

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240631

计及能效-能质-碳效的能源站规划方案综合评价方法

窦真兰¹, 张春雁¹, 周天烁^{2,3}, 王丹^{2,3}, 张帅^{2,3}, 陈洪银⁴

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 3. 天津市智慧能源与信息技术重点实验室(天津大学), 天津 300072; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 科学、合理的能源站规划方案综合评价方法, 对于新型能源体系的规划建设与发展具有重要意义。针对现有评价方法未综合考虑能效-能质-碳效, 且评价指标体系中存在同向性指标的问题, 首先, 提出基于专家信任传播关系的评价指标筛选方法。然后, 基于能源站的基本特征, 建立了计及能效、能质、碳效、安全、灵活和经济社会效益的能源站规划/运行综合评价体系, 提出了基于标准间冲突性相关性-多准则妥协解排序(criteria importance through intercriteria correlation-vlsekriterijumska optimizacija I kompromisno resenje, CRITIC-VIKOR)法的能源站规划方案综合评价方法。最后, 通过算例验证了所提方法可以量化评估能源站的规划/运行综合效益, 明确给出不同方案的排序, 并检验了该方法的适用性和稳定性。

关键词: 全电能源站; 能量品质; 碳效; 多指标评价; 规划; 运行

A comprehensive evaluation method for an energy station planning scheme incorporating energy efficiency, energy quality, and carbon efficiency

DOU Zhenlan¹, ZHANG Chunyan¹, ZHOU Tianshuo^{2,3}, WANG Dan^{2,3}, ZHANG Shuai^{2,3}, CHEN Hongyin⁴

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 3. Key Laboratory of Smart Energy & Information Technology of Tianjin Municipality (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A comprehensive evaluation method for scientifically and rationally planning energy stations is of great significance for the construction and development of new energy systems. Given that existing evaluation methods do not fully integrate energy efficiency, energy quality, and carbon efficiency, and that there are issues with unidirectional indicators in the evaluation index system, this paper first proposes an indicator screening method based on expert trust propagation relationships. Then, considering the basic characteristics of energy stations, a comprehensive evaluation system for energy station planning and operation is established, incorporating energy efficiency, energy quality, carbon efficiency, safety, flexibility, and socio-economic benefits. This paper also introduces a comprehensive evaluation method for energy station planning schemes based on the criteria importance through intercriteria correlation-vlsekriterijumska optimizacija I kompromisno resenje (CRITIC-VIKOR) method. Finally, through case studies, the proposed method is validated as capable of quantifying and assessing the comprehensive benefits of energy station planning and operation, clearly ranking different schemes, and testing the method's applicability and stability.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5108-202218280A-2-381-XG).

Key words: all-electric energy station; energy quality; carbon efficiency; multi-criteria evaluation; planning; operation

0 引言

国家发展改革委、国家能源局对多能互补发展

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5108-202218280A-2-381-XG)

提出明确指导意见, 北京、上海、广东等地在能源消费环节积极推进清洁电能替代技术^[1], 未来 40 年, 我国的全社会用电量需求将得到进一步提升, 电能 in 终端能源消费中的比重不断提高。随着以电力为核心的新型能源体系建设^[2], 涌现出多种形态的能源站, 以匹配多样化供用能需求, 例如在超特

大城市的高密度建筑群, 建设全电能源站^[1]成为了决策者的优先选择之一。能源站担负着电-气-冷-热等多种形式能源的转换、分配、调控等任务, 是综合能源系统(integrated energy system, IES)中的关键节点, 是多能互补发展的重要基础。同时, 能源站也是 IES 中产生碳排放较多、烟损较高、高品质电能低质利用的突出环节。因此, 能源站在新型能源体系的重要性不言而喻, 对其开展科学合理的综合评价具有重要意义。

国内外学者从构建评价指标体系、评价方法方面, 开展能源站综合评价研究。在评价指标体系方面, 针对港口、楼宇、园区、微能源网等不同尺度的 IES 对象^[3-5], 从经济、能效、环境、可靠、灵活等维度, 对其规划、运行、设计等阶段, 构建多维度评价指标体系; 在评价方法方面, 通过层次分析法、熵权法、优劣解距离法及改进方法^[3]等方法, 解决权重计算、得分排序、模糊评价问题。进一步地, 部分学者将构建一级指标作为目标函数, 利用 Pareto 多目标优化、粒子群算法等优化方法, 求解 IES 的优化配置。

然而, 传统评价指标体系和评价方法难以适应能源站的快速发展, 不利于能源企业适时调整能源站的发展规划方案, 主要表现为两方面: 1) 缺少能量品质的评价维度。传统的能源站评价维度通常仅涵盖经济性、能源效率和环境影响等方面, 而对能量品质的考量较少。在现有研究中, 很少涉及对能源站的焓分析^[6]、焓经济学和焓增^[7]的讨论, 更没有将能效、能质^[8]与碳效^[9]进行综合评估。2) 缺少对能源站规划类/运行类评价指标间影响关系的分析与筛选, 传统能源站评价指标体系中对指标的筛选常依据决策者偏好, 导致体系中的某些指标存在同向性。

综上所述, 亟待构建更全面的能源站规划/运行综合评价指标体系及综合评价方法, 提供客观评价依据。本文首先提出基于信任传播-决策实验室分析(trust propagation-decision making trial and evaluation laboratory, TP-DEMATEL)的评价指标筛选方法。然后, 构建以能效-能质-碳效为核心维度的能源站规划/运行综合评价指标体系, 提出输入侧有效能占比、焓增流增量等创新指标。建立基于指标间相关性权重-多准则妥协解排序(criteria importance through intercriteria correlation-vlsekriterijumska optimizacija I kompromisno resenje, CRITIC-VIKOR)的指标评价方法。并以某能源站工程为例, 对比了传统能源站与全电能源站的评分排序以及优劣分析。

1 能源站规划/运行综合评价指标体系构建

1.1 能源站的特征、发展与评价

能源站作为新型能源体系的关键环节, 呈现出灵活高效、品质对口、经济低碳、安全韧性、空间高效利用的基本特征。因此, 在构建规划/运行综合评价指标体系时, 评价指标应集中从“能效水平、能质水平、碳效水平、安全水平、灵活水平、经济社会效益”六大方面体现能源站的基本特征。

与输入侧为电力、天然气的传统能源站相比, 全电能源站成为超特大城市优选方案之一, 其典型应用场景如图 1 所示, 主要为区域内具有高密度负荷特征建筑群提供电、冷、热的供应服务。全电能源站内配备了基载冷水机组、风冷热泵机组、蓄热/冷水箱等全电气化设备。

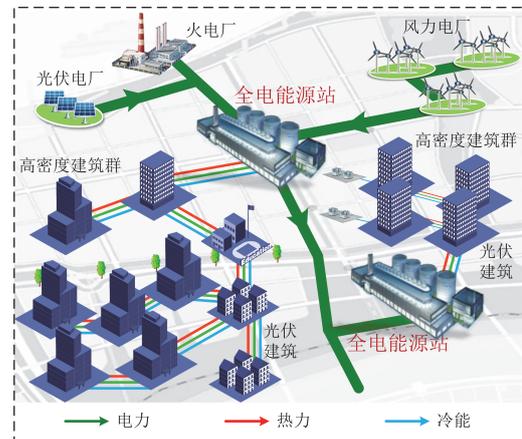


图 1 全电能源站典型应用场景示意图

Fig. 1 Diagram of typical application scenarios for an all-electric energy station

