

基于正态云模型和模糊熵权法的综合能源服务成效评价

任明远¹, 姜明军¹, 蒋紫微², 宋玉峰², 彭 晶¹, 李帅兵²

(1. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730031;

2. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 能源结构逐渐转型, 综合能源服务产业迅速发展, 如何对综合能源服务成效进行评价至关重要。为了建立综合能源服务成效评价体系, 分析了综合能源系统组成, 建立了综合能源服务架构, 提出综合能源服务评价指标, 并基于正态云模型和模糊熵权法确定权重, 针对不同场景建立综合能源服务评价体系并给出评价结果, 最后提出了提升综合能源服务水平的对应政策措施。

关键词: 综合能源服务; 模糊熵权法; 正态云模型; 评价体系

Effectiveness evaluation of comprehensive energy services based on normal cloud model and fuzzy entropy weight method

REN Mingyuan¹, JIANG Mingjun¹, JIANG Ziwei², SONG Yufeng², PENG Jing¹, LI Shuaibing²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China;

2. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730031, China)

Abstract: With the gradual transformation of energy structure and the rapid development of comprehensive energy service industry, how to evaluate the effectiveness of comprehensive energy service is very important. In order to establish the comprehensive energy service effectiveness evaluation system, the composition of the comprehensive energy system is analyzed, the comprehensive energy service architecture is established, the comprehensive energy service evaluation index is put forward, the weight based on normal cloud model and fuzzy entropy weight method is determined, the comprehensive energy service evaluation system for different scenarios is established, and the evaluation results are given. Finally, the corresponding policies and measures to improve the comprehensive energy service level are put forward.

Key words: integrated energy services; entropy weight method; normal cloud model; evaluation system

0 引言

2020年9月, 习近平总书记提出了“碳达峰·碳中和”的美好愿景, 加速能源转型。需求侧能源结构发生变化, 单一的电能已不能满足人们日益丰富的用能需求, 以“冷-热-电-气”为主的综合能源系统逐步占据主导地位。除应对能源类型

的变化, 如何对多种能源进行耦合互补、协同优化, 从而提高综合能源系统的服务能效成为当前能源供给的热点问题。

综合能源服务是面向能源系统终端, 以用户需求为导向, 通过能源种类组合或系统集成、能源技术或商业模式创新等方式, 使用户收益或满

足感得到提升的行为。综合能源服务旨在提供符合用户需求、契合能源发展方向的解决方案，是推动能源革命、实现能源低碳发展以及提高能效和清洁能源利用率的重要举措。为此，建立综合能源服务成效评价体系，对综合能源服务市场中主体的能源效益、经济效益、环境效益和社会效益等指标进行评价，按照不同的权重建立评价体系，对能源服务主体进行综合性评估，能够有效推动综合能源服务提质增效。

目前，国内外针对综合能源系统服务成效问题开展了相关研究。文献[1]将不同的能源仿真规划平台按特性归类研究，探讨各仿真平台的优缺点，并提出了改进意见；文献[2]针对不同的场景，以最小成本为目标函数，以供需平衡为约束条件，构建了综合能源系统最优调度模型；文献[3]提出了考虑费用、排放最小化及效率最大化的综合能源系统多场景最优运行模式。文献[4]针对社区综合能源系统的功率波动问题，将中央空调系统视为虚拟储能系统，提出了混合储能系统的最优协调控制策略；文献[5]考虑到运行不确定性和多种电网支持服务的问题，提出了建筑物和DER两阶段随机调度的相关混合整数线性规划公式；为了消除负载和分布式发电机不确定性对系统安全性和稳定性的影响，文献[6]提出了一个考虑FR业务的CIES优化规划模型。上述研究为综合能源系统服务成效的评价提供了参考依据。

为保证综合能源服务成效评价结果的可靠性，构建合理的评价体系至关重要。为此，国内外学者开展了系统研究，主要评价方法包括主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法主要包括二项系数法、最小平方方法、层次分析法和专家调查法等；客观赋权法包括变异系数法、复相关系数法、熵值法和主成分分析法等。在评价指标赋权方面，文献[7]针对如何确定指标权重的问题，提出主观赋权与客观赋权相结合的AHP-熵权赋权法；文献[8]提出了网络分析法和反熵权法确定各指标权重；文献[9]提出了综合能源系统典型架构，构建了综合能效评价指标并提出了主客

