

多能源互补分布式能源系统集成研究综述及展望

李承周¹, 王宁玲^{1*}, 窦潇潇¹, 杨志平¹, 王利刚², 杨勇平¹

1. 华北电力大学国家火力发电工程技术研究中心, 北京市 昌平区 102206;
2. 华北电力大学能源电力创新研究院, 北京市 昌平区 102206)

Review and Prospect on the System Integration of Distributed Energy System With the Complementmentation of Multiple Energy Sources

LI Chengzhou¹, WANG Ningling^{1*}, DOU Xiaoxiao¹, YANG Zhiping¹, WANG Ligang², YANG Yongping¹

- (1. National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. Institute of Energy Power Innovation, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The distributed energy system is an important carrier and means of promoting the development of the energy revolution, and it will play a significant role in the future energy system. Multi-energy complementarity is the main direction and key characteristic of the development of the distributed energy system. Thus, it is of great significance to carry out related research on multi-energy complementarity distributed energy systems for China's energy transformation. In terms of five aspects, i.e. quantitative characterization of resources and demand forecasting, system integration and multi-energy flow modeling, system planning and optimization design, operation optimization and active energy management, as well as the comprehensive evaluation, the paper analyzes the research status of the multi-energy complementary distributed energy system, discusses the potential development trend and possible challenges. Some references and suggestions are provided for scientific research and industry development.

KEY WORDS: multi-energy complementary; distributed energy system; multi-energy carrier modeling; energy planning; operation optimization; comprehensive evaluation

摘要: 分布式能源系统是能源革命发展的重要载体和推进手段, 将在未来能源体系中占据重要地位; 同时多能源互补是其发展的主要方向和关键特征, 开展多能源互补分布式能源系统相关研究对我国的能源转型具有重要的意义。该文从资源量化表征与需求预测、多能流建模、系统集成与规划、运行优化与主动能量调控、以及能源系统综合评价等5个方面

对多能源互补分布式能源系统集成的发展现状进行分析, 探讨未来可能的发展趋势和面临的挑战, 为多能互补分布式能源系统未来基础及应用研究和行业发展提供一定的参考和建议。

关键词: 多能互补; 分布式能源系统; 多能流建模; 能源规划; 运行优化; 综合评价

0 引言

能源短缺与环境污染是制约经济和社会可持续发展的主要瓶颈, 开发先进供能系统已成为我国实施节能减排战略, 构建清洁低碳、安全高效能源体系的重要补充手段, 将传统“源-网-荷”间的刚性链式转变为便于调控的“源-荷”柔性连接^[1], 是实现能源转型和能源利用技术变革的重要方向。分布式能源系统在地理位置上位于或临近负荷中心, 避免了能源大规模输送导致的能源损耗和基础设施投资, 实现了能源的就地生产与消纳。在燃料利用上具有多元灵活的特点, 不仅可以采用天然气、氢气作为燃料, 还可以利用太阳能、生物质等可再生能源, 在“碳中和”目标下, 以可在生能源为主体的多能源互补分布式能源系统是实现我国能源转型可持续性发展的必由之路。

多能互补分布式能源系统 (multi-energy complementary distributed energy system, MCDES) 是对传统分布式能源系统的衍生和拓展。我国相关研究基础可追溯至上世纪八十年代以天然气冷热电联供为代表的总能系统, 依据“分配得当, 各得

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(52090062); 国家重点研发计划项目(2021YFB2601405)。

Project Supported by Major Program of National Nature Science Foundation of China(52090062); National Key Research and Development Program of China (2021YFB2601405).

其所, 温度对口, 梯级利用”原则实现能的梯级综合利用^[3]。在世纪更迭之际, 国家出台的《节约能源法》和国家发改委关于分布式能源系统有关问题的报告中鼓励发展能源梯级利用技术和能源多联产技术, 支持小型化、模块化和多样化的分布式能源系统^[4]。但是随着分布式冷热电联供系统规模增长, 系统运行灵活性调整困难、经济性欠佳等局限性逐渐暴露出来。因此探索风、光、水等新能源开发利用与传统煤炭、天然气化石能源的深度融合互补方法, 挖掘异质能源时空耦合与互补特性, 构建 MCDES 逐渐成为新的研究重点^[5]。十三五期间, 首批 23 项多能互补集成优化示范工程和首批 28 个新能源微电网示范项目为我国后续 MCDES 的发展奠定了基础。同时随着信息和通讯技术的不断发展, MCDES 在满足局部能源自洽的基础上, 基于“互联网+”技术实现能源商品属性在能源产销者之间的流通和交易, 未来将与大电网、天然气网等主干网络一起构建“能源互联网”新形态^[6]。

多能互补分布式能源系统是能源互联网的物理载体^[7]。通过化石与可再生能源资源整合、能源转换过程协同、终端冷热电气联合供应, 实现能源的产供销一体化。可再生与化石能源互补能够降低化石能源不可逆损失, 平抑可再生能源的不稳定输入^[2]。发电、供热和制冷等多过程协同为能源综合梯级利用、优化调度、高效转换和系统大幅度节能提供了条件。面对包括移动应用在内的冷、热、电等多元负荷联合供应, MCDES 打破了传统单一能源供应独立规划、设计和运行的既有模式^[8], 通过供用能系统整体协调配合, 实现系统经济高效、可靠灵活、低碳环保等可持续发展目标。但不确定性可再生能源接入、多种异质能源耦合、终端多元能源需求等复杂因素也为 MCDES 的资源需求分析、多能流建模、系统集成^[9]、优化运行、综合评价^[10]等诸多研究和工程应用实践带来巨大挑战。

本文以多能互补分布式能源系统为研究对象, 分析了系统集成研究涵盖的主要内容和面临的挑战, 并根据研究内容间的关系梳理研究框架。在此基础上对资源量化表征与需求预测、多能流建模、系统集成与规划、运行优化与主动能量调控、以及系统综合评价等 5 个方向的研究现状进行综述, 对未来可能的发展趋势进行展望, 以期为学者未来的研究提供参考。

1 多能互补分布式能源系统的研究框架

多能互补分布式能源系统是探究异质能源耦合机理、推广先进能源技术的前沿阵地。受节能减排和碳中和政策的影响, 能源供应逐渐由传统能源驱动向可再生能源驱动转变, 能源技术进步促使能源传递和转化过程更加复杂, 移动应用和用户侧需求响应等使得用能需求呈现出多元化发展。这些因素导致 MCDES 的研究内容愈发丰富, 主要包括: 1) 间歇性和波动性的可再生能源资源量化表征, 以及中长期、短期、超短期多元负荷预测; 2) 涵盖冷热电气在内的多元异质能源建模; 3) 包括 MCDES 结构创新、能源站优化配置、以及站网联合规划在内的系统集成优化; 4) 考虑系统源荷时序匹配的运行优化与主动能量调控; 5) 计及能效、经济、环保、安全及社会效益在内的多属性指标体系和综合评价。根据 MCDES 的主要研究内容以及相互之间的关系, 其研究框架总结如图 1 所示。

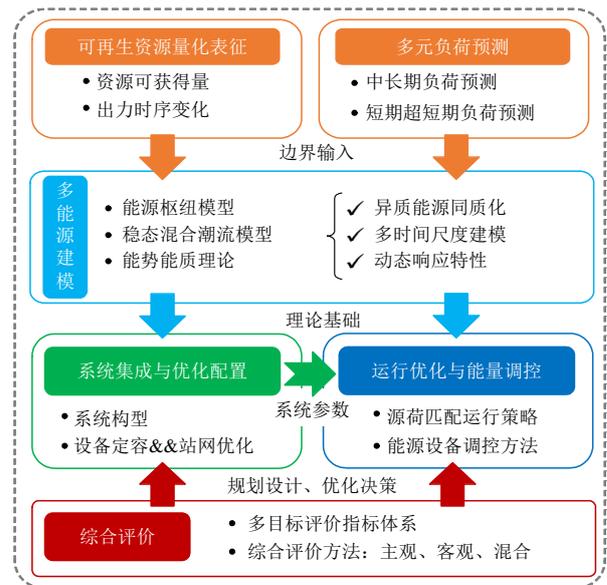


图 1 多能互补分布式能源系统研究框架：
主要研究内容及相互关系

Fig. 1 Research framework of the multi-energy complementary distributed energy system: main content and relationships

“源荷”不确定性的精确量化表征和预测是 MCDES 优化集成和运行调控的基础^[11]。风光等可再生能源具有显著的间歇性和随机波动性, 为分布式能源系统的稳定运行带来了严峻挑战^[12], 可再生能源不确定性增加了系统规划设计和运行调度的难度, 尤其是对储能设备的容量配置和系统超短期能量调控策略具有显著影响。用户侧能源需求随着工作日和季节轮换呈现明显的周期性变化, 而移动

应用、车载电源以及需求侧响应技术的推广进一步增强了系统的不确定性。

多能流建模是解决 MCDES 系统规划、智能调控、协同控制、综合评价、系统信息安全等关键问题的核心与基础^[5]。能源枢纽(energy hub, EH) 模型^[13]通常用于多能互补系统的静态建模, 表征系统内部冷热电等异质能源互补转化特性, 但是无法描述系统内部复杂的动态特性。多能混合潮流模型是多能流建模的重要手段, 基于现有电力系统、热力网络和天然气网络建模方法, 诸多学者在多能流统一化通用建模方面做了诸多探索^[14-15]。MCDES 建模的难点在于异质能源的同质化, 能源品质的差异在热力学中通过能势能质进行区分, 能量势差的高低会影响能量转化的方向和速率, 能质损失的大小能够决定能源转化效率的高低^[2], 因此在多能源建模过程中如何考虑能势能质的差异是新的挑战。此外系统中能源输入和冷热电负荷具有不同的惯性时间尺度和动态特性, 对其精确建模是 MCDES 优化调度和能量调控的理论基础。

