

有源配网后评价指标体系及其综合评价方法

段穰达

(三峡新能源海上风电运维江苏有限公司, 江苏省 盐城市 224000)

A Post-evaluation Index System of Active Distribution Network Project and Its Comprehensive Evaluation Method

DUAN Rangda

(Three Gorges New Energy Offshore Wind Power Operation and Maintenance of Jiangsu Co., Ltd.,
Yancheng 224000, Jiangsu Province, China)

摘要: 配网项目后评价通过对项目的全面总结评价,可以起到总结经验、吸取教训、提高配电网项目建设质量及配电项目决策水平的作用。在分布式电源大量接入配网,配电网结构、运行控制等均发生了变化的背景下,为了达到提高配电网项目建设质量及配电项目决策水平的目的,对传统配网评估指标体系进行了优化,新增或修正了相应评估指标,建立了适合有源配电网工程后评价的指标体系,并给出与之相适应的模糊综合评价方法。最后通过算例验证了该指标体系及评价方法的可行性与优越性。

关键词: 有源配电网; 后评价; 分布式电源; 模糊综合评价

ABSTRACT: Post-evaluation of distribution network project can be used to sum up experience, learn lessons and improve the decision-making level through the comprehensive evaluation of the whole project. With a large number of distributed power sources accessing the distribution network in recent years, the structure and operation control of the distribution network have changed. In order to improve the construction quality of distribution network project and the decision-making level of distribution project, the traditional distribution network evaluation index system was optimized, corresponding evaluation indexes were added or modified, an index system suitable for the post-evaluation of active distribution network project was established. The corresponding fuzzy comprehensive evaluation method was proposed. Finally, the feasibility and superiority of the index system and evaluation method were verified by an example.

KEY WORDS: active distribution network; post-evaluation;

distributed generation; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

对于投资项目而言,在项目竣工验收并经过一定时间的投产运营后进行项目后评价具有重大意义,即对项目的目的是否达成、项目的具体执行情况、项目的经济效益及社会影响等问题作全面的分析与总结。配网工程项目具有投资巨大、周期时间较长、风险大等特点,对整个国民经济和人民生活的发展有着巨大影响^[1-4]。因此,对配电网项目进行后评价,可以判断配网项目是否完成了预期目标,项目相关效益指标是否达到项目要求,同时,从项目后评价的结果出发,可以分析项目的经验教训,提高配网项目建设决策水平。

国外对项目后评价的研究主要集中在后评价方法上。美国 T.L.Satty 教授提出的层次分析法通过构造出分层的结构模型,从而将一个复杂问题分解为各组成因素再进行决策,为项目后评价问题提供了理论思路^[5-9]。文献[10]将模糊数学与层次分析法相结合,采用隶属度的方法来解决具有模糊性的难以量化的问题。文献[11]分析了多元统计问题,并将其运用于评价问题中。文献[12]研究了项目的评估周期问题,指出了进行项目后评价的必要性。

目前国内对项目后评价的评价方法以及如何建立后评价模型的研究很多。文献[13]基于项目后评价的现有理论,提出了综合后评价的发展趋

势。文献[14]以模糊数学的思想方法解决了含软指标的综合评价问题。文献[15]通过人工神经网络聚类与模式识别等理论,来解决指标的归一量化问题。文献[16]通过定义评价准则,给出考虑分布式电源(distributed generation, DG)启动及运行特性的指标体系,并给出了综合评价方法。文献[17]针对有源配电网规划方案的多元决策主体,建立了基于满意度和一致性的专家权重优化模型,在得到方案排序的同时获得各主体对最优方案的满意度向量。文献[18]基于主动配电网的不同利益相关者需求,构建一套较完整的主动配电网现状网架的综合评价指标体系,并对各评价指标的权重分配以及综合评价的具体方法进行分析。文献[19]通过对配电网运行的现状分析找到现有配电网网架的薄弱环节,进而设计多个配电网规划方案,并计算出不同配电网规划方案的单项与综合评估指标,最后选出指标最优的规划设计方案。文献[20]重点就主动配电网下分布式能源系统的投资规划、优化运行、效益评价、投资模式及保障机制这几大方面进行研究,旨在为相关主体提供分析和决策依据。具体到电力工程建设领域,后评价的相关研究成果也很多。文献[21]建立了输变电项目的后评价指标体系。文献[22]构建了配网投资后评价指标体系,以对区域配网投资作客观评价。文献[23]通过引入有序加权算子来计算输变电项目后评价的因素权重。文献[24]建立了一套较为完整的配网项目后评价指标体系,并构建了其综合评价模型。文献[25]运用内点法求解构建的配网量化综合评价模型,并给出评价结果。文献[26]运用德尔菲法建立了中压配电网关键评价指标体系,并给出其中关键评价指标的提取算法。

