

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.013

园区能源互联网规划评价指标体系与方法

蔡京陶¹, 李志铿², 赵青宇², 赵振杰²

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518033; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 园区能源互联网是对多种能源、负荷和电网进行统一协调优化实现能效最优的复杂系统, 评价指标体系的构建和规划方案的综合评价, 是园区能源互联网规划所必须解决的关键问题。[方法] 从能源互联网的作用出发, 构建了其规划的评价指标体系, 对体系中各指标的定义及计算方法进行了详细说明, 并基于层次分析法进行了量化评价, 最后基于实际工程队对该指标体系及评价方法的应用进行了分析。[结果] 利用该方法, 可对各类园区的能源互联网项目进行更加定量、客观的综合效益评估。[结论] 算例分析表明: 所提的方法准确有效, 为项目投资运营模式及技术方案的决策提供方法支持。

关键词: 能源互联网; 综合评价; 指标体系

中图分类号: TK01; TM7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0075-06

Research on Benefit Evaluation Method of User Side Distributed Energy Storage System

CAI Jingtao¹, LI Zhikeng², ZHAO Qingyu², ZHAO Zhenjie²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518033, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Objective] Energy Internet is a complex system that optimizes energy efficiency, load and power grids to achieve optimal energy efficiency. The evaluation index system and comprehensive evaluation of planning schemes are key issues that must be solved in the park's energy internet planning. [Method] Based on the role of energy internet, an evaluation index system for energy internet planning was conducted and the definition and calculation method of each index in the system was performed. Furthermore, a quantitatively evaluates method based on the analytic hierarchy process was proposed in this paper and the application of the indicator system and evaluation method was analyzed. [Results] By the method proposed, a more quantitative and objective comprehensive benefit assessment can be conducted for energy Internet projects in various parks. [Conclusions] The analysis of the example shows that the proposed method is accurate and effective, which provides method support for project investment operation mode and technical solution decision-making.

Key words: energy internet; comprehensive evaluation; index system

近年来, 在世界范围内“第三次工业革命”正席卷而来。历史上的工业革命总离不开能源革命与信息革命。可再生能源、分布式发电、智能电网、直流输电、储能、电动汽车等新能源技术与物联网、大数据、移动互联网等信息技术的不断发展, 为第三次工业革命奠定了坚实基础。以正在飞速发展的

互联网为基础, 实现能源流通的智能化, 达到能源技术和信息技术深度融合的效果, 便形成了能源互联网, 即“互联网+智慧能源”。

能源互联网近几年来蓬勃发展。能源互联网是传统能源架构+新能源技术+互联网思维与技术的结合。利用电力电子技术、人工智能技术、信息与通信技术, 能源互联网将电、热、气等能源网络, 以及广泛接入的分布式能源、储能系统和能源负荷进行优化协调, 实现能量和信息的对等交换与共享。由于不同类型的能源存在一定互补特性, 能源

收稿日期: 2018-12-08 修回日期: 2019-09-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目“广东省智能电网装备产业技术创新联盟建设示范”(ER04581W)

互联网有望通过能源梯级利用增加终端能源利用效率。以大数据以及广域信息平台为基础的需求侧响应,提高能源生产与传输设施的利用效率。

传统电力系统可分为发电、输电、配电及用电四个环节。在开展电力系统规划的综合评价时,往往也都基于上述4个环节分别进行^[1]。然而,园区能源互联网是以智能电网为核心,是对多种能源、负荷和电网进行统一协调优化实现能效最优的复杂系统,评价指标体系的构建和规划方案的综合评价,是园区能源互联网规划所必须解决的关键问题。

目前,以运筹学为基础的各种评价方法,如层次分析法^[2-3]、数据包络法^[4-5]、熵权分析法^[6-8]等,已经成为国内外研究的热点。其中,层次分析法(The Analytic Hierarchy Process, AHP)能够多维度地量化评估者的主观经验判断,因而在电力系统中得到了广泛应用。

为此,本文着重从供电可靠性、能源利用效率、清洁能源消纳和投资经济性等方面,构建了园区能源互联网规划方案的综合评价指标体系,从而对其进行多维度的全面评价。

1 评价指标体系

1.1 指标体系

根据能源互联网的定义和实施目的,显然,应从供电可靠性、设备利用效率、能效水平、绿色低碳,以及经济效益等5方面构建智慧能源系统的多目标综合评估指标体系^[9-10],如表1所示。