多能互补分布式能源系统集成优化有两层含义: 1) 结合地区资源禀赋、负荷特征以及技术经济条件约束因地制宜提出多元化系统构型; 2) 考虑能源耦合的横向互补对能源系统进行优化配置, 实现能源的梯级利用和优化调度。但目前多能源互补和能势耦合缺乏可靠的理论指导, 可再生能源的能势表征亟待研究^[2], 多能源互补过程中不可逆损失机理尚不明晰。系统集成优化的研究范畴包括系统设备选型、容量配置以及分布式能源系统的站网分布, 但是由于源荷多重不确定性, 如何在规划阶段考虑“源-荷-储”的时空匹配, 避免能源供需容量失配、设备利用率低下等问题是 MCDES 集成优化的又一难点。

运行优化是在多能互补系统优化配置基础上提高系统能效、降低成本的关键。多能源耦合、源荷多重不确定性、异质能流多时间尺度特性、设备的动态特性和调控手段差异性, 以及多目标优化等因素为 MCDES 优化调度带来挑战, 需要深入地研究多能互补系统的全工况能质互补特性与源荷匹配规律, 进而创新多能源系统主动调控方法, 实现互补系统性能质的提升和高比例可再生能源的提质增效。

综合评价是保障 MCDES 规划设计、优化决策, 以及实现系统经济高效、可靠灵活、低碳环保等可

持续发展目标的必要理论指导。综合评价内容包括多属性指标体系和多准则综合评价方法, 前者从能效、经济、安全、环境及社会效益等多个维度定义指标; 而后者对多属性指标进行科学系统的处理, 借助标准化和加权方法, 得到简洁直观、客观公正的评价结果。MCDES 具有技术复杂度高、多元主体博弈等特征, 综合评价面临场景繁多、维度复杂、主体不一等挑战, 导致当前评价指标繁多, 存在相关性高、易混淆、不规范等问题^[10]。如何处理主观因素对综合评价结果影响是能源系统综合评价方法研究的难点。因此系统全面地构建多属性评价指标体系, 创新多准则综合评价方法仍面临严峻挑战。

2 资源量化表征与多元能源需求预测

2.1 可再生能源资源量化表征

源头互补是 MCDES 的重要特征, 通过合理规划, 充分发挥可再生能源之间、及其与化石能源在时间尺度和能源品质等方面的互补特性。风能和太阳能是 MCDES 的重要资源, 气象条件和时空不确定性使风力发电功率具有强烈的间歇性和随机波动性, 风电出力小时级波动尤为明显^[16]。昼夜交替和季节变换使太阳能成为一种典型的间歇式能源, 太阳辐照度受气候、气象、地理等多种环境因素影响, 光伏功率能以极快频率在几分钟内实现从满功率到零功率的变化^[17]。风光资源的不确定性为其量化表征带来挑战, 相关研究集中在风电和光伏功率预测, 在预测形式上分为确定性和概率性预测方法。前者预测风光气象参数或者设备功率等具体数值; 而后者预测结果中包含概率分布参数, 常用的概率性预测方法包括分位数回归、动态贝叶斯网络、核密度估计、马尔科夫链和使用数值天气预报(numerical weather prediction, NWP)结果的预测方法等。

风光功率预测根据预测过程分为直接法和间接法; 按照时间尺度分为超短期(0~6h)、短期(6h~1d)和中长期(1月~1年)预测方法^[17]; 根据建模方式分为物理方法、统计方法和智能算法预测。直接预测根据风光功率历史数据直接预测功率, 间接预测先预测风速或太阳能辐照度等参数, 然后计算风光出力。不同时间尺度的预测结果用处不同, 超短期预测提供功率瞬变信息, 短期预测用于运行优化, 中长期预测用于新建 MCDES 资源评估。另外, 物理方法基于数值天气预报结果和能源转换传递机理,

统计方法依据模型输入与输出间的统计规律进行预测,而智能算法通过深入挖掘风光转换过程中的复杂非线性动态规律,提高预测精度。

风电功率受到气象参数的影响,结合 NWP 的风速和风电功率预测研究成为重要方向^[18]。由于水平分辨率、物理参数化、初始和边界条件不足等原因,气象模型预测得到的地表风速可靠性较低,Cassola 和 Burlando^[19]采用卡尔曼滤波器提高了风速和风电功率预测精度。Vaccaro 等^[20]提出物理模型与机器学习模型结合的组合预测模型,能够显著提高风速和风电功率预测精度。Men 等^[21]使用 Gauss 混合模型建立 NWP 数据与实测风速之间的映射模型,通过校正后的风速数据和 Gauss 混合模型能够显著提高风电功率预测精度。用 NWP 数据预测风电功率时需要考虑风电场所在区域、时空分辨率、预测时长、精度和计算复杂度要求,统计学预测方法通过挖掘历史数据时间相关性进行风电功率预测,原理简单但预测精度较高,常用方法包括卡尔曼滤波、时间序列法、指数平滑法等。

近年来机器学习、深度学习、大数据等技术广泛应用于风电预测,综合多种模型优点建立组合预测模型以提高预测精度已经成为热点研究方向^[22]。Chitsaz 等^[23]提出一种改进的小波神经网络预测风电功率,结果表明应用最大相关熵准则能够降低预测结果的均方误差。叶林和刘鹏^[24]基于经验模态分解和支持向量机提出短期风电功率组合预测方法,结果表明预测误差比单一统计模型降低了 5%~10%。针对气象数据缺失场景,佟佳弘等^[25]基于小波分解、特征提取和 XGBoost+逻辑回归等方法提出不依赖气象数据的风电预测模型,结果表明该模型能够降低模型的预测误差 0.2%~1%。苗长新等^[26]提出一种基于数据驱动的混合深度学习模型,通过数据清洗加强风速和风电的相关性,设计多通道卷积挖掘气象信息与风电出力以及相邻风电场间的时空关联,并通过门控循环网络挖掘时序关联,得到有效多风电场风电功率预测结果。

光伏功率预测的关键在于确定不同时间尺度下影响光伏功率的主要因素及其作用机理^[17]。云层运动是影响地面辐照度和光伏功率波动的主要气象因素,基于云图的预测方法是光伏精细化预测的重要方向,陈志宝等^[27]将大气层外辐射、大气质量、图像亮度和云量作为输入因子,构建径向基神经网络预测地表辐射,结果表明计及地基云图信息的光

伏功率超短期预测模型明显优于无图像模型。NWP 能够提供光伏功率预测的气象参数,按照时空分辨率可以分为全球和中尺度 NWP,但 NWP 模型内辐照转化过程、云量预测、及其他变量预报的误差会导致辐照度存在较大误差,可以通过数据后处理方法改进 NWP 精度^[28],进而提高功率预测精度。

数据驱动方法亦广泛应用于光伏功率预测,包括统计学方法和人工智能算法:1) 统计学方法包括时间序列、回归分析、灰色理论、模糊理论、时空关联等方法;2) 人工智能算法包括神经网络、支持向量机、卡尔曼滤波、马尔科夫链、粒子群算法和遗传算法等。通过深度把握光伏发电及光资源特性,基于数据驱动的组合预测模型已经成为研究重点。针对单一气象预报源可能存在的误差和偏差问题,师浩琪等^[29]采用自组织映射神经网络聚类算法对天气类型划分,并基于遗传算法优化反向传播神经网络预测光伏短期功率。李丰君等^[30]结合天气分类融合训练集和长短期记忆网络深度学习方法,得到了在气象信息缺失情况下的光伏功率高精度短期预测结果。方鹏等^[31]基于模糊 C 均值聚类-随机森林算法和长短期记忆网络预测光伏电站的中长期发电量,解决了“长时间周期依赖”问题。

除风光以外,水能、生物质、地热能等也是 MCDES 的重要资源。水电站按照水能利用方式分为调蓄式和径流式,调蓄式水电启停方便、调节迅速,能够快速跟踪负荷,是平抑系统中风光波动性的重要方式^[32],径流式水电出力与河流水资源紧密相关,不具有调峰能力。水电短期波动较小,昼夜径流基本均匀,但是存在明显的季节性差异,需要细致分析区域水能资源时空特性和储量,优化设计集成水电的分布式能源系统,进而提高水电在枯水期调峰能力、减少汛期弃水能力。生物质能够贮存太阳能,是一种可再生的碳源,分布式能源系统中需要充分考虑生物质资源的可获得性以及季节差异性,例如秸秆只能在农作物收获之后才能处理成为生物燃料,可通过统计分析进行量化评估。地热能按照属性分为水热型、地压地热性、干热岩和岩浆热能,目前水热型地热资源已达到商业开发利用阶段。地热能储存于地下,不受气候条件影响,即可作为基本负荷,也可用作峰值负荷,地热能资源可以通过热流量法、热储法、热导率计算法、地下水折算法、水热均衡法、类比法和数值法等方法评估^[33],针对具体应用场景和数据选定方法。