然而,目前大部分项目后评价体系及方法均以常规电网为主体,而未能考虑分布式电源并网对配网后评价问题带来的影响。事实上,随着近年来大量分布式电源接入配电网,若采用常规评价指标定量评估,其评价结果将与真实情况存在较大偏差。因此,本文针对上述问题,充分考虑分布式电源大量接入配网对配网建设的影响,对涉及的指标作优化与修正,同时新增相应指标,

在传统配网指标体系的基础上建立了一套有源配电网后评价指标体系,并给出与该有源配电网后评价指标体系相适应的模糊综合评价方法,最后通过算例验证了该指标体系及评价方法的可行性和优越性。

1 有源配电网项目后评价指标体系

1.1 指标体系构建

目前大部分配网后评价方法主要以常规电网作为主体,但随着分布式电源并网项目大力发展,后评工作在构建评价指标体系时必须切实考虑分布式电源对配网后评价的影响。

本文将分布式电源对配网的影响归纳为配网性能及经济效益2方面,如图1所示。其中,配网性能方面的影响主要体现在配网安全性及分布式电源并网性能2方面。针对上述分布式电源影响内容,本文对传统配电网后评价指标体系进行优化,新增或修正相应指标,从而建立有源配电网工程后评价的指标体系。

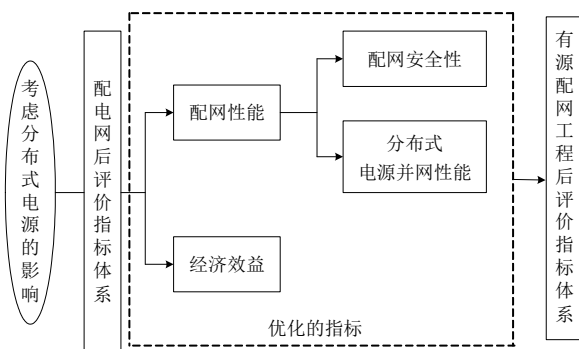


图1 分布式电源对配网的影响

Fig. 1 Impact of DG on the distribution network

运用层次分析法的相应理论,建立包含四级指标的有源配电网工程后评价指标体系,如图2所示。在配网综合后评价这个一级指标下,共分为实施过程、经济效益、配网性能、社会影响及可持续性这4个二级指标。

由于二级指标中的实施过程、影响效果及可持续性指标与传统电网指标体系中相似,本文不加赘述,下文仅对本文改进的经济效益和配网性能指标下的相应指标进行说明。

1.2 经济效益

传统电网的经济效益的主要评价指标有投资

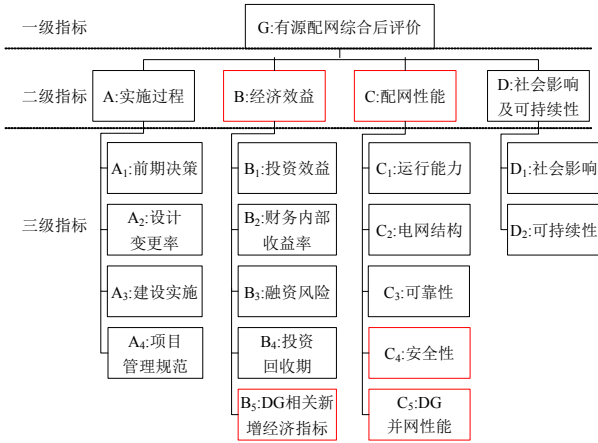


图2 有源配网项目后评价指标体系层次结构

Fig.2 Hierarchical structure of the active distribution network post-evaluation system