表1 园区能源互联网规划指标体系

Tab. 1 Energy internet planning index system

一级指标	二级指标	指标含义
系统的供电可靠性	用户平均停电时间	用户在统计期间的平均停电小时数, AIHC-1
	用户平均停电次数	用户在统计期间的平均停电次数, AITC-1
能源和设备利用的高效性	重载变电站比例	区域内负载率超过80%的变电站数量占比
	轻载变电站比例	区域内负载率低于20%的变电站数量占比
	线路平均负载率	区域内中压配电网线路的负载率平均值
	峰谷负荷比	区域最高峰时的负荷与最低时的负荷之比
单位GDP能耗	各种一次能源的电能供应量折算为标煤煤耗量及其与区域GDP的比值。	

表1(续) 园区能源互联网规划指标体系

Tab. 1(Cont.) Energy internet planning index system

一级指标	二级指标	指标含义
能源利用的清洁性	新能源渗透率	风、光和燃气三联供装机容量与区域最大负荷之比
	新能源消纳电量比	可消纳的分布式能源发电量与区域网供电量之比
	减排率	区域内CO ₂ 排放量降低的比率
项目投资的经济性	内部收益率	项目投资内部收益率
	投资回收年限	项目投资回收年限

1.2 评价指标

1.2.1 系统安全可靠

1) 用户平均停电时间

根据《供电系统用户供电可靠性评价规程》(DL/T 836—2012),用户平均停电时间是指用户在统计期内(通常为1年)的平均停电小时数,记作AIHC-1(h/户):

$$\begin{aligned} \text{用户平均停电时间} &= \frac{\sum (\text{每次每户的停电时间})}{\text{总用户数}} \\ &= \frac{\sum (\text{每次停电持续时间} \times \text{每次停电用户数})}{\text{总用户数}} \end{aligned} \quad (1)$$

在不考虑外部影响时,可将其记作AIHC-2(h/户);不计系统电源不足限电时,可记作AIHC-3(h/户)。

通过自愈配电网的建设,预计示范区供电可靠率可达99.999%,对应AIHC-1为0.5 h/户。

2) 用户平均停电次数

用户平均停电时间是指用户在统计期内(通常为1年)的平均停电次数,记作AITC-1(次/户):

$$\text{用户平均停电时间} = \frac{\sum (\text{每次的停电总用户数})}{\text{总用户数}} \quad (2)$$

在不考虑外部影响时,则记作AITC-2(次/户);若不计系统电源不足限电时,则记作AITC-3(次/户)。

由于自愈配电网采用断路器作为线路的主要分段开关,大幅减少故障影响范围,预计AITC-1为0.1次/户。

1.2.2 能源和设备利用的高效性

设备利用效率指标,是反映区域智慧能源应用对于提高电网设备资产利用效率的定量指标,主要

涉及变电站、配电线路的负载情况, 以及区域负荷的峰谷比。

1) 重载/轻载变电站占比

统计分析区域内涉及的 110/10 kV 高压变电站和 220/110/10 kV 变电站的负载率情况, 将其中负载率不低于 80% 的变电站列为重载变电站, 将负载率不高于 20% 的列为轻载变电站, 则重载/轻载变电站占比为重载变电站数量和轻载变电站数量与区域内变电站数量的占比。

2) 线路平均负载率

通过网架运行方式调整、需求响应和分布式能源接入等技术手段, 使区域内中压配电线路的负载率处于合理区间, 从而一定程度上延缓配电网建设投资, 是智慧能源系统的主要作用之一。因此, 定义线路平均负载率指标为示范区内中压线路年最大负载率的平均值。

3) 峰谷负荷比

区域内相关用户的高峰负荷与其低谷负荷之比, 该比值越小, 表明负荷越平稳, 供用电设备越能得到充分利用, 需求响应的作用得到有效发挥, 反之, 表明电力设备容量在负荷低谷时被闲置, 降低了设备利用效率。

通过实施需求响应和分布式能源建设, 实现削峰填谷, 预计可降低峰谷负荷比 19%。

4) 单位 GDP 能耗

各种一次能源的电能供应量折算为标煤煤耗量及其与区域 GDP 的比值:

$$\text{单位 GDP 能耗} = \frac{\sum(\text{网供电量}) + \sum(\text{燃气分布式发电量}) - \sum(\text{分布式风电、光伏发电量})}{\text{区域 GDP 总量}} \quad (3)$$

1.2.3 绿色低碳

1) 新能源渗透率

为衡量区域内分布式风电、分布式光伏和燃气分布式能源的装机规模, 定义新能源渗透率指标。其计算方式为:

$$\text{新能源渗透率} = \frac{\sum(\text{分布式风电、光伏和燃气分布式能源总容量})}{\text{区域最大负荷}} \quad (4)$$

