

# 计及投资效益评估的县级配电网 投资分配方法

李 锰<sup>1</sup>, 刘 巍<sup>2</sup>, 李 鹏<sup>1</sup>, 田春笋<sup>1</sup>, 高玉芹<sup>3</sup>,  
张宝丹<sup>4</sup>, 李 智<sup>3</sup>, 胡 钊<sup>3</sup>

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000;  
3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 4. 云南开放大学机电工程学院, 云南 昆明 650223)

**摘 要:**为了全面精准、合理科学地对县级配电网(110kV及以下)投资额进行分配,首先,在综合考虑县级配电网在新一轮投资后的投资效益情况下,构建县级配电网投资效益层次化综合评价指标体系。然后,运用五级集对分析模型对该指标体系进行评估。最后,基于单指标评估结果和指标体系综合评估结果构建投资分配调整系数模型,并结合未来用电量需求,对县级配电网投资分配额进行分析和计算。算例表明,该文所提出考虑投资效益评估结果的县级配电网投资分配方法可以用于制定县级配电网精准投资策略,实现县级配电网的精细化规划和有限资金的科学、合理、有效利用。

**关 键 词:**县级配电网;投资效益;综合评价;集对分析;投资分配

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.011 中图分类号:TM726 文章编号:1673-9140(2020)06-0083-07

## Method for allocation of county distribution network considering the investment benefit evaluation

LI Meng<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, TIAN Chunzheng<sup>1</sup>, GAO Yuqin<sup>3</sup>,  
ZHANG Baodan<sup>4</sup>, LI Zhi<sup>3</sup>, HU Po<sup>3</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 3. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Electromechanic Engineering College of Yunnan Open University, Kunming 650223, China)

**Abstract:** In order to comprehensively, accurately and reasonably allocate the investment amount of the county-level distribution network (110 kV and below), this paper builds a county-level distribution network investment benefit indicator system by considering the county investment benefits of a new round investment firstly. Then, the indicator system is evaluated by using the five-level set pair analysis model. Furthermore, Based on the single-index evaluation result and the comprehensive evaluation result of the indicator system, the investment allocation adjustment factor model is constructed. In the end, the county-level grid investment allocation amount is analyzed and calculated combining with the future electricity demand. The example shows that the proposed method can be used to formulate the

收稿日期:2019-01-08;修回日期:2019-03-16

基金项目:国家高技术研究发展计划("863"计划)(2015AA050101);国网河南省电力公司科技项目(5217L017000X)

通信作者:李 锰(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事配电网规划技术的研究;E-mail:hnlmn@163.com

investment strategy precisely for the county-level distribution network to realize the refined planning of the county-level distribution network and the scientific, reasonable and effective use of limited funds.

**Key words:** county-level distribution network; investment benefit; comprehensive evaluation; set pair analysis; investment distribution

县级配电网的投资在整个电力系统投资中占有一定比例,实现县级配电网的科学合理、精准有效投资能加快改善中国县级配电网布局。传统的配电网项目投资多侧重于项目的必要性、可行性、紧迫性来进行决策,对于具体的投资分配额缺乏一套明确的标准。目前也有一些文献对配电网投资分配方法进行了研究,文献[1]从配电网总体投资效益、单项目投资效益方面构建 35 kV 及以下配电网投资效益评价与决策模型,通过投资效益评分决定了单项目投资优先顺序,但缺乏对配电网未来规划规模的考虑;文献[2]从投资建设后的运行效果和投资效率方面建立投资效果后评价指标体系对配电网投资的合理性进行了分析,并没有投资分配方法进行进一步探讨;文献[3]构建了适用于项目群评价和单项目评价的配电网运行状态改善效果综合评价体系,建立省级电网公司投资分配模型,但没有精准分配到电压等级较低的配电网,且分配方法缺乏电网投资效益的全面考虑;文献[4]构建配电网规划项目评价指标,通过分析项目属性与项目评价指标的映射关系确定项目属性的重要程度,提出了配电网投资规模和项目属性的分配方法,但缺乏对各个指标的全面考虑,没有充分考虑每一项指标对投资额的影响。