效益评价、财务内部收益率、融资风险及回收期。对于有源配电网而言，应考虑分布式电源带来的经济性。DG 通常以可再生能源为主，其成本与火电有很大的差别。在考虑 DG 并网对配网经济性的影响后，本文新增 DG 相关经济性指标，包括以下 6 方面：

1) DG 单位发电量成本。

$$C_G = (F_{DG,m} + F_{fuel} + F_{DG,c}) / P_{DG} \quad (1)$$

式中： $F_{DG,m}$ 为 DG 年运行维护费用； F_{fuel} 为年发电燃料费用； $F_{DG,c}$ 为 DG 建设安装费用等年值； P_{DG} 为分布式电源年发电量。

2) DG 单位发电量年生产维护费。

$$C_m = (F_{DG,m} + F_{fuel}) / P_{DG} \quad (2)$$

3) 系统平均线损率。

$$L = (\tilde{P}_{DG,su} + P_{DG,su} - P_{DG,sa}) / (\tilde{P}_{DG,su} + P_{DG,su}) \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\tilde{P}_{DG,su}$ 为非 DG 年供电量； $P_{DG,su}$ 为 DG 年供电量； $P_{DG,sa}$ 为 DG 年售电量。

4) 系统线损改善程度。

$$I_L = (L' - L) / L \times 100\% \quad (4)$$

式中 L' 为未安装 DG 时系统平均线损率。

5) 单位发电量污染物排放治理减少费用。

$$C_p = \left| \sum_{i=1}^n A'_{d,i} F'_{t,i} - \sum_{i=1}^n A_{d,i} F_{t,i} \right| / P_{DG} \quad (5)$$

式中： $A'_{d,i}$ 、 $F'_{t,i}$ 分别为安装 DG 前第 i 种污染物年排放量及年治理费用； $A_{d,i}$ 、 $F_{t,i}$ 分别为安装 DG 后第 i 种污染物年排放量及年治理费用。

6) 停电经济损失变化率。

$$I_e = \left| \sum_{j=1}^m A'_{o,j} C_{o,j} - \sum_{j=1}^m A_{o,j} C_{o,j} \right| / \sum_{j=1}^m A'_{o,j} C_{o,j} \quad (6)$$

式中： $A'_{o,j}$ 、 $A_{o,j}$ 分别为安装 DG 前后第 j 种负荷停电电量； $C_{o,j}$ 为第 j 种负荷停电损失。

1.3 配网性能

传统意义上对配网进行性能评价时，主要从配网运行能力、电网结构、安全可靠性等方面进行考量。本文在分布式电源影响下进行分析，细化了配电网安全性能指标，增加了分布式电源影响下的相应评估指标。