能效是指发挥作用的能源与实际消耗的能源量之比。能质, 即能量品质。当系统由任意状态可逆地变化到与给定环境相平衡的状态时, 理论上转变为功的那部分能量, 反映了能量品质的高低, 通常可由焓效率、焓损、能质系数等概念表征能量品质^[6]。碳效是指系统单位用能的碳排放量, 旨在反映系统对可再生能源的使用程度。多样化的能源站匹配多样化的供用能方式, 而能源站中存在的高焓损、高品质电能低质利用等现象, 尚未在传统能源站评价体系中得到重视。基于此, 本文补齐传统能源站评价指标体系中缺失的能质维度, 综合能效-能质-碳效, 建立涵盖能效水平、能质水平、碳效水平、安全水平、灵活水平和经济社会效益六大维度的能源站评价指标体系。

1.2 评价指标选取原则

能源站规划/运行评价指标的选取遵循目的性(purposefulness)、独立性(independence)、重点性(centrality)、可比性(heterogeneity)、可操作性(operability)、显著性(significance)原则,简称 P-I-C-H-O-S 原则^[5]。规划/运行评价指标体系是对能源站的不同规划方案及相应的运行结果进行综合性“绩效评价”。该评价指标体系包括规划和运行两部分,前者侧重于对规划方案的评价,后者侧重于对运行策略的评价,两者中的某些指标不可避免地存在重叠,违背了独立性原则。因此,需要对指标进行筛选与处理,以形成满足 P-I-C-H-O-S 原则的全电能源站规划/运行评价指标体系。

1.3 指标定义及其计算方法

1.3.1 规划类评价指标

1) 能效水平

能效水平是传统评价体系中的重点,设备利用率 E_{n1} 、能源耦合等值效率 E_{n2} 、电储能等效放电次数 E_{n3} 、蓄热等效放热次数 E_{n4} 、蓄冷等效放冷次数 E_{n5} 为能源站规划方案的能效水平评价指标,具体定义及计算方法^[4]不再赘述。

2) 能质水平

能质水平即能源站的能量品质水平,通常以焓^[6]、熵^[10]等物理量来表征能量品质水平的高低。输入侧有效能占比 E_{x1} 、制热设备焓损率 E_{x2} 、制冷设备焓损率 E_{x3} 为能源站规划方案能质水平的评价指标。具体定义与计算方法如下所述。

输入侧有效能占比 E_{x1} 表示统计期内,能源站输入焓流与输入能量之比(%),反映能源站输入侧的能量品质水平,计算如式(1)所示。

$$E_{x1} = \frac{\eta_{re} Q_{tot}^{RE} + \eta_e Q_{buy}^E + \eta_g Q_{buy}^G \cdot G}{Q_{tot}^{RE} + Q_{buy}^E + Q_{buy}^G \cdot G} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Q_{tot}^{RE} 为可再生能源设备输入能源站的能源总量(MWh); Q_{buy}^E 、 Q_{buy}^G 分别为能源站向电网、天然气网的购电量(MWh)和购气量(m^3); G 为天然气的热值; η_{re} 、 η_e 和 η_g 分别为可再生能源、电能、天然气的能质系数^[11]。

制热设备焓损率 E_{x2} 表示 p 个制热设备的焓损之和与能源站总焓损的比值(%),反映能源站焓损分布情况,计算如式(2)所示。

$$E_{x2} = \frac{\sum_{t=1}^p E_{x,t}^{H,loss}}{E_{x,tot}^{EH,loss}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $E_{x,t}^{H,loss}$ 为第 t 个制热设备的焓损; $E_{x,tot}^{EH,loss}$ 为能源站总焓损。

制冷设备焓损率 E_{x3} 表示 q 个制冷设备的焓损之和与能源站总焓损的比值(%),反映能源站焓损分布情况,计算如式(3)所示。

$$E_{x3} = \frac{\sum_{s=1}^q E_{x,s}^{C,loss}}{E_{x,tot}^{EH,loss}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $E_{x,s}^{C,loss}$ 为第 s 个制冷设备的焓损。

3) 碳效水平

碳效水平反映了能源站的环境友好性,新能源装机容量占比 C_1 、新能源出力占比 C_2 为新能源站规划方案的碳效水平评价指标,具体定义及计算方法^[4]不再赘述。

4) 安全水平

安全水平也可认为是能源站可靠性的体现,综合能源 $N-1$ 通过率 E_{S1} ^[12]、供热安全指标 E_{S2} 、供冷安全指标 E_{S3} 、最大供能能力 E_{S4} 和平均供能可靠率 E_{S5} 为能源站规划方案的安全水平评价指标。

供热安全指标 E_{S2} 指对能源站内部管道压力、介质流速等参数进行校验,如表 1 所示,应满足相关设计规范^[13]要求,计算如式(4)所示。

$$E_{S2} = \frac{\text{满足供热规范的参数数量}}{\text{参数总数量}} \times 100\% \quad (4)$$

表 1 供热、供冷系统参数规范(部分)

Table 1 Parameters specification for heating and cooling systems (partial)

参数	供热	供冷
介质流速/(m/s)	≤3.5	≤3.5
系统压力/kPa	≥50	≥50
供水温度/°C	热泵为主: ≤60	压缩式: ≥5
	锅炉为主: ≥80	吸收式: ≥7
供回水温差/°C	热泵为主: 10~15	蓄冷: 4~6
	锅炉为主: ≥20	压缩式: ≥7
比摩阻/(Pa/m)	30~70	吸收式: ≥7
		冰水蓄冷: ≥9
	30~70	30~70

供冷安全指标 E_{S3} 主要对能源站内部供冷系统相应参数进行校验,计算如式(5)所示,判断其是否符合供冷设计规范^[14]中的参数要求。

$$E_{S3} = \frac{\text{满足供冷规范的参数数量}}{\text{参数总数量}} \times 100\% \quad (5)$$

最大供能能力 E_{S4} 即在满足各类安全约束条件下,能源站所能供应的最大负荷^[12],可以用式(6)所示的优化模型表示。

$$\begin{cases} E_{S4} = \max(L) \\ \text{s.t.} \begin{cases} E_{S1} = 100\% \\ E_{S2} = 100\% \\ E_{S3} = 100\% \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中, L 为供能能力(MW)。

平均供能可靠率 E_{S5} 为 y 种供应能源的均值, 供能可靠率为用户获得供能时间与统计期总时间的比值。 E_{S5} 计算表达式为

$$E_{S5} = \frac{\sum_{x=1}^y (1 - T_{\text{dis},x} / T_{\text{year}})}{y} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $T_{\text{dis},x}$ 为第 x 类能源的系统平均失能时间, 具体计算方式见文献[15]; T_{year} 为统计期总时间。

5) 经济社会效益

经济社会效益包括经济和社会两部分, 建设投资成本 E_{c1} [4]、动态投资回收期 E_{c2} [5]、建筑风貌影响程度 E_{c3} 为能源站规划方案的经济社会效益评价指标。其中, 建筑风貌影响程度 E_{c3} 如式(8)所示。

$$E_{c3} = \begin{cases} 0, \text{有泄爆口或烟囱} \\ 1, \text{无泄爆口或烟囱} \end{cases} \quad (8)$$

