

区域级综合能源系统多维度能效评估方法研究

陆圣芝, 曹俊杰, 周峰, 金城, 陈正华

(国网江苏省电力公司 扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:随着全球能源与环境问题日益突出,具有多能互补特性的区域级综合能源系统(RIES)是一种有效的解决方法。为了实现区域级综合能源系统能效的全方位、合理评估,从能源供应效率、能源转换效率、能源供应可靠性、能源供应质量、经济效益与社会效益等六个维度对其进行了详细的指标体系构建,并在AHP-熵权法的基础上给出了组合权重计算方法,进而提出了更加直观、清晰地对不同规划方案进行评估的基于改进TOPSIS法的区域级综合能源系统能效评估方法;最后,通过区域级综合能源系统的算例验证了所提方法理论的合理性与有效性。

关键词:综合能源系统;能效评估;多维度指标体系;优劣解距离法

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23069

Research on Multi-dimensional Energy Efficiency Assessment Method of Regional Integrated Energy System

LU Shengzhi, CAO Junjie, ZHOU Feng, JIN Cheng, CHEN Zhenghua

(Yangzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

Abstract: With the global energy and environmental problems becoming increasingly prominent, the regional integrated energy system (RIES) with multi-energy complementary characteristics is an effective solution. In order to realize the comprehensive and reasonable evaluation of energy efficiency of the RIES, a detailed evaluation index system from the aspects of energy supply efficiency, energy conversion efficiency, energy supply reliability, energy supply quality, economic and social benefits was established. And on the basis of AHP entropy weight method, the calculation method of combination weight was given. Then, a regional integrated energy system energy efficiency evaluation method based on improved TOPSIS was proposed to evaluate different planning schemes more intuitively and clearly. Finally, the rationality and effectiveness of the proposed method were verified by an example of a RIES.

Key words: integrated energy system (IES); energy efficiency assessment; multi-dimensional index system; technique for order preference by similarity to an ideal solution

随着全球能源危机与环境问题的日益突出,能源互联网、综合能源系统(integrated energy system, IES)等概念被提出,并在近几年能源领域中被广泛采用^[1-2]。IES是能源互联网的物理载体^[3],是适应能源行业变革、促进能源互联网推进的重要支撑,其包含了冷、热、电、气等不同能源系统领域^[4]。依据 IES 的地理因素与能源发/输/配/用等特性,其可以划分为三类:跨区级、区域级与用户级^[5]。作为承上启下的重要环节,区域级综合能源系统(regional integrated energy system,

RIES)的实现是整个 IES 建设的关键。为了实现 RIES 的有效构建,满足不同能源的合理、高效利用,以及充分了解与认识 RIES 的核心价值,实现对 RIES 有效评估指标体系的构建以及方法的提出具有重要意义。

目前,针对 RIES 的能源转换与利用评估、区域内不同装置的运行评估等方面均取得了一定的研究成果,例如:为了实现 RIES 内运行设备的有效评估,考虑系统内所存在的大量组件,文献[6]提出了一种基于马尔科夫模型多组件的评估

基金项目: 国网江苏省电力有限公司资助项目(SGJSY200FCJS1900766)

作者简介: 陆圣芝(1981—),女,硕士,高级工程师,Email:lushengzhi@yandex.com

通讯作者: 周峰(1984—),男,硕士,工程师,Email:feng42123@163.com

方法,实现了区域RIES的有效评估,但所存在的边界效应需进一步解决;针对RIES系统的设备节能潜力,文献[7]通过冷-热-电联产系统矩阵实现了该系统节能潜力的有效评估,取得了较好的效果;文献[8]提出了基于蒙特卡洛模拟法的RIES评估体系,并依据不同能源网络流动模型对系统状态进行了具体分析;站在系统规划与运行的角度,文献[9-12]分别从规划方法、模型构建与效益评估等角度对RIES进行了研究,取得了较好的研究成果;针对RIES中能源利用效率问题,文献[13]通过参数分析方法对四种不同的影响RIES效率的因素进行了分析,得到了较好的分析效果,然而,文中仅考虑了设备转换问题,并未对供能子系统做统一分析。通过上述分析可知,目前对于RIES的评估研究工作大多集中于某一特性独立系统^[14],评估指标的细化导致评估内容缺乏多方位与完整性。

针对目前RIES评估指标体系与方法所存在的问题,本文首先从能源供应效率、能源转换效率、能源供应可靠性、能源供应质量、经济效益与社会效益等六个维度构建了用以评估RIES能效的多维度指标体系;在此基础上,通过主、客观权重以及组合权重计算方法的分析,提出了基于多维度评估指标体系的RIES能效评估方法;最后,以含有工业生产区与商业区的RIES为例,对所提多维度评估指标体系与方法的有效性进行了验证。