该文充分考虑县级配电网投资后的投资效益,提出一套比较全面、系统、层次化的县级配电网投资效益综合评价指标体系,建立基于单指标评估结果的投资分配调整系数模型以充分考虑每项指标对投资分配的影响,并基于县级配电网未来的电量需求进行县级配电网投资分配额的分析与计算,以此实现县级配电网的精准投资<sup>[5-8]</sup>。

## 1 县级配电网投资效益综合评价指标体系

由于县级配电网网架结构复杂,其投资效益衡量指标的选取会对评价结果产生很大影响。配电网投资一方面是为了满足用户用电需求及用电安全可

靠性,另一方面则是为了提高投资利用率和电网企业经济性。因此,该文从用户侧和管理侧选取能够全面衡量县级配电网投资效益的评价指标。县级配电网投资在用户侧的效益可以体现在运行效果上,投资效率可用来衡量投资管理侧的效益。因此,该文从投资效率和运行效果这两方面对县级配电网投资效益进行分析。

### 1.1 运行效果评价指标体系

供电能力是体现运行效果优劣的主要因素,也最能体现用户侧的利益,同时,投资建设的成效也可以从宏观上反映运行效果。因此,该文从供电能力、电网结构这 2 个方面来分析投资后的运行效果,所建立的县级配电网运行效果评价指标体系如图 1 所示,考虑到指标数据的时间性,其统计和计算时间单位均为年<sup>[9]</sup>。

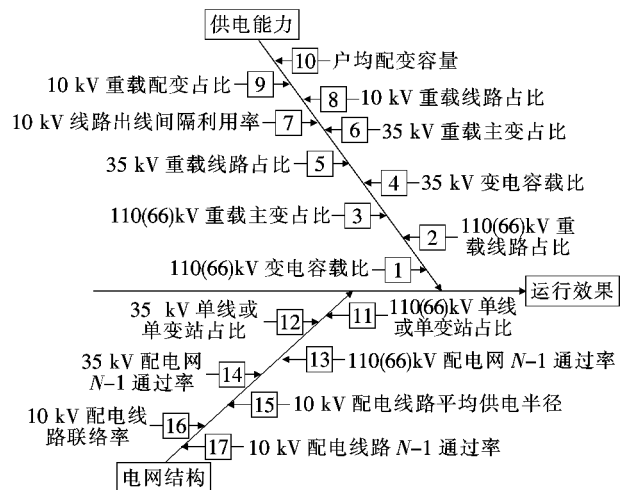


图 1 县级配电网运行效果评价指标体系

Figure 1 County-level distribution network operation effect evaluation index system

### 1.2 投资效率评价指标体系

投资效率从宏观上可以表现在县级配电网投资的阶段性经济性指标、电网发展情况。因此,该文从供电质量、电能损耗、设备利用率和经济效益 4 个方面对投资效率进行分析,所构建的县级配电网投资效率评价指标体系如图 2 所示<sup>[10]</sup>。

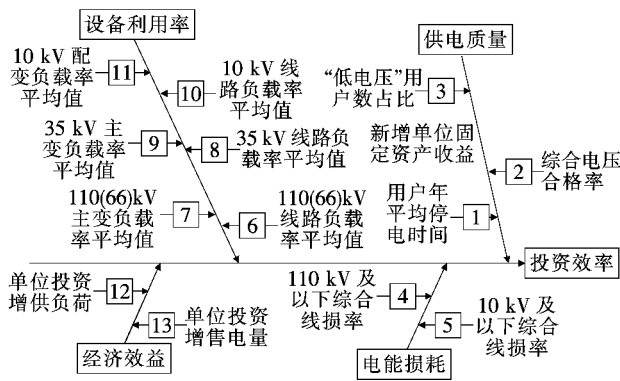


图 2 县级配电网投资效率评价指标体系

Figure 2 County-level distribution network investment efficiency evaluation index system

## 2 县级配电网投资效益综合评价方法

### 2.1 集对分析模型

设 2 个集合  $A$  和  $B$  组成集对  $H = (A, B)$ , 通过对集合  $A$  和  $B$  的特性分析可以得到集  $H$  的总特性个数  $p$ , 设集合  $A$  和  $B$  包含的相同特性的个数为  $x$ , 对立特性的个数为  $z$ , 既不完全相同, 亦不完全对立的特性的个数为  $y = p - x - z$ . 集合  $A$  和  $B$  的联系度  $u$  定义为

$$u = a + bi + ck \quad (1)$$

式中  $u$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为同一度、差异度、对立度,  $a = x/p$ ,  $b = y/p$ ,  $c = z/p$ ;  $i$  为差异度系数, 其取值区间为  $[-1, 1]$ ;  $k$  为对立度, 通常取  $-1^{[11-12]}$ .