2.2 多元能源需求预测技术

多能互补分布式能源系统中能源耦合、可再生能源接入、能源消费市场化等特点对系统用能预测的准确性、实时性、可靠性和智能性提出更高要求^[34]。能源需求预测是系统优化配置和能量调控的基础，预测方法按照时间尺度分为长期、中期、短期及超短期等，预测结果按照信息详尽程度分为点预测、区间预测、和概率密度预测^[35]。中、长期需求预测是系统集成优化的边界条件，实际应用中电力需求通过单位指标法、需要系数法和负荷密度法等方法测算，冷、热负荷通过动态负荷算法、指标法及逐时负荷系数法等预测得到负荷的全年分布。短期和超短期预测是系统运行策略优化的边界条件，是提高系统能效、可靠性和灵活性的保障。

多元能源需求预测方法及挑战如图 2 所示，MCDES 的多元负荷需求具有强烈的波动性和不确定性，主要源于：1) 空调、采暖等负荷对气候变化敏感；2) 用户行为模式随机变化。针对气候气象等因素导致的不确定性，马建鹏等^[36]通过 Copula 理论分析负荷之间以及负荷与天气因素之间的相关性，利用核主成分分析对数据进行降维，利用广义回归神经网络进行多元负荷预测，但模型在一定程度上割裂负荷连续性。针对用户行为模式带来的随机性，文献[37]采用多主体建模方法，基于概率模型和人口信息对不同类型公寓中不同家庭的能源消费行为进行模拟，预测得到系统的多场景多元能源需求。

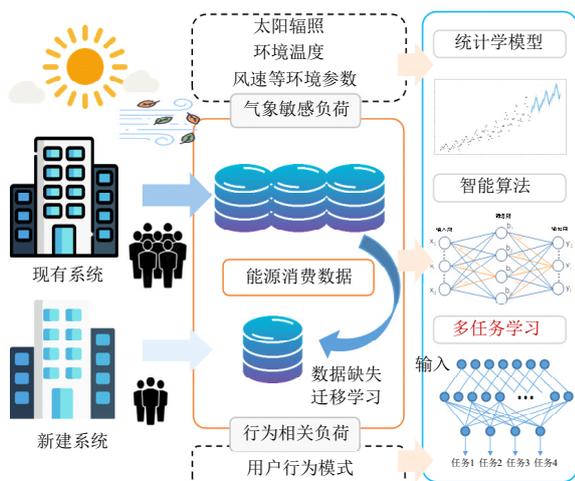


图 2 负荷侧多元能源需求预测方法及挑战

Fig. 2 Methods and challenges of multi-energy demand prediction of demand-side

单一能源需求预测技术已比较成熟，回归分析、时间序列法、卡尔曼滤波等统计学模型能够分

析数据内部的时间序列相关性，而人工神经网络、支持向量机、深度学习等智能算法能够挖掘多重影响因素和需求之间的非线性关系，得到比较精确的预测结果。MCDES 中需要同时预测多种能源需求，但是多元负荷之间、负荷及环境等因素间存在复杂的关联性，多元负荷的时间序列具有强烈的动态及非线性特征^[36]。针对多元负荷之间的互相关性，赵峰等^[38]考虑冷热电负荷中多个变量的相互耦合关系，提出基于多变量相关空间重构和卡尔曼滤波的负荷预测方法，有效提高了负荷精确性。一些学者将大数据、机器学习和深度学习等技术应用于多元负荷预测，栗然等^[39]基于多通道卷积神经网络和长短时记忆网络，提出一种超短期负荷预测方法，通过对基本负荷单元的像素重构、多能负荷的特征融合等过程全面挖掘负荷时空特性。

多元负荷联合预测属于多任务学习问题，史佳琪等^[34]基于受限玻尔兹曼机的深度置信网络，将深度学习和多任务学习模式应用于电热气负荷联合预测，发现多任务学习在预测精度和训练时间上具有优势，但在计算时间、算法适应性、结果鲁棒性等方面仍有改进空间。基于历史数据的深度学习方法可以提高预测精度，然而新建设的分布式能源系统和新接入的用户不具有足够规模的负荷数据，使得多元负荷预测成为小样本问题。迁移学习能够将源域的知识迁移到目标域，适用于解决小样本问题，根据标签分为归纳迁移学习、转导迁移学习和无监督迁移学习。在短时负荷需求预测领域，孙晓燕等^[40]提出了基于负荷特征提取和迁移学习的预测机制。

多能互补分布式能源系统多元负荷预测呈现出以下趋势：1) 深入挖掘能源技术进步和能源市场化发展下的终端用户用能特性；2) 综合考量区域规划布局、社会发展水平、气象数据等时空影响因素；3) 大力发展集成学习、迁移学习、强化学习等数据驱动方法以及在线学习算法；4) 逐步构建涵盖多能源耦合、多时间尺度、多空间层级和管理环节的多维度协同预测体系。

3 多能流建模

多能互补分布式能源系统由能源站和能源网络构成，多能流建模描述了能源设备互补转化和能源网络传输特性，是多能互补系统集成优化、潮流计算、运行调度等关键技术的核心。

3.1 能源站多能流建模分析

能源枢纽模型是目前广泛应用的多能源系统通用建模方法,通过耦合矩阵形式描述电、热、气等多种能源形式之间的转换、存储、传输关系^[41]。各种形式的能源从输入到输出之间经过能源转换与分配两个环节,分别以效率和分配系数表示。调整耦合矩阵的端口,能源枢纽模型可拓展至可再生能源消纳、储能设备、需求侧管理等应用场景。文献[42]回顾了能源枢纽模型的概念和模型,分析了EH主要结构、优缺点和面临的挑战。为了便于数学建模,文献[43]提出一种自动构建多能源系统能源枢纽模型中耦合矩阵的标准化建模方法。

能源母线模型是关注能源站内设备间能量流动与转换的多能流建模方法^[44],可按照母线和能源设备顺序逐次建立多能源系统功率平衡和能量转换的线性方程^[45]。文献[46]选择电气、烟气、蒸汽、热水、空气等作为基本母线,与源-荷-储及转换装置构成多能源系统,实现冷热电联产系统的灵活配置和通用建模。能源母线模型能够有效降低模型维度,但该模型将设备连接简化为能量流在母线上的汇聚,一种母线结构可能对应多种设备连接方式,更适用于内部结构已知的能源系统^[44]。

能源枢纽与能源母线模型用于能源站建模仍存在一些缺点:1)模型可扩展性不足,当系统结构发生变化时,需要迭代建模以避免模型失效;2)难以描述能源系统内部复杂动态特性,如气热转化中的时延特性;缺乏对各环节中不确定性的考虑;3)建模过程关注能量数量上的变化规律,不能区别能源品质和做功能力的差异。未来需要探索多能流建模过程中整合能质能势理论的途径,通过多能互补的能势匹配与能的梯级利用,实现多能源系统的优化集成设计与全工况最佳性能智能调控。

3.2 多能流网络建模分析

传统能源网络的建模方法相对成熟,电力系统建模主要基于经典潮流方程、Distflow方程和近似潮流方程^[44]等稳态模型;供热/冷网络遵循流体力学和热力学定律,包括水力和热力模型^[14],通过节点流量平衡方程、回路压降方程、水头损失方程、管道热损方程和热水混合方程等表示;天然气网络遵循流体力学定律,通过运动方程、连续性方程和状态方程描述管道压力和节点流量,求解天然气管网潮流^[15]。然而多能互补系统中多种异质能流相互耦合,呈现复杂的动态特性和多时间尺度特征,单一

能量系统的建模方法不再适用,因此多能流网络建模成为当下研究的重点。

许多研究着眼于电-气、电-热系统耦合,文献[47]采用分布式平衡节点技术,考虑天然气受温度影响下的电-气多能流方程。热网具有明显的功率传输与温度变化延迟特性,因此具备一定的蓄热能力,能够促进可再生能源消纳、促进热电联产系统解耦、增强系统负荷调节能力。文献[48]基于电网、水力和热力回路、以及耦合元件模型,提出两种分析电热耦合网络状态的稳态仿真方法。针对电-气-热等更为复杂的多能耦合系统,文献[49]基于混合分辨率建模和混合指令周期调度建立电、热、气综合能源系统混合时间尺度运行优化框架。

为突破异质能源联合分析瓶颈,学者们致力于多能源系统统一化通用建模研究。文献[50]基于热电比拟提出热阻概念,统一电能传输和热能输运,提出电热整体能量流模型。文献[51]提出一种基于网络节点压力的能量流模型,利用“节点势能”统一电压、气压、水压、温度等关键参数。文献[52]提出适用于能量网络建模的广义基尔霍夫定律,结合能量在线(管)路中的普遍传递方程,构建了可比能量网络中的普遍化等效传递方程,但是算法较为复杂。杨经纬等^[53]提出广义电路分析理论,基于拉普拉斯变换,将多能源网络在时域的复杂传输特性转换为代数问题,构建了支路层和网络层能量流集中参数传输模型。陈彬彬等^[54]从学科融合交叉角度出发提出统一能路理论,将电力网络分析方法拓展至天然气管网和供热网络,简化偏微分方程为代数方程,为多能流建模提供参考和方法借鉴。这些方法实现了异质能源建模形式上的统一,降低了模型复杂度,提高了计算效率。多能流模型的求解算法分为解耦求解和统一求解^[15],前者在迭代过程中对不同系统方程进行求解,计算时间短但可能出现潮流不收敛问题;而后者将多能流系统所有变量统一求解,系统规模较大时求解耗时较长。

