

综合智慧能源多维绩效评价研究综述

王永真^{1,2}, 张靖^{1,2}, 潘崇超³, 袁小雪⁴, 吴小敬⁴, 朱轶林⁵, 景锐⁶, 王子缘⁷, 康利改^{4*}

(1. 清华大学能源互联网创新研究院, 北京市 海淀区 100084;

2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084;

3. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京市 海淀区 100083;

4. 河北科技大学建筑工程学院, 河北省 石家庄市 050018; 5. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100190;

6. 卡迪夫大学工程学院, 英国 卡迪夫市 CF24 3AA; 7. 佛山环境与能源研究院, 广东省 佛山市 528000)

Multi-dimensional Performance Evaluation Index Review of Integrated and Intelligent Energy

WANG Yongzhen^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, PAN Chongchao³, YUAN Xiaoxue⁴, WU Xiaojing⁴, ZHU Yilin⁵,
JING Rui⁶, WANG Ziyuan⁷, KANG Ligai^{4*}

(1. Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,
Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

3. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Haidian District, Beijing 100083, China;

4. School of Civil Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei Province, China;

5. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Haidian District, Beijing 100190, China;

6. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK;

7. Foshan Institute of Environmental and Energy Technology, Foshan 528000, Guangdong Province, China)

Abstract: As an important form of energy internet industry development, integrated and intelligent energy (IIE) has become an important starting point for promoting the use of renewable energy, improving energy system efficiency, and reducing energy cost. However, at present, IIE demonstrates the characteristics of fuzzy concept boundaries, multi-agent games, heterogeneous energy flow coupling integration, and complex and diverse technical routes. Therefore, scientific, systematic, and operable performance evaluation is necessary theoretical guidance that ensures optimal IIE planning and design decision-making and the economic benefits of projects. Then, based on an IIE comprehensive evaluation system review, this study summarizes the multi-dimensional indicators of current IIE performance evaluation, taking the park or regional IIE as the object from four dimensions of energy utilization, environmental friendliness, economy and society, and comprehensive

intelligence; the first is to define 41 quantitative and qualitative performance evaluation indicators, the calculation mode, and the forward and reverse indicator directions, whereas the indices are graphically classified and summarized. The second is to study and judge the differences in similar indicators, such as the renewable energy replacement, utilization, and penetration ratios, as well as specific application scenarios. It determines evaluation indicators that IIE should resolve around in the future, including the energy sustainability index and demand-side interaction. In this study, the non-inferior solution, normalization, weighting, and other architectural methods of the IIE performance evaluation system as well as the systematically described performance evaluation steps, and the IIE performance indicators are inspected from the aspects of academic research, industrial application, and standardization.

Keywords: integrated and intelligent energy (IIE); energy internet; evaluation index; energy sustainable index; standard

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52006114); 中国博士后科学基金课题 (2019M660634); 国家社会科学基金重大项目 (19ZDA081)。

National Natural Science Foundation of China (52006114); China Postdoctoral Science Foundation Project (2019M660634); Major Projects of National Social Science Foundation (19ZDA081).

摘要: 综合智慧能源作为能源互联网产业发展的重要业态, 已成为促进可再生能源利用、提高能源系统能效与降低用能成本的重要抓手。但当前综合智慧能源概念边界模糊, 且具有多元主体博弈、异质能流耦合集成、技术路线复杂多样的特征。因此, 科学、系统、可操作的绩效评价是保障综

合智慧能源规划设计、优化决策与项目经济效益的必要理论指导。在综述综合智慧能源相关评价体系的基础上,从能源利用、环境友好、经济社会以及综合智慧4个维度,以园区或区域综合智慧能源为对象,归纳评述了当前综合智慧能源绩效评价的多维度指标。一是明确了41个定量及定性绩效评价指标的定义、计算方式以及指标的正逆性,并对指标进行了图形化分类与归纳;二是研判了可再生能源替代率、利用率、渗透率等相似指标的区别及其应用场景,指明了包括能值可持续指数、需求侧互动等综合智慧能源未来应侧重的评价指标。同时,系统阐述了综合智慧能源绩效评价体系的非劣解、归一化和赋权重等架构方式以及绩效评价的步骤,并从学术研究、产业应用以及标准化方面对综合智慧能源绩效评价进行了展望。

关键词: 综合智慧能源; 能源互联网; 评价指标; 能值可持续指数; 标准

0 引言

风、光等可再生能源的开发及利用,以及能源转型与消费综合能效的提升已成为“四个革命、一个合作”能源安全新战略以及“碳达峰、碳中和”目标的重要抓手^[1-4]。但是,中国当前的能源电力系统转型面临一些问题和挑战:①供应侧可再生能源的不确定性以及多种异质能流的非线性强耦合问题;②需求侧多元、多样、个性、分散、动态的负荷变化,灵活性能源资源有待激发;③不同尺度下能源供应侧与需求侧的时空量质不匹配,以及电网潮流双向化、概率化;④能源相关行业条块分割、烟囱式发展、协同能力不足。

随着第四次工业革命的发展,以“综合化”和“智慧化”为核心的能源技术结构创新和商业模式的重塑,成为上述问题的重要解决方案^[5-6]。数字技术与能源技术的深度融合,催生了综合智慧能源、综合能源服务等“互联网+智慧能源”(能源互联网)的新兴技术与业态。作为综合智慧能源的主要载体——综合能源系统,是以市场为牵引,以“能的梯级利用、综合利用、耦合互补和互联互通”推进能源系统“源、网、荷”的协调互动,实现能源效率、能源安全、能源经济与精准服务、生态协调的多重目标^[7-9]。

但中国综合智慧能源的发展还处于初级阶段,其规划、设计及运营往往需要匹配多元主体的需求及约束^[10]。相较于传统能源系统,综合智慧能源在评价及优化方面存在2个明显的特征:①综合智慧能源的技术路线(系统拓扑、设备容量、运行策略)与其在能效、经济、环境等维度评价指标呈现明显的非线性强

耦合关系;②除了能源利用的能效及成本外,综合智慧能源更加突出可再生能源的利用或消纳、冷热电气的耦合联供、需求侧资源互动、多能源系统的互联互通等“综合化”与“智慧化”的特征^[10-12]。因此,科学、系统、可操作的绩效评价是保障综合智慧能源规划设计、优化决策与项目经济效益的必要理论指导。

学界和工程界已有一些综合智慧能源绩效评价方面的研究^[13-14],如表1所示。国内研究方面,何大春等^[15]将主观评价与数理统计模型相结合,从能效、经济、环保和社会效益等二级指标出发,提出一种主客观信息融合的港口综合智慧能源评价体系(该体系包括了港口能源转换效率、项目适应性、单位吞吐量能耗、岸电系统配备率等16个三级指标);钟依庐等^[16]从“技术类和效益类”的角度,提出一种覆盖“源、网、荷、储”技术特性以及经济、环境、可靠、智慧等多维度评价体系,用于工业园区综合智慧能源的性能评价,该评价体系包含了年利用小时数、上级网络年供能占比、供能可靠率以及智慧设备覆盖容量比例等19个细分指标;韩中合等^[17]采用一次能源利用率、节能率、系统初始投资、年度化成本、CO₂排放量和NO_x排放量等6个指标,建立基于信息熵权和灰色关联分析的分布式能源系统3E(energy、environment、economy)综合评价模型,对分布式综合能源系统综合效益进行了评价;董福贵等^[18]构建了包含分布式能源系统的经济、能耗、环境因素的指标体系,并提出了主观与客观赋权相结合的层次分析法-熵权赋权法综合评价方法,用于各指标之间的权重赋值;陈柏森等^[19]提炼出能源环节、装置环节、配电网环节和用户环节区域综合能源系统的指标,并采用网络分析法-反熵权法组合等方法计算各项指标的权重和评分函数;洪潇等^[20]从协调优化、安全稳定、经济效益和社会效益4个维度构建区域能源互联网多能源协调评价指标体系;陈灵敏等^[21]采用粒子群算法,利用投资费用、一次能源消耗、CO₂排放、供能可靠性5个评价指标,对含CCHP的微能源网进行容量和运行策略的优化;金璐等^[22]构建了成本节约率、污染减排率和能效提升率3种评价指标,并采用非支配排序遗传算法对融合风、光、沼、地热的可再生微能源网系统进行了双层优化配置模型的求解。

国际研究方面,Jing等^[23]提出了灰色关联分析与熵权法相结合的综合能源系统性能评价方法,并进一步梳理了多目标优化决策与多指标综合评价2类研究的区别与联系;Strantzali等^[24]从技术、经

济、环境、社会影响4个角度系统性回顾应用于能源系统规划的决策方法，同时指出并无完美且通用的评价方法，应具体问题具体分析，选择适合的能源系统决策方法；Mardani等^[25]利用Web of Science检索了1995—2015年间196篇能源系统多指标综合评价的文献，分析指出混合多指标综合评价与模糊多指标综合评价被广泛应用于能源系统的综合评估；Shivarama等^[26]采用经济距离限制、净现值、能源成本、可再生能源占比、运营成本/排放等指标对混合可再生能源系统进行了性能评估；Kourkoumpas等^[27]利用全生命周期的环境和能源绩效指标（例如“全球变暖潜力”、“减少CO₂直接排放”、“避免的CO₂排放”、“CO₂等价的投资回收期”）评估了包含储能的可再生能源系统；Cuesta等^[28]从经济、环境、技术和社会4个二级指标出发，评估了混合可再生能源系统，具体包括年化资本成本、累积能源需求、能源回收期、自治程度、能源供应损失的概率、可再生能源占比、地区的就业率和发生事故的风险等16个三级指标，并建立了混合可再生能源系统及其社会影响之间的联系；Zhou等^[29]针对园区级综合能源系统，从经济性、环境性、能源利用率、可靠性和可持

续性等9个二级指标出发，提出园区级综合能源系统性能分析与评价的混合模糊多准则决策方法；Yang等^[30]提出包含一次能源比率、烟效率、运营成本、年SO₂排放量、维护便利性等12个评价指标的综合能源系统灰色关联评估规划方法；Liu等^[31]从效益、机会、成本和风险的角度确定了23个评价标准，提出ANP-TOPSIS的评价体系；Xu等^[32]以某数据中心冷热电联供系统2年的运行数据为基础，构建了与传统系统相比的3种衡量能源、环境和经济的评价指标；Ju等^[33]采用熵权法，从能源、经济和环境的评价指标出发，构建了包含能量率、储值率、运行费用、净现值、内部回收率和碳减排的混合能源系统的评价指标体系；Liu等^[34]采用模糊层次分析法和模糊综合评价法为可再生能源系统提出一种通用可持续性指标的开发框架，该通用指标考虑了经济、环境和社会标准方面的因素；Wang等^[35]采用能效、烟效率、CO₂排放量、CO₂减排率等指标，分析了分布式能源系统的能源、烟、能效经济和环境性能；Ren等^[36]针对含太阳能的综合能源系统，考虑了年成本节约率、CO₂减排量、一次能源节约率等评价指标，发现建筑能源系统的年成本节约率与CO₂减排量和一次能源节约率成负相关。