1.3.2 运行类评价指标

1) 能效水平

综合能源利用率 E_{n6} [4]、综合能耗 E_{n7} 、电储能利用效率 E_{n8} [16]、蓄热装置利用效率 E_{n9} [16]、蓄冷装置利用效率 E_{n10} 为能源站运行策略的能效水平评价指标。其中, 综合能耗表示统计期内能源站实际消耗的各类能源实物量(tce), 以标准煤折合, E_{n7} 计算表达式为

$$E_{n7} = \lambda_c Q_{\text{buy}}^E + \lambda_g Q_{\text{buy}}^G + \lambda_{re} Q_{\text{tot}}^{\text{RE}} \quad (9)$$

式中: λ_c 和 λ_g 分别为火电和天然气的折标准煤系数, 查表可得; λ_{re} 为可再生能源的折标准煤系数, 运行阶段一般取 0。

2) 能质水平

年平均焓效率 E_{x4} 、有效能利用率 E_{x5} 、熵增流增量 E_{x6} 为能源站运行策略的能质水平创新评价指标; 电压合格率 E_{x7} 、供热温度合格率 E_{x8} 、供冷温度合格率 E_{x9} 作为能源站运行策略的能质水平传统评价指标[16]。

年平均焓效率 E_{x4} 表示统计期内, 能源站输出焓流总量与输入焓流总量的比值(%), 反映了能源站的有效能利用水平, 如式(10)所示。

$$E_{x4} = \frac{E_{x,\text{out}}^{\text{ES}}}{E_{x,\text{in}}^{\text{ES}}} \quad (10)$$

式中, $E_{x,\text{out}}^{\text{ES}}$ 、 $E_{x,\text{in}}^{\text{ES}}$ 分别为能源站输出焓流总量和输入焓流总量(MWh)。需要注意的是, 当能源站输入侧含有可再生能源, 则存在 E_{x4} 大于 100% 的情况[6]。当然, E_{x4} 是否大于 100% 也与可再生能源在能源站输入侧的占比密切相关。

有效能利用率 E_{x5} 表示统计期内, 输出焓流总量与输入能量总量的比值, 如式(11)所示。有效能利用率越高, 能源站的能量品质转化水平越高。

$$E_{x5} = \frac{E_{x,\text{out}}^{\text{ES}}}{Q_{\text{tot}}^{\text{RE}} + Q_{\text{buy}}^E + Q_{\text{buy}}^G \cdot G} \quad (11)$$

熵增流作为能量品质衡量手段, 已得到广泛关注[7], 熵增流增量 E_{x6} 表示能源站的输出侧熵增流与输入侧熵增流的差值, 反映了能源站对能量无序程度的影响。能量无序程度的增量越小, 表明能源站造成的无序性越小。熵增流增量可表示为

$$E_{x6} = S_{\text{out}} - S_{\text{in}} \quad (12)$$

式中, S_{out} 、 S_{in} 分别为能源站的输出侧熵增流与输入侧熵增流(MW/K), 熵增流计算参见文献[10]。

3) 碳效水平

碳效比 C_3 和二氧化碳排放量 C_4 为能源站运行策略的碳效水平评价指标。其中: 碳效比表示实现某一功能单位排放的二氧化碳当量, 即能源站的碳排放总量与其功能单位总和的比值, 如式(13)所示。

$$C_3 = \frac{C_{\text{FP}}}{T_{\text{FU}}} \quad (13)$$

式中: C_{FP} 为碳排放总量; T_{FU} 为功能单位总和[17]。

4) 灵活水平

灵活水平表征了能源站解决可再生能源消纳和供需匹配等问题的调节能力。灵活互动资源占比 E_{F1} [18]、峰时购电量占比 E_{F2} 、谷时购电量占比 E_{F3} 为源站运行策略的灵活水平评价指标, 具体定义与计算方法不再赘述。

5) 经济社会效益

焓经济因子 E_{c4} [19]、综合能源收益 E_{c5} [4]、运行维护成本 E_{c6} 为能源站运行策略的经济社会效益指标, 具体定义与计算方法不再赘述。

1.4 评价指标体系构建

由于规划类指标和运行类指标之间关系尚不明确, 各指标间是否满足 P-I-C-H-O-S 原则尚未验证, 首先需要分析指标间的关系。

1.4.1 基于 TP-DEMATEL 的评价指标筛选

DEMATEL 法较为成熟, 基于 TP-DEMATEL 的评价指标筛选步骤如下所述。

1) 直接影响矩阵

由 h 名专家组成专家组, 根据表 2 所示的评分表, 对 n 个指标间的相互影响程度和方向进行打分, 形成 h 个直接影响矩阵 A^z 。

$$A^z = \begin{bmatrix} 0 & a_{12}^z & \cdots & a_{1n}^z \\ a_{21}^z & 0 & \cdots & a_{2n}^z \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^z & a_{n2}^z & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, a_{ni}^z 表示第 z 个专家针对指标 n 对指标 1 的影响程度给出的打分值。

表 2 影响程度评分表
Table 2 Impact rating scale

影响程度	无关	较低	中等	较高	很高
分数	0	1	2	3	4

2) 专家权重确定

专家打分存在一定的主观性, 需要进行专家权重确定, 通过专家之间的社会信任传播关系^[20], 建立专家之间的信任传播方程 $T(\alpha_{ab}, \alpha_{ba})$, 如式(15)所示。

$$T(\alpha_{ab}, \alpha_{ba}) = \frac{\alpha_{ab} \times \alpha_{ba}}{1 + (1 - \alpha_{ab})(1 - \alpha_{ba})} \quad (15)$$

式中: α_{ab} 表示专家 a 对专家 b 的信任度; α_{ba} 为专家 b 对专家 a 的信任度, $\alpha_{ab}, \alpha_{ba} \in [0, 1]$ 。

其中, 信任度 α_{ab} 可表示为

$$\alpha_{ab} = \sum_{\psi=1}^c \alpha_{ab}^{d_\psi} \quad (16)$$

式中: $\alpha_{ab}^{d_\psi}$ 表示专家 a 和专家 b 在第 ψ 条信任传播路径 d_ψ 下的信任度; c 为专家 a, b 之间的信任传播路径的总数。

据此, 专家 a 在专家组内的综合信任程度 T_a 可表示为

$$T_a = \frac{1}{h-1} \sum_{b=1, b \neq a}^h \alpha_{ba} \quad (17)$$

T_a 越大则表示专家 a 在专家组的综合信任程度越高, 即表明其在专家组内的权重更高, 专家 a 的权重 ω_a 可表示为

$$\omega_a = \frac{T_a}{\sum_{b=1}^h T_b} \quad (18)$$

式中, T_b 为专家 b 在专家组内的综合信任程度; ω_a

满足 $\sum_{a=1}^h \omega_a = 1$ 。

3) 综合影响矩阵

首先根据式(18)的专家权重结果, 将 h 个直接影响矩阵转换为 1 个总直接影响矩阵 A , 如式(19)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中

$$a_{uv} = \sum_{z=1}^h \omega_z a_{uv}^z \quad (20)$$

式中: a_{uv} 为直接影响矩阵 A 中某个元素, 指标 $u, v \in [1, n]$; ω_z 为第 z 个专家的权重; a_{uv}^z 表示第 z 个专家针对指标 u 对指标 v 的影响程度给出的打分值。