1 RIES 多维度能效评估指标体系构建

为了避免采用单一维度指标对RIES评估所带来的片面性、局限性,同时为确保综合能效评估结果的科学性与合理性,根据评估目的和数据采集条件,从多个角度考虑系统的全部能量输送与存储环节,以反映评估对象的运行状态与系统的本质能效属性为方向,从多维度能效评估角度对RIES进行评估是实现规划设计与调控优化的重要依据。针对区域级综合能源系统多维度能效评估指标体系构建的实际需求和SMART原理的基本概念,在指标体系构建时遵循目的性、规范性、全面性、系统性、简明性、定性定量相结合与可比性等基本原则。同时考虑RIES中电、冷、热、气计量情况,以实用性与可操作性为前提,从能源供应效率、能源转换效率、能源供应可靠性、能源供应质量、经济效益以及社会效益六个维度

构建用以实现RIES多维度能效评估的指标体系,具体体系架构如图1所示。

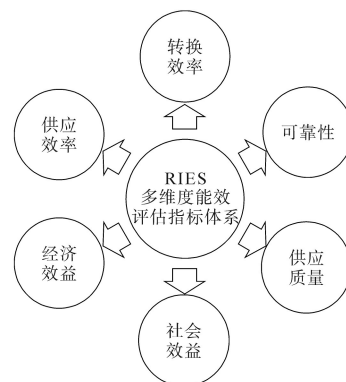


图1 综合能源多维度能效评估指标体系结构

Fig.1 Multi-dimensional energy efficiency evaluation index system structure of comprehensive energy

1.1 能源供应效率指标

在RIES中,能源供应效率指标主要考虑在传输网络和存储设备中的损耗。电、冷、热、气系统的供应效率指标分别如下。

1.1.1 电能供应效率

RIES中的电力供应主要由外部电网、储能系统与能源转换装置三部分构成,电力消耗对象则主要为纯电负荷、储电装置以及实现热(冷)、气等转换的设备等。因此,本文在考虑供电效率时主要考虑电能的输送、分配与存储环节。考虑RIES从外部所购入的电能以及三联供机组所提供电压等级的不同,在此选定RIES的外购电压等级与三联供机组电压等级分别为10 kV与380 V作为代表进行具体分析,则RIES的电能供应量 W_E 为

$$W_E = [P_e \eta_t + E_{chp} + R_e + (1 - \gamma_e) D_e] \eta_{line} \quad (1)$$

式中: P_e 为从外部电网购入的电量; η_t 为变压器运行效率; E_{chp} 为三联供系统所产生的电能; R_e 为RIES中可再生能源产生的电能; γ_e 为电负荷的折算系数; D_e 为储电装置所释放的能量; η_{line} 为电力线路效率。

在RIES电能供应量的基础上,计算得到系统电能供应效率:

$$\eta_e = \frac{W_E - \gamma_e S_e (1/\eta_{se} - 1)}{P_e + E_{chp} + (1 - \gamma_e) D_e / \eta_{de}} \quad (2)$$

式中: η_{se} 与 η_{de} 分别为储电装置的储/放电效率; S_e 为计及储电装置储能损耗后实际储入的能量。

1.1.2 冷/热能供应效率

RIES中的冷/热供应主要由系统外部购入的冷/热、储冷/热系统提供的冷/热、能源转换装置供

应的冷/热等构成。在冷/热能供应系统中,冷/热能在管网中传输势必会存在一定能量的耗散,在此通过单位长度的管网耗散情况简化处理。由此,供冷与供热系统的供冷量 W_c 与供热量 W_h 分别为

$$W_c = [C_{e-c} + C_{h-c} + R_c + (1 - \gamma_c)D_c](1 - 0.01l_c a_c) \quad (3)$$

$$W_h = [H_{g-h} + H_{e-h} + H_{chp} + R_h + (1 - \gamma_h)D_h] \cdot (1 - 0.01l_h a_h) \quad (4)$$

式中: C_{e-c}, C_{h-c} 分别为由电能和热能通过能源转换装置获得的冷能; H_{g-h}, H_{e-h} 分别为由天然气和电能转换装置转换获得的热能; R_c, R_h 分别为可再生能源产生的冷/热能; γ_c 为冷负荷的折算系数; H_{chp} 为三联供系统产生的热能; D_h 为储热装置释放的热能; l_c, l_h 分别为冷/热管网的长度; a_c, a_h 分别为冷/热管网每100米的耗散率; γ_h 为负荷的折算系数; D_c 为储冷装置释放的能量; D_h 为储热装置释放的能量。

在RIES冷/热能供应量的基础上,计算得到系统冷/热能供应效率分别为

$$\eta_h = \frac{W_h - \gamma_h S_h (1/\eta_{sh} - 1)}{P_h + H_{chp} + H_{e-h} + (1 - \gamma_h)D_h/\eta_{dh}} \quad (5)$$

$$\eta_c = \frac{W_c - \gamma_c S_c (1/\eta_{sc} - 1)}{C_{e-h} + C_{h-c} + (1 - \gamma_c)D_c/\eta_{dc}} \quad (6)$$

式中: η_{sh}, η_{dh} 分别为储热装置的储/放热效率; η_{sc}, η_{dc} 分别为储冷装置的储/放冷效率; S_h, S_c 为计及储热/冷装置储能损耗后实际储入的能量; P_h 为外部热网输入热量。