2) 新能源消纳电量比

区域内分布式风电、分布式光伏和燃气分布式

能源的发电量, 与该区域网供电量的比值。

3) 减排率

目前全球变暖是世界最关心的环保问题之一, 而造成全球变暖的温室气体的主要成为即是二氧化碳。因此, 对减排率指标 η_{poll} 的定义为应用智慧能源系统后, 区域内二氧化氮排放量降低的比率, 即

$$\eta_{\text{poll}} = 1 - \frac{\text{Em}_{\text{rec}}}{\text{Em}_{\text{ref}}} \quad (5)$$

式中: Em_{rec} 为在综合能源系统应用的情况下, 供应区域负荷所产生的碳排放量, 分为分布式电源和主网电源的排量两部分, 其中分布式电源排量通常产生于天然气的消耗, 而主网排量则按标煤燃烧排量作为计算标准; Em_{ref} 为在综合能源系统应用的情况下, 供应区域负荷所产生的碳排放量, 基本由主网排量组成。

2 评价方法

2.1 基本步骤

1) 数据预处理阶段

数据预处理阶段统一了各指标的数据形式, 包括统一取值方向、无量纲化处理等。根据数据的实际情况, 可采用标准化法、归一法等。

2) 确定指标权重

权重系数的设置反映了相应指标在整体评价结果中的影响力, 因而是综合评价模型的核心, 常用方法包括主观赋权法、客观赋权法及综合赋权法等。本文采用 AHP 进行客观赋权。需要指出的是, 在采用 AHP 进行综合赋权前, 填写判断矩阵时需要考虑指标间的相关性。

3) 综合评价

由各指标的数值及其相应的权重系数进行加权求和, 得到综合评价值, 如下式所示。

$$y = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i \quad (6)$$

式中: n 为指标总数; y 为综合评价值; x_i 为指标 i 的取值。

2.2 基本 AHP 的权重计算

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是美国著名的运筹学家 T. Lsatty 等人在 20 世纪 70 年代提出的一种定性定量相结合的多准则决策、评价方法, 主要包括建立层次结构模型、构造判断矩阵、层次单排序及一致性检查和权重计算几个

步骤^[2]。

2.2.1 判断矩阵

基于 AHP 的基本方法^[4]，采用专家讨论确定各层指标的判断矩阵如表 2~表 6 所示：

表 2 判断矩阵 B1
Tab. 2 Judgment matrix B1

指标	用户平均停电时间/mm	用户平均停电次数
用户平均停电时间/min	1	2
用户平均停电次数	0.5	1

表 3 判断矩阵 B2
Tab. 3 Judgment matrix B2

指标	重载变电站比例	轻载变电站比例	线路平均负载率	峰谷负荷比	单位 GDP 能耗/(t·万元 ⁻¹)
重载变电站比例	1	2.4	3	2	2.2
轻载变电站比例	0.42	1	1.8	0.6	0.8
线路平均负载率	0.33	0.56	1	0.6	0.8
峰谷负荷比	0.50	1.67	1.67	1	1.2
单位 GDP 能耗/(t·万元 ⁻¹)	0.45	1.25	1.25	0.83	1

表 4 判断矩阵 B3
Tab. 4 Judgment matrix B3

指标	新能源渗透率	新能源消纳电量比	减排率
新能源渗透率	1	1.2	0.8
新能源消纳电量比	0.83	1	0.8
减排率	1.25	1.25	1

表 5 判断矩阵 B4
Tab. 5 Judgment matrix B4

指标	投资回报率	投资回收年限/年
投资回报率	1	1.6
投资回收年限/年	0.63	1

表 6 判断矩阵 A
Tab. 6 Judgment matrix A

指标	系统的供电可靠性	能源和设备利用的高效性	能源利用的清洁性	项目投资的经济性
系统的供电可靠性	1	1.2	1.4	2
能源和设备利用的高效性	0.83	1	1.2	1.4
能源利用的清洁性	0.71	0.83	1	1.6
项目投资的经济性	0.50	0.71	0.63	1

2.2.2 一致性校验

AHP 的判断矩阵应满足非负性、自反性、互反

性和由式(7)定义的一致性^[5]：

$$a_{ij} = a_{ik} \times a_{kj} (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中： a_{ij} 为判断矩阵的元素。

然而，由于专家判断的主观性和多样性，综合不同专家判断得到的判断矩阵往往无法满足不一致性条件。为此，文献[7]提出了一种在原有矩阵的基础上构造完全一致性的矩阵的方法，对此，本文不再赘述。