表 1 近年来能源系统的绩效评价体系汇总（部分）

Table 1 Summary of performance evaluation system of energy system in recent years (partial)

机构	研究对象	指标数量	评价方法	参考文献
国网江苏电力有限公司经济技术研究院/ 上海海事大学/东南大学	港口综合能源系统	2层，4个维度，16个指标	基于马氏距离的统计检验方法	[15]
中国能源建设集团广东电力设计研究院有限公司	园区综合能源系统	2类，3层，4个维度，19个指标	德尔菲法与层次分析法	[16]
华北电力大学	分布式能源系统	2层，3个维度，6个指标	熵权法和灰色关联法	[17]
华北电力大学	分布式能源系统	2层，3个维度，6个指标	AHP-熵权法	[18]
武汉大学/中南电力设计院/ 国网黄石供电公司	区域综合能源系统	2层，4个维度，16个指标	网络分析法（ANP）-反熵权法	[19]
华北电力大学	区域综合能源系统	2层，4个维度，26个指标	改进投影寻踪评价法	[20]
广东工业大学/南方电网调峰调频发电有限公司	微能源网	1层，5个指标	粒子群算法	[21]
中国电力科学研究院/国网江西电力有限公司/东南大学	可再生微能源网系统	1层，3个指标	非支配排序遗传算法	[22]
Xiamen University/Imperial College London	综合能源系统	2层，3个维度，7个指标	灰色关联分析与熵权法相结合	[23]
National Technical University of Athen	综合能源系统	2层，4个维度，36个指标	综述	[24]
School of Electrical Engineering, VIT University	混合可再生能源系统	1层，5个指标	加权法和	[26]

续表

机构	研究对象	指标数量	评价方法	参考文献
CERTH/CPERI/NTUA/LSBTP	可再生能源系统	2层, 3个维度, 21个指标	综述	[27]
Universidad de Deusto, Avda	混合可再生能源系统	2层, 4个维度, 16个指标	综述	[28]
North China Electric Power University/ China Southern Power Grid	园区综合能源系统	2层, 5个维度, 9个指标	混合模糊多准则决策方法	[29]
University of Birmingham	综合能源系统	2层, 4个维度, 12个指标	改进的灰色关联法	[30]
North China Electric Power University	储能	2层, 4个维度, 23个指标	ANP-TOPSIS混合方法	[31]
Purdue University, United States	数据中心能源系统	2层, 3个维度, 3个指标	TRNSYS	[32]
North China Electric Power University	混合能源系统	2层, 3个维度, 6个指标	熵权法	[33]
Central South University/The University of Queensland	可再生能源系统	2层, 4个维度, 15个指标	模糊层次分析法和模糊综合评价法	[34]
North China Electric Power University/ University of Pennsylvania	分布式能源系统	2层, 4个维度, 4个指标	基于能级的改进的熵经济方法	[35]
Shanghai Jiao Tong University	综合能源系统	2层, 3个维度, 3个指标	NSGA-II算法	[36]

上述研究面向港口、园区、楼宇、区域、行业不同尺度的综合智慧能源,在其规划、设计、运营等环节构建了综合评价体系。另外,学界也不乏对微能源网、多能互补、综合智慧能源、能源互联网、区域能源等相近对象综合绩效评价体系的筛选与架构^[37-38],以及对综合智慧能源某一过程或环节的绩效评价指标的创新设计^[39-40]。但是综合智慧能源的发展还处于初级阶段,中国综合智慧能源的规划、设计及运营离不开对项目前后综合绩效科学、全面、系统的量化评价。而综合智慧能源自身存在技术复杂度高、多元主体博弈的特征,其绩效的全面评价面临场景多、维度多、主体多的挑战,导致当前综合智慧能源绩效评价指标繁多,并呈现相关性高、容易混淆、不规范的问题。因此,系统、全面、差异化审视可用于综合智慧能源特定场景的绩效评价指标,是综合智慧能源规划方案设计与系统决策优化的必要理论支持。

进而,本文从能源利用效益、环境友好效益、经济社会效益和综合智慧效益4个评价维度出发,定性与定量相结合,综述了当前综合智慧能源的绩效评价指标。一是明确41个定量及定性指标的定义、计算/操作方式以及指标的正逆性,以为综合智慧能源相关项目的评价和优化提供参考;二是研判可再生能源替

代率、利用率、渗透率等相似指标的区别以及具体的应用场景,以期规范综合智慧能源一些相关性指标的异同及适用范围;三是指明能值可持续指数、需求侧互动等综合智慧能源未来可能侧重的指标,以便能够用单个统一指标去衡量综合智慧能源的综合性能,并避免主观权重的影响。最后,展望了综合智慧能源绩效评价体系的架构方法及其步骤。上述工作,以期综合智慧能源绩效评价相关领域的规划设计、项目评估、运营调度以及标准制定提供参考。

1 本文综合智慧能源的边界以及评价指标的体系架构

综合智慧能源是在安全可靠的基础上,以促进可再生能源利用、提高能源系统能效与降低用能成本为目的(即“开源节流”)。如图1所示,当前综合智慧能源的主要思想是从能质耦合集成提效的“综合化”技术(其偏向于“梯级利用、多能互补”),结合能源数字化赋能的“智慧化”技术(其侧重于“协同优化、源荷互动”),实现不同尺度能源系统物理驱动与数据驱动以及能源信息系统的高度耦合,并促进新一代能源系统的一体化规划设计及灵活运营。可以说,

综合智慧能源是能源互联网产业视域下的重要业态，其相关技术理念和商业模式与能源互联网高度相关。假如能源互联网是利用“互联网”的思维去实现能源行业的多尺度“多元互动的协同网络”，那么，综合智慧能源则是让“多元互动的协同网络”在消费侧和供应侧实现更好的能源供能基本服务及能源数字化增值服务^[41-43]。

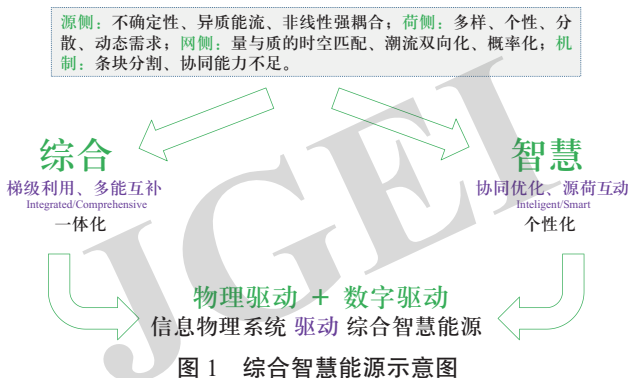


Fig. 1 Schematic diagram of integrated and intelligent energy (IIE)

实际上，业界还有综合能源、多能互补、综合能源服务、区域能源、冷热电联供等与综合智慧能源高度相似的概念，鉴于综合智慧能源产业生态视角的不同，当前从学术上难以辨识上述概念的区别，但为进一步澄清本文绩效评价指标的研究对象，本文试将综合智慧能源分为狭义综合智慧能源和广义综合智慧能源。狭义综合能源实际上就是具有具体形态的多能互补冷热电联供系统，其在物理层强调能源流的梯级综合利用，在信息层强调信息流改造能量流，在价值层强调能源的开放共享，目的是从能源服务系统全生命周期视角最大化系统的综合效益。而涉及到多能互补综合能源系统“基本供能服务”以及“多元增值服务”或冷、热、电、气任意一体化供能类别或“源、网、荷、储”其中任意两环节，都属于广义综合智慧能源的范畴^[44-45]。因此，本文综合智慧能源绩效评价的对象和边界，是针对区域或园区尺度的狭义综合智慧能源，并做以下假设：

1) 本文综合智慧能源的尺度为园区或楼宇，不考虑大区域尺度下一些诸如GDP贡献、万元国民生产总值排放的CO₂等综合智慧能源的宏观指标；

2) 本文对综合智慧能源评价指标的筛选是基于能源系统的黑箱模型，即不细化到诸如电网或热网损失率、子设备能源转换效率等能源系统内部或某环节的性能指标；

3) 本文综合智慧能源不考虑一些诸如综合能源服

务新业务开展、平台创新能力等综合智慧能源产业或企业效益及发展模式的评价指标。

因此，基于前述假设与前人研究，并以“能源三角博弈”为切入点，如图2所示，本文就综合智慧能源的评价指标设置能源利用效益、环境友好效益、经济社会效益以及综合智慧效益4个维度，综述当前综合智慧能源绩效评价的常用指标。值得一提的是，据前述，“开源节流”的“能效”手段是能源系统满足支付能力、维持安全可靠、实现低碳清洁的传统手段，其余能源系统的效益高度耦合，是能源系统效益评价的共性指标，也是“能源不可能三角”的基本架构。而对于综合智慧能源，随着数字技术发展，综合化和智慧化的手段逐渐凸显。因此，除了与传统能源系统并存的效益评价指标外，本文也将综合化和智慧化的特征手段单独提取出来当做“效益评价指标”，以突出当前及未来综合智慧能源的辨识度。

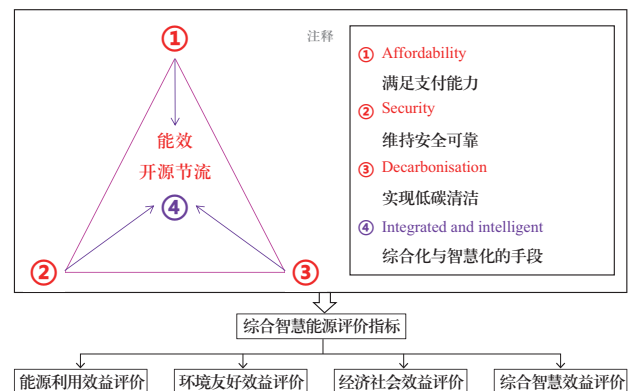


图2 本文综合智慧能源绩效评价指标的分类图示

Fig. 2 Classification diagram of IIE performance evaluation indicators

2 综合智慧能源绩效评价指标概述

综合智慧能源的绩效评价，是对其能量系统在一定周期内由于能源使用引起的能源利用效益、环境友好效益、经济社会效益以及综合智慧效益等维度可测量、计算或评价的结果或预期结果进行评价。其中，绩效评价是测量或计算得出绩效指标值，并与预期评价目标值进行比较，用以决策综合智慧能源的“事前评估”或“事后评估”。

2.1 能源利用效益评价

综合智慧能源的能源利用效益评价是对其能源利用效果进行评价，应至少反映综合智慧能源对输入能量的有效利用程度，主要的评价指标如下。

1) 综合能耗 (comprehensive energy consumption, CEC)。在统计报告期内综合智慧能源生产某种产品或提供某种服务实际消耗的各种能源实物量^[46], 按规定的计算方法和单位分别折算后的一次能源总和, 即综合能耗, 通常折合为标准煤进行衡量。其中, 输入综合智慧能源的天然气、地热、风、光等可再生能源均为一次能源, 从外部电网输入电能为二次能源。