1.1.3 供气效率

RIES中的供气系统主要指的是其天然气供应系统,其能量输入端口为外部购入的天然气与由能量转换装置产生的天然气,输出端口为纯天然气负荷以及用以转换为冷/热/电的负荷。本文不考虑天然气在供气系统中的损耗,由此可以计算得到供气量 W_g 以及供气效率近似为100%。

$$W_g = P_g + G_{e-g} \quad (7)$$

式中: P_g, G_{e-g} 分别为由外部购入以及由电能转换的天然气量。

1.2 能源转换系数指标

在RIES中,能源转换主要有电转热/冷、气转电/热与热转冷等。本文考虑的不同能量之间转换的系数指标具体如下。

1.2.1 电转热/冷能源转换设备能效

在电转热/冷过程中,能源转换设备的输入端

口为电能,输出端口为热/冷能。电转热/冷能源转换系数分别可通过下式计算:

$$\eta_{e-h} = \frac{\lambda_h}{\lambda_e} C_{e-h} \quad (8)$$

$$\eta_{e-c} = \frac{\lambda_c}{\lambda_e} C_{e-c} \quad (9)$$

式中: C_{e-h}, C_{e-c} 分别为电转热/冷的制热/冷系数; $\lambda_h, \lambda_e, \lambda_c$ 分别为热、电、冷能折算系数。

1.2.2 气转电/热能源转换设备能效

在气转电/热过程中,能源转换设备的输入端口为天然气,输出端口为电/热能。在此主要考虑热电联产机组与燃气锅炉的能量转换,两者的转换系数分别由下两式计算:

$$\eta_{chp} = \frac{\lambda_c E_{chp} + \lambda_{steam} H_{chp}}{\lambda_g G_{chp}} \quad (10)$$

$$\eta_{g-h} = \frac{\lambda_h}{\lambda_g} COP_{g-h} \quad (11)$$

式中: E_{chp}, H_{chp} 分别为热电联产机组所产生的电能与热能; λ_{steam} 为热电联产机组蒸汽的折算系数; λ_g 为天然气折算系数; G_{chp} 为热电联产机组所消耗的天然气的量; COP_{g-h} 为天然气的制热系数。

1.2.3 热转冷设备能效

能源转换设备的输入端口为热能,输出端口为冷能,该类设备的能源转换系数为

$$\eta_{h-c} = \frac{\lambda_c}{\lambda_h} COP_{h-c} \quad (12)$$

式中: COP_{h-c} 为制冷机的制冷系数。

1.3 能源供应可靠性指标

在RIES中,能源供应可靠性指标主要考虑冷、热、电、气能源供应可靠程度,分别构建指标体系,具体如下。

1.3.1 供电可靠性

供电系统的可靠性通过供电可靠率指标表示:

$$\begin{aligned} \mu_e &= 1 - \frac{\lambda_{se}}{\lambda_{se} + \mu_{se}} \\ &= 1 - \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} \\ &= 1 - \frac{f \times MTTR}{8760} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: λ_{se} 为供电系统理论失效率(单位:失效次数/年); μ_{se} 为供电系统理论修复率(单位:修复次数/年); $MTTR$ 为供电系统理论平均修复时间(单位:h); $MTTF$ 为供电系统理论失效前平均运行时间(单位:h); f 为供电系统理论平均失效频率(单

位:失效次数/年)。

1.3.2 燃气管网供应可靠性

燃气管网的供应可靠性以燃气管网的出口压力合格率表示,以燃气管网相关标准为基准计算其合格率:

$$\mu_s = \frac{P_{sc} - P_{sb}}{P_{sb}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: P_{sc} 为燃气管网出口压力测量值; P_{sb} 为燃气管网的相关压力标准。

1.3.3 供热、冷可靠性

对于RIES的供热、冷可靠性以其相关设备的故障率表征:

$$\mu_{c/h} = \left(1 - \frac{t_{c/h-n}}{t_{c/h-n} + t_{c/h-m}}\right) \times 100\% \quad (15)$$

式中: $t_{c/h-n}$ 为供冷、热设备的正常运行时间; $t_{c/h-m}$ 为供冷、热设备的故障维修时间。

1.4 能源供应质量指标

在RIES中,能源供应质量指标主要考虑电、冷、热、气能源供应质量,在此分别构建指标体系。

1.4.1 供电质量

在RIES的供电网络中,主要考虑中低压台区的谐波含量与电压合格率两个指标:

$$\theta_{e-f} = \frac{N_{e-f}}{N_{all-f}} \times 100\% \quad (16)$$

$$\theta_{e-U} = \frac{N_{e-U}}{N_{all-U}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: N_{e-f} 为中低压台区满足谐波含量的台区数量; N_{all-f} 为中低压台区总数量; N_{e-U} 为中低压台区满足电压质量的检测点数量; N_{all-U} 为中低压台区总检测点数量。

