

基于改进 TOPSIS 的区域综合能源系统 综合能效评估

连文翰, 崔双喜, 李宇智, 邱红桦
(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 随着区域综合能源系统的发展,对区域综合能源系统进行全面综合能效评估已经成为热点问题。文章首先针对不同能源在转化过程中“质”的变化,引入焓效率的概念,通过能质系数法对不同的能源进行折算,在此基础上建立包含经济、能源、环境3个维度的综合能效评估指标,构建了综合能效评估体系;其次,建立改进的 TOPSIS 对区域综合能源系统进行综合能效评估,利用最小二乘法将熵权法和变异系数法的结果相结合计算客观权值,并利用灰色关联度对 TOPSIS 中的测距方式进行改进;最后,算例分析结果表明了所提方法的有效性和可行性。为高品质区域综合能源系统的规划和优化运行提供一定的参考价值。

关键词: 区域综合能源系统; 综合能效评估; 焓效率; 组合赋权; TOPSIS

中图分类号: TK81; TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)10-1355-08

0 引言

为实现“双碳”目标,综合能源系统受到了广泛的关注^[1-3]。综合能源系统按其规模可分为跨区域级、区域级和用户级^[4]。目前,关于综合能源系统的能源指标评估主要集中在能源的消耗量,未能完全考虑到不同能源在转化过程中“质”的损耗,不能科学地表征不同能源的利用程度。

通过焓效率可以量化评估区域综合能源系统中能源梯级利用的优势,对寻求能效优化和高品质系统规划具有一定参考价值。文献[5]通过提高经济指标和新能源利用率指标验证了 P2G 对系统的有益性,但对考虑冷、热等多种负荷情况下的系统未做详细的研究。文献[6]建立了包含社会效益、能源利用效率、经济性等多种评价指标,但其中能源指标的评价未考虑到不同能源“质”的差异与损耗。文献[7]评估了各系统能源利用效率并结合能质系数评估能源转换设备的利用率,未详细对子系统中焓效率进行评价。文献[8]较为全面地计算了能源利用率和焓效率,但仅在冷、热模块对焓效率进行评估。国内外学者对于评价方法的选取主要包括主观评价法或客观评价法。传统客观评价法包括 TOPSIS 法等, TOPSIS 法能充分利用原始数据的信息,且对数据的分布以及数量没有严格的限制,简单易行。但在线性关系等情况

时会给出错误的判断。文献[9]基于层次分析法进行了多方面的评价,但只包含主观赋权法,结果会有误差。文献[10]结合了 AHP 与熵权法提出了兼具主观性和客观性的评价方法。文献[11]采用了 ANP 结合反熵权法确定权值,通过德尔菲法和最小二乘法拟合确定评分函数。文献[12]构建了改进灰色 TOPSIS 评估模型,在对工业园区的评估中取得了准确度更高的评价。

面对区域综合能源系统能效评估时,以上研究对于能源指标的评价未充分考虑到不同能源做功能力的差异,或未对子系统进行详细评价。本文考虑到不同能源品味的差异,引入子系统的焓效率作为能源的主要评估指标,在此基础上添加经济和环境传统指标,建立全面的综合评价体系;其次在指标权重的确定上,考虑到主观方法较为依靠评价者的经验和偏好,故采用客观权重法确定指标权重,并且单一赋权方法存在权值分配不合理的缺陷,本文利用最小二乘法组合熵权法和变异系数法的权值,可以更加客观的对区域综合能源系统进行评价,采用改进的逼近理想解排序模型(TOPSIS),利用灰色关联度法克服传统 TOPSIS 法的欧式测距的缺点,建立评估模型;最后通过算例对比分析不同情形下的评估得分,验证本文所提方法的可行性。