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

式中: E_{IE} 为综合智慧能源在统计期内输入的一次能源的量值, tce 或 kgce; p_e 为煤电折标煤系数, kgce/kWh; p_g 为天然气折标煤系数, kgce/m³; p_{re} 为可再生能源折标煤系数, kgce/MJ, 一般在运行期内设为 0; Q_e 为电能输入量, kWh; Q_g 为天然气输入量, m³; Q_{re} 为可再生能源输入量, MJ。另外, 若综合智慧能源涉及新水、软化水、压缩空气、氧气等耗能工质 (energy consumed medium) 且其耗量较大, 则宜计入能源消耗中。同时, 用能部门实际消耗的燃料能源应以其低 (位) 发热量为计算基础折算为标准煤量, 当无法获得各种燃料能源的低 (位) 发热量实测值和单位耗能工质的耗能量时, 可参照《GB/T 2589-2020 综合能耗计算通则》中所明确的折标煤系数进行核算。

2) 能耗强度 (energy consumption intensity, ECI) 为统计期内综合智慧能源单位面积、人口或产值的综合能耗, 亦称单位产值综合能耗、单位产品综合能耗等。其可反映综合智慧能源的经济效率, 可用于预估综合智慧能源项目装机容量以及项目经济投资效益。面向楼宇、社区、园区/工业企业的典型应用场景, 综合智慧能源的能耗强度可采用下式计算:

$$P_{IE} = \begin{cases} E_{sum}/A_{sum} & \text{场景为建筑楼宇} \\ E_{sum}/H_{sum} & \text{场景为社区} \\ E_{sum}/W_{sum} & \text{场景为园区/工业企业} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{IE} 为综合智慧能源的能耗强度 (场景为建筑楼宇时, kgce/km²; 场景为社区时, kgce/人; 场景为园区/工业企业时, kgce/万元); E_{sum} 为能源年消耗量之和的标准煤当量折算值, kgce; A_{sum} 为综合智慧能源区域 (项目) 的建筑面积, km²; H_{sum} 为综合智慧能源区域 (项目) 的人口数, 人; W_{sum} 为综合智慧能源区域 (项目) 的年生产总值, 万元。

3) 综合能源利用率 (primary energy ratio, PER) 是指综合智慧能源产出能量总和与一次能源消耗量的比值, 又称能源利用率或综合能效, 其数值大小可以

表征综合智慧能源对一次能源的利用水平。值得注意的是, 综合能源利用率一般不考虑不同能源间的品位差异, 如式 (3) 所示。如考虑异质能源的差异性, 可通过能质系数 (energy quality coefficient, EQC, 为能源的焓值与该能源数量的比值) 来反映不同形式能源品位的差异^[47], 继而得到含不同品位能源系统的综合利用效率, 如式 (4) 所示, 此时, 综合能源利用率与系统焓效率的含义一致^[48]。

$$\eta = \frac{E_{C,y} + E_{H,y} + E_{e,y}}{\sum_i W_i} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{E_{C,y} \lambda_C + E_{H,y} \lambda_H + E_{e,y} \lambda_e}{\sum_i (W_i \lambda_i)} \quad (4)$$

式中: $E_{C,y}$ 、 $E_{H,y}$ 和 $E_{e,y}$ 分别为被评价系统的全年耗冷量、耗热量和耗电量, kJ; λ_C 、 λ_H 和 λ_e 分别为对应能源形式的能质系数; W_i 为系统消耗的第 i 种一次能源的能量, kJ; λ_i 为第 i 种能源对应的能质系数, 可由统一标准下的焓效率计算, 如恒定的环境参数 (25 °C, 101 kPa)。

4) 系统焓效率 (system exergetic efficiency, SEE) 是表征综合智慧能源热力学完善度的数值, 是指综合智慧能源所输出的总焓 (收益焓) 与输入的总焓 (耗费用焓) 的比值^[49]。与基于热力学第一定律的综合能源利用率不同, 焓效率反映了基于热力学第二定律的综合智慧能源供能和用能在能级上的匹配程度。如式 (5) 所示, 从数值上看, 同一综合智慧能源的焓效率小于对应系统的热效率或综合能源利用率。

$$\varepsilon = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{E_{xe}^o + E_{xc}^o + E_{xh}^o}{E_{xe}^i + E_{xc}^i + E_{xre}^i} \quad (5)$$

式中: ε 为系统焓效率; E_{xe}^i 、 E_{xc}^i 、 E_{xre}^i 分别为单位时间内综合智慧能源输入电能、天然气、可再生能源的焓, kJ; E_{xe}^o 、 E_{xc}^o 、 E_{xh}^o 分别为综合智慧能源输出电能、冷量、热量的焓, kJ。需要注意的是, 焓值的计算要保证不同能源处于统一环境参考标准, 且存在燃料的化学热是否应包含的问题^[50-51]。

5) 能源节约率 (energy saving rate, ESR) 是指与传统系统相比, 从热力学第一定律角度, 当综合智慧能源产生相同数量的冷、热、电时, 综合智慧能源所节省的能量 (即节能量) 与传统系统所消耗的总能量之比, 简称节能率。同理, 热力学第二定律角度也有焓节约率的定义, 此处不再赘述。

$$\theta = \frac{E_{SP} - E_{IE}}{E_{SP}} \times 100\% \quad (6)$$

式中： θ 为能源节约率； E_{sp} 为传统分产系统的燃料消耗量（换算为一次能源的标煤量）。

6) 用户侧满意度 (user side satisfaction, USS)，反映综合智慧能源用户对周围温度、相对湿度、电能质量等物理量的满意度，是一个综合指标。其代表性指标包括平均热感觉指数、室内空气质量满意度、预计不满意者的百分数指数 (predicted percentage of dissatisfied, PPD) 等。难以量化的指标多通过对一定范围内用户的投票经折算得到。以PPD指数为例，PPD可提供有关热不适或热不满意的信息，为预计处于热环境中的群体对于热环境不满意的投票平均值^[52]，以反映用户侧房间舒适度。这类定性指标也可用定量方式计算，其计算方法为

$$P_{PPD} = 100 - 95e^{-(0.03353P_{PMV}^4 + 0.2179P_{PMV}^2)} \quad (7)$$

式中： P_{PPD} 为用户侧满意度； P_{PMV} 为预计平均热感觉指数，是根据人体热平衡预计群体对7个等级热感觉评价的平均值。

7) 万元产值能耗下降率 (decline rate of energy consumption per ten thousand yuan of output value, DRECTTYOV)，反映综合智慧能源系统在经济效益约束下能源合理利用的情况，一般用来衡量省市或地区发展综合智慧能源计划完成情况。

$$\eta_{DREC} = \left(1 - \frac{P_{IE}}{P_{SP}}\right) \times 100\% \quad (8)$$

式中： η_{DREC} 为万元产值能耗下降率； P_{IE} 为报告期万元产值能耗，tce/万元； P_{SP} 为基期万元产值能耗，tce/万元。

8) 用户端能源质量 (client energy quality, CEQ) 主要是综合智慧能源用户端的电能、热能、冷能及燃气等能源的供给质量。用户端能源质量的高低直接决定了用户是否能够消费该类能源以及用户的用能体验。用户端能源质量已有很多标准规范，比如电能质量的评估已有完善的标准体系^[48, 53-54]，包括电压偏差 (GB/T 12325)、电压暂降与短时中断 (GB/T 30317)、三相电压不平衡 (GB/T 15543)、频率偏差 (GB/T 15945)、电压波动与闪变 (GB/T 12326)、谐波 (GB/T 14549)、暂时过电压和瞬态过电压 (GB/T 18481) 等。用户端热能及冷能的供能质量则与供能载体的流量、温度、压力、湿度或者焓值的变化率相关，应符合城镇供热服务 (GB/T 33833) 等标准的相关规定；燃气质量、设备与管道、燃气储罐、安全与消防等应符合城镇燃气设计规范 (GB 50028)、城镇燃气技术规范 (GB 50494) 等标准的有关规定。

9) 设备能效等级 (energy efficiency grade of equipment, EEGE)。综合智慧能源“源网荷储”以及“信息层”的设备门类繁多，其设备能效等级难以统一规范。对于常见设备，综合智慧能源设备能效等级应符合：冷水机组能效限定值及能源效率等级 (GB 19577)、中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级 (GB 18613)、微型计算机能效限定值及能效等级 (GB 28380)、永磁同步电动机能效限定值及能效等级 (GB 30253)、通风机能效限定值及能效等级 (GB 19761)、电力变压器能效限定值及能效等级 (GB 20052)、工业锅炉能效限定值及能效等级 (GB 24500)、低环境温度空气源热泵 (冷水) 机组能效限定值及能效等级 (GB 37480)、溴化锂吸收式冷水机组能效限定值及能效等级 (GB 29540) 等能效限定值及能效等级标准的相关规定。

2.2 环境友好效益评价

环境友好效益评价是考核综合智慧能源新建、改造或优化后对环境的影响，应至少能反映综合智慧能源对系统内外可再生能源的利用程度、能量系统对外界环境有害物质的排放，以及如热、声、光、辐射、电磁、振动等其他环境影响，主要评价指标如下。

1) 可再生能源替代率 (renewable energy replacement ratio, RERR)，或称可再生能源装机占比，是指与传统化石能源为主的分供系统相比，综合智慧能源源侧 (供给侧) 由可再生能源替代传统化石能源供能的装机比例。类似的还有清洁能源替代率或清洁能源装机占比。

$$R_{RER} = \frac{\sum_r W_r}{W_{IE}} \times 100\% \quad (9)$$

式中： R_{RER} 为可再生能源替代率，%； W_r 为第 r 种可再生能源在综合智慧能源中的装机，kW； W_{IE} 为综合智慧能源系统总装机，kW。

2) 可再生能源利用率 (renewable energy utilization rate, REUR) 是指综合智慧能源源侧 (需求侧) 中可再生能源利用量与能源消耗总量的比值，或称可再生能源消费占比^[55-56]。在生态城市指标体系、区域能源规划中，可再生能源的应用常以可再生能源利用率为控制目标。类似的还有清洁能源利用率。

$$R = \frac{\sum_r W_{M-IOE-r}}{E_{sum}} \times 100\% \quad (10)$$

式中： R 为综合智慧能源中可再生能源产能占比，%；

E_{sum} 为综合智慧能源年消耗量之和的标准煤当量折算值, kgce; $W_{\text{M-IOE},r}$ 为在统计时间内第 r 种可再生能源转化成可利用能源形式能量的标准煤当量折算值, kgce。

3) 可再生能源渗透率 (renewable energy penetration ratio, REPR), 或称可再生能源源荷比, 是指综合智慧能源供给侧可提供的可再生能源能量与需求侧终端用户用能的比例, 即终端用户可获得 (或供给侧可提供) 的可再生能源能量与终端用户消费的可再生能源和不可再生能源总和的比值^[57-58], 可以发现, 不同于可再生能源替代率和利用率, 可再生能源渗透率可大于1。

$$\lambda_{\text{end}} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{\text{in},i}}{\sum_{i=1}^N R_{\text{end},i} + \sum_{i=1}^N U_{\text{end},i}} \quad (11)$$