观相结合的综合赋权方法；文献[10]将线性规划与多准则评价方法相结合，建立了综合设计与评价模型；文献[11]拟定评估标准对多个能源系统的环境影响进行量化，并根据选定的指标库进行评估，从而能够对能源系统进行公平的比较；文献[12]提出了一种新的模糊熵加权自然最近邻方法，能够有效分析高维海量网络安全数据。

尽管目前许多国内外学者针对如何建立综合能源服务体系已有较多研究，在综合能源服务成效评价体系方面，许多学者都有独到的见解，但对于不同服务场景，目前缺乏行之有效的通用型评价策略和评价体系。为此，本文以效益、环境和经济等因素为评价因素，构建了相应的评价体系，提出一种基于正态云模型和模糊熵权法的评价体系赋权方法，根据不同场景的实际运行数据对综合能源服务的成效进行了评价，并根据评价结果给出了相关政策性建议。

1 综合能源服务

1.1 综合能源系统

综合能源系统是指整合区域内煤炭、石油、天然气、电能和热能等多种能源，实现各能源子系统间的协调规划、优化运行、协同管理和互补互济。综合能源系统有助于可再生能源规模化开发，实现社会资源的可持续发展，其主要由供能网络、能源交换环节和终端用户共同构成，如图1所示。

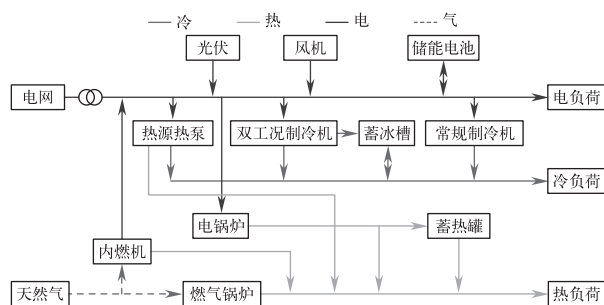


图1 综合能源系统

Fig. 1 Integrated energy system

通过综合能源系统，各种能源能够实现协调运行和互补利用，提高能源消纳能力，促进能源

可持续发展。

1.2 综合能源服务

综合能源服务是指一种以满足用户多元化能源需求为目标，涵盖规划设计、投资建设和运营服务等多方面的服务方式。2019年年初，国家电网提出“三型两网”的战略决策，以优化能源结构、提升能源运营管理水平为目标，与“双碳”政策相结合，是推动节能减排、提升综合能源服务水平的重要方向。

综合能源服务系统架构，通常与大数据、物联网和智慧能源等新技术相结合，研究一种面向需求侧的能源和服务管理系统。综合能源服务系统架构通常由三个层面组成，如图2所示。

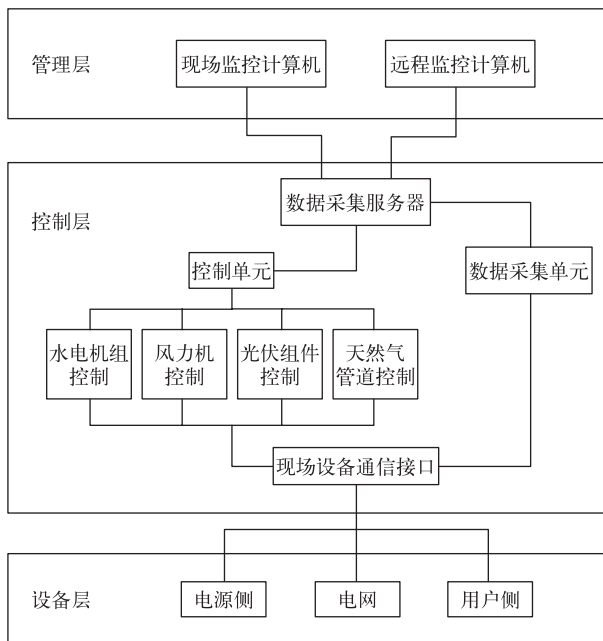


图2 综合能源服务系统架构

Fig. 2 Integrated energy service system architecture

1) 设备层：主要包含供给侧和需求侧的多种发电设备及用电设备，能源发出、消耗计量装置等。

2) 控制层：从设备层采集到的数据汇总上传到服务器，并将管理层分析完成的命令向设备层下达。

3) 管理层：收集信息，以节能减排、降低成本及提升用户难易度等为目标，制定满足需求

的优化方案，完成与控制层的信息交互。

2 综合能源服务成效评价体系

2.1 综合能源服务评价指标

综合能源服务评价以区域综合能源系统为对象，包括能效、经济和环境等评价指标。能效评价指标包含对冷、热、电、气的全方位多维度评价，如系统可靠功能率、网络综合损耗、管网热损失率和天然气系统消纳率等；经济评价指标包含能源经济性水平、建设投资成本、运行维护成本和管理服务成本等；环境评价指标包括CO₂年排放量、等值环境收益、环境污染排放水平和碳排放减少量等。