4 多能互补分布式能源系统集成与优化配置

4.1 多能互补分布式能源系统集成与构架

能源系统构架明确了能源生产、转换、输送、存储以及消费等过程以及它们之间的相互联系^[55]。MCDES构架具有显著的“源网荷储”一体化特征,其一般性构架如图3所示。

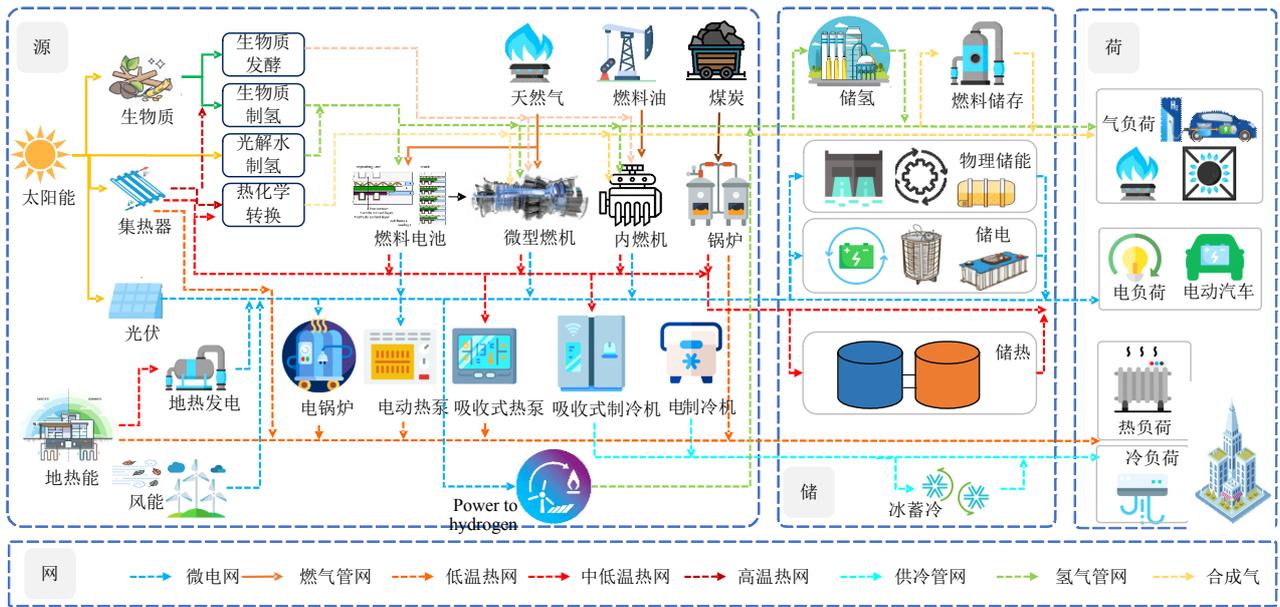


图 3 “源网荷储”一体化设计的多能互补分布式能源系统一般性构架

Fig. 3 General framework of multi-energy complementary distributed energy system considering the integrated design of “source, network, load and storage”

源侧包括能源生产和能源转换过程。能源生产过程中燃料来源广泛，既包括天然气、煤炭、燃料油等传统化石能源，也能够耦合太阳能、风能、生物质、地热能等可再生能源，甚至包括工业余热等资源，受节能减排政策影响，MCDES 逐渐由传统能源驱动向可再生能源驱动转变^[2]。能源转换设备包括燃料电池、燃气轮机、内燃机、热泵、电制氢(气)、制冷机、储电(热)等设备。能源网络是分布式能源系统的重要组成部分，主要包括微电网、燃气管网、供热(冷)管网、中水分级利用管网等综合网络。与主干网络相比，微能源网参数等级更低，主要实现能源站能源设施和负荷侧用能主体的互联互通。负荷侧除冷热电气等传统负荷以外，还需要考虑移动应用(电动、氢/混合动力汽车，车载应急电源、可移动冷-热-电联供)及化工原料等多元化需求。

储能是解决分布式能源系统中发电功率和负荷功率之间、不同类型电源响应时间之间不匹配问题的核心技术。目前热能存储、电化学存储以及机械能存储技术较为成熟，电能存储和化学能存储技术发展迅速^[12]。多能源系统中可再生电力可以通过锂电池、液流电池、超导电容等直接存储，也可以通过抽水蓄能、压缩空气储能转化为机械能存储，亦或者经由电化学方式转化为氢气、甲烷等燃料以化学能形式存储，此外需求侧电动汽车也是电能存储的一种重要方式。热能可以通过显热和潜热两种

方式直接存储，也可以通过热化学转化为燃料化学能间接存储，近年来冰蓄冷逐渐成为宾馆、酒店等应用场景下的重要储能手段。

分布式能源系统中的能源互补按照特征可分为时间互补、热互补、热化学互补等形式。时间互补是根据能源资源和终端负荷波动情况，借助协调运行和储能技术将能源资源在时间尺度上重新分配，促进可再生能源消纳、保障能源供应可靠性。热互补依据“温度对口、梯度利用”原则对能源转换设备涉及的热力循环进行优化集成，提高系统综合能效，以中低温热源驱动吸收式热泵为例，中低温热互补已经逐渐成为多能互补的典型形式^[4]。太阳能与化石能源热互补因其能效提升和经济适用性也受到广泛关注，此外探索太阳能与生物质、地热能等可再生能源间热互补机制也逐渐成为低碳化发展的趋势，文献[56]提出了生物质沼气和太阳能光电光热综合利用系统。热化学互补通过将热能转化为燃料的化学能，实现可再生能源蓄存和转运，目前仍处于基础研究阶段。文献[57]提出太阳能与甲烷化学链燃烧耦合的分布式冷热电联产系统，能够实现 CO₂ 低能耗分离和良好的能源利用率。

多能源互补集成遵循因地制宜的指导准则，在优先发展可再生能源的基础上，合理开发利用本地能源资源，实现可再生能源与化石能源的协同转化。在能源转换过程中，遵循能势匹配、梯级利用思想，构建新型高效 MCDES，结合源荷时空分布

特性,合理配置系统设备和储能单元,实现终端能源需求的可靠灵活供应。未来 MCDES 集成优化需要从基础理论和技术方法等多层面研究系统协同转化与能势耦合机制,创新系统规划方法。

4.2 多能互补分布式能源系统规划研究

能源规划的目的是确定何时何地建设多大容量的何种种子结构的能源站和能源网络^[44, 58],按照建模方式分为自底向上、自顶向下和混合模型^[55],自底向上模型以能源流和设备为基础进行建模,自顶向下模型基于经济学分析优化能源结构,混合模型综合两种建模方式的优点,通过模块化建模方式建立能源供需平衡,优化能源系统。能源规划根据研究内容可分为能源站规划、能源网络规划、以及站网协同规划。能源站规划旨在优化系统结构、设备容量和运行策略,能源网络优化则通过多能流优化确定管网规划方案,而站网协同优化能够同时确定能源站内设备配置、能源站建设位置以及管网分布。

多能源系统统一规划能够有效考虑各个子系统间的互补关系,弥补能源系统单独规划的不足,提高能源和资产的利用率,降低供能成本。但 MCDES 规划也面临着严峻挑战:1)多能耦合与精细化建模,如何在规划中考虑能源耦合的影响,准确表征多能流静态、动态及时延特性是保障规划结果可靠的基础;2)变量增加、优化问题规模扩大,多能流耦合与站网协同规划使系统决策变量激增,问题求解难度增加;3)多重不确定性影响,可再生能源出力、多元负荷以及能源-交通耦合等环节中的不确定性难以量化表征,提高了建模难度;4)投资主体多元化、权衡各方利益诉求,除能效、经济、安全和环保目标以外,还需要考虑可再生能源渗透率、产业效益及其他社会效益目标;5)求解难度提升,以上诸多原因使 MCDES 规划问题成为复杂的多目标、多约束、非线性、随机不确定混合整数组合优化问题,本质上属于非确定性多项式难问题。

国内外存在许多能源规划模型和成熟的商业软件,文献[9]对现有优化配置软件及其适用系统、相关指标进行对比,发现不同的规划模型在特定的情境下具有优势,但不存在能够同时解决能源规划所有问题的方法或模型。能源枢纽模型作为通用建模方法被广泛应用与多能源系统规划中,文献[59]基于能源枢纽概念和图论提出一种多能流系统的优化配置方法,通过支流建模方法灵活描述能源转

换和储能设备特性和拓扑关系。文献[60]提出一种多能源系统最优拓展规划模型,以系统可靠性、能效和排放等系统性能为约束,优化发电单元、能源传输、CHP 等设备投资。储能是平抑可再生能源和负荷波动性的重要手段,文献[61]研究了蓄冷、储热、储电和混合储能在冷热电联供机组和电制冷等设备互补协同运行下的盈利策略,讨论了系统配置不同储能的经济性和可行性。能源规划过程中建模精度越高,则规划结果越可靠,任洪波等^[62]阐述了分布式冷热电联供系统变工况下的相关规划设计理念与方法。文献[63]分别借助进化算法和混合整数线性规划构建了计及设备变工况特性的能源规划模型,发现在规划阶段考虑设备特性能够有效降低系统成本,消弭能源设备容量与终端需求失配的问题。