收稿日期: 2023-02-19。

基金项目: 国家自然科学基金(51667020);新疆大学自然科学基金(BS160246)。

通信作者: 崔双喜(1970-),男,博士,副教授,主要从事新能源并网与控制、微能源网优化利用研究。E-mail:1449622236@qq.com

1 区域综合能源系统基本结构

区域综合能源系统通过各种能量耦合设备实现了能源之间的耦合互补和综合利用^[13]。图 1 为系统内的设备种类以及能量流动。

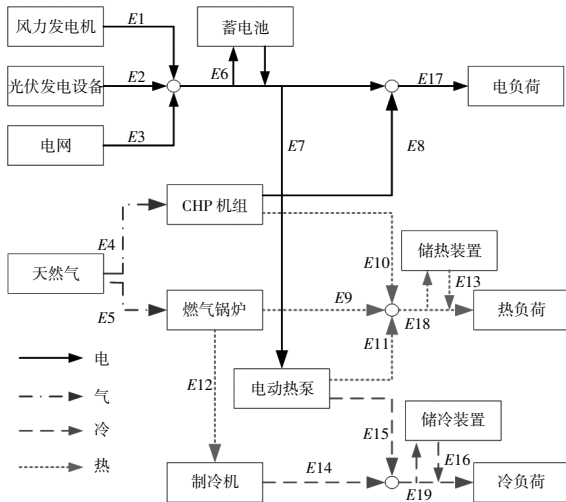


图 1 区域综合能源系统能量流动示意图
Fig.1 Energy flow diagram of regional integrated energy system

由图 1 可知,系统主要通过天然气、风力发电和光伏发电满足电负荷,添加电储能设备提高系统削峰填谷的能力,当不满足负荷需求时可从电网购电。天然气一部分通过 CHP 机组产生热能和电能,另一部分通过燃气锅炉产生热能。电动热泵可以将电能转化为热能或者冷能,制冷机可以将燃气锅炉产生的一部分热能转化为冷能,以满足冷负荷需求。

2 区域综合能源系统评估体系

为保证方案评价的准确性和科学性,本文从经济、环境、能源 3 个维度建立了区域综合能源系统综合能效评估体系,如图 2 所示。

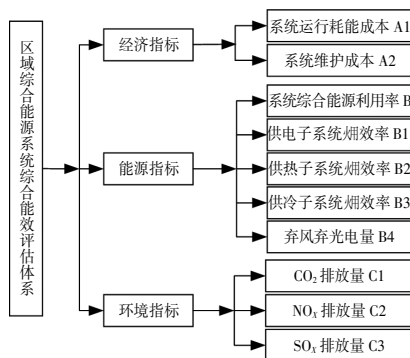


图 2 区域综合能源系统综合能效评估体系
Fig.2 Comprehensive energy efficiency evaluation system of regional comprehensive energy system

区域综合能源系统采用了多种能源形式联合对不同负荷进行供能,因此,在能源指标中应细化成不同供能子系统进行评估,并且单一考虑“量”的变化不能完全反应转换效率,故引入能质系数对不同能源进行折算,计算各个供能系统焓效率。经济性指标主要计算系统运行下所需天然气与电力价格成本和设备维护成本,弃风弃光量放入能源指标进行计算。此外计算了各污染物的排放量以及 CO₂ 排放量作为环境指标。本文构建的指标旨在对区域综合能源进行系统全面的评价,也可根据实际情况基于本文框架进行拓展,以满足不同设计者的实际需求。

2.1 经济指标

①系统运行耗能成本

系统运行耗能成本主要为系统在满足负荷需求运行下,所要购买的天然气和电力成本。

$$A_1 = \sum_{t=1}^{24} \frac{H_t p}{V_{LHV}} + \sum_{t=1}^{24} E_t m_t \quad (1)$$

式中: H_t 为 t 时刻系统天然气消耗量; V_{LHV} 为天然气热值,本文取 $10.8 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$; p 为天然气价格; E_t 为 t 时刻向电网购买电量; m_t 为 t 时刻电网电价,元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

②系统维护成本

系统维护成本主要为购买系统所需设备的成本和设备运行时所产生的费用。

$$A_2 = \sum_{i=1}^N S_i w_i + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} W_{i,t} r_i \quad (2)$$

式中: S_i 为设备 i 的额定容量; w_i 为设备 i 的单位设备投资费用; $W_{i,t}$ 为设备逐时负荷; r_i 为单位设备运行费用。

2.2 环境指标

①CO₂ 排放量

天然气在燃烧利用的过程中会排放出 CO₂ 等物质,本文主要计算天然气消耗产生的 CO₂ 以及从电网购电(折合燃煤发电产生的污染物)的 CO₂ 排放总量。

$$C_1 = \sum_{t=1}^{24} \frac{H_t}{V_{LHV}} a + \sum_{t=1}^{24} E_t b \quad (3)$$

式中: a 为天然气燃烧的 CO₂ 排放因子; b 为燃煤发电的 CO₂ 排放因子。

CO₂, SO_x 排放因子如表 1 所示。

表 1 气体排放因子
Table 1 Gas emission factors

名称	CO ₂ 排放因子	SO _x 排放因子
天然气/g·m ⁻³	1 964	1.24
燃煤发电/g·(kW·h) ⁻¹	900	9.14

②NO_x 排放量

污染物的过多排放会导致环境问题的加速发生,本文主要研究 NO_x 和 SO_x 的排放。区域综合能源系统的 NO_x 主要来源于电池、燃气锅炉、制冷机、电动热泵、CHP 和外购电量。各设备 NO_x 排放因子如表 2 所示。