县级配电网投资效益指标体系  $R$  和指标评价等级标准  $G$  构成集对  $H = (R, G)$ , 按照《配电网发展水平导则》中评价指标目标值划分的 5 个等级, 将联系度相应划分为 5 个等级, 所建立的集对分析的五级联系度模型为

$$u = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + b_3 i_3 + ck \quad (2)$$

据此分析集合  $R$  和  $G$  之间的同一度和差异度, 其中各级界限值及对应等级如表 1 所示<sup>[13-15]</sup>.

表 1 联系度等级划分

Table 1 Classification table of connection levels

等级	联系度	界限值
A+	1~0.6	$S_1=1$
A	0.6~0.2	$S_2=0.8$
B	0.2~-0.2	$S_3=0.6$
C	-0.2~-0.6	$S_4=0.4$
D	-0.6~-1	$S_5=0.2$

设  $X$  为各个评价对象指标的  $n \times m$  维原始数据矩阵, 即

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $n$  和  $m$  分别为评估对象个数和指标个数。为了消除指标间量纲的影响, 对原始矩阵  $X$  进行标准化处理, 即

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i < n} x_{ij}}{\max_{1 \leq i < n} x_{ij} - \min_{1 \leq i < n} x_{ij}}, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$y_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i < n} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i < n} x_{ij} - \min_{1 \leq i < n} x_{ij}}, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式(4)、(5)分别用于效益型和成本型指标标准化, 据此得到规范矩阵  $Y$ , 即

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此, 集对分析的五级联系度模型为

$$\begin{cases} u_{ij} = a_{ij} + b_{1ij}i_1 + b_{2ij}i_2 + b_{3ij}i_3 + c_{ij}k = \\ \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0k, \quad y_{ij} \geq S_1 \\ \frac{y_{ij} - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{S_1 - y_{ij}}{S_1 - S_2}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0k, S_2 \leq y_{ij} < S_1 \\ 0 + \frac{y_{ij} - S_3}{S_2 - S_3}i_1 + \frac{S_2 - y_{ij}}{S_2 - S_3}i_2 + 0i_3 + 0k, S_3 \leq y_{ij} < S_2 \\ 0 + 0i_1 + \frac{y_{ij} - S_4}{S_3 - S_4}i_2 + \frac{S_3 - y_{ij}}{S_3 - S_4}i_3 + 0k, S_4 \leq y_{ij} < S_3 \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{y_{ij} - S_5}{S_4 - S_5}i_3 + \frac{S_4 - y_{ij}}{S_4 - S_5}k, S_5 \leq y_{ij} < S_4 \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1k, \quad y_{ij} < S_5 \end{array} \right. \end{cases} \quad (7)$$

式中  $i \in n, j \in m, y_{ij}$  为各指标的标准化值;  $a_{ij}$  为同一度,  $b_{1ij}$ 、 $b_{2ij}$ 、 $b_{3ij}$  为差异度,  $c_{ij}$  为对立度;  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  为差异度系数, 取值区间均为  $[1, -1]$ , 按照均分原则<sup>[16]</sup>, 其取值分别为 0.5, 0, -0.5;  $S_5 < S_4 < S_3 < S_2 < S_1$ .