式中: λ_{end} 为可再生能源终端渗透率, %; R_{in} 为综合智慧能源供应侧可提供的可再生能源能量, kWh; R_{end} 为综合智慧能源终端用户获得的可再生能源能量, kWh; U_{end} 为终端用户获得的不可再生能源能量, kWh; i 为能量形式。

4) 减排率 (reduction ratio, RR) 用来评价有效节约物质资源和能量资源, 减少废弃物和环境有害物质 (包括三废和噪声等) 排放情况。一般多指 CO_2 减排率, 即与传统分产系统相比, 综合智慧能源在输出相同冷热量时对应的 CO_2 减排量与传统化石能源分供系统 CO_2 排放量的比值。

$$\varepsilon_{\text{R}} = \frac{\Delta E}{E_{\text{m1}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: ε_{R} 为减排率; E_{m1} 为传统分产系统污染物理论排放量, kg; ΔE 为与传统分产系统相比, 综合智慧能源在输出相同冷热量时对应的 CO_2 减排量, kg。

5) 噪声环境影响 (environmental noise impact, ENI), 应符合环境影响评价技术导则声环境 (HJ 2.4)、城市区域环境噪声适用区划分 (GB/T19190)、工业企业厂界噪声标准 (GB 12348) 等相关标准的有关规定。

6) 电磁环境影响 (electromagnetic environmental impact, EEI), 应符合电磁环境控制限制 (GB 8702)、环境电磁波卫生标准 (GB 9175)、城市配电网规划设计规范 (GB 50613) 等相关标准的有关规定。

7) 大气环境质量影响 (atmospheric environment quality impact, AEQI), 应符合环境质量标准 (GB

3095)、电池工业污染物排放标准 (GB 30484)、火电厂大气污染物排放标准 (GB 13223) 等相关标准的有关规定。

8) 水环境评价 (water environmental assessment, WEA), 应符合地下水质量标准 (GB/T 14848) 和地表水环境质量标准 (GB 3838) 等相关标准的有关规定。

9) 生态环境影响 (ecological environmental impact, EEI), 应符合环境影响评价技术导则生态影响 (HJ 19) 等相关标准的有关规定。

2.3 经济社会效益评价

经济社会效益评价考核综合智慧能源的项目经济效益以及对社会就业及产业影响, 应至少能反映综合智慧能源项目的资金内部收益率和投资回收期, 主要评价指标如下。

1) 单位供能成本 (unit energy cost, UEC) 为综合智慧能源产生单位能量所需要付出的经济投入, 多用年均化成本 (或称年度化成本、年化综合成本) 表示, 可采用下式计算:

$$L_{\text{COE}} = \frac{I_0 - \frac{V_{\text{R}}}{(1+i)^N} + \sum_{n=1}^N \frac{A_n + D_n + P_n}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N Y_n} \quad (13)$$

式中: L_{COE} 为综合智慧能源的单位能耗成本, 万元/kgce; I_0 为初始投资, 万元; V_{R} 为固定资产残值, 万元; N 为项目运行年限, 年; A_n 为第 n 年的运行成本, 万元; D_n 为第 n 年的折旧, 万元; P_n 为第 n 年的利息, 万元; Y_n 为第 n 年供能量的标准煤当量折算值, kgce; i 为折现率。

2) 用能成本变化率 (rate of change of energy cost, RCEC), 又称年总成本节省率, 是指综合智慧能源所服务用户用能成本减少量与规划设计之前的用户用能成本之比, 可采用下式计算:

$$R_{\text{CEC}} = \frac{C_{\text{before}} - C_{\text{after}}}{C_{\text{before}}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: R_{CEC} 为用户用能成本变化率, %; C_{before} 、 C_{after} 分别为综合智慧能源规划设计之前、之后的用户用能成本, 元/kgce。

3) 系统焓经济成本 (exergic economic cost, EEC) 是指基于焓经济分析方法^[59], 将系统输出的电、冷、热看作系统能源服务的产品, 该多能源产品单位焓所付出的经济成本可定义为综合智慧能源输入的总焓与

单位成本之积和所有设备投资运维成本之和与系统所输出总焓的比值。

$$E_{EC} = \frac{c_e E_{xe}^i + c_g E_{xg}^i + c_{re} E_{xre}^i + Z}{E_{xe}^o + E_{xc}^o + E_{xh}^o} \quad (15)$$

式中： c_e 、 c_g 、 c_{re} 分别为综合智慧能源输入电能、天然气、可再生能源的焓的单位成本，万元； Z 为所有设备投资和运维成本的折合成成本流，万元； E_{xe}^i 、 E_{xg}^i 、 E_{xre}^i 分别为单位时间内综合智慧能源输入电能、天然气、可再生能源的焓，kJ； E_{xe}^o 、 E_{xc}^o 、 E_{xh}^o 分别为综合智慧能源输出电能、冷量、热量的焓，kJ。

4) 投资回收期 (pay back time, PBT)，即投资返本年限，是指以综合智慧能源的净收益回收其总投资（包括建设投资和流动资金）所需要的时间。投资回收期自建设开始年算起，项目评价的投资回收期不大于部门或行业的基准投资回收期，可认为项目的经济性是可以接受的^[60]。投资回收期一般有静态投资回收期和动态投资回收期之分。静态投资回收期的计算公式如下^[5]，动态投资回收期则是按现值计算的投资回收期。

$$\sum_{t=0}^{P_t} (C_1 - C_0)_t = 0 \quad (16)$$

式中： P_t 为技术方案静态投资回收期，年； C_1 为技术方案现金流入量，元； C_0 为技术方案现金流出量，元； $(C_1 - C_0)_t$ 为技术方案第 t 年的净现金流量，元。

5) 内部收益率 (internal rate of return, IRR)，又称资金内部收益率，是指使综合智慧能源技术方案在计算期内各年净现金流量的现值累计等于0时的折现率^[61]。当综合智慧能源项目的资金内部收益率不小于部门或者行业的基准收益率，应认为项目的经济性是可以接受的。

$$\sum_{t=0}^n N_{Ct} (1 + F_{IRR})^{-t} = 0 \quad (17)$$

式中： F_{IRR} 为财务内部收益率，%； N_{Ct} 为计算周期内第 t 年的新增净现金流量，元，根据全部投资和资本金财务现金流量表确定。

6) 投资收益率 (rate of return on investment, ROI)，又称投资利润率，是指综合能源投资方案在达到设计生产能力后1个自然年的年净收益总额与方案投资总额的比率，是评价投资方案盈利能力的静态指标，表明投资方案正常生产年份中，单位投资所创造的年净收益额。投资收益率的应用指标，根据分析目的不同又可分为总投资收益率 (ROI)、资本金净利润

率 (ROE)，其中ROI的计算方法如下：

$$R_{OI} = \frac{E_{BIT}}{T_1} \times 100\% \quad (18)$$

式中： R_{OI} 为综合智慧能源规划设计方案的总投资收益率，%； E_{BIT} 为综合智慧能源规划设计方案正常年份的年息税前利润或运营期内年平均税前利润，万元； T_1 为综合智慧能源规划设计方案总投资，万元。

7) 配电网缓建效益 (postpone benefit of distribution network, PBDN) 用来反映相对于传统分供系统，综合智慧能源的建设对于减少配电网初始投资或延缓其改造升级的能力，通过有功、无功功率的单位成本表示。若为负值，从线路和变压器角度，代表传输功率下降；从设备角度，代表使用强度降低，从而延缓对新设备的投资。

$$\Delta C_{inode,p} = \frac{C_{inode,p}}{\Delta p_{inode}} \quad (19)$$

$$\Delta C_{inode,q} = \frac{C_{inode,q}}{\Delta q_{inode}} \quad (20)$$

式中： $\Delta C_{inode,p}$ 、 $\Delta C_{inode,q}$ 分别为有功功率和无功功率的单位成本，万元/kW、万元/kvar； Δp_{inode} 、 Δq_{inode} 分别为节点 i 的有功功率和无功功率的变化值，kW、kvar； $C_{inode,p}$ 、 $C_{inode,q}$ 分别为节点 i 有功变化值、无功变化值引起的费用，万元。

8) 节约区域装机投资 (save investment in regional installation, SIRI) 是指综合智慧能源协调前后预期的制冷、制热、发电的装机投资费用之差与协调前预期的制冷、制热、发电的装机投资之比^[20]。

$$S_{IRI} = \frac{S_{before} - S_{after}}{S_{before}} \times 100\% \quad (21)$$

式中： S_{before} 为综合智慧能源协调前预期的制冷、制热、发电的装机投资，万元； S_{after} 为综合智慧能源协调后实际的制冷、制热、发电的装机投资，万元。

9) 减少用户停电损失 (reduce the loss of power outages, RLPO) 是指综合智慧能源协调前后用户的停电损失之差与协调前用户的停电损失之比^[62]。

$$R_{LPO} = \frac{E_{before} - E_{after}}{E_{before}} \times 100\% \quad (22)$$

式中： E_{before} 、 E_{after} 分别为综合智慧能源协调前、后用户的停电损失，元/kWh。

10) 能源经济性水平 (energy economy level, EEL)。能源系统的投入成本和收益决定了其经济性水平。与传统能源系统相比，综合智慧能源在降低成

本费用的同时,也能获得可观的经济效益,特别是在多元能源耦合的区域综合能源系统(以配电系统为核心,耦合分布式能源、天然气、地热能、交通等多元能源系统)^[19],计算公式为

$$\rho = \frac{D - \sum_i C_i}{\sum_i C_i} \times 100\% \quad (23)$$

式中: ρ 为IIE的能源经济性水平; D 为一段时间内总的经济收益,万元; C_i 为能源品种 i 的投入成本,万元。

11) 就业效益 (employment benefits, EB) 是指综合智慧能源投资总额与就业拉动系数之积^[20]。

$$E_B = \eta S_{\text{input}} \quad (24)$$

式中: η 为就业拉动系数,依据相关测算标准,一般取 $\eta=700$,即每1亿元投资增加700人就业; S_{input} 为综合智慧能源投资总额,亿元。

12) 产业效益 (benefits of industry, BI) 是指综合智慧能源协调前后使用的一次能源总量差值与区域的生产总值之比^[20]。

$$B_I = \frac{Q_{\text{all}}^*}{E^*} \quad (25)$$

式中: Q_{all}^* 为综合智慧能源协调前后使用的一次能源总量差值, kJ; E^* 为综合智慧能源实施前后区域的生产总值,万元。

2.4 综合智慧效益评价

综合智慧效益评价就是突出综合智慧能源的“综合化”和“智慧化”的特征手段,强调区别于传统分供化石能源系统的性能特征,相关指标如下。

1) 电能占终端能源消费占比 (electricity accounts for proportion of terminal energy consumption, EAPTEC), 定义为综合智慧能源终端耗电量的标准煤当量折算值与终端能源消耗量总和的标准煤当量折算值之比^[2], 既是衡量终端能源消费结构的重要指标, 有利于清洁电力的消纳, 也是衡量电气化程度的重要指标之一。

$$\zeta_e = \frac{Q_e}{E_{\text{sum}}} \times 100\% \quad (26)$$

式中: ζ_e 为综合智慧能源中电能占终端能源消费的比例, %; Q_e 为综合智慧能源耗电量的标准煤当量折算值, kgce; E_{sum} 为综合智慧能源年能源消耗量之和的标准煤当量折算值, kgce。