表 2 设备 NO_x 排放因子
Table 2 NO_x emission factors of equipment

设备名称	NO _x 排放因子/g·(kW·h) ⁻¹
蓄电池	0.005 0
燃气锅炉	0.255 6
制冷机	0.100 8
CHP	0.32
电动热泵	0.180
燃煤发电	2.68

NO_x 排放量为

$$C_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} Y_{i,t} c_i + \sum_{t=1}^{24} E_t d \quad (4)$$

式中: c_i 为设备 i 的排放因子; $Y_{i,t}$ 为设备 i 在 t 时刻耗电量,kW·h; d 为燃煤发电的 NO_x 排放因子。

③SO_x 排放量

SO_x 排放量计算与 CO₂ 排放量计算类似。

$$C_3 = \sum_{t=1}^{24} \frac{H_t}{V_{LHV}} e + \sum_{t=1}^{24} E_t f \quad (5)$$

式中: e 为天然气燃烧的 SO_x 排放因子; f 为燃煤发电的 SO_x 排放因子。

2.3 能源指标

在包含多种能源之间相互转化的区域综合能源系统中,不同能源的转化不仅要考虑到“量”的守恒,还需要考虑到不同能量做功的大小导致“质”的差异。传统的折算方法主要通过标煤法和热当量法将不同能源折算到统一能级^[14]。但标煤法主要用于一次能源例,如煤炭、天然气的折算;热当量法通过不同热能做的功进行折算,主要对冷和热两种能源进行折算。以上方法都不能很好地满足区域综合能源系统的能源折算,故本文采用能质系数法^[15]进行折算,计算不同供能系统的焓效率。

2.3.1 焓分析的能质系数法

焓定义为系统达到热力学寂态所能做出的最大有效功^[16]。能质系数定义为不同能源对外所能做的功与其总能量的比值,表示每单位能量中所含焓值的大小^[17]。能质系数可以直观的区分不同能源之间品味的差异,综合考虑到能量转化过程中“质”的变化,合理地揭示能量的损失以及利用程度。能质系数会受到环境温度、不同能量形态等因素的影响,不同能源在不同季节下的能质系数如表 3 所示^[11]。

表 3 能源能质系数
Table 3 Energy quality coefficient

名称	夏季能质系数	冬季能质系数
电力	1	1
天然气	0.51	0.53
热水	0.1~0.2	0.2~0.3
热负荷	0.07	0.07
冷负荷	0.05	0.05

由于不同季节下能质系数不同,故基于实例分析不同季节下的区域综合能源系统焓效率。

2.3.2 系统综合能源利用率

区域综合能源系统综合能源利用率表示系统输入的能量进行能质系数折算后统一为输出焓与折算后的输入焓的比值。

$$B = \sum_{t=1}^{24} \frac{D_t^e \lambda_E + D_t^h \lambda_{hot} + D_t^c \lambda_{cool}}{H_t \lambda_G + P_{E,t} \lambda_E} \quad (6)$$

式中: $\lambda_E, \lambda_G, \lambda_{hot}, \lambda_{cool}$ 为电力、天然气、热负荷、冷负荷的能质系数; D_t^e, D_t^h, D_t^c 为 t 时刻的电需求、热需求、冷需求,kW·h; $P_{E,t}$ 为 t 时刻的购电量加上风力发电量和光伏发电量。

为进一步详细分析系统内焓转换过程,本文将区域综合能源系统细化分为供电子系统、供热子系统、供冷子系统 3 个子系统进行焓效率的评估,分析各个子系统输出焓与输入焓的比值,得出 1 d 内各个子系统焓效率。

①供电子系统焓效率

供电子系统主要包括电池和 CHP 机组,系统焓效率的损失主要在于电池充放电的损耗和机组的能源转换,具体焓效率为

$$B_1 = \sum_{t=1}^{24} \frac{D_t^e \lambda_E + PE_{3,t} \lambda_E + P_{cha,t} \lambda_E}{P_{E,t} \lambda_E + P_{dis,t} \lambda_E + H_{1,t} \lambda_G} \quad (7)$$