同时，为考量有源配网的分布式电源并网性能，增加 DG 并网性能指标，并采用 DG 消纳率进行刻画。

具体指标如下：

1) 短路容量。

$$S_s = \sqrt{3} U_s I_s \quad (7)$$

式中： U_s 为某节点故障前线电压； I_s 为该节点三相短路时短路电流。

2) 母线电压合格率。

$$R_{bus} = (1 - t_o / t_a) \times 100\% \quad (8)$$

式中： t_o 为电压超限时间； t_a 为电压监测时间。

3) 线路负荷节点电压合格率。

$$R_U = n_q / n \quad (9)$$

式中： n_q 为线路负荷节点电压合格点数； n 为线路总负荷节点数。

4) 负荷节点电压改善程度。

$$U_{im} = R'_U / R_U \quad (10)$$

式中 R'_U 为安装 DG 后负荷节点电压合格率。

5) 负荷节点电压平均偏移率。

$$I_{d,U} = \sum_{j=1}^m |U_a - U_N| / (n U_N) \times 100\% \quad (11)$$

式中： U_a 为负荷点实际电压； U_N 为线路额定电压。

6) 母线负载裕度变化率。

$$I_L = (L_{\max} - L'_{\max}) / L'_{\max} \times 100\% \quad (12)$$

式中 $L'_{\max}$ 、 $L_{\max}$ 分别为安装 DG 前后母线最大可带负载。

7) 母线电压稳定裕度变化率。

$$I_U = (U_{\max} - U'_{\max}) / U'_{\max} \times 100\% \quad (13)$$

式中 $U'_{\max}$, $U_{\max}$ 分别为安装 DG 前后母线最大允许电压。

8) DG 消纳率。

$$\eta = \frac{P_{\text{DG}}}{L_C} \times 100\% \quad (14)$$

式中 L_C 为负荷用电电量。

2 基于模糊综合评价法的成功度评价

本文涉及指标具有评定模糊性, 即某些指标难以用确定的定量关系描述, 且综合后评价只关注评价结果的优劣程度。故本文采用模糊理论对上述有源配网指标体系进行综合后评价, 并给出成功度评价。该方法的具体步骤如下: 1) 建立模糊评价矩阵; 2) 确定各层指标权重; 3) 计算指标综合评价结果; 4) 进行成功度评价。

2.1 模糊评价矩阵的建立

将某上层指标的各下层指标在评判等级论域上作量化, 即可确定各下层指标模糊评价隶属度, 从而形成该上层指标的模糊评价矩阵。

2.1.1 建立评判等级论域

对于每个指标而言, 可以对其进行等级评定, 从而建立评判等级论域。本文划分了 1—5 级的评价等级, 分别对应于完全成功、基本成功、部分成功、不成功与失败。则评判等级论域为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} \quad (15)$$

同时, 不妨给定与评判等级 1—5 级相对应的分数, 并写成向量形式如下:

$$G = (100, 80, 60, 40, 20) \quad (16)$$

2.1.2 模糊评价矩阵

在建立了评判等级论域后, 要逐个对某上层指标 U_k 包含的 m 个下层指标在各评语等级 v_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 上进行量化。

即对于各下层指标构成的集合:

$$S_{U_k} = \{U_{k1}, U_{k2}, \dots, U_{km}\} \quad (17)$$

分别确定其第 i ($i=1, 2, \dots, m$) 个下层指标对等级模糊子集的隶属度为

$$U_{ki} = (u_{ki1}, u_{ki2}, \dots, u_{ki5}) \quad (18)$$

1) 定性指标隶属度的确定。

对于定性分析指标, 可以采用模糊统计方法

确定其隶属度, 即以问卷调查的形式让各专家对该指标进行判断, 并给出评判等级。假设得到 n 份样本, 则对应于各评判等级的样本数为 a_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$), 且满足:

$$\sum_{i=1}^5 a_i = n \quad (19)$$

则该指标对于评判等级论域的隶属度为

$$U_{ki} = (u_{ki1}, u_{ki2}, \dots, u_{ki5}) = \left(\frac{a_1}{n}, \frac{a_2}{n}, \dots, \frac{a_5}{n}\right) \quad (20)$$

2) 定量指标隶属度的确定。

对于定量指标, 可以结合指标的具体特点采用合适的模糊分布, 再根据指标数值就可以得到相应的隶属度。模糊分布可分为偏小型、偏大型和中间型 3 类^[27]。

对于某些数值越小越好的指标, 宜采用偏小型模糊分布; 对于数值越大越好的指标, 宜采用偏大型模糊分布; 对于数值越居中越好的指标, 宜采用中间型模糊分布。需要指出, 为确定定量指标隶属度而采用的隶属度函数一般为近似值, 具有一定主观性, 需在实践中不断修改完善。

根据各下层指标隶属度, 即可得到上层指标 U_k 的模糊评价矩阵为

$$R_k = \begin{bmatrix} U_{k1} \\ U_{k2} \\ \vdots \\ U_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{k11} & \cdots & u_{k15} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{km1} & \cdots & u_{km5} \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2 各层指标权向量的确定

采用层次分析法确定各层指标权重。首先请专家对各下层指标 U_{ki} 对于上层指标的重要性进行比较, 根据比较结果得到判断矩阵 $H_{m \times m}$ 。比较依据可采用 1—9 标度表^[28]。

对判断矩阵进行一致性校验, 若校验不通过, 则修正判断矩阵, 并重新进行一致性校验; 若校验通过, 则将判断矩阵的最大特征根对应的特征向量 w 作为指标权向量。

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_m) \quad (22)$$

2.3 指标综合评价结果

根据模糊评价矩阵 R_k 和指标权向量 w , 即可通过模糊变换得到上层指标的模糊评价向量 U_k , U_k 表达式为

$$U_k = w \times R_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{k5}) \quad (23)$$