对指标联系度  $u_{ij}$  各个指标的对应客观权重  $w_j$  进行合成运算, 可以求得第  $i$  个评价对象的总联系度  $u_i$ , 即

$$u_i = \sum_{j=1}^m (u_{ij} \cdot w_j) \quad (8)$$

为了使得评估结果更加直观,按照集对分析的五级联系度等级划分标准设定各个等级最大值对应的评分,具体量化分级如表2所示。

表2 评估结果量化分数

Table 2 Quantification score table of evaluation results

等级	评分	等级	评分	等级	评分
A+	100~80	B	60~40	D	20~0
A	80~60	C	40~20		

## 2.2 客观权重的计算

作为一种客观赋权法,CRITIC法以对比强度和冲突性来衡量权重<sup>[5]</sup>,对比强度用标准差进行量化,其量化值为

$$\delta_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}, j=1,2,\dots,m \quad (9)$$

式中  $\bar{x}_j$  为第  $j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ) 个指标数据的平均值。由于指标间的相关性越大,冲突性越小,因此,可以相关性来表征冲突性。第  $j$  个指标与其他指标间冲突性的量化值为

$$\epsilon_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (10)$$

式中  $r_{ij}$  为第  $l$  ( $l=1,2,\dots,m$ ) 个指标  $y_{kl}$  和第  $j$  个指标  $y_{kj}$  之间的相关系数

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_{kl} \cdot y_{kj}) \quad (11)$$

综合考虑指标的对比强度和冲突性,得第  $j$  个指标的权重为

$$w_j = v_j / \sum_{j=1}^m v_j \quad (12)$$

式中  $v_j$  为第  $j$  个评价指标所包含的信息量,其量化值为

$$v_j = \delta_j \epsilon_j \quad (13)$$

## 3 基于投资效益评估结果的投资分配方法

为了更加全面、精准地实现县配电网投资,该文考虑县级配电网的现状,由县级配电网投资效益评估结果得到投资分配综合调整系数<sup>[17]</sup>,同时兼顾现

状负荷和未来负荷需求,得到第  $i$  个县的配电网投资额占整个市辖范围内配电网投资的占比为

$$I_i = \frac{(P_i \cdot q_i / U_i + G_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot q_i / U_i + G_i)} \quad (14)$$

式中  $q_i$  为第  $i$  个县配电网的综合投资调整系数; $P_i$  为第  $i$  个县现状负荷规模, MW; $G_i$  为第  $i$  个县2017—2020年最大负荷增量规模, MW; $U_i$  为评估对象的运行效果和投资效率综合评估得分,其计算式为

$$U_i = (g_{1i} + g_{2i}) / 2 \quad (15)$$

各县配电网的综合投资调整系数为

$$q_i = (k_{1i} g_{1i} + k_{2i} g_{2i}) / 2 \quad (16)$$

式中  $g_{1i}$ 、 $k_{1i}$  分别为第  $i$  个县配电网投资效率水平评估分数、调整系数; $g_{2i}$ 、 $k_{2i}$  分别为第  $i$  个县配电网运行效果水平评估分数、调整系数。

该文引入因素理论中的保健和激励因素<sup>[7]</sup>,定义保健因素是考虑县级配电网发展水平现状,仅需维持其基本正常需求的系数,激励因素是能够引导县级配电网运行效果和投资效率指标进一步提升的系数。

投资效率评价激励因子  $k_{1i\max}$ 、保健因子  $k_{1i\min}$ 、运行效果评价激励因子  $k_{2i\max}$  和保健因子  $k_{2i\min}$  计算式分别为

$$k_{1i\max} = g_{1i\max} / g_{1i\min} \quad (17)$$

$$k_{1i\min} = g_{1i\min} / g_{1i\max} \quad (18)$$

$$k_{2i\max} = g_{2i\max} / g_{2i\min} \quad (19)$$

$$k_{2i\min} = g_{2i\min} / g_{2i\max} \quad (20)$$

调整系数计算的基本原则:用单指标评估得分与指标体系综合得分相比较,比较第  $i$  个评估对象投资效率单指标得分与该评估对象的投资效率评估总得分,并与指标的客观权重进行加权,若加权结果大于0,则  $k_{1i}$  取值区间为  $[k_{1i\min} \ 1]$ ;若小于0,则  $k_{1i}$  取值区间为  $[1 \ k_{1i\max}]$ 。同理,比较第  $i$  个评估对象运行效果单指标得分与该评估对象运行效果评估总得分,并与指标的客观权重进行加权,若加权结果大于0,则  $k_{2i}$  取值区间为  $[k_{2i\min} \ 1]$ ;若小于0,则  $k_{2i}$  取值区间为  $[1 \ k_{2i\max}]$ 。

$$K_i = \sum_{j=1}^m \frac{(u_{1ij} - u_{1i}) \cdot w_{1j}}{(u_{2ij} - u_{2i}) \cdot w_{2j}} \quad (21)$$