站网联合规划是 MCDES 规划的重要内容,能够避免能源站或者能源网络单独规划导致的局部最优^[44]。文献[64]考虑柔性负荷、电动汽车和储能影响,以经济性为目标构建能源站与能源网络协同规划模型,结果表明站网协同规划有助于减缓能源基础设施扩建速度。基于能源网络潮流分析的站网联合规划模型求解复杂,部分学者基于图论理论对能量流动过程进行简化,文献[65]基于图论和能距概念,建立“站-网”P 中位布局模型,实现能源站数量、站址选择、储能中心与管径路径的协同求解。

针对规划模型中的不确定性,在分析其来源及特征后,采用概率论、序列运算等数学工具进行建模,通过敏感性分析、随机规划、鲁棒性规划等方法研究不确定性对规划结果的影响^[41]。文献[63]采用两层全局敏感性分析方法确定对多能源系统规划影响最显著的因素,并通过全局敏感效应指标进行量化表征。文献[66]提出一种融合模糊多目标决策和两阶段自适应鲁棒优化方法,考虑负荷不确定性影响进行多能源系统的设备选型与定容。不确定性分析根据因果关系分为先验与后验方法,文献[67]以蒙特卡洛模拟和两阶段随机优化为代表,比较先验与后验建模方法处理分布式能源系统不确定性对优化设计的影响,发现后验方法能够得到系统方案的性能分布,而先验方法可以捕获不确定性但计算成本较高。

能源规划是一个多目标优化问题,可通过多目标优化算法直接求解 Pareto 前沿,也可以通过归一化方法将多目标整合成为单目标优化问题进行求

解。文献[68]提出了分布式能源系统规划的多目标优化与多准则评价集成框架,采用 ϵ -constraint 方法和多准则评价方法确定系统最优设计、调度策略以及最佳选址。针对冷热电联产系统,文献[69]采用改进的非支配排序遗传算法求解在净现值和碳排放目标下的系统设备选型和定容的权衡方案。

经典凸优化算法难以直接求解能源规划问题,可以将优化模型近似简化,然后通过序列二次规划法、内点法、分支界定法、Benders 分解法等凸优化算法寻优求解;或者通过遗传算法、粒子群算法、机器学习、深度学习等人工智能算法直接求解^[70]。线性化是模型简化最常用的手段,文献[63]采用分段线性方法处理设备投资和变工况性能曲线,构建混合整数线性规划模型对终端能源站进行优化设计。能源规划问题具有显著的模块化特征,通过变量解耦和分离能够有效简化模型,文献[60]采用 Benders 分解将整数变量和连续变量分离到不同的迭代子问题中,经过反复迭代确定优化方案。此外,人工智能算法对处理高维非线性问题具有明显优势。

5 多能互补分布式能源系统运行优化

多能源系统中冗余的能流路径为系统智能调控提供了空间,运行策略优化能够提高系统能效、调节峰谷用能差、提升系统安全性和可靠性。然而多能源耦合、多时间尺度建模、多重不确定性、多目标优化等特点使多能源系统调度优化愈发复杂,导致传统能源系统的优化调度方法不再适用,亟需结合多能流能源转换设备和传输网络的动态特性和相互作用,研究多时间尺度下能源系统的智能调控方法(图 4)。

5.1 多能互补系统多能流耦合运行优化

多能互补系统并非多个独立供能系统简单的叠加,而是通过多种供能单元的协同调控实现供需平衡,不同能流之间、设备与设备之间存在强耦合关系。传统的“以热定电”或“以电定热”运行模式将导致能源设备严重偏离设计工况、系统性能大幅下降。而且这种调控模式以负荷侧为重点,未从系统整体层面上考虑综合性能,并且大多未计及系统内部能量耦合对系统性能的影响,难以实现系统的最佳调控^[9]。

针对多能互补系统及其关键设备变工况特性,文献[71]分析了汽轮机驱动的冷热电三联产机组在

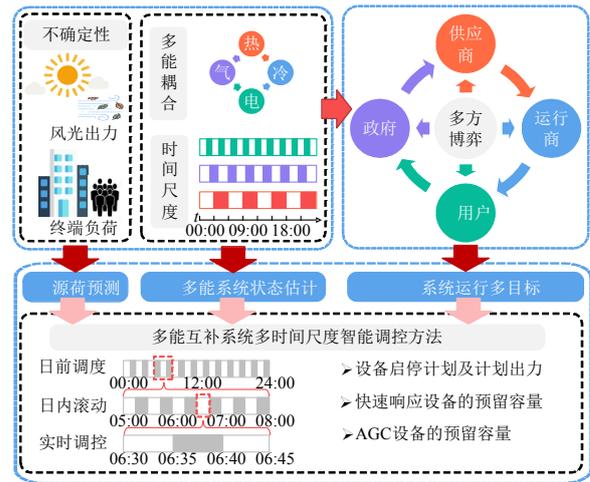


图 4 多重因素影响下的多能互补分布式能源系统多时间尺度智能调控

Fig. 4 Multi-time scale intelligent regulation of multi-energy complementary distributed energy system under the influence of multiple factors

热跟随、电跟随及季节运行 3 种模式下的变工况性能,并对其能源消耗、成本支出和碳排放进行比较。文献[72]研究了不同运行策略下使用燃气和生物质燃料的小型热电联产机组的变工况性能。关于多能互补分布式能源系统,文献[73]考虑设备变工况特性,对以冷热电三联产机组为核心、耦合电能转换设备的多能互补系统进行研究,建立计及设备变工况特性和供能充裕性的综合能源系统运行-规划双层模型。

能源枢纽是实现多能流耦合优化运行的关键技术,可通过单个 EH 优化能源站运行策略,亦可通过协调多个 EH 进行站网联合运行优化。针对居民住宅、商业建筑、工业园区、农业应用等应用场景,文献[74]对基于 EH 的多能源系统规划和优化运行研究进行了综述。针对单个 EH 运行优化,文献[75]考虑能源站与外部网络交互,基于图论构建能源站的能效矩阵,建立了能源市场化背景下的冷热电三联产系统的能源管理优化框架。基于 EH 建模的能源站运行优化难以考虑设备的动态特性,文献[63]考虑了设备变工况特性对系统优化运行策略的影响,但目前没有更高精度时间分辨率的设备动态特性的运行优化研究。通过 EH 对能源网络建模,可类比电力系统构建多能源最优潮流模型^[58]对站网运行进行协同优化,文献[76]考虑多能源系统中能源站和能源网络的详细参数,提出一种通用的能源枢纽拓展模型,用于分析多能源系统中能源潮流,并以多种网络拓扑下的热电网耦合为例对模

型的灵活性和通用性进行验证。

集成储能技术是多能流解耦的重要手段,也是应对源荷不确定性的的重要途径,通过合理设计储释能策略,提高系统运行灵活性和可靠性。储热技术在成本、寿命及可靠性方面具有优势,文献[77]综合考虑供热管网与储能水罐储能特性,对工业园区的综合能源系统进行日前优化调度,结果表明储热水罐的出力优化增加了系统灵活性,热网热惯性增强了能源供应的稳定性。电制气与电制热技术对于新能源消纳及移峰填谷具有重要意义,文献[78]建立了包含蓄电池、蓄热电锅炉和电制气等技术的微网系统经济优化运行模型,发现含有3种储能方式的系统能够减少弃风量,降低环境污染治理费用,提高经济效益。但是储能技术由于造价高昂等原因在实际应用中受限,文献[79]将储电、储热、储冷设备和需求侧灵活性负荷视为系统广义储能资源,通过储释能优化调度实现系统能量优化调度,提高系统经济性、促进可再生能源消纳。

5.2 多能互补系统多时间尺度运行优化

运行优化本质上是基于系统运行规律和设备运行特性,考虑复杂约束,充分调动系统可控可调资源,实现成本削减、能效提升等目标的过程^[55]。电、气、热等多能源网络动静态特性与设备控制特性在时间尺度上的显著差异,决定了多能源系统运行优化是一个多时间尺度优化问题。多能互补系统中热网和电网在传输时延和传输损耗等方面差异明显,文献[80]以电能实时平衡和热能调度时间内总量平衡为约束,提出基于电-热分时间尺度平衡的多能源系统优化方法,结果表明该方法在满足用户舒适度的同时能够提高系统经济性。

多能源系统优化调度根据时间尺度可分为日前调度计划、日内滚动优化以及实时动态调整,文献[81]针对园区能源系统,以设备模型为基础,建立包含滚动优化环节和动态调整环节的两阶段多时间尺度模型预测控制调度方法,结果表明该方法能够充分发挥设备互补特性,并可快速响应可再生能源和负荷变化。文献[82]基于分布式模型预测控制,建立了综合能源系统日前、日内和在线动态经济优化调度方法,仿真结果表明该方法能够改善系统控制性能、提高系统运行经济性。对描述系统动态过程的偏微分方程进行离散化处理便于问题求解,文献[49]采用与气网、热网动态过程相匹配的模型分辨率刻画能流动态过程,类比电力系统多时

间尺度滚动调度提出满足异质能流协调精细化调度的混合指令周期优化调度方法,构建了综合能源系统混合时间尺度运行优化框架。

5.3 多重不确定性条件下的多能系统运行优化

多能互补分布式能源系统运行优化,需要考虑冷热电气等能源在生产、传输、转化及消费等环节中的(非)连续性时变不确定性。借助鲁棒性规划、随机规划、区间规划等方法分析不确定性的影响,能够增强系统优化运行策略的可靠性。另外在多时间尺度运行调度框架下通过模型预测控制进行滚动优化和反馈校正,可以降低不确定性对系统在线运行优化的影响^[81]。