可采用不同模糊变换模型进行综合评价计算，具体模型^[22]有：

1) $M(\wedge, \vee)$ 。

$$u_{kj} = \vee_{i=1}^m (w_i \wedge u_{kij}), i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, 5 \quad (24)$$

其中， $\vee$ 和 $\wedge$ 分别表示上确界和下确界。

2) $M(\cdot, \vee)$ 。

$$u_{kj} = \vee_{i=1}^m (w_i \cdot u_{kij}), i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, 5 \quad (25)$$

3) $M(\cdot, +)$ 。

$$u_{kj} = \sum_{i=1}^m (w_i \cdot u_{kij}), i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, 5 \quad (26)$$

当实际进行后评价工作时，主因素起主导作用，可采用 $M(\wedge, \vee)$ ，当 $M(\wedge, \vee)$ 失效时，可采用 $M(\cdot, \vee)$ 。 $M(\cdot, +)$ 对各因素权重大小均衡兼顾，适用于考虑各因素起作用的情况。

采用适当的模糊变换模型，并经过逐层向上计算，最终得到指标综合评价结果。假设最上层指标经归一化处理后的模糊评价集为 U_u ，则最终配网综合后评价的总评分为

$$S = U_u G^T \quad (27)$$

2.4 成功度评价

由本文选取的评判等级论域，将项目成功度划分为 5 级，分别为完全成功、基本成功、部分成功、不成功及失败。同时，划分适当的分值区间从而建立项目成功度评价表，以此为根据对项目总体的成功程度进行评估。

对于某实际配网项目，根据模糊综合评价得到的评分，比对其在成功度表中所处区间，即可确定项目最终的成功度。

3 算例分析

3.1 指标权重

以某实际配网工程建设项目为例，首先确定其底层指标模糊评价隶属度，形成模糊评价矩阵；然后，令各专家对各指标重要性进行比较，形成判断矩阵，经过一致性校验后得到指标权重向量；最后经逐层模糊变换计算，得到配网综合后评价的结果及评分，并对其进行成功度评价。具体指

标的模糊评价隶属度及指标权重分别如表 1、2 所示。

表 1 各指标模糊隶属度

Tab. 1 The fuzzy evaluation results of indices

指标	隶属度	指标	隶属度
A11	(1,0.2,0,0,0)	B56	(1,0.7,0.5,0,0)
A12	(1,0.2,0,0,0)	C11	(1,0.6,0.4,0.1,0)
A13	(0.3,1,0.3,0,0)	C12	(1,0.7,0.4,0,0)
A2	(1,0.7,0.4,0,0)	C21	(1,0.2,0.2,0,0)
A31	(0.1,0.8,0.1,0,0)	C22	(0.4,0.7,0.3,0,0)
A32	(0,0,0.4,1,0.4)	C23	(0.3,0.7,0.3,0,0)
A33	(0.1,0.7,0.2,0,0)	C24	(0.1,0.9,0.1,0,0)
A34	(0.3,1,0.3,0,0)	C25	(0.3,1,0.3,0,0)
A35	(1,0.2,0.2,0,0)	C31	(0.1,0.6,0.4,0.1,0)
A36	(0.1,0.9,0.1,0,0)	C32	(0.5,0.7,0.5,0.1,0)
A41	(0,0.3,0.7,0.3,0)	C41	(1,0.6,0.4,0.1,0)
A42	(0.2,0.5,0.2,0.1,0)	C42	(0.5,0.7,0.5,0.1,0)
B1	(0.1,0.6,0.4,0.1,0)	C43	(0.1,0.6,0.4,0.1)
B2	(0,0.9,0.7,0.4,0.1)	C44	(0.1,0.8,0.1,0,0)
B3	(0.1,0.8,0.1,0,0)	C45	(0.5,0.6,0.4,0,0)
B4	(0,0.3,0.7,0.3,0)	C46	(0.6,0.3,0.2,0.1,0)
B51	(0.2,1,0.2,0,0)	C47	(1,0.7,0.4,0,0)
B52	(1,0.2,0.2,0,0)	C5	(0.7,0.3,0.2,0,0)
B53	(0.3,1,0.3,0,0)	D11	(1,0.2,0.2,0,0)
B54	(0,0,0.4,1,0.4)	D12	(0.1,0.8,0.1,0,0)
B55	(0.5,0.7,0.5,0.1,0)	D2	(0,0.3,0.7,0.3,0)