2.1.1 能源利用效益评价

能源利用水平是衡量综合能源系统性能的重要指标，一次能源消耗和一次能源效率可以从不同角度反映能源利用效益。

(1) 一次能源消耗

一次能源消耗主要分为三部分，分别为天然气消耗、电力消耗和可再生能源消耗，其公式如下

$$E = p_e Q_e + p_g Q_g + p_{re} Q_{re} \quad (1)$$

式中， E 为一次能源输入量值； p_e 、 p_g 和 p_{re} 分别为煤电、天然气和可再生能源折标煤系数； Q_e 、 Q_g 和 Q_{re} 分别为电能、天然气和可再生能源的输入。

(2) 一次能源效率

一次能源效率表征了一次能源输出能量与消费能量的比值，是反映系统能源利用率的重要指标，公式如下

$$A = \frac{P + F_{h,out} + F_{c,out}}{F_{in}} \quad (2)$$

式中， A 为一次能源利用效率； P 为系统有效输出功率； $F_{h,out}$ 、 $F_{c,out}$ 分别为单位时间系统热、冷输出量； F_{in} 为一次能源输入量。

2.1.2 经济效益评价

经济效益是评价项目对经济社会的影响，是投资者关注的重要属性，由投资建设成本和运行

维护费用构成。

(1) 投资建设成本

投资成本包含各个设备采购和安置的成本，从一定程度上反映了经济效益和建设难度，表达式为

$$C = \sum_{i=1}^n I_i V_i \quad (3)$$

式中， C 为投资成本； I_i 为第 i 种设备单位容量投资； V_i 为第 i 种设备容量。

(2) 运行维护费用

综合能源系统年运行维护成本可分为固定成本和可变成本两部分。固定成本是指日常维护所需的人工和管理费用；可变成本是指由于系统不确定运行带来的费用。表达式为

$$C_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \alpha_i (c_{fi} + T_i c_{vi}) + \sum_{i=1}^{n_2} \alpha_{ri} (c_{fri} + T_{ri} c_{vri}) + \sum_{i=1}^{n_3} \alpha_{si} (c_{fsi} + T_{si} c_{vsi}) \quad (4)$$

式中， α_i 、 α_{ri} 和 α_{si} 分别为热电联产、可再生发电和储能系统的系数； c_{fi} 、 c_{fri} 和 c_{fsi} 分别为三种设备的固定成本； c_{vi} 、 c_{vri} 和 c_{vsi} 分别为三种设备的可变成本； T_{vi} 、 T_{vri} 和 T_{vsi} 分别为三种设备的年平均利用小时数。

2.1.3 环境效益评价

CO_2 是导致全球天气变暖的温室气体，为响应国家“碳中和·碳达峰”行动计划和新能源电力系统政策，将 CO_2 排放量和 NO_2 排放量纳入评价指标。

(1) CO_2 排放量

CO_2 排放量是指燃烧化石燃料时排放的 CO_2 容量，其表达式为

$$M_C = W_g c_g + W_c c_c \quad (5)$$

式中， M_C 为 CO_2 排放量； W_g 、 W_c 分别为发电量和电网供电量； c_g 、 c_c 分别为原动机和煤电单位发电量的 CO_2 排放量。

(2) NO_2 排放量

NO_2 排放量与 CO_2 碳排放量类似，可表示为

$$M_N = W_g n_g + W_c n_c \quad (6)$$

式中， M_N 为 NO_2 排放量； n_g 、 n_c 分别为原动机和

煤电厂单位发电量的 NO_2 排放量。

2.2 综合能源服务成效评价体系

2.2.1 正态云模型和模糊熵权法

随着对不确定性研究的深入，越来越多的学者认为只有不确定本身才是确定的。而在多种不确定中，随机性和模糊性是最基本的。云模型用来刻画存在的大量随机性和模糊性以及两者之间的关联，用定性与定量来描述，三个数据表示模型特征：①期望 Ex ，表示数据在空间中的分布；②熵 En ，表示不确定性程度；③超熵，用来表示熵的不确定性，即熵的熵。正态云模型为模型在空间中服从正态分布。