对于源侧可再生能源出力随机性,文献[83]以概率密度函数对光伏出力进行描述,通过场景聚类分析构建光伏随机出力场景,建立双层鲁棒性优化模型,降低由于光伏出力误差引起的损失,提高系统能效和可再生能源利用率。文献[84]将风电和光伏出力预测误差表征成为零均值的正态分布,构建含风、光、气、网联合供电、供热(冷)的多能源系统调度模型,并对“以热定电”和“以电定热”模式在夏冬季节的四种场景下进行对比分析。针对氢能综合能源系统,文献[85]通过分析光照强度变化的不确定性修正光伏出力预测结果,在此基础上对包含光伏、氢燃料电池、热电联产机组的多能源系统运行策略进行优化。

考虑源荷不确定性,文献[86]采用非参数核密度估计与概率场景抽样方法描述源荷不确定性,同时挖掘源网荷储各环节的调控潜力,建立综合能源系统随机优化运行模型。储能技术是应对不确定性可再生能源接入的重要手段,文献[87]在挖掘电/热储能灵活性与源荷不确定性关系的基础上,提出考虑可再生能源及多能负载不确定性的综合能源系统两阶段规划—运行联合优化方法。文献[88]采用混合整数区间线性规划方法,以区间值的形式表征运行优化结果,解决了系统中由于多能源耦合机组运行效率偏差引起的不确定性问题。

5.4 多目标运行优化及多主体博弈运行优化

能源系统运行优化需要综合考虑系统的经济、环保、能效及灵活性等多项指标,是典型的多目标优化问题^[89]。随着MCDES规模化发展和社会资本渗透,逐渐呈现多主体参与、多利益相关方相互博弈的状态,运行优化需要权衡多方关注的目标。文献[90]提出了由能源枢纽运营商、含光伏的用户集

群和储能运营商组成的多能互补微网系统运行交互机制和多主体主从博弈模型，并对考虑网络安全约束的多主体多能源系统优化运行方法进行了研究。针对多方参与主体的利益诉求，文献[91]以能源供应商、园区服务商各自收益最大和园区用户综合用能成本最小为目标，求解源荷双侧博弈的纳什均衡点，结果表明优化运行策略能够有效提高各主体的经济效益。

5.5 多能源系统运行优化求解

与系统规划类似，经典凸优化算法难以直接求解 MCDES 运行优化问题，需要通过简化构建混合整数(非)线性规划模型。但是过度简化模型难以准确描述能源网络静态特性及能源设备特性，无法得到可靠的调度策略。智能算法具有并行高效性、通用性以及鲁棒性等优势^[9]，广泛应用于多能源系统调度优化中，文献[92]将电热耦合系统的能量管理问题表述为转移概率未知的马尔科夫决策过程，采用深度 Q 学习网络对马尔科夫决策过程进行求解，通过自适应的对源荷随机波动做出响应，实现系统的能量优化管理。

6 多能互补分布式能源系统评价

合理评价 MCDES 对于能源规划、优化运行及发展应用具有重要意义，但可再生能源接入、异质能源耦合、多环节协调互动等特点为能源系统评价

带来巨大挑战。单一指标评价不能反应多能源系统综合性能，对 MCDES 进行评价应该遵循两项准则：1) 综合考虑气候、资源禀赋、能源消纳、储能容量、能源转换关联性等因素影响，构建多属性评价指标体系；2) 结合主客观评价方法及不确定性评价方法，构建科学全面的多准则综合评价方法^[93]。

6.1 多属性评价指标体系

科学系统的评价指标体系是保障系统评价结果可靠性的基础，基于文献调研，本文从系统能效、经济效益、环保效益、可靠及灵活性、社会效益及其他 5 项准则梳理 MCDES 多属性评价指标体系(图 5)。

能效评价能够反映对输入能源的有效利用程度，以一次能源消耗量为代表的系统综合能耗是最常用的能效评价指标，将不同能源折算为标准煤来衡量 MCDES 能源消耗水平。但能源消耗量无法用于比较不同的能源系统，因此定义无量纲的一次能源利用率和综合能源利用率等指标。基于能量分析的评价指标没有考虑能源品质的差异，热力学第二定律定义的系统焓效率弥补了这方面的不足，采用能质系数计算得到的综合能源利用率也能表征异质能源的品位差异^[94]。对比多能互补系统与传统供能系统，以热力学第一定律和热力学第二定律定义的节能率和焓节能率能够清晰表征多能互补系统在能效提升方面的优势^[95]。“能势匹配，梯级利用”

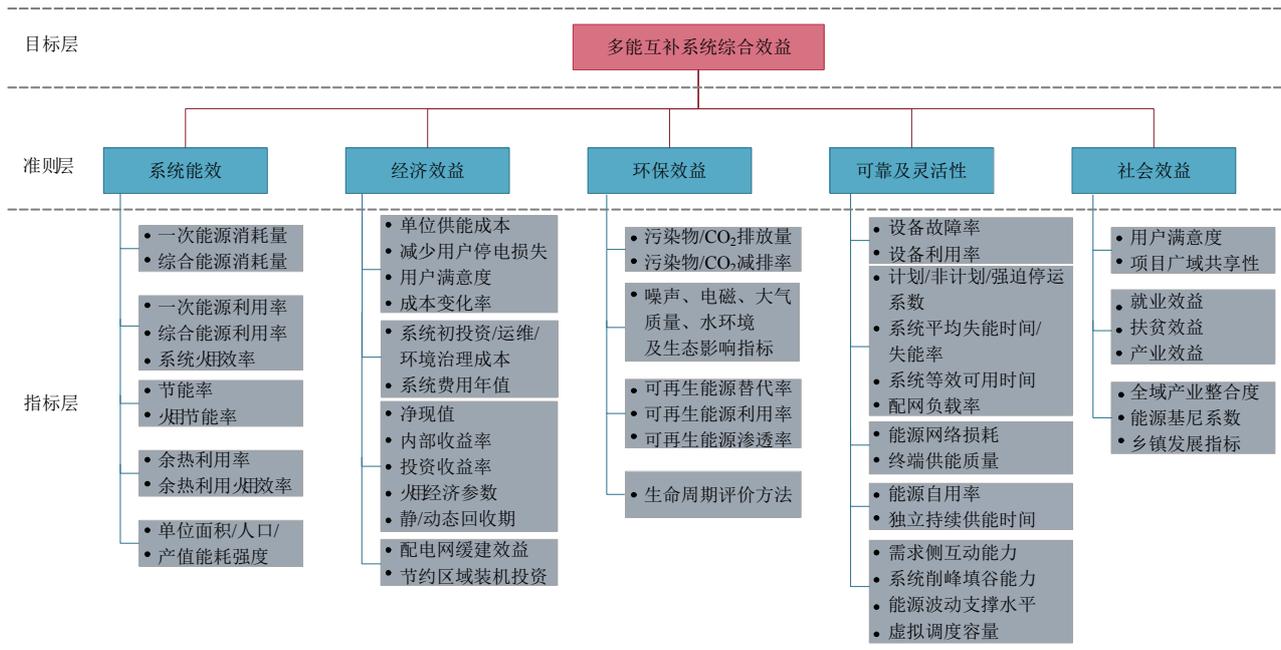


图 5 多能互补分布式能源系统多属性综合评价指标体系
 Fig. 5 Multi-attributes comprehensive evaluation index system of the multi-energy complementary distributed energy system

是提高系统综合能效的重要手段,余热利用率和余热利用焓效率^[96]能够评判多能互补系统中能源梯级利用水平。将系统评价范畴扩展至应用场景,结合供能面积、人口或产值等数据计算得到的能耗强度指标^[10]可以间接评估MCDES的项目经济投资效益。

经济效益是影响系统规划、运行优化及项目实施的关键因素,包括全生命周期成本费用、项目财务表现和系统运行经济性指标^[97]。多能源系统中多方参与主体通常关注不同的经济性评价指标,终端用户用能追求低成本和稳定性,可以通过单位供能成本、减少用户停电损失、用户满意度等指标衡量经济效益,此外还可以通过用能成本变化率描述多能互补系统与传统能源系统的差异性。从能源供应商角度来看,能源供应成本越低、亦或者项目收益越大越好,可以通过系统初投资、运行维护、环境治理成本、系统费用年值等指标衡量系统耗费的经济价值;也可采用净现值、内部收益率、投资收益率、焓经济系数^[98]、静/动态投资回收期等财务指标评估项目效益。从区域能源配置和基础设施来看,MCDES的建设带来的经济效益可以通过配电网缓建效益、节约区域装机投资等指标进行衡量。

碳中和背景下,考虑环保指标在综合评价中显得愈发重要,部分学者直接以 NO_x 、 SO_2 等污染物以及 CO_2 排放水平作为指标来衡量系统环境影响^[99]。考虑多能互补系统与分供系统差异性,减排率指标可用于评价系统减少废弃物和有害物排放情况。此外按照国家标准和规范定义噪声、电磁、大气质量、水环境及生态影响指标^[10]丰富了多属性评价指标体系。可再生能源利用能够提高系统环境友好性,定义可再生能源替代率/利用率/渗透率等指标衡量其环境影响。近年来生命周期分析方法(life cycle assessment, LCA)逐渐用于能源系统的环境评价中^[93],LCA需要对系统边界的能源、物质交换进行详细的清单分析,评价结果的可靠性严重依赖于数据支撑,但国内数据库建设起步较晚,数据主要来源于由四川大学和与亿科环境共同开发的中国生命周期基础数据库