对矩阵 A 进行规范化, 得到规范化直接影响矩阵 G , 并以此构造综合影响矩阵 G, K 分别如式(21)、式(22)所示。

$$G = \frac{1}{\max_{1 \leq u \leq n} \sum_{v=1}^n a_{uv}} A \quad (21)$$

$$K = (k_{uv})_{n \times n} = G^1 + G^2 + \cdots + G^h \quad (22)$$

式中: k_{uv} 为综合影响矩阵 K 内某个元素; G^h 为第 h 个规范化直接影响矩阵。

4) 中心度与原因度

指标中心度越大, 表明该指标在指标体系中越重要; 指标原因度的绝对值越小, 表明该指标与其他指标逻辑关系越强。

$$\begin{cases} M = \left[\sum_{v=1}^n k_{uv} \right]_{n \times 1} + \left[\left[\sum_{u=1}^n k_{uv} \right]_{1 \times n} \right]^T \\ U = \left[\sum_{v=1}^n k_{uv} \right]_{n \times 1} - \left[\left[\sum_{u=1}^n k_{uv} \right]_{1 \times n} \right]^T \end{cases} \quad (23)$$

式中, M 和 U 分别为各指标的中心度、原因度。

若某指标的原因度大于零, 则为原因型指标; 若原因度小于零, 则为结果型指标; 若原因度等于零, 则该指标对其他指标的影响程度, 与其他指标对该指标的影响程度一致, 违背了指标选取的独立性原则, 则可以剔除该指标。

1.4.2 能源站规划/运行综合评价指标体系

利用 TP-DEMATEL 法, 邀请 4 名来自能源电气领域的专家, 首先表达他们对其他专家的信任程度, 通过式(15)一式(18)计算得到 4 名专家的权重分别为 $\omega = (0.19, 0.30, 0.27, 0.24)$, 根据专家打分结果对 1.3 节内的 37 个指标进行筛选分析, 得到各指标的中心度和原因度数据。中心度与原因度的关系如

图 2 所示, 在第一象限的设备利用率、能源耦合等值效率等 22 个指标为原因型指标, 在第四象限的有效能利用率、熵增流增量等 15 个指标则为结果型指标。

如图 2 所示, 电储能利用效率、蓄热装置利用效率、综合能源利用率等 9 个指标的中心度均小于 0.5, 原因度的绝对值均小于 0.08, 表明这 9 个指标在指标体系中的重要度较低, 并且与其他指标的逻辑关系过强, 应予剔除。

得到的能源站规划/运行综合评价指标体系如图 3 所示, 包括能效水平、能质水平、碳效水平、安全水平、灵活水平和经济社会效益, 涵盖了 17 个正向型评价指标和 11 个负向型评价指标。

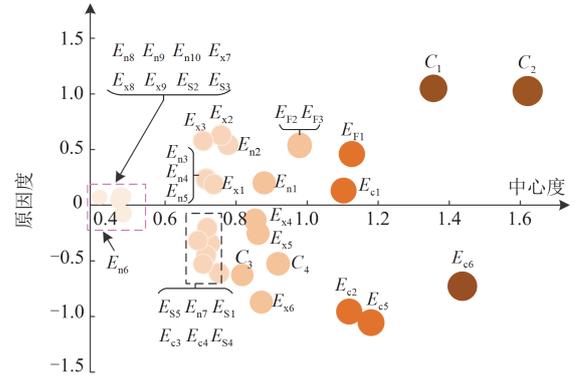


图 2 中心度-原因度关系图

Fig. 2 Diagram of the relationship between centrality and causality

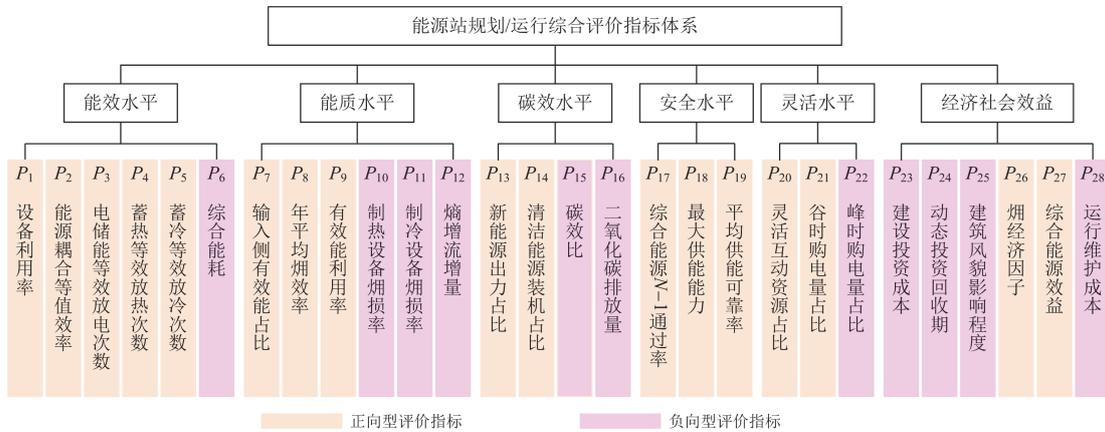


图 3 能源站规划/运行综合评价指标体系

Fig. 3 Comprehensive evaluation index system for energy station planning and operation

2 基于 CRITIC-VIKOR 法的指标评价方法

能源站规划/运行综合评价指标体系中, 各指标存在复杂且庞大的关系。本文将客观赋权^[21]与折衷排序相结合, 通过分析评价指标的波动性、冲突性, 得到评价指标的客观权重^[22], 为求取各方案与理想解的加权距离奠定权重基础。基于 CRITIC-VIKOR 法的指标评价方法具体步骤如下所述。

1) 评价指标计算与标准化

首先根据 1.3 节中的评价指标计算方法, 得到各个能源站规划/运行方案的指标数据; 其次针对各项指标存在量纲、正向型、负向型的差异, 需要对所有指标数据进行标准化处理, 正向型评价指标处理方式

$$z_{ij}^+ = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (24)$$

负向型评价指标处理方式

$$z_{ij}^- = \frac{x_{ij\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (25)$$

式中: z_{ij}^+ 为标准化处理后第 i 个能源站方案的第 j 项正向型评价指标值; z_{ij}^- 为标准化处理后第 i 个能源站方案的第 j 项负向型评价指标值; 后文将 z_{ij}^+ 和 z_{ij}^- 统称为 z_{ij} ; x_{ij} 为标准化处理前第 i 个能源站方案的第 j 项指标值; $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为在 i 个能源站方案中第 j 项指标的最大、最小值。

得到标准化评价指标数据矩阵(决策矩阵) Z , 如式(26)所示。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1j} & z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ z_{i1} & \cdots & z_{ij} & z_{in} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ z_{m1} & \cdots & z_{mj} & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, m 为能源站方案数量。

2) 指标权重确定

计算指标间的冲突系数与指标内的波动性，形成客观赋权。在第 i 个能源站方案中第 j 项指标的波动性 W_j 计算方法为

$$W_j = \left(\frac{\sum_{i=1}^m (z_{ij} - \bar{z}_j)}{m-1} \right)^{1/2} \quad (27)$$