表 2 各评价指标权向量

Tab. 2 The weighted vectors of indices

指标	下层指标权向量	指标	下层指标权向量
A1	(0.4,0.3,0.3)	C2	(0.20,0.19,0.245,0.26,0.11)
A3	(0.3,0.2,0.2,0.1,0.1,0.1)	C3	(0.5,0.5)
A4	(0.6,0.4)	C4	(0.1,0.2,0.2,0.2,0.1,0.1,0.1)
A	(0.26,0.475,0.055,0.21)	C	(0.16,0.175,0.255,0.21,0.2)
B5	(0.1,0.15,0.2,0.1,0.1,0.35)	D1	(0.667,0.333)
B	(0.09,0.21,0.25,0.26,0.19)	D	(0.5,0.5)
C1	(0.5,0.5)	G	(0.21,0.26,0.247,0.287)

3.2 指标体系评价

为验证本文提出的有源配网后评价指标体系相较传统配网后评价指标体系的优越性，采用上述综合评价方法分别对该配网在 2 种指标体系下作评估，采用的模糊变换模型为 $M(\cdot, +)$ 。评价结果分别如表 3、4 所示。

表3 传统配网指标体系评价结果

Tab.3 Evaluation results under traditional index system of distribution network

评价指标	模糊评价矩阵	评分
实施过程	(0.42,0.34,0.20,0.04,0.00)	82.5
经济效益	(0.04,0.49,0.33,0.13,0.01)	68.2
配网性能	(0.30,0.43,0.23,0.04,0.00)	79.8
社会影响及可持续性	(0.25,0.30,0.33,0.12,0.00)	73.8
综合评价	(0.24,0.39,0.28,0.09,0.00)	75.6

表4 有源配网指标体系评价结果

Tab.4 Evaluation results under the index system of active distribution network

评价指标	模糊评价矩阵	评分
实施过程	(0.42,0.34,0.20,0.04,0.00)	82.5
经济效益	(0.10,0.46,0.30,0.12,0.01)	70.2
配网性能	(0.34,0.41,0.22,0.04,0.00)	80.8
社会影响及可持续性	(0.25,0.30,0.33,0.12,0.00)	73.8
综合评价	(0.27,0.38,0.27,0.08,0.00)	76.4

3.3 结果分析

3.3.1 经济效益评价

从表3和表4所示不同指标体系评价结果可以看出,由本文提出的有源配网指标体系计算得到的经济效益模糊评价向量为(0.10,0.46,0.30,0.12,0.01);而根据传统配网指标体系计算得到的经济效益模糊评价向量为(0.04,0.49,0.33,0.13,0.01)。相应地,在有源配网指标体系下,经济效益的评分为70.2;在传统配网指标体系下,经济效益的评分为68.2。这说明该配网工程在分布式电源并网建设方面做得较好,从而提高了其在经济效益方面的评分。

3.3.2 配网性能指标评价

从表3、4中可以看出,由本文提出的有源配网指标体系计算得到的配网性能指标模糊评价向量为(0.34,0.41,0.22,0.04,0.00);而根据传统配网指标体系计算得到的配网性能指标的模糊评价向量为(0.30,0.43,0.23,0.04,0.00)。相应地,有源配网指标体系下和传统配网指标体系下,配网性能的评分分别为80.8和79.8。评价结果表明,该配网工程在分布式电源并网建设方面做得较好,提高了其在配网性能指标上的评分。