式中: $PE_{3,t}$ 为 t 时刻供给电动热泵的电量; $P_{cha,t}$ 为

t 时刻电池充电的电量; $P_{dis,t}$ 为 t 时刻电池放电量; $H_{1,t}$ 为 t 时刻供给 CHP 的天然气的量。

②供热子系统效率

供热子系统主要造成损耗的设备有燃气锅炉、CHP 机组和电动热泵,具体效率为

$$B_2 = \sum_{t=1}^{24} \frac{D_t^h \lambda_{hot} + PH_{2,t} \lambda_H}{H_{1,t} \lambda_G + H_{2,t} \lambda_G + P_{EMPH,t} \lambda_E / COP_{EMP}} \quad (8)$$

式中: $PH_{2,t}$ 为 t 时刻燃气锅炉供给制冷机的热量; $H_{2,t}$ 为 t 时刻天然气供给燃气锅炉的量; $P_{EMPH,t}$ 为 t 时刻电动热泵的制热量; COP_{EMP} 为电动热泵效率; λ_H 为热水的能质系数。

③供冷子系统效率

供冷子系统主要造成损耗的设备有制冷机和电动热泵,具体效率为

$$B_3 = \sum_{t=1}^{24} \frac{D_t^c \lambda_{cool}}{PH_{2,t} \lambda_H + P_{EMPC,t} \lambda_E / COP_{EMP}} \quad (9)$$

式中: $P_{EMPC,t}$ 为 t 时刻电动热泵的制冷量。

④弃风弃光电量

由于新能源发电的波动性,会出现负荷的消纳能力不足,预测风力发电和光伏发电量之和大于实际消耗的电量,预测电量减去实际消耗电量即为弃风、弃光电量。

3 基于 TOPSIS 的改进评价方法

对以上多指标进行评价确定权重时,本文针对原有 TOPSIS 的评价算法的不足提出改进,改进的灰色 TOPSIS 法计算流程如图 3 所示。

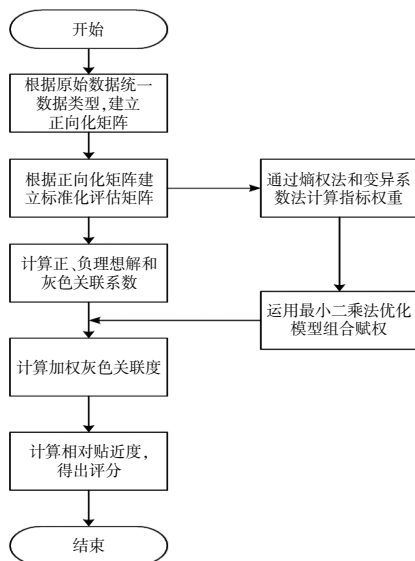


图 3 改进的灰色 TOPSIS 法计算流程

Fig.3 Calculation process of improved grey TOPSIS method

图中权值由最小二乘法组合赋权,避免了单一赋权方法的缺陷,使结果更具有参考性。传统 TOPSIS 算法采用欧式测距的方法评估系统与正、负最优解的距离,但在差距较小的情况下可能会给出错误的评价^[12],为解决这个问题引入了灰色关联度代替原有欧式测距法,可以提高评判系统的评估准确性。

TOPSIS 法作为一种多目标决策综合评价方法,依据评价对象与正、负理想解之间的距离来评估优劣性^[19]。欧式测距法作为传统 TOPSIS 法计算正、负理想解的距离,当评估指标之前存在线性关系或者方案离正、负理想解都相近时,欧式距离会失效,影响评价对象的评价^[20]。为克服上述缺点,通过灰色关联度法计算指标间整体趋势的相似程度来评价各方案与正、负理想解间的距离,代替原有欧式测距法,并结合组合权值计算加权灰色关联度正、负理想解,基本步骤如下。

根据标准化矩阵 R 得到各个指标的最优值和最差值:

$$r^+ = \{ \max_j R_{ij} \} = \{ R_1^+, R_2^+, \dots, R_n^+ \} \quad (10)$$

$$r^- = \{ \max_j R_{ij} \} = \{ R_1^-, R_2^-, \dots, R_n^- \} \quad (11)$$

式中: r^+ 为指标最优值组成的正理想解集合; r^- 为指标最差值组成的负理想解集合。

计算每个评价对象对应评价指标的灰色关联系数 $\gamma_{ij}^+, \gamma_{ij}^-$:

$$\gamma_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |r_{ij}^- - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij}^- - r_j^+|}{|r_{ij}^- - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij}^- - r_j^+|} \quad (12)$$

$$\gamma_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |r_{ij}^+ - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij}^+ - r_j^-|}{|r_{ij}^+ - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij}^+ - r_j^-|} \quad (13)$$