式中， \bar{z}_j 为 m 个能源站方案的第 j 项指标平均值。

由能源站方案的第 j 、 g 项指标的冲突系数 r_{jg} ，可得到第 j 项指标的冲突性 R_j ，分别如式(28)和式(29)所示。

$$r_{jg} = \frac{\sum_{i=1}^m (z_{ij} - \bar{z}_j)(z_{ig} - \bar{z}_g)}{\left[\sum_{i=1}^m (z_{ij} - \bar{z}_j)^2 \sum_{i=1}^m (z_{ig} - \bar{z}_g)^2 \right]^{1/2}} \quad (28)$$

$$R_j = \sum_{g=1}^n (1 - r_{jg}) \quad (29)$$

波动性与冲突性的乘积表征了该指标的承载量，通过归一化处理即可得到第 j 项指标的权重 φ_j ，如式(30)所示。

$$\varphi_j = \frac{W_j \times R_j}{\sum_{j=1}^n W_j \times R_j} \quad (30)$$

3) 平均加权、最大加权和综合加权距离

提取矩阵 Z 中第 j 项指标，在所有能源站方案中，最大值 $z_{j\max}$ 为正理想解，最小值 $z_{j\min}$ 为负理想解。根据式(31)分别计算第 i 个能源站方案的平均加权距离 S_i 、最大加权距离 F_i 和综合加权距离 Q_i 。

$$\begin{cases} S_i = \sum_{j=1}^n \frac{\varphi_j (z_{j\max} - z_{ij})}{z_{j\max} - z_{j\min}} \\ F_i = \max_{1 \leq j \leq n} \left[\frac{\varphi_j (z_{j\max} - z_{ij})}{z_{j\max} - z_{j\min}} \right] \\ Q_i = \frac{\mu (S_i - \max_{1 \leq i \leq m} S_i)}{\max_{1 \leq i \leq m} S_i - \min_{1 \leq i \leq m} S_i} + \frac{(1-\mu) (F_i - \min_{1 \leq i \leq m} F_i)}{\max_{1 \leq i \leq m} F_i - \min_{1 \leq i \leq m} F_i} \end{cases} \quad (31)$$

式中， μ 为决策机制系数， $\mu > 0.5$ 说明偏好风险， $\mu < 0.5$ 说明偏保守，本文取 0.5，认为 S_i 和 F_i 一样重要。

4) 方案得分排序

根据 Q_i 值对各能源站方案进行排序。最小的 Q_i 值表示第 i 个方案为当前决策机制系数 μ 下的最佳方案。

3 算例分析

3.1 算例介绍

以我国华东地区某能源站工程项目为例，备选规划方案如图 4 所示。方案 1、方案 2 为含有燃气锅炉供热非全电方案；方案 3、方案 4 为全电力供应冷热的全电方案。其中，方案 2 和方案 4 配置有分布式屋顶光伏，具体设备容量见附录 A 表 A1。同时，各方案的运行策略均以电储能、蓄热/冷水箱参与“削峰填谷”为原则，详细数据见文献[23]。

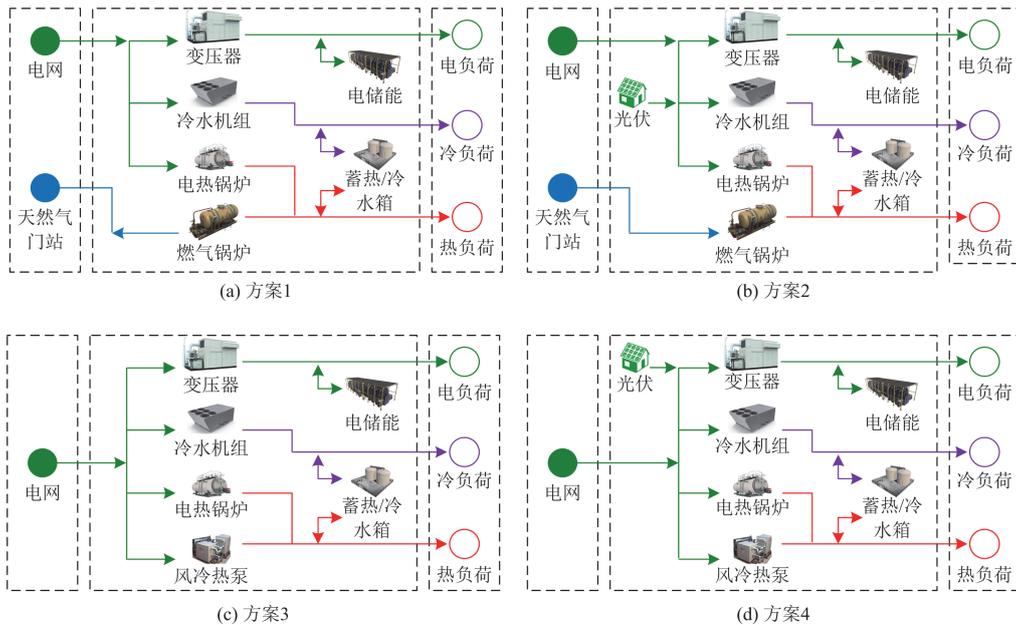


图 4 能源站工程的备选规划方案图

Fig. 4 Diagram of alternative planning schemes for energy station projects

3.2 评价结果分析

考虑到单一赋权方法可能存在局限与误差, 本节以熵权-VIKOR 法作为 CRITIC-VIKOR 法的对照组, 对算例中的能源站方案分别进行综合评价。

3.2.1 指标计算结果

由 1.3 节得到评价指标的标准化数据如表 3 所示。仅从指标计算结果初步来看, 含光伏配置的全电能源站在能效水平、碳效水平和灵活水平上均具有明显优势; 在能质水平方面, 方案 1 和方案 2 具有一定的优势; 在经济社会效益方面, 全电能源站不具有优势。

表 3 各方案评价指标的标准化数据

Table 3 Standardized data of evaluation index for each scheme

指标	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
P_1	0	0.27	0.30	1.00
P_2	0	0	1.00	1.00
能效水平 P_3	0.07	0.95	0	1.00
P_4	0.07	0.50	0	1.00
P_5	0.27	0.81	0	1.00
P_6	0	0.92	0.53	1.00
P_7	0	0.13	1.00	1.00
P_8	0.01	0.84	0	1.00
能质水平 P_9	1.00	0.84	0.48	0
P_{10}	0.98	1.00	0	0.64
P_{11}	1.00	0.81	0.31	0
P_{12}	1.00	0.46	0	0
P_{13}	0	0.81	0	1.00
碳效水平 P_{14}	0	0.76	0	1.00
P_{15}	0	0.93	0.12	1.00
P_{16}	0	0.95	0.04	1.00
安全水平 P_{17}	1.00	0.99	0.01	0
P_{18}	0.29	0.44	0	1.00
P_{19}	0.50	0	1.00	0.33
灵活水平 P_{20}	0	0.44	0.13	1.00
P_{21}	0	0.36	0.16	1.00
P_{22}	0.54	0.34	0	1.00
P_{23}	1.00	0.63	0.37	0
P_{24}	1.00	0	0.85	0.23
经济社会效益 P_{25}	0	0	1.00	1.00
P_{26}	0.13	1.00	0	0.92
P_{27}	0	0.98	0.02	1.00
P_{28}	1.00	0	0.83	0.42

3.2.2 指标权重计算结果

基于 CRITIC 法和熵权法两类客观赋权方法, 指标权重计算结果如图 5 所示。熵权法计及了指标内的波动性, 由信息熵构造各指标的权重, 指标的信息熵越小, 则该指标的权重越大; 而 CRITIC 法在计算权重时, 不仅考虑了指标内的波动性, 也考

虑了不同指标间的冲突系数。

各维度权重如图 6 所示。CRITIC 法中, 各维度所占权重的排序为: 经济社会效益 > 能质水平 > 能效水平 > 安全水平 > 碳效水平 > 灵活水平。熵权法中, 各维度所占权重的排序为: 能效水平 > 经济社会效益 > 能质水平 > 碳效水平 > 安全水平 > 灵活水平。