云模型的中心 Ex_i 可由如下公式计算

$$Ex_i = X_{\min} + \theta_i (X_{\max} - X_{\min}) \quad (7)$$

式中， $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为 X 的有效论域。

En_i 的取值应满足 3σ 准则

$$3\varepsilon_1 En_i' = \max\{X_{\max} - Ex_i, Ex_i - X_{\min}\} \quad (8)$$

式中， $\varepsilon_1 \geq 1$ 。

En_i 的取值可看作与其对应的云朵及其相邻云朵 En_i 的平均值，可表示为

$$En_i = \begin{cases} (En_i' + En_{i+1}') / 2 & i = 0 \\ (En_{i-1}' + En_i' + En_{i+1}') / 3 & 0 < i < g \\ (En_i' + En_{i+1}') / 2 & i = g \end{cases} \quad (9)$$

式中， $En_i' \sim N(En_i, He_i^2)$ 。

He 的取值也应满足 3σ 准则，即

$$3\varepsilon_2 He_i = \max\{En_i' - En_i, En_i - En_i'\} \quad (10)$$

式中， $\varepsilon_2 \geq 1$ 。

取值实际应用中两朵云过于贴近时，其刻画的模糊概念也会出现如图3a所示过早重叠现象，因此重新调整 En_i 的大小，取 $\varepsilon_1=1$ 、 $\varepsilon_2=2$ ，以解决状态云过早交叠问题。

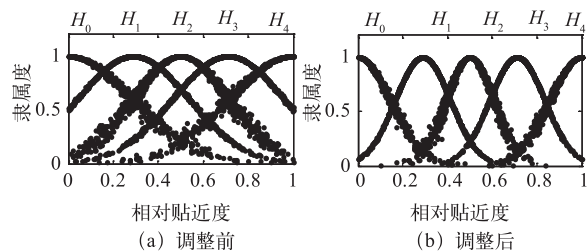


图3 不同云熵下的状态云

Fig. 3 State clouds under different cloud entropy

熵权法是已知评价对象指标的数值来确定每个指标所占的权重，熵是系统无序程度的一个度量，熵值越小，离散程度越大，该指标权重就越大。模糊熵权法即在模糊环境下，考虑多种因素的影响，针对某一目的对事物做出综合决策的方法。

通过模糊熵权法确定权重方法如下：

1) 首先构建判断矩阵 $X=[x_{ij}]_{m \times n}$ ， m 为指标个数， n 为对象个数。

2) 归一化处理矩阵 X ，得到 $B=[b_{ij}]_{m \times n}$ ，其元素为

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

式中， $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为最大、最小值； $\bar{x}$ 为均值。

3) 计算评估指标的熵值

$$\begin{cases} H_j = -\frac{1}{\ln y} \left(\sum_{i=1}^y f_{ij} \ln f_{ij} \right) \\ f_{ij} = \frac{b_{ij} + 1}{\sum_{i=1}^n (b_{ij} + 1)} \end{cases} \quad (12)$$

其中， $i=1,2,\dots,y$ ； $j=1,2,\dots,n$ 。

4) 计算指标权重

$$w_j^2 = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad j=1,2,\dots,n \quad (13)$$