式中: ρ 为分辨率系数,在 $[0, 1]$ 内,一般取 0.5; r_{ij} 为标准化矩阵 R 中的元素; r_j^+ 为正理想解方案的指标值; r_j^- 为负理想解方案的指标值。

计算加权灰色关联度代替 TOPSIS 法中的正、负理想解,改进后的正、负理想解采用了组合权重与灰色关联系数相乘的方法,得到改进后的正、负理想解 S_i^+, S_i^- :

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n w_j \gamma_{ij}^+ \quad (14)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n w_j \gamma_{ij}^- \quad (15)$$

式中:权重值 w_j 为通过最小二乘法组合熵权法与变异系数法得到的组合权值。

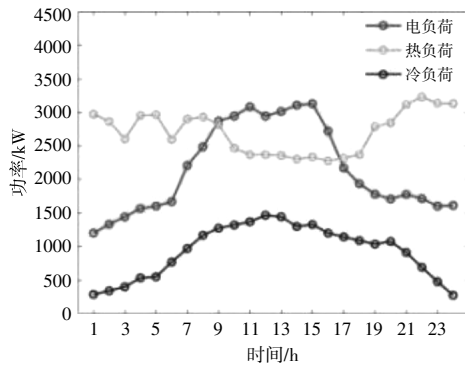
计算相对贴近度 D_i , D_i 越大,表明方案的综合能效越好;根据 D_i 进行排序,直观表现方案的优缺点。

$$D_i = \frac{S^+}{S^+ + S^-} \quad (16)$$

4 算例分析

4.1 算例介绍

以某工业园区为研究对象进行仿真,园区结构如图 1 所示,包含主要设备参数如表 4 所示。



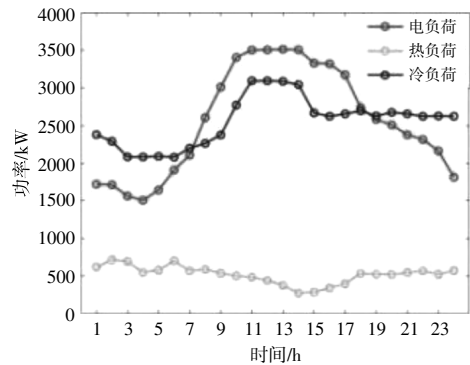
(a) 冬季典型日负荷

表 4 园区主要能源设备及其参数
Table 4 Main energy equipment and parameters in the park

设备名称	额定容量 kW	效率或 COP	单位投资费用 元/kW	单位运行费用 元/kW
蓄电池	900	0.9	600	0.05
燃气锅炉	1 500	0.9	800	0.01
制冷机	1 200	1.2	1 000	0.01
CHP	3 500	气转电 0.35 气转热 0.45	600	0.04
电动热泵	1 500	3	1 500	0.02

根据气候特征,将区域分为夏季和冬季,取各季节典型日数据进行计算,各典型日负荷数据如图 4 所示。

各典型日风力发电机和光伏发电设备预测出



(b) 夏季典型日负荷

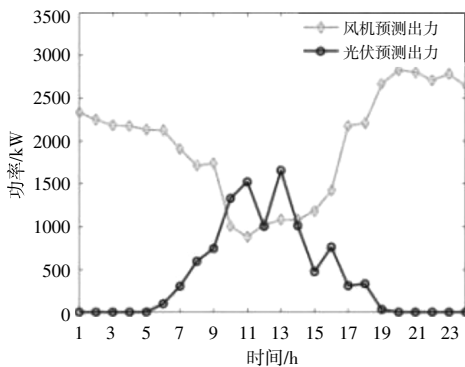
图 4 典型日负荷曲线

Fig.4 Typical daily load curve

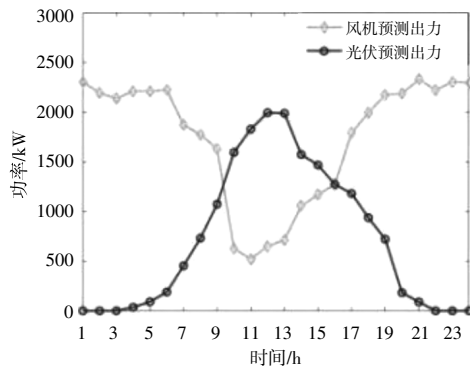
力情况如图 5 所示。园区电价采用分时电价,分时电价见表 5,天然气价格根据式(1)天然气热值折