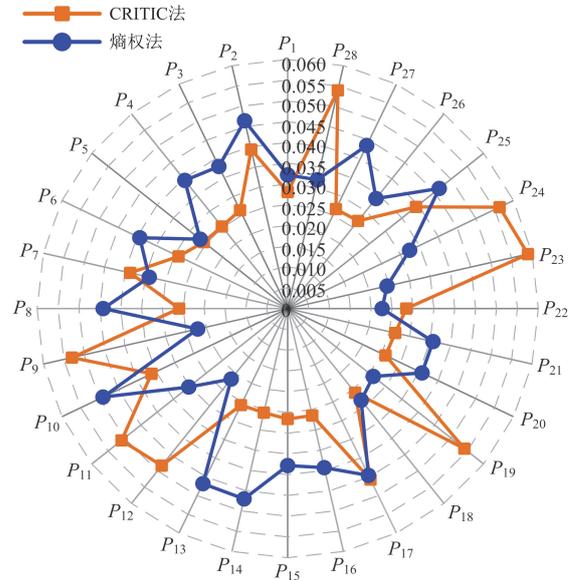


图 5 评价指标权重雷达图

Fig. 5 Radar chart of evaluation index weights

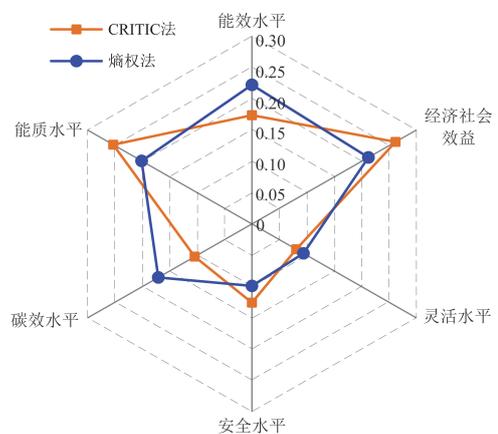


图 6 评价维度权重雷达图

Fig. 6 Radar chart of evaluation dimension weights

3.2.3 方案排序结果对比与分析

正向型评价指标的正理想解为各方案得分的最大值, 而负向型评价指标的正理想解则为各方案得分的最小值, 负理想解同理可得。进一步地, 利用熵权-VIKOR 法与 CRITIC-VIKOR 法, 分别计算各能源站方案指标实际得分与理想解的平均加权距离 S_i 、最大加权距离 F_i 和综合加权距离 Q_i , 当决策机

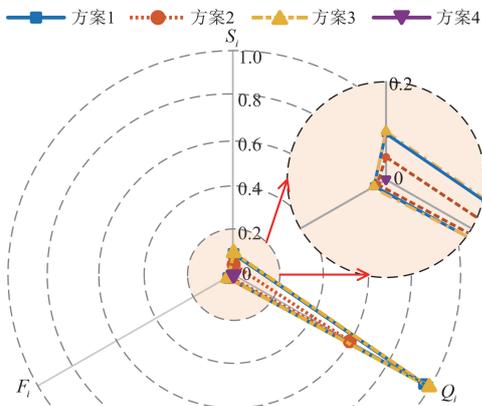
制系数 $\mu = 0.5$ 时, 图 7 展示了在两种评价方法下, 4 个方案的加权距离计算结果雷达图, 由于进行了标准化处理, 所以最大加权距离 F_i 更趋于零。两种计算方法得到的排序结果在平均加权距离 S_i 排序中略有区别, 但综合加权距离排序 Q_i 保持一致, 排序结果分别如式(32)和式(33)所示。

CRITIC-VIKOR法:

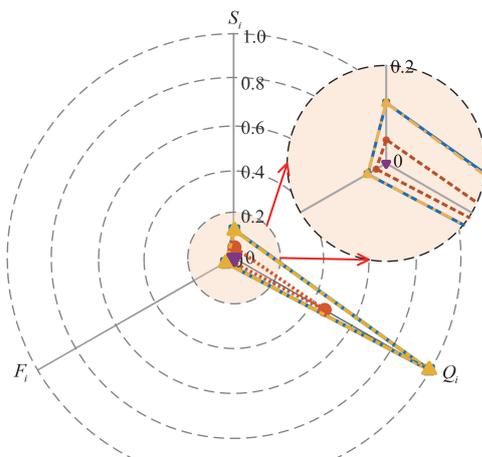
$$\begin{cases} S_i : S_4 > S_2 > S_1 > S_3 \\ F_i : F_4 > F_2 > F_1 > F_3 \\ Q_i : Q_4 > Q_2 > Q_1 > Q_3 \end{cases} \quad (32)$$

熵权-VIKOR法:

$$\begin{cases} S_i : S_4 > S_2 > S_3 > S_1 \\ F_i : F_4 > F_2 > F_1 > F_3 \\ Q_i : Q_4 > Q_2 > Q_1 > Q_3 \end{cases} \quad (33)$$



(a) 基于 CRITIC-VIKOR 法计算结果的雷达图



(b) 基于熵权-VIKOR 法计算结果的雷达图

图 7 加权距离计算结果雷达图

Fig. 7 Radar chart of weighted distance calculation results

加权距离数值越小则表明其距离理想解更近, 处于最优的位置, 从式(32)和式(33)可以看出, 两种评价方法下, 三类加权距离中方案 4 均处于最优位置, 在当前决策机制系数下, 方案 4 即为最优方案。

方案 1 为最典型 IES 的规划方案, 涉及的能源形式包括了电/气/冷/热, 其在建设投资成本、运行维护成本和设备损耗率方面具有一定的优势, 由于电、气、热(水)、冷(水)的能量品质水平逐步降低, 与方案 3、方案 4 中直接电制热、电制冷相比, 气制热的能量品质损失更少。

方案 2 在方案 1 的基础上, 接入了出力占比大于 50% 的光伏。考虑到可再生能源对能源站供能, 则可认为在计算含光伏的能源站的年平均焓效率时, 根据式(10), 输入焓只计算非可再生能源的输入总量, 输出焓总量则按实际输出计算^[11]。因此, 方案 2 和方案 4 的年平均焓效率远高于方案 1 和方案 3, 且具有较高的碳效水平。

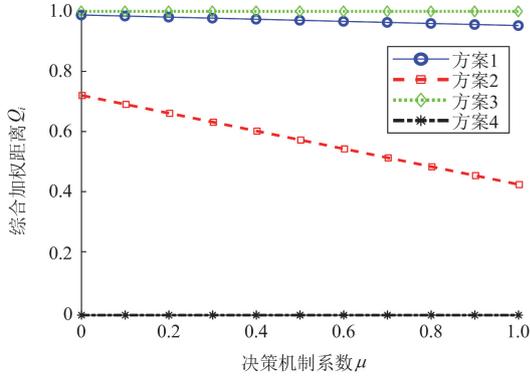
方案 3 为不接入光伏的全电能源站, 所有负荷均由上级电网供应, 输入侧有效能占比达到 100%, 但是在碳效水平、年平均焓效率、电储能等效放电次数、蓄热等效放热次数、蓄冷等效放冷次数方面均不具有优势。方案 3 虽然不使用天然气等化石能源, 但其综合排序结果并不高, 这是由于其在能质水平和经济效益方面存在劣势, 不论是建设全电能源站, 还是非全电能源站, 接入光伏等可再生能源(或接入低碳排放因子的市电)是影响其综合排序结果的重要因素。