3.3.3 综合评价

根据表3及表4中各项指标的评价结果,计

算得出有源配网指标体系和传统配网指标体系下的综合评价向量分别为(0.27,0.38,0.27,0.08,0.00), (0.24, 0.39, 0.28,0.09,0.00)。相应地,有源配网指标体系下,综合评价评分为76.4;传统配网指标体系下,综合评价评分为75.6。这说明该配网工程在分布式电源并网建设方面做得较好,提高了最终的综合评价得分。若采用传统配网指标体系对其进行后评价工作,显然有失公允;而按照本文提出的有源配网指标体系对该配网工程进行评价,则更为客观公正,也与分布式电源并网项目飞速发展的现状相适应。

此外,根据评价结果,可以判断配网项目预期的目标是否达到,项目主要效益指标是否实现,在哪些方面存在欠缺,从而为未来的配网建设项目提供借鉴。根据有源配网后评价指标体系下的评价结果,通过对照成功度表,可以认为该配网工程在实施过程和配网性能方面获得了完全成功,在经济效益、社会影响及可持续性方面评分较低,在未来配网建设中应对这2方面予以重视。配网项目的综合评价分数为76.4,该项目基本成功,达到了预期的效益和影响。

4 结论

为与分布式电源大量接入配网的现状相适应,对传统配电网后评价指标体系进行优化,新增或修正相应指标,从而建立有源配电网工程后评价的四级指标体系。提出了有源配网后评价指标体系及其综合评价方法,主要结论为:

1) 给出与有源配网后评价指标体系相适应的模糊综合评价方法并作成功度评价。

2) 通过算例验证了有源配网后评价指标体系及评价方法的可行性,以及其较传统配网后评价指标体系的优越性。

参考文献

- [1] 张勇军, 刘子文, 邓丰强. 柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 3-13.
ZHANG Y J, LIU Z W, DENG F Q. Review on research status and development of flexible interconnected distribution networks[J]. Guangdong

- Electric Power, 2020, 33(12): 3-13.
- [2] 邢晓敏, 何铁新, 吴卓, 等. 配电网运行状态评估递阶模型构建及评价方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 81-86.
- XIANG X M, HE T X, WU Z, et al. Construction of hierarchical model and evaluation method for distribution network operation status evaluation [J]. Smart Power, 2019, 47(4): 81-86.
- [3] 赵骞, 张肖, 汪鸿, 等. 融入区块链理念的配电网数据池构建方法研究[J]. 发电技术, 2019, 40(6): 540-547.
- ZHAO Q, ZHANG X, WANG H, et al. Research on construction method of distribution network data pool integrating block chain concept[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(6): 540-547.
- [4] 徐璐, 熊天军, 杨素, 等. 计及新电改政策的配电网变化影响因素及其规划方法综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 108-117.
- XU L, XIONG T J, YANG S, et al. Survey of distribution network change factors & planning methods under new electricity reform policy[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 108-117.
- [5] 陈兢, 周哲, 方敏. 基于层次分析法及灰色聚类决策模型的主动配电网经济活动外部性评价[J]. 浙江电力, 2020, 39(5): 88-92.
- CHEN J, ZHOU Z, FANG M. Externality evaluation of active distribution network economic activities based on analytic hierarchy process and grey clustering decision model[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(5): 88-92.
- [6] 杨磊, 任健. 基于层次分析法的燃煤发电企业低碳综合评价[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 66-70.
- YANG L, REN J. Low carbon comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on analytic hierarchy process[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 66-70.
- [7] 李强年, 赵巧妮, 聂龔. 基于层次分析法(AHP)的风电产业发展影响因素探析: 以甘肃省酒泉风力发电基地为例[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 75-81.
- LI Q N, ZHAO Q N, NIE Y. Research on the factors affecting the development of wind power industry based on analytic hierarchy process (AHP): taking Jiuquan wind power generation base in Gansu province as an example[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 75-81.
- [8] WIND Y, SAATY T L. Marketing applications of the analytic hierarchy process[J]. Management Science, 1980, 26(7): 641-658.
- [9] SAATY T L. Mathematical modeling of dynamic decisions; priorities and hierarchies with time dependence[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1979, 21(4): 352-358.
- [10] RN X U, ZHAI X Y. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1992, 52(3): 251-257.
- [11] HECKLER C E. Applied multivariate statistical analysis[J]. Technometrics, 2005, 47(4): 517.
- [12] BONNIE J M. Closing the assessment loop using pre - and post - assessment[J]. Reference Services Review, 2011, 39(2): 244-259.
- [13] 黄德春, 许长新. 投资项目后评价的现有理论及评析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 105-108.
- HUANG D C, XU C X. Comments on theory of post-evaluation of investment projects[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(6): 105-108.
- [14] 查健禄, 田钦谟, 李盛德. 综合评价问题的系统分析[J]. 系统工程学报, 2000, 15(2): 124-130.
- CHA J L, TIAN Q M, LI S D, et al. Systematic analysis of problem in comprehensive evaluation[J]. Journal of Systems Engineering, 2000, 15(2): 124-130.
- [15] 冯圣洪, 周心权. 一种综合评价指标属性值归一量化技术新途径[J]. 系统工程学报, 2000, 15(2): 187-191.
- FENG S H, ZHOU X Q. A new way to normalize attribute-value of integrating assessment-indicators [J]. Journal of Systems Engineering, 2000, 15(2): 187-191.
- [16] 方嵩, 彭嵩, 赵晋泉, 等. DG启动及运行特性综合评价指标与方法[J]. 电测与仪表, 2018, 56(14): 5-11.
- FANG S, PENG S, ZHAO J, et al. Comprehensive evaluation index and method for DGs' startup and operation characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 56(14): 5-11.
- [17] 冯磊, 李楠, 顾洁, 等. 多元主体下有源配电网规划方案协同评估研究[J]. 供用电, 2019, 36(8): 7-15.
- FENG L, LI N, GU J, et al. Research on collaborative evaluation of active distribution network planning based on multi-stakeholder[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(8): 7-15.
- [18] 熊剑峰. 基于 AHP 法与 FCE 法的主动配电网现状网架综合评价体系与方法的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- XIONG J F. Research on comprehensive evaluation