算为 0.3 元/(kW·h)。

为分析对比储能设备和能源转换设备对于系



(a) 冬季典型日发电预测



(b) 夏季典型日发电预测

图 5 可再生能源典型日预测出力曲线

Fig.5 Typical daily predicted output curve of renewable energy

统的影响,设置 4 种不同情形进行对比分析:①不包含蓄电池和电动热泵;②不包含蓄电池;③不包含电动热泵;④包含所有设备。在不包含电动热

泵的情形下,燃气锅炉和制冷机容量分别增加 1 500 kW 以满足负荷需求,园区设定在外购电和天然气费用总和最低的策略下运行。

表5 分时电价
Table 5 Time-of-use price

时段	时间	购电价格/元·(kW·h) ⁻¹
谷	00:00-05:00	0.3
平	06:00-07:00,22:00-23:00	0.7
峰	08:00-21:00	1.1

4种情形下两季典型日运行的各个指标值如表6,7。由表6可知,在冬季负荷量较少且风光发电充足的情况下,电动热泵和蓄电池的加入明显减少了系统的弃风弃光现象和系统运行的耗能成本,电动热泵使多余电量转化为热能,减少了中等

表6 各情形冬季指标值结果
Table 6 Results of winter index values under various conditions

情形	运行耗能 元	维护成本 元	综合能源 利用率/%	供电子系统 烟效率/%	供热子系统 烟效率/%	供冷子系统 烟效率/%	弃风弃光 电量/kW·h	CO ₂ 排放量 t	NO _x 排放量 kg	SO _x 排放量 kg
1	35 140.85	7 201 739.67	59.08	86.10	16.50	20.00	22 041.60	21.36	35.25	15.63
2	16 235.90	6 752 614.63	67.04	92.68	21.94	19.32	468.29	10.67	29.91	19.10
3	34 604.32	7 742 774.23	58.99	86.76	16.63	20.00	21 181.43	20.98	34.25	13.24
4	15 606.05	7 292 752.56	67.21	92.72	21.16	18.80	0.00	10.34	29.32	17.34

表7 各情形夏季指标值结果
Table 7 Results of summer index values under various conditions

情形	运行耗能 元	维护成本 元	综合能源 利用率/%	供电子系统 烟效率/%	供热子系统 烟效率/%	供冷子系统 烟效率/%	弃风弃光 电量/kW·h	CO ₂ 排放量 t	NO _x 排放量 kg	SO _x 排放量 kg
1	27 243.00	7 201 533.21	67.68	97.72	28.96	30.00	5 097.71	17.51	36.36	47.50
2	22 102.32	6 751 967.30	72.88	96.27	19.19	17.61	45.03	16.54	48.33	98.83
3	26 534.60	7 741 634.89	67.65	97.87	29.05	30.00	4 361.27	16.94	34.72	42.12
4	21 627.72	7 292 121.34	72.83	96.34	19.35	17.68	0.00	16.44	47.89	97.10

品质天然气转化为低品质的热能,提高了系统供热和供电子系统烟效率。

由表7可知,在夏季负荷需求量大且风、光伏发电不够充足的情况下,弃风、弃光现象发生较少,电动热泵和蓄电池起到的积极效果不明显,此季节下情形3评分略高于其他情形,情形3系统通过大量购买天然气使燃气锅炉和制冷机工作,以满足冷负荷需求。由于电动热泵会将一部分高品质的电能转化为较低品质的热、冷能,故情形3的供热、冷子系统烟效率较高但综合能源利用率较低,且情形3只有制冷机供冷,不利于系统的长久可靠运行以及环境保护。

4.2 指标权重计算

根据前述步骤对原始数据进行处理,得到熵权法权重、变异系数法权重、组合权重见图6,7。

由图6,7可知,在能源指标差距不明显的情况下,组合权重更加偏向于通过经济性和环境性指标评价各个情形下的评分。在4种情形下,运行耗能都有着巨大的差距,考虑经济性是比较符合实际的选择,同时在环境上弃风、弃光量的差距也十分明显,在能源效率差距不明显的情况下,给予经济和环境指标较高的权重更能综合评价出较优