如图3所示,由式(21)计算第  $i$  个评估对象所

在位置的斜率  $K_i$ , 其对应的角度为  $\theta = \arctan K_i$ , 再根据  $k_{2i}$  和  $k_{1i}$  的变化区间(取值变化区间  $\infty$  角度变化区间), 可以分析计算出运行效果和投资效率的调整系数  $k_{2i}$  和  $k_{1i}$ , 进而由式(14)、(16)得到县级配电网投资分配占比和调整系数。

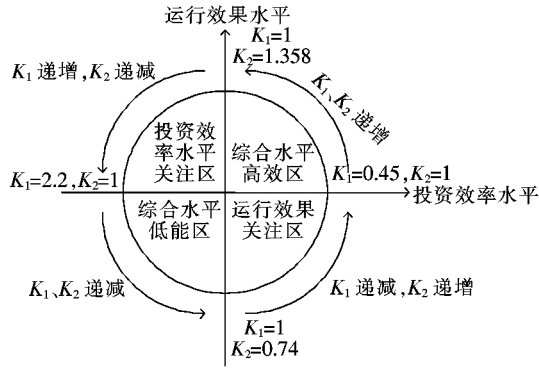


图 3 调整系数变化趋势

Figure 3 Adjustment factor change trend

### 4 算例分析

该文以河南省新乡市所辖 5 个县的配电网作为评价对象, 为使得投资最大限度满足未来用户电量需求, 选取负荷预测数据均为最大负荷数据, 其中, 2017 年各县最大负荷数据以及 2020 年预测最大负荷数据如表 3 所示, 负荷预测数据来源于河南省电网规划。

基于 2017 年各县的指标数据, 对其投资效益进行分析, 由式(4)、(5)求得运行效果和投资效率指标标准化数据, 由 CRITIC 法求得运行效果和投资效率指标客观权重, 分别如表 4、5 所示。

由式(7)、(8)求得 5 个县配电网的运行效果和投资效率联系度及其量化得分, 如表 6 所示。由此可见, 在运行效果方面, 有 4 个县的配电网水平达到 A 级, 新乡县等级最低, 说明其运行效果类指标有很大的提升空间; 在投资效率方面, 除长垣县达到 A 级, 其他 4 个县配电网均在 B 级以下, 这说明下一轮投资应该重点提升投资效率类指标。综合考虑 5 个县配电网的运行效果和投资效率, 长垣县达到 A 级, 其余 4 个县均处于 B 级。

由式(17)~(20)计算得到投资效率的激励因子  $k_{1max}$ 、保健因子  $k_{1min}$  分别为 2.204 1、0.453 7; 运行效果的激励因子  $k_{2max}$ 、保健因子  $k_{2min}$  分别为 1.358 1 和 0.736 3。由式(14)、(16)计算得到 5 个县的投资

分配占比以及投资效率和运行效果调整系数, 如表 7 所示。

表 3 负荷数据

Table 3 Load data MW

县名	最大负荷		
	2017 年	2020 年	负荷增量
长垣县	390	510	120
原阳县	345	470	125
延津县	375	470	95
新乡县	562	634	72
卫辉县	460	590	130

表 4 运行效果指标数据和客观权重

Table 4 Operational effect indicator data and objective weights

指标编号	评价对象原始数据标准化					指标客观权重
	长垣县	原阳县	延津县	新乡县	卫辉县	
1	0.910 1	0.910 1	0.896 5	0.904 7	0.896 5	0.017 0
2	0.925 8	0.900 2	0.900 2	0.900 2	0.912 5	0.028 4
3	1.000 0	0.949 6	0.858 9	0.788 4	1.000 0	0.227 1
4	1.000 0	0.788 4	0.888 2	0.692 7	0.811 1	0.318 3
5	0.977 3	0.942 1	0.917 9	0.856 1	0.937 6	0.108 0
6	0.406 7	0.387 4	0.279 6	0.287 3	0.344 1	0.270 9
7	0.014 1	0.014 1	0.011 9	0.007 0	0.011 1	0.016 8
8	0.006 3	0.006 3	0.006 3	0.007 0	0.007 2	0.002 7
9	0.993 3	0.995 1	0.995 3	0.993 3	0.989 6	0.004 9
10	0.002 3	0.000 0	0.001 2	0.000 3	0.000 2	0.005 8