- system and method of active distribution network frame based on AHP and FCE method [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [19] 陈雪, 黄伟, 叶琳浩, 等. 基于多源数据的配电网规划辅助决策系统研究[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 53-58.
- CHEN X, HUANG W, YE L H, et al. Study on auxiliary decision system for power distribution network planning based on multisource data [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1): 53-58.
- [20] 彭丽霖. 主动配电网下分布式能源系统规划运行及效益评价研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- PENG L L. Research on planning, operation and benefit evaluation of distributed energy system under active distribution network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [21] 黄晓娟. 基于多目标层次分析法的输变电项目后评价体系研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- HUANG X J. Research on post-evaluation system of power transmission and transformation project based on multi-objective AHP[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [22] 杨波. 10 kV 及以下配网建设与改造投资后评价指标体系研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(s1): 8-14.
- YANG B. Study on post-project evaluation index system for 10 kV and below distribution network investment[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(s1): 8-14.
- [23] 吕雷. 输变电项目后评价因素权重的确定[J]. 煤炭技术, 2010, 29(8): 35-37.
- LÜ L. Determining the weight of factors in power transmission project post-project evaluation[J]. Coal Technology, 2010, 29(8): 35-37.
- [24] 何滢. 配电网项目后评价研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- HE Y. Research and application of post evaluation of distribution network project[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [25] 白恒远, 潘凯岩, 王森, 等. 基于拉格朗日函数的配电网评价指标权重研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 1-8.
- BAI H Y, PAN K Y, WANG S, et al. Research of comprehensive quantitative evaluation index system and determination of weights of distribution network operation mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 1-8.
- [26] 贺静, 苏卫华. 中压配电网关键评价指标体系研究[J]. 供用电, 2010, 27(3): 26-28, 39.
- HE J, SU W H. Study on key evaluation index system about middle-voltage distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2010, 27(3): 26-28.
- [27] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2005: 143-161.
- XIE J J, LIU C P. Fuzzy mathematics method and its application[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 2005: 143-161.
- [28] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9): 109-114.
- LAN J B, XU Y, HUO L A, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process [J]. System Engineering Theory and Practice, 2006, 26(9): 109-114.

收稿日期: 2020-09-30。

作者简介:



段穰达

段穰达(1990), 男, 助理工程师, 研究方向为海上风电、新能源并网、有源配电网分析, duan_rangda@ctg.com.cn。

(责任编辑 辛培裕)