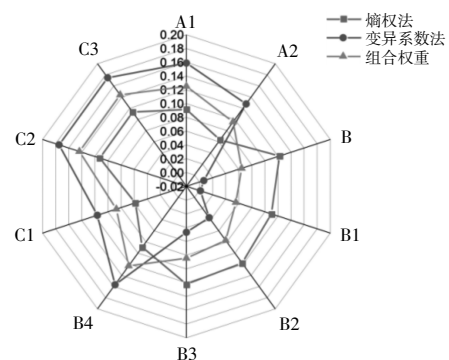


图6 夏季各项指标权重示意图
Fig.6 Schematic diagram of weights of various indicators in summer

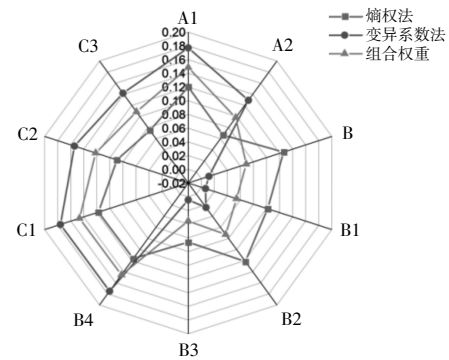


图7 冬季各项指标权重示意图
Fig.7 Schematic diagram of weights of various indicators in winter

的方案,验证了综合能效指标权重的确定具有科学性与合理性。

将组合权重带入本文改进的 TOPSIS 法中,得到的评分结果见表 8。

表 8 改进 TOPSIS 法评价结果
Table 8 Evaluation results of improved TOPSIS

情形	冬季 评分	冬季 排名	夏季 评分	夏季 排名	全年 评分	全年 排名
1	0.183 9	4	0.243 7	4	0.213 8	4
2	0.308 5	2	0.248 6	2	0.278 5	2
3	0.194 7	3	0.261 5	1	0.228 1	3
4	0.313 0	1	0.246 2	3	0.279 6	1

由表 8 可知,情形 4 得出的全年综合评分最高,综合能效评价最好,基本上符合实际情况。通过表 6 对比可知,在除去蓄电池的情形下维护成本明显降低,但在运行耗能、弃风、弃光量和环境指标都有略微增长。综上,包含多种能源转换设备的系统具有较好的综合能效,电动热泵和蓄电池的加入提高了系统能源利用率且能起到减少弃风、弃光现象和减少温室气体排放的作用,但系统维护成本也会有所提高。

4.3 模型综合性能分析

为验证本文改进 TOPSIS 法的合理性、优越性,将熵权法、变异系数法、传统 TOPSIS 法进行比较,结果见表 9。

表 9 不同评价方法结果对比
Table 9 Comparison of results of different evaluation methods

情形	方法	冬季 评分	冬季 排名	夏季 评分	夏季 排名	全年 评分	全年 排名
1	熵权法	0.073 2	4	0.284 9	2	0.179 0	4
2		0.409 4	2	0.203 2	3	0.306 3	2
3		0.089 4	3	0.312 3	1	0.200 9	3
4		0.428 0	1	0.199 6	4	0.313 8	1
1	变异系数法	0.097 7	4	0.220 4	4	0.159 0	4
2		0.394 7	2	0.275 1	1	0.334 9	1
3		0.112 6	3	0.248 9	3	0.180 7	3
4		0.395 0	1	0.255 7	2	0.325 4	2
1	传统 TOPSIS	0.000 0	4	0.000 0	4	0.000 0	4
2		0.487 6	2	0.407 4	2	0.447 5	1
3		0.024 4	3	0.437 9	1	0.231 1	3
4		0.488 1	1	0.154 7	3	0.321 4	2

由表 9 可知,本文方法与熵权法全年评分的排名一致,与其他方法基本一致。在冬季的评分中,4 种方法得出的排名一致;在夏季评分中,本文所提出的方法与传统 TOPSIS 法的排名一致;

变异系数法和熵权法在权重分配上都有各自的缺陷,熵权法过于灵敏使得能源指标所占权值过大,而变异系数法得出的权值又过小,导致错误判断多能源系统评分较低,经过组合权值和 TOPSIS 法排序可以减少误差,增加准确度。同时传统 TOPSIS 法得出的评分差距过大,不利于综合评分得出全年评价,改进的 TOPSIS 法避免了这一缺点。与其他方法相比,本文所提出的方法能得出更客观的权值,同时全面、准确地对区域综合能源系统进行全年评价。

5 结论

本文结合实例从经济、能源、环境 3 个角度建立了综合能效评价体系,通过改进 TOPSIS 法对系统进行全年细致的客观评价,得出如下结论。

①通过分析不同供能子系统的焓效率可以直观地得出各种子系统中能源“质”的变化。在多种能源设备互补运行下可能会降低子系统的焓效率,但可以提高系统的综合能源利用率以及其他指标,因此在系统规划时应全面考虑多种指标。