1.4.2 供气质量

天然气管网出口质量合格率为

$$\theta_g = \left(1 - \frac{T_S/T_{S-n} + T_{H2S}/T_{H2S-n} + T_C/T_{C-n}}{3}\right) \times 100\% \quad (18)$$

式中: T_S, T_{H2S}, T_C 分别为天然气出口硫、硫化氢、二氧化碳杂质含量的测试值; $T_{S-n}, T_{H2S-n}, T_{C-n}$ 分别为天然气相关标准中出口硫、硫化氢、二氧化碳杂质含量的规定值。

1.4.3 供冷、热质量

RIES的供冷、热质量以冷、热网出口温度波动合格率表示:

$$\theta_{c/h} = \left(1 - \frac{T_{c/h-max} - T_{c/h-min}}{T_{c/h-N}}\right) \times 100\% \quad (19)$$

式中: $T_{c/h-max}, T_{c/h-min}$ 分别为冷热网出口的测量温度最高与最低值; $T_{c/h-N}$ 为冷、热用户所需求的温度值。

1.5 经济效益指标

本文以单位投资供能成本、单位投资增供能量、财务净现值、投资回收期与财务内部收益率来反映其经济性水平,评价多能源配置条件下的经济效益优化程度。

1.5.1 单位投资供能成本

单位投资供能成本计算如下:

$$LCOE = \frac{I_0 - \frac{V_R}{(1+i_r)^r} + \sum_{r=1}^N \frac{A_r + D_r + P_r}{(1+i_r)^r}}{\sum_{r=1}^N \frac{Y_r}{(1+i_r)^r}} \quad (20)$$

式中: I_0 为初始投资; V_R 为固定资产残值; N 为项目运行年份; A_r 为第 r 年的运行成本; D_r 为第 r 年的折旧; P_r 为第 r 年的利息; Y_r 为第 r 年的供能量,采用等效电法进行统一度量; i_r 为折现率。

1.5.2 单位投资增供能量

单位投资增供能量 $UIES$ (单位:标煤/万元)可采用下式计算:

$$UIES = \frac{FAWE + FVBP}{CPICE} \quad (21)$$

式中: $FAWE, FVBP$ 分别为期末、期初年供能量; $CPICE$ 为计算期内综合能源系统建设工程投资。

1.5.3 财务净现值指标

财务净现值为系统收益能力的计算:

$$FNPV = \sum_{t=1}^{n_c} NC_t (1+i_c)^{-t} \quad (22)$$

式中: n_c 为项目计算周期; NC_t 为计算周期内第 t 年的新增净现金流量; i_c 为基准收益率。

1.5.4 投资回收期

投资回收期 PP 可采用下式计算:

$$PP = NY - 1 + \frac{ANCF}{NCF} \quad (23)$$

式中: NY 为累计净现金流量开始出现正值的年分数; $ANCF$ 为上年累计净现金流量; NCF 为当年净现金流量。

1.5.5 财务内部收益率

财务内部收益率可采用下式计算:

$$\sum_{t=1}^{n_c} NC_t (1+FIRR)^{-t} = 0 \quad (24)$$

式中: $FIRR$ 为财务内部收益率。

1.6 社会效益指标

RIES的社会效益主要从其对环境的影响角

度进行分析,在此考虑可再生能源产能占比与年二氧化碳/硫排放减少量等指标。

1.6.1 可再生能源产能占比

表示RIES内可再生能源提供的能量与系统年总消耗量的比值:

$$\gamma_{\text{mrgdgr}} = \sum_{x=1}^a Q_{\text{RGx}} / \sum_{y=1}^b Q_{\text{Gy}} \quad (25)$$

式中: Q_{RGx} 为RIES内第 x 类可再生能源的年供能量; Q_{Gy} 为RIES内第 y 类能源的年供能量; a 为RIES中可再生能源种类数量; b 为RIES中能源种类数量。

1.6.2 CO₂/SO₂年排放减少量

CO₂/SO₂年排放减少量可分别通过下二式计算:

$$F_{\text{co}_2} = F_{\text{C}} \times C_{\text{sc}} \quad (26)$$

$$F_{\text{so}_2} = F_{\text{S}} \times C_{\text{ssc}} \quad (27)$$

式中: F_{co_2} , F_{so_2} 分别为CO₂/SO₂年排放减少量; F_{C} 为含碳能源节约量(折算为标准煤); C_{sc} 为每吨标准煤发电所产生的CO₂排放量; F_{S} 为含硫能源节约量(折算为标准煤); C_{ssc} 为每吨标准煤发电所产生的SO₂排放量。

2 基于多维度指标体系的RIES能效评估方法

2.1 权重计算方法

为了反映不同指标对于RIES多维度能效评估的贡献度,在此选用组合权重法对指标权重进行计算分析,其中主观权重法与客观权重法分别采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与熵权法(entropy weight method, EWM),最后通过矩估计思想进行规划求解,进而得到组合权重。

2.1.1 主观权重计算

主观权重的计算选用AHP,具体思路如下:

- 1)层次模型构建;
- 2)相对重要程度确定,由此得到判断矩阵 P ;
- 3)重要性排序计算:计算 P 的最大特征根 λ_{max} 与特征向量 w : $P=\lambda_{\text{max}}w$;然后,将特征向量归一化,即得到各个因素的权重分配;

4)一致性检验:利用一致性检验来验证权重的合理性,所需的一致性指标为 CI (consistency index): $CI=\lambda_{\text{max}}/(k-1)$; k 为每一层次中影响因素数量;

5)计算一致性比例 CR (consistency ratio): $CR=CI/RI$,其中 RI 为随机一致性指标。

2.1.2 客观权重计算

客观权重计算采用EWM,其主要思路为利用指标的信息熵来确定熵值,然后通过熵权计算对权重进行修正,具体步骤如下:

1)指标矩阵的构建。评价对象的样本数为 p ,评价指标数为 q ,各指标值为 v_{ij} ($i=1,2,\dots,p$; $j=1,2,\dots,q$),则指标矩阵为 V_{pq} 。

2)规范化指标矩阵。对指标矩阵进行规范化处理,得到规范化矩阵为 $X=(x_{ij})_{pq}$,其中 x_{ij} 为矩阵中第 i 个样本的第 j 个指标值,可通过下式计算:

$$x_{ij} = \frac{v_{ij}}{(\sum_{i=1}^p v_{ij}^2)^{0.5}} \quad (28)$$

3)EWM确定指标权重。每种指标出现的概率 h_{ij} ,第 j 项指标的熵权 s_j ,系统的信息熵 k_j 分别为

$$h_{ij} = \frac{1 + x_{ij}}{\sum_{i=1}^p (1 + x_{ij})} \quad (29)$$

$$s_j = \frac{1 - k_j}{\sum_{j=1}^q (1 - k_j)} \quad (30)$$

$$k_j = \frac{1}{\ln p} \sum_{i=1}^p h_{ij} \ln h_{ij} \quad (31)$$

指标权重列向量为

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_q)^T \quad (32)$$

式中, s_q 为第 q 项指标权重。

4)加权标准化。加权标准化矩阵为

$$Y = (y_{ij})_{pq} = (s_j x_{ij})_{pq} \quad (33)$$

式中: y_{ij} 为标准化矩阵第 i 个样本的第 j 个指标值。

2.1.3 组合权重计算

在此提出基于AHP-EWM的组合权重计算方法对指标进行赋值。由上述AHP与EWM计算得到的权重向量分别为 $T=(t_1, t_2, \dots, t_q)$ 与 $S=(s_1, s_2, \dots, s_q)^T$,两者对组合权重向量的相对重要程度分别为 α 与 β ,且满足组合权重向量与主观权重向量的偏差最小:

$$\min H(w_j) = \alpha(w_j - t_j)^2 + \beta(w_j - s_j)^2 \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^q w_j = 1 \quad 1 \leq j \leq q \quad (35)$$

式中: $H(w_j)$ 为组合权重; w_j 为第 j 个指标组合权重; α 为主观权重向量对组合权重的相对重要程度; β 为客观权重向量对组合权重的相对重要程度。

依据矩估计的基本思想,计算不同指标的主/

客观权重的期望值,进而可以计算单一指标主/客观权重向量的相对重要系数:

$$\begin{cases} \alpha_j = t_j / (t_j + s_j) \\ \beta_j = s_j / (t_j + s_j) \end{cases} \quad (36)$$

对于多决策矩阵中的评价指标,可计算整体主/客观权重向量的相对重要系数:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\sum_{j=1}^q \alpha_j}{\sum_{j=1}^q \alpha_j + \sum_{j=1}^q \beta_j} \\ \beta = \frac{\sum_{j=1}^q \beta_j}{\sum_{j=1}^q \alpha_j + \sum_{j=1}^q \beta_j} \end{cases} \quad (37)$$

针对每一个指标 x_j ,以 $H(w_j)$ 最小为优,可转换为如下公式:

$$\begin{cases} \min H = \{H(w_1), H(w_2), \dots, H(w_q)\} \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^q w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1, 1 \leq j \leq q \end{cases} \quad (38)$$

将多目标最优化模型转化为单目标最优化模型进行求解,计算方式如下:

$$\begin{cases} \min H = \sum_{j=1}^q [\alpha(w_j - t_j)^2] + \sum_{j=1}^q [\beta(w_j - s_j)^2] \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^q w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1, 1 \leq j \leq q \end{cases} \quad (39)$$

2.2 能效评估方法

基于上述所构建的指标体系,进行RIES运行方案的能效评估,评价周期为一个自然年。鉴于优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)具有不受指标量纲影响、能充分反映不同方案之间的差距、可以真实反映实际情况、直观可靠等优势,具有普遍的适用性。然而, TOPSIS法对于单一方案的评估却存在一定局限,由此提出改进型 TOPSIS法,具体如下:

1) 建立评估初始矩阵。在样本数据的基础上得到实际值 $A_1 = [c_{11} \ c_{12} \ \dots \ c_{1e}]$, 并选取指标的预期值为最优值 $A_2 = [c_{21} \ c_{22} \ \dots \ c_{2e}]$, 选定传统规划方案下的指标值为最劣值 $A_3 = [c_{31} \ c_{32} \ \dots \ c_{3e}]$, 进而构建评估初始矩阵:

$$C_{3 \times e} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1e} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2e} \\ c_{31} & c_{32} & \dots & c_{3e} \end{bmatrix} \quad (40)$$

式中: e 为二级指标个数。

2) 决策矩阵规范化。利用下式对初始矩阵进行规范化处理:

$$c'_{mn} = \frac{c_{mn}}{\sqrt{\sum_{m=1}^3 c_{mn}^2}} \quad (41)$$

其中 $m=1, 2, 3 \quad n=1, 2, \dots, e$

得到规范决策矩阵 $C' = (c'_{mn})_{3 \times e}$

3) 构造加权规范矩阵 $Z = (z_{mn})_{3 \times e}$:

$$z_{mn} = w_j c'_{mn} \quad (42)$$

4) 实际值与最优/劣值之间的距离:

$$d_+ = \sqrt{\sum_{m=1}^3 (z_{mn} - z_{m+})^2} \quad (43)$$

$$d_- = \sqrt{\sum_{m=1}^3 (z_{mn} - z_{m-})^2} \quad (44)$$

式中: d_+ 与 d_- 为实际值与最优/最劣值之间的距离; z_{m+} 与 z_{m-} 分别为正理想解与负理想解, z_{m+} 由矩阵 Z 中每列数据的最大值构成, z_{m-} 由矩阵 Z 中每列数据的最小值构成。

5) 评分标准构建:

$$\xi_j = d_+ / (d_+ + d_-) \quad (45)$$

该评分标准反映了指标实际值与最优值的接近程度,该值越大则越优。相较于其他方法,对单个评价对象指标最优/劣值的选取进行了优化,改进了各指标实际值与最优值接近程度的计算方法,改进后的 TOPSIS 法可以通过定量计算分析各方案的效果,更加直观、清晰地对不同规划方案进行评估。在该方法的基础上,结合上文所提出的多维度能效评估指标体系,对RIES的能效进行评估,具体评估流程如图2所示。

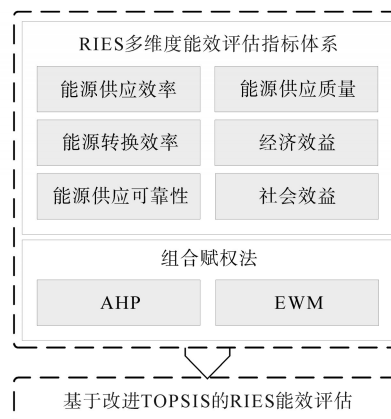


图2 评估流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of assessment process

由图2可知:从能源供应与转换效率、能源供应可靠性与质量、经济与社会效益等角度确定了RIES的指标体系;然后,通过组合赋权法实现指标体系权重的计算;最后,基于构建的指标体系与权重,利用改进的TOPSIS法对RIES的能效进行评估,即形成基于多维度能效评估指标体系的RIES评估方法。

3 算例分析

以某一138平方公里区域系统为例进行计算分析,该区域由工业生产区与商业区构成。区域内电负荷由外部电网、CCHP机组供应,冷负荷由常规冷机等供应(基于供热负荷指标与用地规划情况进行供热/制冷负荷估算,其中全年累计供热、制冷天数选取120天,且将热水负荷需求按照热水水温为60℃、冷水水温20℃进行热负荷折算)。追溯至电力生产的污染物排放强度参考表1所示。

表1 污染排放强度参考

Tab.1 Pollution emission intensity reference		
发电技术	SO ₂ /(g·kWh ⁻¹)	CO ₂ /(g·kWh ⁻¹)
燃气发电	0.000 928	184.083
燃料电池	0	635.04

在此对该区域的工业生产区与商业区两种RIES典型场景进行多维度能效评估。RIES在源-网-荷-储配置时,最优的容量配置可以确保系统能在满足可靠性以及安全性约束的条件下实现最低成本投入并且保证系统在最优情况下运行。系统设备过度的容量配置会增加系统的成本,然而配置不足则会造成可再生能源的浪费、能源供不应求等情况。因此,为了对比分析不同配置方式下系统的多维度能效,本文选取RIES的单一目标最优配置方式以及多目标最优配置方式两种不同方案进行多维度能效评估。

3.1 工业生产区能效评估

3.1.1 单一目标效益最优供能模式

为了缓解环境污染压力、降低碳排放,RIES通过可再生能源的有效利用能够减少污染气体的排放。选取环境效益为单一目标进行仿真,在环境效益最优模式中,以系统各个设备年运行中的污染气体排放量为目标函数,利用污染排放系数表示能源消耗的污染排放。运行优化也以污染最小为目标。某区域环境效益最优匹配方案如下所示,其环境效益好,但经济性与能源效率都较差。