2.2.3 权重计算结果

基于上述指标体系和判断矩阵，采用 AHP 方法计算各指标的权重，其结果如表 7 所示。在实际计算时，需对各指标值按 0~100% 进行离差标准化。

表 7 各指标的权重系数
Tab. 7 Weight coefficient of indicators

一级指标	二级指标	权重
系统的供电可靠性	用户平均停电时间	0.12
	用户平均停电次数	0.08
能源和设备利用的高效性	重载变电站比例	0.13
	轻载变电站比例	0.05
	线路平均负载率	0.07
	峰谷负荷比	0.11
能源利用的清洁性	单位 GDP 能耗	0.09
	新能源渗透率	0.09
	新能源消纳电量比	0.08
项目投资的经济性	减排率	0.08
	内部收益率	0.06
	投资回收年限	0.04

3 算例分析

3.1 概况

以深圳某大型工业园区的能源互联网为例进行验证。

1) 电力负荷与电量

根据市政规划，按照负荷密度法(按不同性质用地的单位面积负荷)预测区域负荷总和为 71 MW，扣除集中供冷的冷负荷后，预测电力负荷最大值约为 63 MW，负荷密度为 65 MW/km²，区域内每年用电量大概为 250~270 TWh。

2) 电源配置

燃气内燃机总装机容量 47.5 MW，溴化锂制冷机总制冷负荷约为 31.5 MW，电制冷机组 6.3 MW。2 台 3 MW 沼气内燃机组及 4 台烟气余热发

电机组总装机容量为 6.7 MW。

3) 电网结构

按 10 kV 双母线的型式建设大型开闭所, 并以此对区域内部光伏发电、沼气发电和三联供机组的出力, 以及外部 110 kV 网供电力进行集中分配, 接线示意图如图 1 所示。

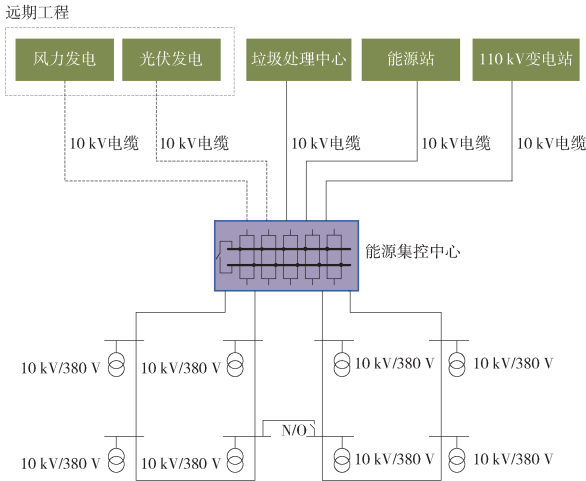


图 1 区域电网接线模式

Fig. 1 10 kV distributions network structure

4) 控制保护方案

本区域采用广域电流保护与主站集中控制相结合的控制保护方案, 智能终端之间的实时数据传输延时控制在 10 ms 以内, 使控制响应速度小于 100 ms。

3.2 指标评价

根据所提的指标体系, 对区域能源互联网进行定量评价, 如表 8 所示。

表 8 园区能源互联网规划指标取值

Tab. 8 Values of the energy internet planning indices

一级指标	二级指标	指标取值	权重系数
系统的供电可靠性	用户平均停电时间/min	5	0.12
	用户平均停电次数/(次·年)	0.2	0.08
能源和设备利用的高效性	重载变电站比例	0	0.13
	轻载变电站比例	0	0.05
	线路平均负载率	35%	0.07
	峰谷负荷比	1.3	0.11
	单位 GDP 能耗/(t·万元 ⁻¹)	0.2	0.09
能源利用的清洁性	新能源渗透率	60%	0.09
	新能源消纳电量比	80%	0.08
	减排率	90%	0.08
项目投资的经济性	内部收益率	8	0.06
	投资回收年限/年	7.8	0.04

利用式(6)进行综合评价, 可得本规划方案的各项得分如表 9 所示。评估结果如图 2 所示。

表 9 规划方案的评估得分

Tab. 9 Evaluation score of the planning plan scheme

一级指标	二级指标	二级评分	一级评分
系统的供电可靠性	用户平均停电时间	0.114	0.19
	用户平均停电次数	0.076	
能源和设备利用的高效性	重载变电站比例	0.13	0.415 7
	轻载变电站比例	0.05	
	线路平均负载率	0.065 8	
	峰谷负荷比	0.097 9	
能源利用的清洁性	单位 GDP 能耗	0.072	0.225
	新能源渗透率	0.081	
	新能源消纳电量比	0.072	
项目投资的经济性	减排率	0.072	0.09
	内部收益率	0.054	
	投资回收年限	0.036	