②单一的熵权法或者变异系数法都具有不同的缺点,通过组合权重的方法可以减少评价时造成的误差,弥补单一方法的缺陷。

③不同季节下可再生能源出力曲线不同、负荷需求不同、能质系数也有差别,因此在区域综合能源系统规划以及优化时应充分考虑季节因素,评价系统时也应该分季节评价,综合得出最优系统。

参考文献:

- [1] 牛蒙科,韩芳明,杨旭,等.基于 TRNSYS 的河水源热泵与电锅炉复合供暖系统仿真研究[J].东北电力大学学报,2022,42(3):15-20.
- [2] Cheng Y H,Zhang N,Wang Y,et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems [J].IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(4):3562-3574.
- [3] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联网简述[J].电工技术学报,2016,31(1):1-13.
- [4] 刘涤尘,彭思成,廖清芬,等.面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J].电网技术,2015,39(11):3023-3034.
- [5] 杜琳,孙亮,陈厚合.计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价 [J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.
- [6] 赵璞,周满,高建宇,等.基于电能替代的园区综合能

- 源规划评价方法[J].中国电力,2121,54(4):130-140.
- [7] 刘洪,赵越,刘晓鸥,等.计及能源品位差异的园区多能源系统综合能效评估[J].电网技术,2019,43(8):2835-2843.
- [8] 郭艳飞,吴强,程林,等.基于焓效率的综合能源系统能效分析模型[J].可再生能源,2017,35(9):1387-1394.
- [9] 冯晓梅,张瑞雪,李骥,等.建筑多能源系统优化评价方法研究[J].建筑节能,2020,48(11):45-50.
- [10] 孟明,罗洋.基于 AHP-熵权法的综合能源系统多指标评价[J].电力科学与工程,2021,37(5):46-54.
- [11] 陈柏森,廖清芬,刘涤尘,等.区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J].电力系统自动化,2018,42(4):174-182.
- [12] 赵洪山,李静璇.基于 PSR 和改进灰色 TOPSIS 的园区客户能效评估模型[J].中国电力,2022,55(3):203-212.
- [13] 刘晓鸥,葛少云.区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J].电力系统自动化,2020,44(8):8-18.
- [14] 高霞,胡燕,冯连勇.不同能源统计加总方法的比较[J].中国能源,2011,33(9):21-26.
- [15] 朱明善.能量系统的焓分析[M].北京:清华大学出版社.1988.
- [16] 王子铭,孙亮,孙立国,等.基于相变储能热阻模型的 CCHP 型微能源网优化调度[J].东北电力大学学报,2022,42(1):96-103.
- [17] 吕志鹏,吴鸣,宋振浩,等.电能质量 CRITIC-TOPSIS 综合评价方法[J].电机与控制学报,2020,24(1):137-144.
- [18] 段穰达.有源配网后评价指标体系及其综合评价方法[J].发电技术,2021,42(1):86-93.
- [19] 李慧玲,芦新波,刘大川,等.基于 AHP-TOPSIS 的电力能效项目综合评价[J].现代电力,2014,31(4):88-94.
- [20] 赵佳慧,许红师,王田野,等.基于改进熵权-TOPSIS-灰色关联方法的城市洪涝风险评估[J].水利水电技术,2022,53(10):58-73.

Comprehensive energy efficiency evaluation of regional integrated energy system based on improved TOPSIS

Lian Wenhan, Cui Shuangxi, Li Yuzhi, Qiu Honghua
(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi 830017, China)

Abstract: With the development of regional integrated energy system, how to comprehensively evaluate the comprehensive energy efficiency of regional integrated energy system has become a widespread concern. First, consider the change of quality in the transformation process of different energies, introduce the concept of "exergy efficiency", convert different energies through the energy quality coefficient method, and establish a comprehensive energy efficiency evaluation index including economy, energy efficiency and environment on this basis; Secondly, an improved TOPSIS is established for evaluation, the results of entropy weight method and coefficient of variation method are combined by the least square method to calculate the weight, and the distance measurement method in TOPSIS is improved by using grey correlation degree; Finally, an example is given to verify the effectiveness and feasibility of the proposed method. It can provide a certain reference value for the planning and optimal operation of the high-quality regional integrated energy system in the future.

Keywords: regional integrated energy system; comprehensive energy efficiency assessment; exergy efficiency; combination weighting; TOPSIS