2) 设备利用率 (rate of equipment utilization, REU) 是指综合智慧能源系统内设备的工作状态和

生产效率, 是一段时期内设备的实际工作时间与计划工作时间的比值, 其大小直接影响综合智慧能源的投资效益。一般情况下, 系统主要供能设备的利用率越高, 系统的经济效益越好。

$$\eta_e = \frac{1}{N_e T_0} \sum_{n=1}^{N_e} T_n \quad (27)$$

式中: η_e 为综合智慧能源设备利用率, %; N_e 为综合智慧能源内的能源环节设备数量, 台; T_0 为综合智慧能源单位计划工作时长, h; T_n 为综合智慧能源第 n 台设备在单位时间内的实际工作时长, h。

3) 能源自用率 (energy utilization rate, EUR), 或称能源自消费占比, 反映综合智慧能源内能源的自发自用程度 (即自治程度)^[2], 可通过综合智慧能源总的产能功率与通过并网点向外部能源互联网络的送出功率之差与综合智慧能源总的产能功率的比值获得。

$$\gamma_e = \left[\int_0^{8760} P_g(t) dt - \int_0^{8760} P_i(t) dt \right] / \int_0^{8760} P_g(t) dt \quad (28)$$

式中: γ_e 为综合智慧能源的综合能源自用率, %; $P_i(t)$ 为综合智慧能源通过并网点向外部能源互联网络的送出功率, kW; $P_g(t)$ 为综合智慧能源总的产能功率, kW。

4) 独立运行持续供能时间 (independent operation continuous energy supply time, IOCEST) 反映综合智慧能源独立运行时支撑不间断负荷的能力, 定义为综合智慧能源系统内不间断 (或持续、稳定、抗干扰能力较强的) 供能能力与综合智慧能源用能负荷之比^[2]。

$$r_{\text{IIE}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{SL}i}}{P_{\text{max}}} \quad (29)$$

式中: r_{IIE} 为综合智慧能源的独立运行持续供能时间; $P_{\text{SL}i}$ 为综合智慧能源内第 i 个不间断供能负荷, kWh; P_{max} 为综合智慧能源用能负荷, kW。

5) 能值评价指标 (emergy evaluation index, EEI)。能值可以统一量化综合智慧能源全生命周期系统内外能源燃料的输入、能源设备资产投入、建设及运维劳力的投入等^[2]。其中, 能值可持续指数 (emergy sustainability index, ESI) 可用来反映综合智慧能源系统的生产效率和环境压力, 是综合智慧能源运行周期内能值产出率与环境负荷率的比值。

$$E_{\text{SI}} = E_{\text{VR}} / E_{\text{LR}} \quad (30)$$

式中: 环境负载率 (environmental loading ratio, ELR) 为系统不可再生能源投入能值与可再生能源投入能值

之比，其为衡量生产活动对环境的压力指标，该指标值越大，则环境压力越大；能值产出率（emergy yield ratio, EYR）为产出能值与经济输入能值之比，能值产出率值越高表明相同的系统经济能值投入所生产出来的产品能值越高，即生产效率越高。

6) 平均失能频率（mean incapacitation frequency, MIF）通过统计一段时间内综合智慧能源用户的平均失能次数，反映综合智慧能源的运行可靠程度，此处的“失能”表示停电、停气、停热/冷等^[7]，可用下式计算：

$$F = \frac{n_{\text{energy-lose}}}{n_{\text{user}}} = \frac{\sum_{i_{\text{node}}=1}^{n_{\text{node}}} \lambda_{i_{\text{node}}} n_{i_{\text{node}}}}{n_{\text{user}}} \quad (31)$$

式中： F 为系统平均失能频率； $n_{\text{energy-lose}}$ 为系统失能总次数； $\lambda_{i_{\text{node}}}$ 为负荷点 i_{node} 的故障率； $n_{i_{\text{node}}}$ 为负荷点 i_{node} 的用户数； n_{node} 为综合智慧能源系统内电/气/冷/热负荷点总数（非负整数）； n_{user} 为用户总数。

7) 需求侧互动性（demand side interaction, DSI）用于反映综合智慧能源的需求侧能源资源与系统的互动水平，可体现综合智慧能源“源-荷”之间的互动程度及其对能效提升、清洁能源占比提高等的贡献。用户侧互动性的具体指标主要包括主动削峰填谷负荷量、分布式电源即插即用能力（或称分布式能源接入能力）、智能电表普及度等^[6]。

8) 主动削峰负荷量（active peak clipping load, APCL）与需求侧管理和需求侧响应有关。需求侧管理和需求侧响应是指通过制定确定性或随时间合理变化的激励政策，激励用户在负荷高峰或系统可靠性变化时，及时响应削减负荷或调整用电行为的手段。需求侧响应的建设水平和用户的参与积极性可通过主动参与峰值负荷削减的用户比例衡量^[63-64]。

9) 互动潮流熵（entropy of interactive flow, EIF）用来描述单位柔性负荷互动后综合能源系统负载率分布的变化。定义为综合智慧能源互动前后电网潮流熵的改变量与柔性负荷的影响程度的平均值之比，能够定量评估互动参与程度对电网潮流分布的影响。当互动潮流熵为负值时，说明柔性负荷参与互动后电网潮流分布更趋均衡，取值越小互动带来的影响也越小，反之亦然。

$$E_1(t) = \frac{H(t)^* - H(t)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(t)} \quad (32)$$

式中： $H(t)$ 、 $H(t)^*$ 分别为互动前、后的电网潮流熵，J/K；

I_i 为柔性负荷的影响程度。

10) 可再生能源波动支撑水平（renewable energy fluctuates in support levels, REFSL）用来评估综合智慧能源通过互动提高可再生能源消纳的能力，定义为用于消纳可再生能源波动的柔性负荷互动量与可再生能源波动量的比值。而互动前后峰谷差变化率（peak-valley difference change rate, PVD CR）为有互动与无互动场景下综合智慧能源系统峰谷差改变量与无互动时系统峰谷差的比值，用来评估柔性互动对系统削峰填谷的贡献。

$$C_{\text{RE}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i(t)}{\Delta P_{\text{RE}}(t)} \quad (33)$$

$$H_{\text{p-v}} = \frac{C_{\text{p-v}} - C_{\text{p-v}}^*}{C_{\text{p-v}}} \quad (34)$$

式中： $C_{\text{RE}}(t)$ 为可再生能源波动支撑水平； ΔP_{RE} 为可再生能源的功率波动量； $\Delta P_i(t)$ 为柔性负荷的实际互动量； $H_{\text{p-v}}$ 为互动前后峰谷差变化率； $C_{\text{p-v}}$ 为无互动情况下系统峰谷差； $C_{\text{p-v}}^*$ 为有互动情况下系统峰谷差。

11) 虚拟调度容量（virtual scheduling capacity, VSC）是指在综合智慧能源的柔性负荷调度事件中能够调度的容量，其有最大虚拟调度容量和最小虚拟调度容量之分。在评价时，最大虚拟调度容量并非越大越好，考虑到柔性负荷调度实际情况，一般理想调度曲线为定值或分段函数，若实际调度容量超过理想调度容量过多，则会导致实际调度与理想调度差距过大。因此，实际调度过程中应保证调度容量的稳定性，最大虚拟调度容量与最小虚拟调度容量之间的偏差率应越小越好。

3 综合智慧能源绩效评价指标的取值范围及正逆性

3.1 综合智慧能源绩效评价指标的一般分类

综合智慧能源绩效评价指标的分类及适用场景如图3所示。与图中右边所示的分供系统相比，可将综合智慧能源绩效评价指标在前述4个维度的基础上，细分为共性指标、对比型指标、能源自给型指标、互联型指标、源网荷互动型指标以及效率型指标。

其中，共性指标是指均适用于综合智慧能源及其对应的分供系统的绩效评价指标，如综合能耗、能源质量、单位供能成本、噪声环境影响等指标；对比型指标是指与分供系统相比，衡量综合智慧能源绩效改

进或者优化后的评价指标,如能源节约率、减排率、节约区域装机投资等指标;能源自给型指标则是指综合智慧能源能源供应的自洽程度,表征综合智慧能源孤网运行的能源供应能力,如能源自用率、独立运行持续供能负荷比等指标;源网荷互动型指标是指综合智慧能源系统内“源、网、荷”以及“储能”等角色相互之间的削峰填谷、需求响应、友好互动的能力,如需求侧互动性、主动削峰负荷量、互动潮流熵等指标;互联型指标是指不同相邻综合智慧能源系统之间通过信息物理网络实现的能源互联互通互济的程度,此指标暂未在本文中列举。

需要指出的是,效率型指标一般是指综合智慧能源系统输入和输出之间能量转换的能力(如基于热力学第一定律的综合能源利用率以及基于热力学第二定律的系统熵效率),以及用来表征综合智慧能源中可再生能源或者清洁能源开发和利用的能力,即用于源侧的可再生能源替代率(或可再生能源装机的占比)、用于荷侧的可再生能源利用率,以及从两者角度共同考虑的可再生能源渗透率。

3.2 综合智慧能源绩效评价指标的一般属性

为更好地表征上述综合智慧能源评价指标的定量/定性属性、取值范围及其正逆性,表2对上述指标进行汇总,同时也给出了对应的数据来源参考文献。本文所指综合智慧能源绩效评价指标共41个,包括能源利用、环境友好、经济社会及综合智慧4个维度。针

对不同维度指标,衡量其是否能够通过相关参数进行定量计算,将指标分为定性指标与定量指标,或有些指标可进行定量与定性之间的转换,并进一步获取其取值范围,以及考察指标与评价系统的正逆性,即指标值的增大带来综合智慧能源系统效益的改进或损失。

4 综合智慧能源绩效评价体系的架构及其绩效评价的步骤

综上,综合智慧能源的绩效评价面临着多维、多层指标的复杂情况,对应的绩效评价的步骤及方法需要进一步明确。总结相关文献资料^[60],归纳综合智慧能源绩效评价的基本步骤一般包括:①确定综合智慧能源的系统边界;②搜集现状资料及数据;③确定绩效评价的指标体系;④开展综合智慧能源的绩效分析。其中,确定绩效评价的指标体系应包括的具体指标应从符合性、适用性、全面性、先进性等方面选取。同时,指标体系的构成应考虑不同综合智慧能源在能效、环境、经济等方面综合性能的平衡和优化,各项指标应可测量、计算或通过专家对比的方法进行量化。