在环境效益最优模式下,以降低碳排放、降低污染物排放为主要目标进行容量配置,工业生产区配置容量情况如下:光伏发电系统25 MW,燃气轮机101.5 MW,吸收式制冷机69.592 MW,余热锅炉55.59 MW,水源热泵3 MW,地源热泵3.28 MW,其余能量由电网提供。

3.1.2 多目标效益最优供能模式

根据区域资源情况选取合适的分布式能源设备,以年成本最低为目标进行容量配置。年成本包括设备初始投资等年值、年购能花费、年设备维护费用。运行层面的优化以每小时的经济性为目标,使得系统的运行成本最低。

多目标效益最优供能模式下,工业生产区资源情况选取合适的分布式能源设备,以年成本最低为目标进行容量配置,配置容量情况为:光伏发电系统30 MW,燃气轮机80.011 MW,吸收式制冷机52.614 MW,余热锅炉44.645 MW,燃气锅炉10.9 MW,水源热泵1.668 MW,地源热泵3.121 MW,空气源热泵1.352 MW,其余能量由电网提供。根据上文的指标计算方法进行指标计算,结果如表2所示。

表2 工业生产区不同供能模式指标计算结果

Tab.2 Index calculation results of different energy supply modes in industrial production area				
一级指标	序号	二级指标	单一目标	多目标
能源供应效率指标	1	供电效率	95%	96%
	2	供冷、热网效率	95%	96%
	3	供气效率	94%	96%
能源转换系数指标	4	电转热/冷能源转换系数	3.4	4.6
	5	气转电/热能源转换系数	0	2.1
	6	热转冷能源转换系数	1.1	2.1
能源供应可靠性指标	7	供电可靠率	99.981 5%	99.983 2%
	8	燃气管网出口压力合格率	99.5%	99.5%
	9	供冷、热设备故障率	1.1%	0.2%
能源供应质量指标	10	中低压台区谐波合格率	95%	96%
	11	中低压台区电压合格率	99.987 2%	99.988 2%
	12	出口天然气质量合格率	100%	100%
	13	冷热出口温度波动合格率	98%	99%
	14	单位供能成本(kWh/元)	1.1	0.97
经济效益指标	15	单位投资增供(kWh/万元)	2.4	2.1
	16	财务净现值(万元)	6273	6821
	17	投资回收期(年)	12.3	9.2
	18	财务内部收益率	10.33%	16.7%
社会效益指标	19	可再生能源产能占比	37%	54%
	20	CO ₂ 年排放减少量(吨)	14.62	17.42
	21	SO ₂ 年排放减少量(吨)	0.05	0.06

使用层次分析法计算一级指标与二级指标的主观权重,使用熵权法计算各二级指标客观权重,然后基于矩估计的思想,构建组合权重的目标函数,使用非线性规划求解计算得到最优组合权重,结果如图3所示。

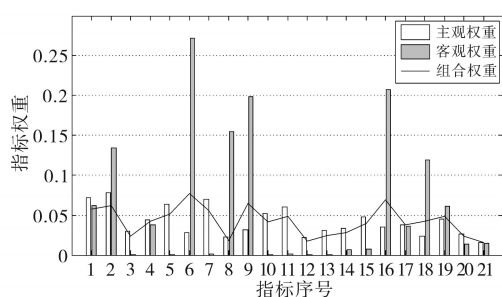


图3 工业生产区指标组合权重计算结果

Fig.3 Calculation results of index combination weight in industrial production area

使用改进TOPSIS评价方法对两种供能模式下的能效进行评估。通过仿真,得到各典型场景不同供能模式下的能效评估结果如表3所示。

表3 工业生产区能效评估计算结果

Tab.3 Calculation results of energy efficiency assessment in industrial production area

供能方式	单一目标效益最优	多目标效益最优
评分	0.569 84	0.785 63

通过工业生产区两种供能模式下多维度能效评估可以看出,多目标效益最优供能模式的能效优于单一目标效益最优模式下的能效。

3.2 商业区能效评估

3.2.1 单一目标最优供能模式

在环境效益最优模式下,以降低碳排放、降低污染物排放为主要目标进行容量配置,商业区配置容量情况如下:燃气轮机76.160 MW,吸收式制冷机5 MW,余热锅炉4 MW,空气源热泵1.5 MW,其余能量由电网提供。

3.2.2 多目标最优供能模式

多目标效益最优供能模式下,商业区资源情况选取合适的分布式能源设备,以年成本最低为目标进行容量配置,配置容量情况为:燃气轮机6 MW,吸收式制冷机4 MW,余热锅炉3.5 MW,空气源热泵0.4 MW,电制冷机1.5 MW,其余能量由电网提供。根据上文指标计算方法进行指标与权重计算,结果如表4与图4所示。

使用改进TOPSIS评价方法对两种供能模式下的能效进行评估。通过仿真,得到各典型场景不同供能模式下的能效评估结果如表5所示。

表4 商业区不同供能模式指标计算结果

Tab.4 Index calculation results of different energy supply modes in business district