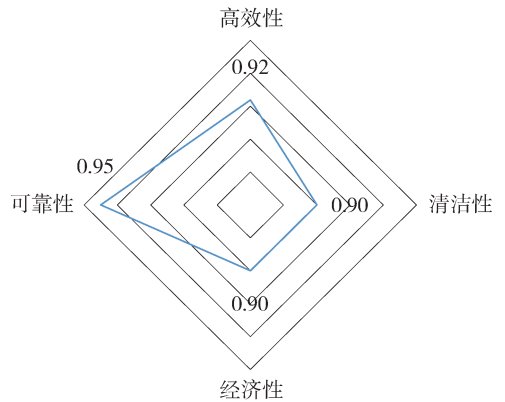


图 2 规划方案的评估结果

Fig. 2 Planning evaluation results

4 结论

本文针对园区能源互联网的实施目的, 从供电可靠性、能源利用效率、清洁能源消纳和投资经济性等方面, 建立了完整的能源互联网建设项目评价指标体系, 并提出了基于层次分析法赋权的综合评价方法, 实现了数据信息的客观性与专家偏好主观性的良好结合。以深圳某园区的能源互联网建设项目为例进行了示例分析。结果表明, 从系统的供电可靠性、能源和设备利用的高效性、能源利用的清洁性和项目投资的经济性等 4 方面, 构建了园区能源互联网规划方案的综合评价指标体系, 能够客观

反映能源互联网提高供电可靠性、提高绿色能源占比、提升综合能源利用效率等核心特征。上述4方面的指标权重系数,建议取值为0.19、0.4157、0.225和0.09。在此基础上,利用层次分析方法构建判断矩阵,能够一定程度上克服专家判断的主观性和多样性,从而实现对规划方案的多维度评价,使不同能源互联网建设项目的综合比较更为客观准确。

参考文献:

- [1] 李兴源,魏巍,王渝红,等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI X Y, WEI W, WANG Y H, et al. Study on the development and technology of strong smart grid [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.
- [2] 赵云飞,陈金富. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 85-89.
ZHAO Y F, CHEN J F. Analytic hierarchy process and its application in power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 85-89.
- [3] 袁昕. 基于AHP的北京城区电网可靠性评价体系研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
YUAN X. Research and applications on the reliability evaluation system of beijing urban district distribution construction based on AHP [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [4] 李金芳. 基于AHP/DEA的20 kV中压配电方案研究及评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
LI J F. Study and evaluation of distribution schemes in which 20 kV is used based on AHP/DEA [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [5] 柳顺,杜树新. 基于数据包络分析的模糊综合评价方法[J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(2): 93-96.
LIU S, DU S X. Fuzzy comprehensive evaluation based on data envelopment analysis [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2010, 24(2): 93-96.
- [6] 华中生,吴云燕,徐晓燕. 一种AHP判断矩阵一致性调整的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(1): 38-41.
HUA Z S, WU Y Y, XU X Y. A new method of consistency regulation for the AHP judgment matrix [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(1): 38-41.
- [7] LIU S, DU S X. Fuzzy comprehensive evaluation based on data envelopment analysis [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2010, 24(2): 93-96.
- [8] 林济铿,李童飞,赵子明,等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 51-54.
LIN J K, LI T F, ZHAO Z M, et al. Assessment on power system black-start schemes based on entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 51-54.
- [9] 王智冬,李晖,李隽,等. 智能电网的评估指标体系[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 14-18.
WANG Z D, LI H, LI J, et al. Assessment index system for smart grids [J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 14-18.
- [10] 焦丰顺,张劲松,唐晟,等. 智能配电网项目综合效益分析评价方法研究[J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 71-74.
JIAO F S, ZHANG J S, TANG S, et al. Research on comprehensive benefits evaluation of smart distribution grid [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 71-74.

作者简介:



CAI J T

蔡京陶(通信作者)

1985-, 男, 山东惠民人, 工程师, 硕士, 主要从事电网调度、规划及智能电网相关研究工作(e-mail) 13927451573@139.com。

李志铿

1981-, 男, 广东顺德人, 高级工程师, 博士, 主要从事配电网规划、设计和运行分析研究工作(e-mail) lizhikeng@gedi.com.cn。

赵青宇

1991-, 男, 江西南昌人, 电气工程师, 电力系统硕士, 主要从事配电网和配电自动化规划研究工作(e-mail) zhaoqingyu@gedi.com.cn。

赵振杰

1989-, 男, 广东广州人, 工程师, 电气工程/硕士研究生, 主要从事配电网规划咨询工作(e-mail) zhaozhenjie@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)