实际上,综合智慧能源的绩效评价可分为针对项目规划设计的“前绩效评价”和针对项目实施运营的“后绩效评价”。综合智慧能源的前绩效评价可理解为不同综合智慧能源形态的规划和运行的优化,多为理

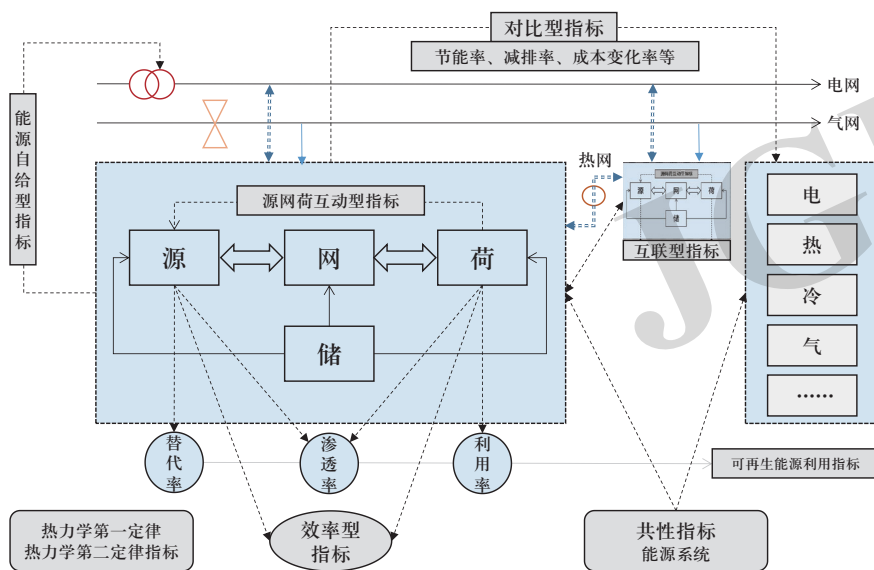


图3 综合智慧能源绩效评价指标的分类及示意

Fig. 3 Classification and schematic of IIE performance evaluation indicators

表 2 综合智慧能源评价指标的取值范围及正逆性
Table 2 Value range and positive and negative properties of IIE performance evaluation indicators

维度	二级指标	定量/定性	取值范围	正向/逆向	参考文献
能源利用 效益评价	综合能耗 CEC ★★	定量	0~∞	逆向	[15]/[46]/[48]
	能耗强度ECI ★★	定量	0~∞	逆向	[2]/[66]/[67]
	综合能源利用率PER ★★★	定量	0~1	正向	[47]/[48]/[68]
	系统烟效率SEE ★	定量	0~1	正向	[49]/[50]/[51]/[65]
	能源节约率ESR ★★★	定量	0~1	正向	[17]/[32]/[36]/[65]
	用户侧满意度USS ★★	定量	5~100	正向	[38]/[48]/[52]
	万元产值能耗下降率DIRECTTYOV ★★	定量	0~1	正向	[69]/[70]
	用户端能源质量CEQ ★	定性	—	正向	[48]/[53]/[54]
环境友好 效益评价	设备能效等级EEGE ★★	定性	—	正向	GB 18613/GB 30253/GB 19577/GB 28380/GB 19761/GB 24500/GB 37480/GB 29540
	可再生能源替代率RERR ★★	定量	0~1	正向	[70]/[71]
	可再生能源利用率REUR ★★	定量	0~1	正向	[16]/[17]/[18]/[55]/[56]
	可再生能源渗透率REPR ★★	定量	0~1	正向	[20]/[72]
	减排率RR ★★★	定量	0~1	正向	[16]/[22]/[33]/[65]
	噪声环境影响ENI ★	定性/定量	—	逆向	HJ 2.4/GB/T19190/GB 12348/[65]
	电磁环境影响EEI ★	定性/定量	—	逆向	GB 8702/GB 9175/GB 50613
	大气环境质量影响AEQI★	定性/定量	—	逆向	GB 30484/GB3095/GB 13223
经济社会 效益评价	水环境评价WEA ★	定性/定量	—	逆向	GB/T 14848/GB 3838
	生态环境影响EEI ★	定性/定量	—	正向	HJ 19
	单位供能成本UEC ★★	定量	0~∞	逆向	[73]
	用能成本变化率RCEC ★★★	定量	0~1	逆向	[48]
	系统烟经济成本EEC ★	定量	0~∞	正向	[35]/[59]
	投资回收期PBT ★★★	定量	0~∞	逆向	[5]/[23]/[60]/[65]/[68]
	内部收益率IRR ★★	定量	0~∞	正向	[33]/[61]/ [74]
	投资收益率ROI ★★	定量	0~∞	正向	[61]/[72]
	配电网缓建效益 PBDN ★★★	定量	0~∞	正向	[48]/[75]
	节约区域装机投资SIRI ★	定量	0~1	正向	[20]
综合智慧 效益评价	减少用户停电损失RLPO ★	定量	0~1	正向	[62]
	能源经济性水平EEL ★★	定量	0~1	正向	[19]/[48]/[65]
	就业效益EB ★	定量	0~∞	正向	[20]
	产业效益BI ★★	定量	0~∞	正向	[20]
	电能占终端能源消费占比EAPTEC ★★	定量	0~1	—	[2]/[15]
	设备利用率REU ★★	定量	0~1	正向	[15]/[19]
	能源自利用率EUR★★	定量	0~1	正向	[2]/[48]
	独立运行持续供能时间IOCEST ★★★	定量	0~∞	正向	[10]
	能值评价指标EEI ★	定量	0~∞	正向	[2]/[76]
	平均失能频率MIF ★	定量	0~∞	逆向	[7]
综合智慧 效益评价	需求侧互动性DI ★★★	定性/定量	—	正向	[6]/[48]/[61]
	主动削峰负荷量APCL ★★	定性/定量	—	正向	[19]/[63]/[64]/[68]
	互动潮流熵EIF ★	定量	-∞~+∞	逆向	[77]
	可再生能源波动支撑水平REFSL ★	定量	—	正向	[77]
	虚拟调度容量VSC ★	定量	0~∞	—	[77]

(注：★表示指标的权重或者使用频次，★越多，代表该指标的权重越大或使用频次越高，是一个推荐的经验值，使用者应根据项目特征确定。)

论研究。其中,如图4所示,综合智慧能源在指标体系确定后,一般通过Pareto非劣解的多目标优化、带权重的多指标综合评价、热/烟经济方法以及生态能值等统一化单目标综合优化的方法,在不同约束条件下,得出综合智慧能源的系统拓扑、设备容量、运行策略的综合最优解,以指导项目的设计和落地。因前绩效评价通常是理论的事前评估,以获得综合智慧能源的预期技术经济效益及盈亏平衡点,并对相关能源输入输出的价格进行敏感性分析,其系统边界相对清晰,资料搜集难度不大。

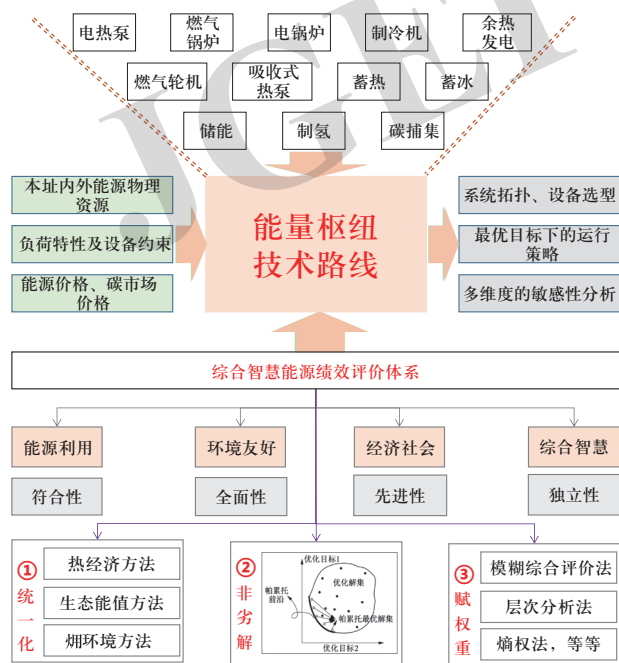


图4 综合智慧能源绩效综合评价体系的构建图示

Fig. 4 Illustration of the construction of IIE performance evaluation system

后绩效评价是针对项目投产后的综合效益进行绩效分析,以得出项目的实际运行效益以及优化改造潜力。因此,后绩效评价是基于实际运行的事后评价,其系统边界的确定和资料收集的难度较大。确定系统边界的基本要求是:边界内所包括的能量系统及穿越边界进出能量系统的能量流或物质流应在运行控制技术和管理机制2个方面具有可控性^[60]。搜集的资料包括但不限于:能源系统的基本设计运行情况、用能情况、外部环境条件、能量输出或能源产品输出情况、污染物产出和排放情况、运行的成本和经济效益等。资料和数据的来源包括但不限于:监测和计量、生产记录和清单、财务和会计、能源审计和环境审核报告,以及必要统计年鉴数据等。鉴于获取数据工作量

的大小,所收集能源数据可以是一段时间的平均值,也可以是反映系统正常运行状况时间点的代表值,也应尽可能的采用黑箱模型的方式,避免过度关注系统内过多细节设备的运行数据。

5 综合智慧能源绩效评价指标展望

中国的综合智慧能源尚处于发展初级阶段,其绩效评价的体系架构和指标的设计也是一个不断发展的过程。更加科学、系统的绩效评价有助于综合智慧能源实现优化设计和运营。以下几点展望,则或是新发展格局下综合智慧能源绩效评价体系及指标应考虑方面。

1) 本文综合智慧能源的绩效评价针对的是区域及园区级的能源系统,后期应分场景,突出多能互补综合能源系统、微能源网、分布式能源、能源互联网分别侧重的“综合化”、“智慧化”指标,刻画不同场景下综合智慧能源的个性指标^[78],如不同能源系统的韧性、弹性、互动性等指标^[79];同时,如将综合智慧能源的空间尺度进一步扩大,宏观气候影响指标以及能源安全等指标也应纳入指标体系。

2) 工业园区、数据中心、交通场站等能量密集型综合智慧能源的优化是新基建下综合智慧能源的重要应用场景。相比于热力学第一定律,热力学第二定律的“烟”分析法能深入到综合智慧能源不同异质能流“品位”的研判。因此,综合考虑热力学、经济学以及环境效应多目标的综合智慧能源环境烟经济学优化目标函数^[80-81],并考虑多输入和多输出综合智慧能源的能量、经济和环境成本分摊问题,未来能够使各种能源系统在统一和客观的基准上进行比较和评价。

3) 综合能源利用率以及系统烟效率中不同能源转换的“能质系数”,可用来衡量异质能源(即不同种类或温度、压力、焓值),但是对于电力这种二次能源,传统的能质系数不能区分煤电或可再生能源发电(如排放系数、清洁系数等),一般方法是通过经济性区分不同发电方式的“能质”。后期,考虑不同发电方式与电网调峰调频耦合关系,从能势角度、能值角度或烟经济学角度提出评价指标,研判不同发电方式“电力”的综合智慧能源的绩效将成为研究热点^[82-84]。