方案 4 在方案 3 基础上接入了装机容量占比达 61.83% 的光伏, 其年平均焓效率高达 334.11%, 这与文献[24]中考虑焓效率有利于可再生能源的消纳的结论也保持一致。方案 4 在能效、碳效、能质、灵活水平方面具有很大的提升, 综合能耗适中, 且无需泄爆口及烟囱, 对建筑风貌的影响程度最小, 但是牺牲了一定的建设投资成本和运行维护成本。

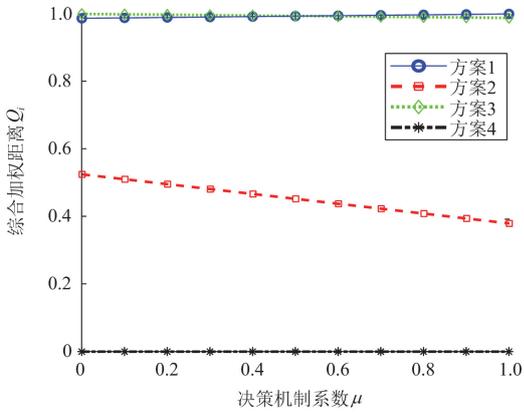
3.2.4 灵敏度分析

对 VIKOR 排序方法的灵敏度分析, 包括决策机制系数 μ 对综合加权距离 Q_i 的影响程度和权重扰动对排序结果的影响程度。如图 8 所示, 将决策机制系数 μ 按 0.1 的步长取值, 分别探究两种评价方法下, 各方案的 Q_i 与 μ 的变化规律。可以发现, 在 CRITIC-VIKOR 的评价方法下, 不论决策机制是偏好风险, 还是偏好保守, 方案 4 均为最优方案, 方案 1 均处于最劣位置, 且均保持方案 4 > 方案 2 > 方案 1 > 方案 3 的趋势。在熵权-VIKOR 评价方法下, 方案 4 均为最优方案, 而方案 1 和方案 2 受到决策机制系数的影响, 当 $\mu \leq 0.6$ 时, 方案 1 优于

方案3, 当 $\mu > 0.6$ 时, 方案3 优于方案1。由此可见, 方案排序结果受决策机制系数的影响较小, 具有一定的稳定性。



(a) 基于CRITIC-VIKOR法的 Q_i - μ 关系图



(b) 基于熵权-VIKOR法的 Q_i - μ 关系图

图8 Q_i - μ 关系图

Fig. 8 Relationship diagram of Q_i - μ

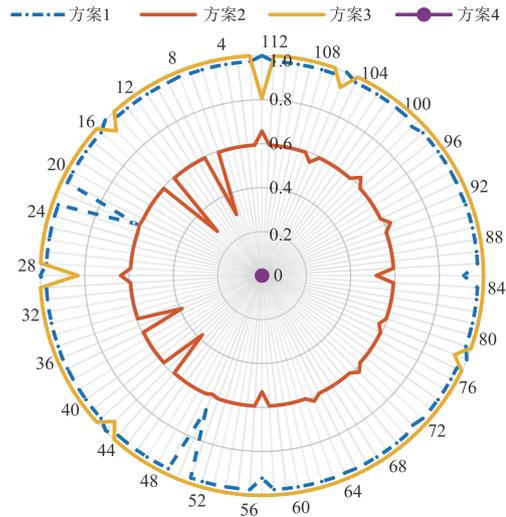
各指标的权重对能源站方案排序存在影响, 本节采用摄动法^[25]进行灵敏度分析, 明确权重变化对方案排序的偏离程度, 即明确评价指标的权重受到微小扰动后, 各方案优先序的相应变化, 验证指标评价方法的稳定性。第 j 项指标的初始权重为 φ_j , 受到扰动后权重为 φ'_j , $\varphi'_j = \ell \cdot \varphi_j$, 且 $0 \leq \varphi'_j \leq 1$, 则参数 ℓ 的区间为 $0 \leq \ell \leq 1/\varphi_j$ 。当第 j 项指标权重变化时, 其余指标的权重均相应发生变化, 记为 $\varphi'_k = \phi \cdot \varphi_k$ ($k=1, 2, \dots, m, k \neq j$), 且满足式(34)。

$$\varphi'_j + \sum_{k \neq j, k=1}^m \varphi'_k = 1 \Rightarrow \ell \cdot \varphi_j + \phi \sum_{k \neq j, k=1}^m \varphi_k = 1 \quad (34)$$

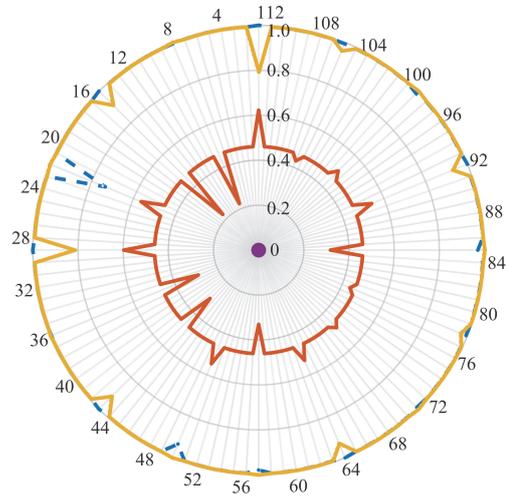
求解得到 $\phi = (1 - \ell \cdot \varphi_j) / (1 - \varphi_j)$, 即可计算 φ'_k 。

基于上述方法, 对28个评价指标的权重进行扰动, 设定参数 ℓ 依次取3、2、1/2和1/3, 即每个指标的权重设定4组扰动值, 共进行112次实验计算,

以 Q_i 值结果排序, 得到了两种评价方法的灵敏度分析结果。在112次实验计算中, 方案4的 Q_i 值均为最小且接近于0, 位列排序结果第一。基于CRITIC-VIKOR法的灵敏度分析结果如图9(a)所示, 仅有6次(5.36%)改变了排序结果, 但最优方案始终为方案4, 次优方案始终为方案2。基于熵权-VIKOR法的灵敏度分析结果如图9(b)所示, 有8次(7.14%)改变了排序结果, 但最优方案始终为方案4, 次优方案始终为方案2。综上, 本文采用的决策方法对评价价值的改变相对不敏感, 具有一定的稳定性。



(a) 基于CRITIC-VIKOR法灵敏度的分析结果



(b) 基于熵权-VIKOR法灵敏度的分析结果

图9 权重扰动下的灵敏度分析结果

Fig. 9 Sensitivity analysis results under weight perturbation

4 结论

本文通过信任网络关系提出了TP-DEMATEL评价指标筛选方法, 构建含能效水平、能质水平、

碳效水平、安全水平、灵活水平和经济社会效益 6 个维度的能源站规划/运行综合评价体系,进一步建立了基于 CRITIC-VIKOR 法的指标评价方法,并应用于某能源站工程案例。具体结论如下所述。

1) 利用评分专家间的信任度关系,建立了 TP-DEMATEL 评价指标筛选方法,以中心度和原因度参数为决策者提供客观建议,避免指标选取的重复性和同向性。

2) 提出了输入侧有效能占比、有效能利用率、熵增流增量等创新指标,建立了以能效-能质-碳效为核心维度的能源站规划/运行评价指标体系,并基于 CRITIC-VIKOR 法的指标评价方法,得到了最优能源站规划方案,并验证了所用评价方法的稳定性。