2.2.2 成效评价体系构建

基于正态云模型和模糊熵权法，针对某一具体场景建立云模型，得到 Ex 、 En 和超熵的值，进而得到效益评价权重，建立综合能源服务成效体系，具体步骤如下：

1) 收集不同用能场景数据，通过正态云模型的方法求解聚合云。

2) 通过模糊熵权法，基于第一步得到的聚合云，求出各评价指标的权重。

3) 进行层次分析，将模型分为目标层、准则层和基础层三层，确定各层各指标所占权重，如图4所示。

4) 建立综合能源服务成效体系，形成具体

场景的综合评价。

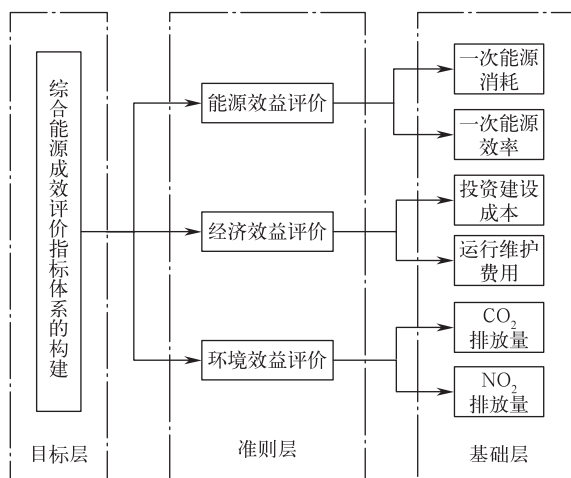


图4 层次分析法

Fig. 4 Analytic hierarchy process

3 典型场景下的综合能源服务成效评价

3.1 典型场景

本文基于我国华北某综合能源示范区，通过分析示范区内不同综合能源系统发电侧形态、用能类型及能源架构等，将示范区分三类典型场景：商业综合体、智慧小区及工业园区。三类场景分别编号为 S_1 、 S_2 和 S_3 。且不同场景的各指标数值具体如表1所示。

表1 不同场景实际数据

Tab. 1 Actual data of different scenarios

指标	S_1	S_2	S_3
一次能源消耗/(MW·h)	4 516	2 622	5 388
一次能源效率/(%)	77.9	75.1	66.37
投资建设成本/万元	310	376	215
运行维护费用/万元	153	193.37	234
CO ₂ 排放量/t	88.3	73.6	221
NO ₂ 排放量/t	1.33	1.97	1.41

3.2 评价指标赋权

商业综合体是将城市的商业、办公、居住、餐饮和文娱等耦合在一起形成复杂的整体。它是每个城市的核心，因此提高效率和降低成本是至关重要的问题。为此，首先将数据进行归一化处理，然后通过式(7)~式(10)得到聚合云，并根据式(11)~式(13)得到各指标熵权法权

重。通过主客观结合赋权法确定权重，即

$$w = \alpha w_1 + \beta w_2 \tag{14}$$

式中， α 、 β 分别为主观权重和客观权重系数； w_1 、 w_2 分别为主观权重和客观权重。

针对商业综合体用能特性，在注重经济效益的同时，尽可能地注重环境效益，建立综合能源服务成效评价体系，权重占比如表2所示。

表 2 商业综合体评价体系
Tab. 2 Evaluation system of commercial complex

准则层	权重占比	基础层	权重占比
能源效益评价	0.245	一次能源消耗	0.128
		一次能源效率	0.117
经济效益评价	0.406	投资建设成本	0.180
		运行维护费用	0.226
环境效益评价	0.349	CO ₂ 排放量	0.200
		NO ₂ 排放量	0.149

随着经济发展和人民生活水平的提高，建筑能耗迅速增加，占比逐渐上升。建筑能耗增加导致产生许多经济环境问题，因此要充分考虑当地资源和环境，构建智慧小区，使得社区能源经济可持续发展。为此，针对智慧小区用能特性，考虑到居民用电可靠性，能源效益至关重要，通过增加能源效益评价主观占比，结合式（11）～式（14）计算出熵权法权重，得到了智慧小区综合能源服务成效评价指标的权重，如表3所示。

表 3 智慧小区评价体系
Tab. 3 Evaluation system of smart community

准则层	权重占比	基础层	权重占比
能源效益评价	0.722	一次能源消耗	0.433
		一次能源效率	0.289
经济效益评价	0.112	投资建设成本	0.023
		运行维护费用	0.089
环境效益评价	0.166	CO ₂ 排放量	0.083
		NO ₂ 排放量	0.083

工业园区是指地方政府根据自身发展要求，划出一块区域，用于聚集多种生产要素，在一定范围内进行科学整合。工业园区用能密度大，对用能可靠性要求高，且面临节能减排、降低成本的需求。针对工业园区特性，结合主客观赋权法，根据式（11）～式（14）建立综合能源服务

成效体系，权重占比如表4所示。

表 4 工业园区评价体系
Tab. 4 Evaluation system of industrial park

准则层	权重占比	基础层	权重占比
能源效益评价	0.33	一次能源消耗	0.17
		一次能源效率	0.16
经济效益评价	0.33	投资建设成本	0.17
		运行维护费用	0.16
环境效益评价	0.34	CO ₂ 排放量	0.18
		NO ₂ 排放量	0.16