4) 目前,可再生能源渗透率、能源转化设备效率和容量配置结构、冷/热/电负荷需求结构以及输入输出的能源价格是影响综合智慧能源绩效的核心要

素。未来,随着落实“碳达峰、碳中和”目标,综合智慧能源的环境影响评价将尤为突出,其高度耦合能源获取、传输、转换、存储及消费的全生命周期过程。后期,不同于能值等方法^[2],可引入环境损害因子、环境污染率及环境损害函数等评价综合智慧能源系统的资源利用率以及环境影响性。

5) 对于上述物理机理表述清晰,且能源、经济、环境能够高度耦合的统一性绩效评价指标,常规的带权重的综合智慧能源绩效综合评价体系的操作过程相对容易,其重点环节是不同评价主体对不同维度指标权重的权衡。另外,基于非劣解的综合智慧能源的多目标优化,虽然实现了不同目标之间的权衡并给出了配置方案,但结果的解释性不强,难以从机理上得出可以推广的规律,且综合智慧能源的非线性和多变量特性迫使非劣解求解时必须引入智能算法。

6) 当前是中国能源互联网多元化、规模化建设的重要时期,开展能源互联网相关领域——综合智慧能源的标准化工作对于促进能源互联网及综合智慧能源技术进步和产业健康发展具有重要意义。其中,能源互联网及综合智慧能源系统化思维在技术和机制上的跨界创新,需要科学、系统、可操作的绩效评价,以为综合智慧能源的规划和实施的效益评价提供必要的理论指导。以能源互联网为例,截至2019年12月,能源互联网标准共计申报37项,含国家标准13项、行业标准6项、团体标准18项^[85],其中也不乏有关性能评价方面的标准内容。

6 结论

本文从能源利用、环境友好、经济社会以及综合智慧4个维度,以园区级或区域级综合智慧能源为对象,综述了当前中国综合智慧能源绩效评价的41个指标,并评述了综合智慧能源绩效评价的体系架构、评价方法以及评价步骤,得出以下结论。

1) 当前综合智慧能源的空间尺度不一,学界和产业界涉及其系统性及过程性的绩效评价指标繁多,涵盖了冷、热、电、气等多行业。因此,综合智慧能源的绩效评价体系应站在传统能源系统的共性指标上,明确特定场景下具体指标的定义,采用定性和定量相结合的方式。

2) 综合智慧能源目的之一在于提高能源系统内外可再生能源或清洁能源的利用率。因此,综合智慧能源的绩效评价应注意可再生能源(清洁能源)替代

率、利用率、渗透率等相似指标的区别,以及需要明确上述指标在综合智慧能源“源、网、荷”之间的应用场景,做到规范化应用。

3) 在热力学第一、第二定律能效的基础上,相较于传统能源系统,综合智慧能源的特征在于“综合化”和“智慧化”的手段。因此,综合梯级利用、多能互补程度、互联互通程度、能值可持续指数、能源环境模型、需求侧互动性、能源系统韧性及弹性等体现“综合化”及“智慧化”的绩效评价指标应在研究中有侧重。

4) 主观赋权法、Pareto非劣解、归一化方法等综合评价及优化的方法在综合智慧能源“事前”和“事后”绩效评价体系中有各有所长,耦合上述评价方法的综合智慧绩效评价体系的标准化应用,应充分考虑上述方法的应用场景、简便性、可操作性以及数据可得性。

参考文献

- [1] HUANG Q L. Insights for global energy interconnection from China renewable energy development[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 1-11.
- [2] 王永真, 朱轶林, 康利改, 等. 计及能值的中国电力能源系统可持续性综合评价[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(1): 19-27.
WANG Yongzhen, ZHU Yilin, KANG Ligai, et al. Comprehensive sustainability evaluation of China's power system based on emergy analysis[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 19-27(in Chinese).
- [3] LIU Z X, ZHANG Y, WANG Y, et al. Development of the interconnected power grid in Europe and suggestions for the energy Internet in China[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(2): 111-119.
- [4] 王永真, 林伟, 李成宇, 等. 工业型城市能源转型的综合评价: 以苏州市为例[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(2): 188-196.
WANG Yongzhen, LIN Wei, LI Chengyu, et al. Comprehensive evaluation of energy transition in industrial cities: a case study of Suzhou[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(2): 188-196(in Chinese).
- [5] REZAIE B, REDDY B V, ROSEN M A. An enviro-economic function for assessing energy resources for district energy systems[J]. *Energy*, 2014, 70: 159-164.
- [6] 王永真, 张宁, 关永刚, 等. 当前能源互联网与智能电网研究选题的继承与拓展[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(4): 1-7.
WANG Yongzhen, ZHANG Ning, GUAN Yonggang, et al. Inheritance and expansion analysis of research topics between

- energy Internet and smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 1-7(in Chinese).
- [7] 刘祥民. 综合智慧能源的多元贡献[J]. 能源, 2020(9): 23-25.
- [8] 汤芳, 代红才, 刘强, 等. 综合能源服务驱动力模型及物联网技术驱动影响模式分析[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 97-100.
- TANG Fang, DAI Hongcai, LIU Qiang, et al. Analysis of integrated energy service driving force model and Internet of Things technology driving influence pattern[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 97-100(in Chinese).
- [9] 陈志昊, 刘培, 李政, 等. 新区综合能源系统多目标最优设计[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(1): 33-39.
- CHEN Zhihao, LIU Pei, LI Zheng, et al. Multi-objective optimal design for the integrated energy system of a new urban area[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 33-39(in Chinese).
- [10] 宋俊朝, 李赵一特, 陈志威. 多能互补分布式能源系统综合评价指标研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(8): 39-42.
- SONG Junchao, LI Zhaoyite, CHEN Zhiwei. Study on comprehensive evaluation index of multi-energy complementary distributed energy system[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(8): 39-42(in Chinese).
- [11] 马瑞, 王京生, 吕振华, 等. 含智慧社区能量枢纽配电网三相不平衡动态潮流模型预测控制方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 547-555.
- MA Rui, WANG Jingsheng, LYU Zhenhua, et al. Model predictive control method for three-phase unbalanced dynamic power flow of distribution network including smart community multi-energy flow hub[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 547-555(in Chinese).
- [12] KUANG Y H, ZHANG Y J, ZHOU B, et al. A review of renewable energy utilization in Islands[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 504-513.
- [13] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3161.
- JIN Hongguang, SUI Jun, XU Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3161(in Chinese).
- [14] 范成围, 陈刚, 熊哲浩, 等. 考虑室内体感舒适度的城市楼宇型能量枢纽优化配置与定容应用分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 291-300.
- FAN Chengwei, CHEN Gang, XIONG Zhehao, et al. Optimal configuration and capacity settings for urban building energy hub considering indoor somatosensory comfort[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 291-300(in Chinese).
- [15] 何大春, 谈健, 苏宜强, 等. 主客观信息融合的港口综合能源系统评价指标体系[J]. 上海海事大学学报, 2020, 41(3): 110-116.
- HE Dachun, TAN Jian, SU Yiqiang, et al. Evaluation index system for port integrated energy system based on subjective-objective information fusion[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2020, 41(3): 110-116(in Chinese).
- [16] 钟依庐, 王路, 郑赟, 等. 适于工业园区综合能源类项目的综合评价指标体系[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(3): 51-56.
- ZHONG Yilu, WANG Lu, ZHENG Yun, et al. Comprehensive evaluation index system for integrated energy system in industrial park[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(3): 51-56(in Chinese).
- [17] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36.
- HAN Zhonghe, QI Chao, XIANG Peng, et al. Benefit analysis and comprehensive evaluation for distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 31-36(in Chinese).
- [18] 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.
- DONG Fugui, ZHANG Ye, SHANG Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214-3223(in Chinese).
- [19] 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 Baisan, 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(in Chinese).
- [20] 洪潇. 区域能源互联网多能源协调评价模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [21] 陈灵敏, 吴杰康, 唐惠玲, 等. 考虑可再生能源消纳的CCHP微能源网优化配置模型[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 121-129.
- CHEN Lingmin, WU Jiekang, TANG Huiling, et al. Optimal allocation model of the micro-energy grid with CCHP considering renewable energy consumption[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 121-129(in Chinese).
- [22] 金璐, 何伟, 闫华光, 等. 考虑多评价指标的可再生微能源网双层优化配置[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2021-03-03].
- [23] JING R, WANG M, BRANDON N, et al. Multi-criteria evaluation of solid oxide fuel cell based combined cooling heating and power (SOFC-CCHP) applications for public buildings in China[J]. Energy, 2017, 141: 273-289.
- [24] STRANTZALI E, ARAVOSSIS K. Decision making in renewable energy investments: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 885-898.
- [25] MARDANI A, ZAVADSKAS E K, KHALIFAH Z, et al. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: two decades from 1995 to 2015[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 216-256.
- [26] SHIVARAMA KRISHNA K, SATHISH KUMAR K. A