表 5 投资效率指标数据和客观权重

Table 5 Investment efficiency indicator data and objective weights

指标编号	评价对象原始数据标准化					指标客观权重
	长垣县	原阳县	延津县	新乡县	卫辉县	
1	0.000 5	0.000 9	0.001 9	0.001 1	0.003 3	0.002 0
2	1.000 0	0.995 1	0.993 5	0.993 3	0.994 9	0.001 9
3	0.787 5	0.604 2	0.691 7	0.637 2	0.676 4	0.068 0
4	0.960 3	0.973 4	0.974 4	0.947 0	0.940 9	0.011 0
5	0.999 9	0.998 3	1.000 0	0.996 8	0.997 9	0.001 0
6	0.751 7	0.284 9	0.356 0	0.115 3	0.348 4	0.294 6
7	0.694 3	0.748 6	0.725 6	0.818 5	0.765 6	0.043 0
8	0.545 3	0.311 1	0.379 2	0.458 7	0.441 2	0.107 1
9	0.658 3	0.875 4	0.579 8	0.694 7	0.723 2	0.104 9
10	0.763 7	0.305 1	0.463 3	0.346 6	0.604 9	0.217 1
11	0.483 5	0.541 0	0.380 8	0.320 4	0.637 6	0.148 2
12	0.001 6	0.001 5	0.000 6	0.001 5	0.001 5	0.000 7
13	0.001 7	0.001 1	0.001 4	0.001 6	0.001 6	0.000 4

表6 5个县配电网运行效果和投资效率的  
联系度及其量化得分

Table 6 The connection degree between the operation efficiency and investment efficiency of the distribution network in five counties and its quantitative score

县名	运行效果 总联系度	运行效 果得分	投资效率 总联系度	投资效 率得分	总得分
长垣县	0.532	76.61	0.210	60.498	68.56
原阳县	0.319	65.97	-0.232	38.387	52.18
延津县	0.340	67.01	-0.315	34.244	50.63
新乡县	0.128	56.41	-0.451	27.448	41.93
卫辉县	0.365	68.25	-0.101	44.954	56.60

表7 5个县投资效率调整系数、运行效果  
调整系数以及投资分配占比

Table 7 Investment efficiency adjustment coefficient, operating effect adjustment coefficient and investment allocation ratio of five counties

县名	投资效率调整 系数 $k_1$	运行效果调整 系数 $k_2$	投资分配占比/ %
长垣县	1.890	1.125	18.99
原阳县	1.880	1.186	17.15
延津县	2.050	1.259	17.80
新乡县	0.994	1.180	23.82
卫辉县	1.960	1.200	22.23

## 5 结语

科学合理的投资效益评价是实现县级配电网精准投资的关键环节。针对县级配电网的复杂性,该文确定了影响县级配电网运行效果和投资效率的关键指标,运用集对分析法分别对县级配电网运行效果和投资效率进行了分析,其结果可以为制定县级配电网精准投资策略提供合理、可靠的依据。此外,根据运行效果和投资效率评估得分,充分考虑每个指标的评估结果,用每个指标的评估得分与总体得分相比较,由比较结果确定投资分配调整系数的范围,再根据调整系数变化趋势图计算出运行效果和投资效率的调整系数,进而确定县级配电网投资分配调整系数以及各个县级配电网投资占比。对县级配电网前期投资效益作出科学、全面准确的评估是制定县级配电网精准投资策略的重要前提,基于实