3.3 评价结果

本文针对综合能源系统服务问题，将其划分为{优秀，良好，一般，差，极差}五个等级，通过指标赋权和数据计算，可得三种不同典型场景下综合能源系统服务评价结果，如表5所示。

表 5 不同场景评价结果
Tab. 5 Evaluation results of different scenarios

场景	优秀	良好	一般	差	极差
S ₁		√			
S ₂			√		
S ₃	√				

由表5可得，工业园区运行状态评价结果较好，而智慧小区运行状态评价结果较差，应采取相应措施加以改善。

3.4 结果讨论与政策建议

针对综合能源服务问题，我国出台了诸多政策给予支撑。2014年11月国务院办公厅颁布《能源发展战略行动计划（2014—2020年）》，明确总体战略和行动纲领，推进能源创新发展；2016年政府提出新旧能源动力转换政策，优化能源结构；2017年国家电网颁布《国家电网公司关于在各省公司开展综合能源服务业务的意见》，奠定了能源转型的趋势；2018年国务院提出《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，推进产业绿色发展；2021年国家发改委、能源局等五部委提出《关于引导加大金融支持力度 促进风电和光伏发电等行业健康有序发展的通知》推动分布式能源发展。针对本文研究的三种典型场景评价结果，结合国家相关政策，现给出如下建议：

1) 针对商业综合体, 应加强政策扶持和规划引导, 鼓励企业发展特色商业形态, 对商业区进行统一规划协调管理, 大力推动经济发展, 同时注重能源利用效率及环境问题。

2) 针对智慧小区, 应增强社区建设, 因地制宜, 切合实际, 找到适合当前阶段发展的建设模式, 提高能源利用率和用电可靠性。

3) 针对工业园区, 应加强人才引进和组织领导, 促进企业与政府相协调, 加强建设综合能源服务项目, 加速企业转型, 提升企业实力, 注重环境保护问题, 降低碳排放。

4 结束语

本文首先分析综合能源系统的概念和组成, 构建综合能源服务系统架构。然后从能效、经济和环境三个方面提出综合能源服务评价指标, 基于正态云模型和模糊熵权法, 通过分层分析的方法建立成效评价体系模型, 根据不同的典型场景求得不同权重, 建立不同评价体系, 得到不同的评价结果。最后针对当下能源发展现状, 提出政策保障措施。

参考文献

- [1] 王梦雪, 赵浩然, 田航, 等. 典型综合能源系统仿真与规划平台综述[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4702-4712.
- [2] 潘华, 梁作放, 肖雨涵, 等. 多场景下区域综合能源系统的优化运行[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 484-492.
- [3] 钟永洁, 孙永辉, 谢东亮, 等. 含电-热-气-冷子系统的区域综合能源系统多场景优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 76-84.
- [4] WANG D, ZHI Y, YU B, et al. Optimal coordination control strategy of hybrid energy storage systems for tie-line smoothing services in integrated community energy systems[J]. Csee Journal of Power & Energy Systems, 2018, 4(4): 408-416.
- [5] CESENA E, LOUKARAKIS E, GOOD N, et al. Integrated electricity-xheat-gas systems: techno-

economic modeling, optimization, and application to multienergy districts[J]. IEEE Proceedings, 2020, 108(9): 1-19.

- [6] LI C, LI P, YU H, et al. Optimal planning of community integrated energy station considering frequency regulation service[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 264-273.
- [7] 董福贵, 张也, 尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3214-3223.
- [8] 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.
- [9] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [10] REN H, GAO W, ZHOU W, et al. Multi-criteria evaluation for the optimal adoption of distributed residential energy systems in Japan[J]. Energy Policy, 2009, 37(12): 5484-5493.
- [11] Kourkoupas D S, Benekos G, Nikolopoulos N, et al. A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions[J]. Applied Energy, 2018, 231(9): 380-398.
- [12] CHEN L, GAO S, LIU B, et al. FEW-NNN: A fuzzy entropy weighted natural nearest neighbor method for flow-based network traffic attack detection[J]. China Communications, 2020, 17(5): 151-167.

作者简介

任明远(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电与用电系统及控制、电力营销、综合能源服务、需求响应研究。

(收稿日期: 2021-10-13)