- review on hybrid renewable energy systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 907-916.
- [27] KOURKOUMPAS 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: 380-398.
- [28] CUESTA M A, CASTILLO-CALZADILLA T, BORGES C E. A critical analysis on hybrid renewable energy modeling tools: an emerging opportunity to include social indicators to optimise systems in small communities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 122: 109691.
- [29] ZHOU J L, WU Y N, WU C H, et al. A hybrid fuzzy multi-criteria decision-making approach for performance analysis and evaluation of park-level integrated energy system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 201: 112134.
- [30] YANG K, DING Y, ZHU N, et al. Multi-criteria integrated evaluation of distributed energy system for community energy planning based on improved grey incidence approach: a case study in Tianjin[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 352-363.
- [31] LIU J C, YIN Y. An integrated method for sustainable energy storing node optimization selection in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 112049.
- [32] XU D H, QU M. Energy, environmental, and economic evaluation of a CCHP system for a data center based on operational data[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 67: 176-186.
- [33] JU L W, TAN Z F, LI H H, et al. Multi-objective operation optimization and evaluation model for CCHP and renewable energy based hybrid energy system driven by distributed energy resources in China[J]. *Energy*, 2016, 111: 322-340.
- [34] LIU G. Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 611-621.
- [35] WANG J J, LU Z R, LI M, et al. Energy, exergy, exergoeconomic and environmental (4E) analysis of a distributed generation solar-assisted CCHP (combined cooling, heating and power) gas turbine system[J]. *Energy*, 2019, 175: 1246-1258.
- [36] REN F K, WEI Z Q, ZHAI X Q. Multi-objective optimization and evaluation of hybrid CCHP systems for different building types[J]. *Energy*, 2021, 215: 119096.
- [37] 李顺昕, 高峰, 张靖, 等. 城市能源战略发展指标评价体系研究[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(3): 117-124.
- [38] 吴强, 程林, 黄河, 等. 基于层次分析法的能源互联网综合能效评估方法[J]. *电气应用*, 2017, 36(17): 62-68.
- [39] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(21): 146-150.
- YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(21): 146-150(in Chinese).
- [40] MANCARELLA P. MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models[J]. *Energy*, 2014, 65: 1-17.
- [41] 李浩, 钟声远, 王永真, 等. 基于能量与信息耦合的分布式能源系统配置优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(17): 5467-5476.
- LI Hao, ZHONG Shengyuan, WANG Yongzhen, et al. Optimization method on the distributed energy system based on energy and information coupled[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5467-5476(in Chinese).
- [42] 蒋超凡, 艾欣. 面向工业园区的综合能源系统协同规划方法研究综述[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(3): 255-265.
- JIANG Chaofan, AI Xin. Review on integrated energy system collaborative planning methods for industrial parks[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(3): 255-265(in Chinese).
- [43] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(15): 1-11.
- DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy Internet: basic concept and research framework[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [44] 王永真. 能源互联网下综合能源服务的新特征、新挑战[J]. *能源*, 2020(6): 64-66.
- [45] 张运洲, 代红才, 吴潇雨, 等. 中国综合能源服务发展趋势与关键问题[J]. *中国电力*, 2021, 54(2): 1-10.
- ZHANG Yunzhou, DAI Hongcai, WU Xiaoyu, et al. Development trends and key issues of China's integrated energy services[J]. *Electric Power*, 2021, 54(2): 1-10(in Chinese).
- [46] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 综合能耗计算通则 GB/T 2589—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [47] 胡泉, 尚策, 陈东文, 等. 考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 22-31.
- HU Xiao, SHANG Ce, CHEN Dongwen, et al. Multi-objective planning method for regional integrated energy systems considering energy quality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 22-31(in Chinese).
- [48] 原凯, 李敬如, 宋毅, 等. 区域能源互联网综合评价技术综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(14): 41-52.
- YUAN Kai, LI Jingru, SONG Yi, et al. Review and prospect of comprehensive evaluation technology of regional energy Internet[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 41-52(in Chinese).
- [49] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 能量系统焓分析技术导则 GB/T 14909—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [50] 李克成, 刘铠诚, 唐艳梅, 等. 综合能源系统中能量和焓在管线传输的特征规律[J]. *南方电网技术*, 2019, 13(1): 53-59.
- LI Kecheng, LIU Kaicheng, TANG Yanmei, et al.

- Characteristics of transfers of energy and exergy through pipeline in integrated energy system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(1): 53-59(in Chinese).
- [51] 李迎建. 总能系统能量利用效率分析[J]. 深圳大学学报, 2004, 21(4): 363-366.
- LI Yingjian. Analysis of energy utilization efficiency of integrated energy systems[J]. Shenzhen University Journal, 2004, 21(4): 363-366(in Chinese).
- [52] 沈文增, 庄兆意, 李彬, 等. 卡式风盘送风角度对室内热舒适度的影响分析[J]. 应用科技, 2020, 47(6): 90-95.
- SHEN Wenzeng, ZHUANG Zhaoyi, LI Bin, et al. Analysis of the influence of the air supply angle of the Cassette fan coil on the indoor thermal comfort[J]. Applied Science and Technology, 2020, 47(6): 90-95(in Chinese).
- [53] 付学谦, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 1-7.
- FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy Internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 1-7(in Chinese).
- [54] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.
- LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176(in Chinese).
- [55] 陈嘉鹏, 汤乃云, 汤华. 考虑可再生能源利用率的风-光-气-储微能源网经济调度研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(1): 70-75.
- CHEN Jiapeng, TANG Naiyun, TANG Hua. Research on the economic dispatch of regional micro energy grid including wind power, photovoltaic power, fuel gas units and energy storage battery[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(1): 70-75(in Chinese).
- [56] 徐宝萍, 徐稳龙. 新区规划可再生能源利用率算法研究与探讨[J]. 暖通空调, 2013, 43(10): 52-55.
- XU Baoping, XU Wenlong. Study and discussion on assessment method of renewable energy utilization rate for new district planning[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2013, 43(10): 52-55(in Chinese).
- [57] 张俊礼, 沈炯, 李益国, 等. 可再生能源渗透率的热力学定义及其分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 522-529.
- ZHANG Junli, SHEN Jiong, LI Yiguo, et al. Thermodynamic definition of penetration rate of renewable energy and its analysis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(2): 522-529(in Chinese).
- [58] 王守相, 张齐, 王瀚, 等. 高可再生能源渗透率下的区域多微网系统优化规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 33-38.
- WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 33-38(in Chinese).
- [59] 郝艳红, 冯杰, 李文英, 等. 双气头多联产系统的焓经济优化与分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(20): 3266-3275.
- HAO Yanhong, FENG Jie, LI Wenying, et al. Exergoeconomic optimization and analysis of a dual-gas sourced polygeneration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(20): 3266-3275(in Chinese).
- [60] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 能量系统绩效评价通则 GB/T 30716—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [61] 袁秀霞, 闫浩春, 付淑英. GB/T 23331-2012《能源管理体系要求》标准差异性的分析研究[J]. 中国建材科技, 2020, 29(3): 6-11.
- [62] 郭贤, 郭贺, 程浩忠, 等. 考虑用户停电损失的微电网架规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 301-308.
- GUO Xian, GUO He, CHENG Haozhong, et al. Optimal architecture planning of microgrid considering user outage costs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 301-308(in Chinese).
- [63] 曾博, 杨雍琦, 段金辉, 等. 新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 10-18.
- ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues and research prospects for demand-side response in alternate electrical power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 10-18(in Chinese).
- [64] 吕智林, 廖庞思, 杨啸. 计及需求侧响应的光伏微网群与主动配电网双层优化[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-14[2021-02-08].
- [65] 严嘉伦. 楼宇式综合能源系统评价体系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [66] 魏楚. 中国能源效率问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [67] 郑玉歆. 节能减排须减少盲目性: 关于能源消耗强度指标的若干思考[J]. 学习与实践, 2011(9): 24-31.
- [68] 刘骏峰. 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, 2019.
- [69] 华如清. 关于对外投资企业产值能耗的分析方法[J]. 现代经济信息, 2011(3): 79-80.
- [70] 宋辉, 魏晓平. 中国可再生能源替代率的理性预测[J]. 经济经纬, 2011, 28(2): 10-13.
- SONG Hui, WEI Xiaoping. A rational forecast of the replacement rate of renewable energy in China[J]. Economic Survey, 2011, 28(2): 10-13(in Chinese).
- [71] 后勇, 徐福缘, 程纬. 基于可再生能源替代的经济持续发展模型[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(9): 67-72.
- HOU Yong, XU Fuyuan, CHENG Wei. Sustainable growth model based on the substitution of renewable energy[J].

- Systems Engineering-Theory & Practice, 2008, 28(9): 67-72(in Chinese).
- [72] 蔡洁聪. 燃气冷热电三联供系统运行优化及经济性分析[C]//浙江省电力学会2018年度优秀论文集, 2018: 6.
- [73] 徐飞宇. 分布式能源站终端能源供应策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- XU Feiyu. Research on terminal energy supply strategy of distributed energy station[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [74] MELLICHAMP D A. Internal rate of return: good and bad features, and a new way of interpreting the historic measure[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, 106: 396-406.
- [75] 陈焜野, 文亚凤, 刘自发, 等. 含有多种分布式电源的配电网综合评估方法[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 128-135.
- CHEN Chiye, WEN Yafeng, LIU Zifa, et al. Comprehensive evaluation method of distribution network including various types of distributed generation[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 128-135(in Chinese).
- [76] 陆宏芳, 蓝盛芳, 彭少麟. 系统可持续发展的能值评价指标的新拓展[C]//中国科协2003年学术年会论文集. 沈阳, 2003: 132-133.
- [77] 李亚平, 周竞, 鞠平, 等. 柔性负荷互动影响量化评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 26-32.
- LI Yaping, ZHOU Jing, JU Ping, et al. Quantitative assessment method for interactive impact of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 26-32(in Chinese).
- [78] 陈清林. 过程系统环境经济建模与优化策略研究[R]. 广东省, 华南理工大学, 2009-01-01.
- [79] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 486-497.
- YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 486-497(in Chinese).
- [80] 樊新刚, 仲俊涛, 杨美玲, 等. 区域可持续发展能力的能值与焓耦合分析模型构建[J]. 地理学报, 2019, 74(10): 2062-2077.
- FAN Xingang, ZHONG Juntao, YANG Meiling, et al. Construction of an emergy and exergy coupling model for the analysis of regional sustainable development capability[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(10): 2062-2077(in Chinese).
- [81] 周欢, 黄龙琼, 伍人剑, 等. 基于绿色经济的综合能源系统价值评价方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 36-42.
- ZHOU Huan, HUANG Longqiong, WU Renjian, et al. Value assessment method of integrated energy system based on green exergy economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 36-42(in Chinese).
- [82] 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.
- LIU Xiaou, GE Shaoyun. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 8-18(in Chinese).
- [83] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 基于能值分析的多能互补综合能源系统价值评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2925-2934.
- TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. Multi-energy system valuation method based on emergy analysis[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2925-2934(in Chinese).
- [84] 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.
- 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): 2835-2843(in Chinese).
- [85] 清华大学能源互联网创新研究院. 国家能源互联网发展年度报告[R]. 北京: 清华大学能源互联网创新研究院, 2020.

收稿日期: 2021-02-17; 修回日期: 2021-03-26。

作者简介:



王永真

王永真(1988), 男, 博士后, 主要从事能源互联网战略转型、中低品位多能互补综合能源系统建模及优化的研究工作, E-mail: wyz80hou@mail.tsinghua.edu.cn。

张靖(1971), 女, 副研究员, 主要从事企业能源转型、综合能源业务设计以及机制模式研究, E-mail: zhangjing1@mail.tsinghua.edu.cn。

潘崇超(1980), 男, 副教授, 主要从事智慧能源系统建模和标准化工作, E-mail: panchch@ustb.edu.cn。

袁小雪(1997), 女, 研究生, 主要从事综合能源系统多目标优化的研究, E-mail: 1759860300@qq.com。

吴小敬(1998), 女, 研究生, 主要从事综合能源系统多目标优化的研究, E-mail: 2421224931@qq.com。

朱轶林(1989), 男, 博士后, 主要从事储能系统关键技术及商业模式、城市能源转型的研究, E-mail: zhuyilin@iet.cn。

景锐(1989), 男, 博士后, 主要从事综合能源系统的规划及优化研究, E-mail: fafujingrui@126.com。

王子缘(1990), 男, 博士, 主要从事新能源与节能、能源经济、氢能产业战略等研究工作, E-mail: 44941166@qq.com。

康利改(1983), 女, 博士, 副教授, 主要从事综合能源系统多目标优化、区域能源系统及建筑环境的研究。通信作者, E-mail: ligaikang@hebust.edu.cn。

(责任编辑 张宇)