3) 考虑光伏接入的全电能源站(方案 4),在能效、能量品质、碳排放水平等方面具有较强的优势,但是牺牲了一定的经济效益;当光伏出力占比达到一定程度时,能量品质水平与碳排放水平呈现正相关性。

考虑到新型能源系统的不断发展,未来能源系统具有很强的智能化、信息化特征,因此后续研究将进一步在智能化水平、信息化水平等方面完善评价指标体系。同时,在评价方法方面,可增加模糊评价等方法,用以应对多重不确定性对能源站评价的影响。

附录 A

表 A1 能源站的设备容量

Table A1 Equipment capacity of energy station

设备	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
光伏/kW	0	5500	0	5500
基载冷水机组/kW	5369	5369	5369	5369
风冷热泵/kW	0	0	2740	2740
电热锅炉/kW	5640	5640	5640	5640
燃气锅炉/kW	5302	5302	0	0
电储能/kWh	16 500	16 500	16 500	16 500
蓄热(冷水箱)/m ³	20 000	20 000	20 000	20 000

参考文献

- [1] 张鑫, 顾炜程. 上海首个全电综合能源站项目落地临港新片区[J]. 上海节能, 2021(10): 1133.
ZHANG Xin, GU Weicheng. The first fully electric comprehensive energy station project in Shanghai has landed in the Lingang new area[J]. Shanghai Energy Saving, 2021(10): 1133.
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] WANG Yongzhen, ZHANG Lanlan, SONG Yi, et al. State-of-the-art review on evaluation indicators of integrated intelligent energy from different perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113835.
- [4] 梁硕, 王艳松. 基于改进云物元模型的工业园区综合能源系统规划方案评价[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 165-176.
LIANG Shuo, WANG Yansong. Evaluation of an integrated energy system planning scheme for an industrial park based on an improved cloud matter-element model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 165-176.
- [5] 黄悦华, 王朔浩, 杨楠, 等. 基于综合赋权与云熵优化的园区综合能源系统评价[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 201-214.
HUANG Yuehua, WANG Shuohao, YANG Nan, et al. Evaluation of park integrated energy system based on comprehensive weighting and cloud entropy optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 201-214.
- [6] 王丹, 周天烁, 李家熙, 等. 面向能源转型的高焓综合能源系统理论与应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 114-131.
WANG Dan, ZHOU Tianshuo, LI Jiayi, et al. Theory and application of high-exergy integrated energy system for energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 114-131.
- [7] REN Rufe, LI Yushuai, SUN Qiuye, et al. Digital twin assisted economic dispatch for energy internet with information entropy[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024: 1-12.
- [8] LI Jiayi, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Mechanism analysis and unified calculation model of exergy flow distribution in regional integrated energy system[J]. Applied Energy, 2022, 324: 119725.
- [9] QIN Minglei, YANG Yongbiao, ZHAO Xianqiu, et al. Low-carbon economic multi-objective dispatch of integrated energy system considering the price fluctuation of natural gas and carbon emission accounting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1013-1030.
- [10] 李家熙, 王丹, 贾宏杰, 等. 面向可再生能源接入的综合能源系统熵态机理和分析方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 47-58.
LI Jiayi, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Entropy state mechanism and analysis method of integrated energy system for integration of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 47-58.

- [11] 胡泉. 考虑能量品质的区域综合能源系统优化规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
HU Xiao. Research on optimal planning of regional integrated energy systems considering energy quality[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [12] LIU Liu, WANG Dan, HOU Kai, et al. Region model and application of regional integrated energy system security analysis[J]. Applied Energy, 2020, 260: 1-24.
- [13] 北京市煤气热力工程设计院有限公司. 城市供热管网设计标准: CJJ/T34—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [14] 华南理工大学. 区域供冷系统设计标准: T/CDHA 506—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [15] 刘骏锋. 基于实测数据的综合能源系统综合评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
LIU Junfeng. Comprehensive evaluation of integrated energy system based on measured data[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [16] 郑玉平. 城镇能源互联网关键技术及实践[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [17] 何冠成, 刘岩, 母志鹏, 等. 碳效比-装备产品低碳性能关键技术参数[J]. 环境技术, 2024, 42(1): 93-98.
HE Guancheng, LIU Yan, MU Zhipeng, et al. Carbon efficiency ratio-key technical parameters of low carbon performance of equipment products[J]. Environmental Technology, 2024, 42(1): 93-98.
- [18] 王玉洁. 新型电力系统建设下区域电能结构质量指数研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
WANG Yujie. Research on regional power structure quality index under the construction of new power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [19] 肖楷. 基于焓、焓经济、焓环境分析的异构能源系统性能评价及优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
XIAO Kai. Performance evaluation and optimization of heterogeneous energy system based on exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analyses[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [20] 缙迅杰, 徐鑫茹, 徐泽水. 基于动态社会网络的能源转型路径评估多属性群决策建模研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-16[2024-08-13]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.1025>.
GOU Xunjie, XU Xinru, XU Zeshui. Research on multi-attribute group decision-making modeling of energy transition path evaluation based on dynamic social network[J]. Chinese Journal of Management Science: 1-16[2024-08-13]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.1025>.
- [21] 戴国华, 戴睿, 张琪瑞, 等. 基于主客观赋权相结合的省级电网发展诊断分析方法与实证研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 110-118.
DAI Guohua, DAI Rui, ZHANG Qirui, et al. Empirical study and analysis of provincial power grid development diagnosis based on the combination of a subjective and objective weighting method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 110-118.
- [22] 陈晨, 闫向阳, 齐桓若, 等. 基于 FAHP-改进 CRITIC 组合赋权的屋顶光伏接入配网评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 97-108.
CHEN Chen, YAN Xiangyang, QI Huanruo, et al. An evaluation method of a roof photovoltaic access distribution network based on the weight of FAHP-improvement CRITIC combination[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 97-108.
- [23] 窦真兰, 张春雁, 张帅, 等. 多区域电-冷-热互联分布式能源站量质协同规划研究[J/OL]. 电网技术: 1-17 [2024-08-21]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0445>.
DOU Zhenlan, ZHANG Chunyan, ZHANG Shuai, et al. Research on quantity and quality collaborative planning of multi-regional electric-cold-thermal interconnected distributed energy station[J]. Power System Technology: 1-17[2024-08-21]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0445>.
- [24] ZHOU Tianshuo, WANG Dan, LI Jiayi, et al. Multi-objective planning for integrated energy systems considering both energy quality and renewable energy[C]// 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), July 16-20, 2023, Orlando, FL, USA: 1-5.
- [25] 袁宇, 关涛, 闫相斌, 等. 基于混合 VIKOR 方法的供应商选择决策模型[J]. 控制与决策, 2014, 29(3): 551-560.
YUAN Yu, GUAN Tao, YAN Xiangbin, et al. Based on hybrid VIKOR method decision making model for supplier selection[J]. Control and Decision, 2014, 29(3): 551-560.

收稿日期: 2024-05-23; 修回日期: 2024-09-03

作者简介:

窦真兰(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为综合能源系统、能源互联网、风力发电、氢能、储能和微电网等; E-mail: douzhl@126.com

张春雁(1967—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为综合能源系统、能源互联网、电制氢及综合利用技术; E-mail: zhcyongji@126.com

周天烁(1995—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统分析. E-mail: tszhou@tju.edu.cn

(编辑 张颖)