多能互补系统中源荷不确定性对系统可靠性和灵活性提出了更高要求。系统可靠性需要综合考虑设备可靠性和供需不确定性^[100],前者可通过计及环境、时变、模式等多因素影响和设备故障率或设备利用率进行描述;后者可通过计划/非计划/强

迫停运系数^[96]、系统平均失能时间/失能率、系统等效可用时间、配网负载率等指标进行评估,同时网络损耗、供能质量^[97]及用户满意度也可以在一定程度上反映系统可靠性。MCDES按照运行模式可分为并网型和离网型,极端天气情况可能导致主网供能失灵,所以能源自用率与独立持续供能时间^[10]也是衡量系统可靠性的重要指标。灵活性是可再生能源接入及负荷多元化带来的新挑战,是描述系统通过多能互补、源荷互动及优化调度实现能源稳定供应的能力,可通过需求侧互动能力、系统主动削峰填谷能力、可再生能源波动支撑水平、虚拟调度容量等指标进行衡量^[10]。

能源系统是支撑社会稳定和经济发展的基础,具有巨大的社会效益,可通过用户满意度、企业形象、项目广域共享性、就业效率、扶贫效益等指标进行定性分析^[97]。例如就业效益指标可以衡量能源系统投资带来的就业机会,产业效益指标可以衡量能源消费对产业生产总值增长的影响。文献[101]以全域产业整合度指标评价小镇旅游业与新能源产业之间的协调整合程度。

6.2 多准则综合评价方法

多能互补分布式能源系统的评价指标体系因多主体参与、多目标优化等因素呈现复杂的多属性特征,需要采用综合评价方法对系统进行简洁直观的评价,为利益相关方和政策制定者提供参考。系统综合评价一般呈现多层次结构,首先根据安全、经济、能效、环保、社会等不同准则对多维指标进行分类,然后通过归一化、加权求和等手段对系统进行综合评价。归一化是无量纲处理过程,以历史标准、行业标准、经验标准等为基准,将具有不同属性的指标换算到可比范围内^[98]。指标的权重确定方法分为主观赋权法、客观赋权法和主客观相结合的综合赋权法,相应的评价方法也根据权重确定方法分为3种^[93]。

常见的主观评价方法包括专家评判法、层次分析法和模糊综合评价等,主观评价方法易受到评价过程随机性、专家主观倾向、工程经验等因素影响,结果主观性过强。常见的客观分析方法包括熵权法、优劣解距离法、主成分分析、数据包络分析和灰色关联分析等方法。为了确保评价结果的客观性,部分学者将不同客观评价方法进行组合,文献[102]基于信息熵权法和灰色关联分析对分布式能源系统中能源、经济和环境效益进行综合评价,

避免了评价过程中的主观赋值。但是客观评价方法过分依赖统计样本及数学定量分析,忽略了评价指标中存在的定性分析因素。

近年来,主客观相结合的组合评价方法逐渐成为多能源系统综合评价的发展趋势,能够最大限度减少数据信息损失,同时使评价结果更加贴近实际情况。文献[99]基于包含经济、能耗、环境因素的多属性指标体系,采用主客观相结合的层次分析法-熵权法确定指标权重,结合集对分析方计算方案贴近度评估分布式能源系统方案优劣。反熵权法是解决熵权法中极端权重问题的改进方法,针对优劣解距离法中权重计算不合理、评价结果逆排序和排序重叠等缺陷。

7 结语与展望

本文针对多能互补分布式能源系统集成研究中的若干问题,包括资源量化表征与多元能源需求预测、多能流建模、系统集成与规划、运行优化与主动能量调控、系统综合评价等进行了系统归纳,总结国内外研究成果与最新进展,并梳理了各部分研究内容之间的关系,提出多能互补分布式能源系统的一般性构架。多能互补分布式能源系统集成的研究和实践是涉及工程热力学、控制科学、化学化工、材料科学,以及能源管理等学科交叉和综合运用的极具挑战性的课题,目前国内外研究基本处于初级阶段,未来的研究任重而道远。对未来关键技术的展望如下:

1) 多重不确定性分析与建模。不确定性因素广泛存在于能源生产、转换、传输及消费等环节,不确定性分析方法需要统筹考虑可再生能源出力、设备运行状态、终端负荷需求等内部因素,以及气象条件、建筑布局、用户行为等外延因素影响。随着系统机理深度揭示、数据监测系统建设、以及人工智能算法提升,基于系统机理和数据驱动相结合的不确定性精确建模方法将是未来研究的重点。

2) 计及动态和时延特性的多能流建模。横向多能源互补和纵向“源网荷储”协同使多能互补分布式能源系统高度集成化,设备耦合使得系统内部多能流的时空分布规律极其复杂。在建模过程中充分考虑异质能源在电、热、化学过程中做功能力、转换效率、转化时间的差异性,对多能源系统进行精细化建模是未来的发展趋势。异质能源同质化是多能流建模的核心,探索遵循不同物理规律的多能

源形式之间的共性,开展标准化及自动化建模是未来研究的热点。

3) 创新能源系统集成设计和规划方法。基于多能源能势高低,逐级有序地转化利用可再生能源、燃料化学能和热能,构建新型高效多能互补分布式能源系统是系统集成研究的重点。如何在规划过程中考虑系统静态及时延特性、计量不确定性因素影响、权衡多方博弈的相关利益,构建可解的能源系统规划模型是未来亟待解决的问题。

4) 多时间尺度下多能源系统的智能调控方法。深度挖掘能源系统及关键设备的变工况特性,基于系统状态估计、模型预测控制和多目标优化技术,综合考虑多方博弈、设备特性、源荷波动等因素,从全工况性能最佳角度出发,构建多能互补分布式能源系统多时间尺度的主动能量调控方法是未来研究的方向。

5) 多属性多准则综合评价。多能互补分布式能源系统将由多方参与,各利益相关方的关注点不同,需要根据能效、经济、环保、安全和社会效益等多项准则构建多属性指标体系。通过标准化和加权等方法处理多属性指标间的差异性和相关性,避免客观数据信息缺失和保持主观因素影响的主客观相结合的组合评价方法是多能互补分布式能源系统综合评价的发展趋势。

参考文献

- [1] 金红光,何雅玲,杨勇平,等. 分布式能源中的基础科学问题[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 266-271.
JIN Hongguang, HE Yaling, YANG Yongping, et al. Basic scientific issues in distributed energy system[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(3): 266-271(in Chinese).
- [2] 杨勇平,段立强,杜小泽,等. 多能源互补分布式能源的研究基础与展望[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 281-288.
YANG Yongping, DUAN Liqiang, DU Xiaozhe, et al. Research foundation and prospect on distributed energy system with the complementation of multiple energy sources[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(3): 281-288(in Chinese).
- [3] 洪慧. 燃料化学能与物理能综合梯级利用的热力循环[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2004.
HONG Hui. Novel thermodynamic cycle with cascade utilization of chemical exergy and physical exergy of fossil fuel[D]. Beijing: Institute of Engineering

- Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2004(in Chinese).
- [4] 王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 84-95.
WANG Yongzhen, KANG Ligai, ZHANG Jing, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2021, 42(8): 84-95(in Chinese).
- [5] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10, 46.
AI Qian, HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10, 46(in Chinese).
- [6] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5(in Chinese).
- [7] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13(in Chinese).
- [8] 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(in Chinese).
- [9] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24(in Chinese).
- [10] 崔琼, 黄磊, 舒杰, 等. 多能互补分布式能源系统容量配置和优化运行研究现状[J]. 新能源进展, 2019, 7(3): 263-270.
CUI Qiong, HUANG Lei, SHU Jie, et al. Research status of capacity configuration and optimal operation for multi-energy complementary distributed energy system [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(3): 263-270(in Chinese).
- [11] 王永真, 张靖, 潘崇超, 等. 综合智慧能源多维绩效评价研究综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 207-225.
WANG Yongzhen, ZHANG Jing, PAN Chongchao, et al. Multi-dimensional performance evaluation index review of integrated and intelligent energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 207-225(in Chinese).
- [12] MA Weiwu, FANG Song, LIU Gang, et al. Modeling of district load forecasting for distributed energy system [J]. Applied Energy, 2017, 204: 181-205.
- [13] 何雅玲, 严俊杰, 杨卫卫, 等. 分布式能源系统中能量的高效存储[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 272-280.
HE Yaling, YAN Junjie, YANG Weiwei, et al. High efficient energy storage in distributed energy system [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(3): 272-280(in Chinese).
- [14] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [15] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8, 16.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8, 16(in Chinese).
- [16] 郑展, 张勇军. 电-气-热一体化混合能源系统研究评述与展望[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 98-110.
ZHENG Zhan, ZHANG Yongjun. Research comment and prospect of electricity-natural gas-heat integrated hybrid energy system[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 98-110(in Chinese).
- [17] 孟昌波, 马吉明, 杨建设. 风资源评估改进方法的研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 237-242.
MENG Changbo, MA Jiming, YANG Jianshe. Study on the improvement of wind resources assessment method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 237-242(in Chinese).
- [18] 龚莺飞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 光伏功率预测技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 140-151.
GONG Yingfei, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. An overview of photovoltaic energy system output forecasting technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 140-151(in Chinese).
- [19] 钱政, 裴岩, 曹利宵, 等. 风电功率预测方法综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1047-1060.
QIAN Zheng, PEI Yan, CAO Lixiao, et al. Review of wind power forecasting method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1047-1060(in Chinese).
- [20] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of Numerical Weather Prediction model output[J]. Applied Energy, 2012, 99: 154-166.
- [21] VACCARO A, BONTEMPI G, BEN TAIEB S, et al. Adaptive local learning techniques for multiple-step-