际投资评估结果进行投资分配可以全面、有效改善县级配电网投资现状的不足,提升县级配电网投资的科学性、实效性和合理性。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴争,崔文婷,龙禹,等. 配电网投资效果后评价及投资合理性分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(12):96-102.  
WU Zheng, CUI Wenting, LONG Yu, et al. Post-evaluation and rationality analysis of distribution network investment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(12): 96-102.
- [3] 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 Weihong, et al. Study on distribution network investment allocation and project selection optimization[J]. Electric Power, 2015, 48(11): 149-154.
- [4] 李文,崔文婷,冯建华,等. 考虑项目属性的中压配电网投资决策方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(5):50-55+62.  
LI Wen, CUI Wenting, FENG Jianhua, et al. Decision-making method for investment on medium-voltage distribution network considering project attributes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(5): 50-55+62.
- [5] Wu kehe, Yao Peng. Research on energy substitution terminal energy application based on CRITIC Algorithm[C]// 10th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Changsha, China, 2017.
- [6] 王维洲,汤红卫,刘福潮,等. A+~E类区域配电网降损潜力评估模型研究[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(2):59-65.  
WANG Weizhou, TANG Hongwei, LIU Fuchao, et al. Study on the evaluation model of energy loss reduction

- potential for A+~E regional distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018,33(2): 59-65.
- [7] 孔祥玉,尧静涛,崔凯,等.考虑分布式电源接入的区域配电网规划投资决策方法[J].中国电力,2020,53(4): 41-48.  
KONG Xiangyu, YAO Jingtao, CUI Kai, et al. Investment decision-making method for regional distribution network planning considering distributed generations [J]. Electric Power, 2020, 53(4): 41-48.
- [8] 王国权,乔琨,侯荣均,等.配电网投资效益评价及投资项目的优选[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(12):146-150.  
WANG Guoquan, QIAO Kun, HOU Rongjun, et al. Evaluation on investment returns of distribution network and optimization of investment projects[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(12): 146-150.
- [9] 韩俊,谢珍建,耿路,等.中压配电网的高可靠性接线模式综合评估方法[J].中国电力,2020,53(3):91-100.  
HAN Jun, XIE Zhenjian, GENG Lu, et al. Research on comprehensive evaluation method of high reliability wiring mode for medium voltage distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 91-100.
- [10] 何凯,王剑晓,王佳伟,等.基于全成本电价的电网规划方案评估与优选[J].中国电力,2020,53(3):66-75.  
HE Kai, WANG Jianxiao, WANG Jiawei, et al. Evaluation and optimization of power network planning scheme based on total-cost price[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 66-75.
- [11] 李建林,牛萌,周喜超,等.能源互联网中微能源系统储能容量规划及投资效益分析[J].电工技术学报,2020,35(4):874-884.  
LI Jianlin, NIU Meng, ZHOU Xichao, et al. Energy storage capacity planning and investment benefit analysis of micro-energy system in energy interconnection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 874-884.
- [12] 王绵斌,谭忠富,丁亚伟,等.基于集对分析理论的发电投资决策模型[J].电网技术,2009,33(20):94-99.  
WANG Mianbin, TAN Zhongfu, DING Yawei, et al. Power generation investment decision-making model based on set pair analysis theory[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 94-99.
- [13] 张全,代贤忠,韩新阳,等.基于全生命周期投入产出效益的电网规划精准投资方法[J].中国电力,2018,51(10):171-177.  
ZHANG Quan, DAI Xianzhong, HAN Xinyang, et al. An accurate investment method of power grid based on full life cycle input-output benefit[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 171-177.
- [14] 吕朋蓬,赵晋泉,李端超,等.电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J].电网技术,2015,39(8):2245-2252.  
LV Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, et al. An assessment index system for power grid operation status and corresponding synthetic assessment method [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2245-2252.
- [15] 叶彬,刘敦楠,杨娜,等.基于实物期权的增量配电网投资决策[J].电力系统自动化,2018,42(21):178-185.  
YE Bin, LIU Dunnan, YANG Na, et al. Realoptions based investment decision-making for incremental distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 178-185.
- [16] 杨海峰,崔莹莹,崔巍.基于多目标函数的电网项目投资组合[J].电力科学与技术学报,2013,28(2):75-79+84.  
YANG Haifeng, CUI Yingying, CUI Wei. Research of multi-objective function based power grid project portfolio[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(2): 75-79+84.
- [17] 李阳,刘友波,黄媛,等.配电网中长期动态规划投资的标尺激励评价方法[J].电力自动化设备,2018,38(6): 95-102.  
LI Yang, LIU Youbo, HUANG Yuan, et al. Yardstick motivation evaluation method for mid-and long-term dynamic planning investment of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 95-102.