, 可用于科学、合理、准确评价经济开发区配电网当前的发展水平和前一年的投资收益, 并用算例进行了验证。

本文提出了改进 AHP-TOPSIS 法, 对传统 AHP 算法求解得到的权重进行协调处理使得其满足经济性与安全性平衡发展的需求, 保证了各二级指标权重的合理性, 且适用于考虑经济性与安全性指标平衡或近平衡下的一般情况。在利用 TOPSIS 法对单个评价对象进行评价方面, 对趋近度的计算方法进行了改进并建立了相应的评分标准和投资优先度评判标准, 据此可以制定实现经济开发区配电网经济性与安全性平衡发展的优化投资策略。

参考文献

[1] 崔文婷, 刘洪, 杨卫红, 等. 配电网投资分配及项目优选研究[J]. 中国电力, 2015, 48(11): 149-154.
CUI Wenting, LIU Hong, YANG Wenhong, et al. Study on distribution network investment allocation and project selection optimization[J]. Electric Power, 2015, 48(11):

149-154.
[2] 梁惠施, 程林, 刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 76-81.
LIANG Huishi, CHENG Lin, LIU Sige. Monte Carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing microgrids[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 76-81.
[3] 赵华, 王主丁, 谢开贵, 等. 中压配电网可靠性评估方法的比较研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3295-3302.
ZHAO Hua, WANG Zhuding, XIE Kaigui, et al. Comparative study on reliability assessment methods for medium voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3295-3302.
[4] 刘伟, 郭志忠. 配电网安全性指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 86-91.
LIU Wei, GUO Zhizhong. Research on security indices of distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 86-91.
[5] 李欣然, 刘杨华, 朱湘有, 等. 高压配电网建设规模的评估指标体系及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 18-24.
LI Xinran, LIU Yanghua, ZHU Xiangyou, et al. Indices system and its application for evaluating planning scale of HV distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 18-24.
[6] 李欣然, 彭国荣, 朱湘有, 等. 地区配电网建设规模的模糊综合评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(6): 70-77.
LI Xinran, PENG Guorong, ZHU Xiangyou, et al. Fuzzy synthetic evaluation method of planning size of distribution grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(6): 70-77.
[7] 卫泽晨, 赵凤展, 王佳慧, 等. 网格化中低压智能配电网评价指标体系与方法[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 249-255.
WEI Zechen, ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, et al. Gridding evaluation index system and method of MV and LV intelligent distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 249-255.
[8] 韩震焘, 黄志伟, 葛少云, 等. 城市配电网综合评价体系[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 95-99.
HAN Zhentao, HUANG Zhiwei, GE Shaoyun, et al. A comprehensive evaluation system of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 95-99.
[9] 刘苑红, 信诚, 王浩国, 等. 智能配电网技术经济综合评价指标体系与方法[J]. 电气应用, 2014, 33(11): 22-26, 30.
LIU Yuanhong, XIN Cheng, WANG Haoguo, et al.

Technical and economic comprehensive evaluation index system and method of intelligent distribution network[J]. *Electrotechnical Application*, 2014, 33(11): 22-26, 30.

[10] 薛振宇, 李敬如, 陈楷, 等. 一种考虑协调系数的配电网综合评价方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(12): 15-19.

XUE Zhenyu, LI Jingru, CHEN Kai, et al. A comprehensive evaluation method for distribution network considering the coordination coefficient[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(12): 15-19.

[11] 宋人杰, 丁江林, 白丽, 等. 基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(14): 1-8.

SONG Renjie, DING Jianglin, BAI Li, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of distribution network based on cooperative game theory and trapezoidal cloud model[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 1-8.

[12] 刘胜利, 曹阳, 冯跃亮, 等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(2): 119-125.

LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(2): 119-125.

[13] MA L, ZHU T, GAO H, et al. Evaluation and sensitivity analysis for economical operation of active distribution network[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2018, 13: 715-724.

[14] 配电自动化规划设计技术导则: Q/GDW 11184—2014[S].

Technical guidelines for distribution automation planning and design: Q/GDW 11184—2014[S].

[15] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.

DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation method of AHP wight vector and its applications[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100.

[16] 田春笋, 殷奕恒, 关朝杰, 等. 基于供电分区的中高压配电网综合评价策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(21): 152-159.

TIAN Chunzheng, YIN Yiheng, GUAN Chaojie, et al. Comprehensive evaluation strategy of medium and high voltage distribution network based on power supply division[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(21): 152-159.

[17] 宋伶俐, 徐秋实, 吴耀文. 计及权重的电网投资效益评价与多目标优化[J]. *电力学报*, 2013, 28(6): 503-506.

SONG Lingli, XU Qiushi, WU Yaowen, et al. Evaluation and multi-objective optimization of power grid investment benefits taking into account the weights[J]. *Journal of Electric Power*, 2013, 28(6): 503-506.

[18] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与 TOPSIS 法的光伏发电项目风险评价研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(6): 1514-1519.

LI Yanbin, YU Xinyi, WANG Zhijie. Risk assessment on photovoltaic power generation project by grey correlation analysis and TOPSIS method[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(6): 1514-1519.

[19] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. *电网技术*, 2014, 38(10): 2741-2746.

ZHANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(10): 2741-2746.

[20] 赵凤展, 王佳慧, 卫泽晨, 等. 利用改进 G1-TOPSIS 法的智能配电网层次化评价[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 3169-3175.

ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, WEI Zechen, et al. Hierarchical evaluation of smart distribution grid based on improved G1-TOPSIS method[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 3169-3175.

收稿日期: 2018-12-22

作者简介:

徐 斌(1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、电力信息化; E-mail: ahlaxb@qq.com

马 骏(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划技术、电力经济技术; E-mail: lagdmj@163.com

陈 青(1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划技术、柔性输配电技术. E-mail: chenqing97@126.com

(编辑 魏小丽)