一级指标	序号	二级指标	单一目标	多目标
能源供应效率指标	1	供电效率	95%	96%
	2	供冷、热网效率	95%	96%
	3	供气效率	98%	98%
能源转换系数指标	4	电转热/冷能源转换系数	3.5	4.7
	5	气转电/热能源转换系数	1	1
	6	热转冷能源转换系数	1.1	2.5
能源供应可靠性指标	7	供电可靠率	99.982 3%	99.986 6%
	8	燃气管网出口压力合格率	99.5%	99.5%
	9	供冷、热设备故障率	3.2%	2.5%
能源供应质量指标	10	中低压台区谐波合格率	98%	98%
	11	中低压台区电压合格率	99.987 2%	99.988 2%
	12	出口天然气质量合格率	100%	100%
	13	冷热出口温度波动合格率	98%	99%
	14	单位供能成本(kWh/元)	1.2	0.99
	15	单位投资增供(kWh/万元)	2.3	2.2
经济效益指标	16	财务净现值(万元)	422	516
	17	投资回收期(年)	9.6	7.8
	18	财务内部收益率	10.33%	16.7%
社会效益指标	19	可再生能源产能占比	39%	51%
	20	CO ₂ 年排放减少量(吨)	10.03	11.12
	21	SO ₂ 年排放减少量(吨)	0.04	0.05

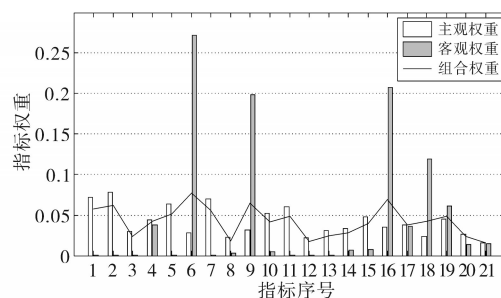


图4 商业区指标组合权重计算结果

Fig.4 Calculation results of business district index combination weight

表5 商业区能效评估计算结果

Tab.5 Calculation results of energy efficiency assessment of business district

供能方式	单一目标效益最优	多目标效益最优
评分	0.732 16	0.886 13

通过对商业区两种供能模式下多维度能效进行评估可以看出,多目标效益最优供能模式的能效优于单一目标效益最优模式下的能效。

4 结论

本文根据评估目的和RIES的数据采集条件,综合考虑系统的全部能量输送与存储环节,以反映评估对象的运行状态与系统的本质能效属性为原则与方向,建立了包含能源供应效率、能源转换效率、能源供应可靠性、能源供应质量、经济效益与社会效益等六个维度的指标体系并给出了其所对应指标的含义与计算方法;为了实现RIES的有效评估,本文在评价指标归一化的基础上,提出了基于多维度评估指标体系的RIES能效评估方法,并在组合权重计算的基础上提出了基于改进TOPSIS法的RIES能效评估方法;最后,以某一由工业生产区与商业区构成的138平方公里的区域系统为例进行了不同供能模式对比评估,由评估的计算结果可以看出,本文所提指标体系与评估方法具有较好的实用性,可以为未来RIES的能效评估工作提供一定参考与借鉴。

参考文献

- [1] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
Wu Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [2] Ahmadi P, Dincer I, Rosen M A. Thermoeconomic multi-objective optimization of a novel biomass-based integrated energy system[J]. Energy, 2014, 68(8): 958-970.
- [3] 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): 2835-2842.
Liu Hong, Zhao Yue, Liu Xiaou, et al. Comprehensive energy efficiency assessment of park-level multi-energy system considering difference of energy grade[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2835-2842.
- [4] 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.
Chen Baisen, Liao Qingfen, Liu Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174-182.
- [5] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305.
Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.
- [6] 韩俊, 黄俊辉, 方亮, 等. 基于综合能源的区域用能可靠性评估研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 9-15.
Han Jun, Huang Junhui, Fang Liang, et al. Research on reliability assessment of regional energy based on integrated energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 9-15.
- [7] Kou Y N, Zhenu J H, Li Zhigang, et al. Many-objective optimization for coordinated operation of integrated electricity and gas network[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 350-363.
- [8] 李媛, 杨秀, 凌梓, 等. 区域综合能源系统中考虑季节负荷特性的多能流耦合运行研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22): 78-86.
Li Yuan, Yang Xiu, Ling Zi, et al. Study on coupling operation of multi-energy flow for integrated community energy system considering seasonal load characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(22): 78-86.
- [9] 余晓丹, 徐宪东, 贾宏杰, 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.
Yu Xiaodan, Xu Xiandong, Jia Hongjie, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [10] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
Jia Hongjie, Wang Dan, Xu Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [11] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.
Jia Hongjie, Mu Yunfei, Yu Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [12] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电-气-热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
Xu Xiandong, Jia Hongjie, Jin Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [13] Huang Z, Yu H, Chu X, et al. Energetic and exergetic analysis of integrated energy system based on parametric method[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 588-598.
- [14] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 40-46.
Zhang Xinjie, Ge Shaoyun, Liu Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46.

收稿日期: 2021-02-09

修改稿日期: 2021-03-13