- ahead wind speed forecasting[J]. *Electric Power Systems Research*, 2012, 83(1): 129-135.
- [22] MEN Zhongxian, YEE E, LIEN F S, et al. Short-term wind speed and power forecasting using an ensemble of mixture density neural networks[J]. *Renewable Energy*, 2016, 87: 203-211.
- [23] FOLEY A M, LEAHY P G, MARVUGLIA A, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation[J]. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 1-8.
- [24] 修春波, 任晓, 李艳晴, 等. 基于卡尔曼滤波的风速序列短期预测方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 253-259.
- XIU Chunbo, REN Xiao, LI Yanqing, et al. Short-term prediction method of wind speed series based on Kalman filtering fusion[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 253-259(in Chinese).
- [25] CROONENBROECK C, DAHL C M. Accurate medium-term wind power forecasting in a censored classification framework[J]. *Energy*, 2014, 73: 221-232.
- [26] 王国权, 王森, 刘华勇, 等. 基于自适应的动态三次指数平滑法的风电场风速预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(15): 117-122.
- WANG Guoquan, WANG Sen, LIU Huayong, et al. Self-adaptive and dynamic cubic ES method for wind speed forecasting[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(15): 117-122(in Chinese).
- [22] TASICARAOGLU A, UZUNOGLU M. A review of combined approaches for prediction of short-term wind speed and power[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 34: 243-254.
- [28] CHITSAZ H, AMJADY N, ZAREIPOUR H. Wind power forecast using wavelet neural network trained by improved Clonal selection algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89: 588-598.
- [29] 叶林, 刘鹏. 基于经验模态分解和支持向量机的短期风电功率组合预测模型[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(31): 102-108.
- YE Lin, LIU Peng. Combined model based on EMD-SVM for short-term wind power prediction[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(31): 102-108(in Chinese).
- [30] 佟佳弘, 武志刚, 谢钰. 缺少气象数据场景下的超短期风电预测[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(3): 142-150.
- TONG Jiahong, WU Zhigang, XIE Yu. Ultra-short-term wind power forecasting in the absence of meteorological data[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2022, 34(3): 142-150(in Chinese).
- [31] 苗长新, 李昊, 王霞, 等. 基于数据驱动和深度学习的超短期风电功率预测[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(14): 22-29.
- MIAO Changxin, LI Hao, WANG Xia, et al. Data-driven and deep-learning-based ultra-short-term wind power prediction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(14): 22-29(in Chinese).
- [32] 陈志宝, 丁杰, 周海, 等. 地基云图结合径向基函数人工神经网络的光伏功率超短期预测模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 561-567.
- CHEN Zhibao, DING Jie, ZHOU Hai, et al. A model of very short-term photovoltaic power forecasting based on ground-based cloud images and RBF neural network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 561-567(in Chinese).
- [33] DIAGNE M, DAVID M, LAURET P, et al. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 65-76.
- [34] 赖昌伟, 黎静华, 陈博, 等. 光伏发电出力预测技术研究综述[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(6): 1201-1217.
- LAI Changwei, LI Jinghua, CHEN Bo, et al. Review of photovoltaic power output prediction technology [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6): 1201-1217(in Chinese).
- [35] 师浩琪, 郭力, 刘一欣, 等. 基于多源气象预报总辐照度修正的光伏功率短期预测[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(3): 104-112.
- SHI Haoqi, GUO Li, LIU Yixin, et al. Short-term forecasting of photovoltaic power based on total irradiance correction of multi-source meteorological forecast[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(3): 104-112(in Chinese).
- [36] 李丰君, 王磊, 赵健, 等. 基于天气融合和 LSTM 网络的分布式光伏短期功率预测方法[J/OL]. *中国电力*, 2022[2022-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20220217.0933.006.html>.
- LI Fengjun, WANG Lei, ZHAO Jian, et al. Research on distributed photovoltaic short-term power prediction method based on weather fusion and LSTM-net [J/OL]. *Electric Power*, 2022[2022-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20220217.0933.006.html>(in Chinese).
- [37] 方鹏, 高亚栋, 潘国兵, 等. 基于 LSTM 神经网络的中长期光伏电站发电量预测方法研究[J]. *可再生能源*, 2022, 40(1): 48-54.
- FANG Peng, GAO Yadong, PAN Guobing, et al. Research on forecasting method of mid-and long-term photovoltaic power generation based on LSTM neural Network [J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(1): 48-54(in Chinese).
- [38] 静铁岩, 吕泉, 郭琳, 等. 水电一风电系统日间联合调

- 峰运行策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 97-104.
JING Tiejian, LÜ Quan, GUO Lin, et al. An inter-day combined operation strategy of hydro and wind power system for regulating peak load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 97-104(in Chinese).
- [39] 孙永明, 袁振宏, 孙振钧. 中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J]. 可再生能源, 2006(2): 78-82.
SUN Yongming, YUAN Zhenhong, SUN Zhenjun. The status and future of bioenergy and biomass utilization in China[J]. Renewable Energy Resources, 2006(2): 78-82(in Chinese).
- [40] 汪集昉, 刘时彬, 朱化周. 21 世纪中国地热能发展战略[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 85-90, 94.
WANG Jiyang, LIU Shibin, ZHU Huazhou. Development strategy of China's geothermal energy in 21st century [J]. Electric Power, 2000, 33(9): 85-90, 94(in Chinese).
- [41] 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1115-1121.
HAN Zaisheng, RAN Weiyang, TONG Hongbing, et al. Exploration and evaluation of shallow geothermal energy[J]. Geology in China, 2007, 34(6): 1115-1121(in Chinese).
- [42] 史佳琪, 谭涛, 郭经, 等. 基于深度结构多任务学习的园区型综合能源系统多元负荷预测[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 698-706.
SHI Jiaqi, TAN Tao, GUO Jing, et al. Multi-task learning based on deep architecture for various types of load forecasting in regional energy system integration [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 698-706(in Chinese).
- [43] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 数据驱动的综合能源系统负荷预测综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7905-7923.
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of data-driven load forecasting for integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7905-7923(in Chinese).
- [44] 林世平. 燃气冷热电分布式能源技术应用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
LIN Shiping. Technology application manual for gas-fired combined cooling, heating, and power distributed energy system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014(in Chinese).
- [45] 马建鹏, 龚文杰, 张智晟. 基于 Copula 理论与 KPCA-GRNN 结合的区域综合能源系统多元负荷短期预测模型[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(3): 24-31.
MA Jianpeng, GONG Wenjie, ZHANG Zhisheng. Short-term multiple load prediction model for regional integrated energy system based on Copula theory and KPCA-GRNN[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(3): 24-31(in Chinese).
- [46] ZHANG Zhihui, JING Rui, LIN Jian, et al. Combining agent-based residential demand modeling with design optimization for integrated energy systems planning and operation[J]. Applied Energy, 2020, 263: 114623.
- [47] 赵峰, 孙波, 张承慧. 基于多变量相空间重构和卡尔曼滤波的冷热电联供系统负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 399-406.
ZHAO Feng, SUN Bo, ZHANG Chenghui. Cooling, heating and electrical load forecasting method for CCHP system based on multivariate phase space reconstruction and Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 399-406(in Chinese).
- [48] 栗然, 孙帆, 丁星, 等. 考虑多能时空耦合的用户级综合能源系统超短期负荷预测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4121-4131.
LI Ran, SUN Fan, DING Xing, et al. Ultra short-term load forecasting for user-level integrated energy system considering multi-energy spatio-temporal coupling [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4121-4131(in Chinese).
- [49] 朱刘柱, 王绪利, 马静, 等. 基于小波包分解与循环神经网络的综合能源系统短期负荷预测[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 133-140.
ZHU Liuzhu, WANG Xuli, MA Jing, et al. Short-term load forecast of integrated energy system based on wavelet packet decomposition and recurrent neural network[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 133-140(in Chinese).
- [50] 孙庆凯, 王小君, 张义志, 等. 基于 LSTM 和多任务学习的综合能源系统多元负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 63-70.
SUN Qingkai, WANG Xiaojun, ZHANG Yizhi, et al. Multiple load prediction of integrated energy system based on long short-term memory and multi-task learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 63-70(in Chinese).
- [51] PAN Yi, ZHENG Jianyong, YANG Yun, et al. An electricity load forecasting approach combining DBN-based deep neural network and NAR model for the integrated energy systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing(BigComp). Kyoto: IEEE, 2019.
- [52] 孙晓燕, 李家钊, 曾博, 等. 基于特征迁移学习的综合能源系统小样本日前电力负荷预测[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(1): 63-72.
SUN Xiaoyan, LI Jiazhao, ZENG Bo, et al. Small-sample day-ahead power load forecasting of integrated energy system based on feature transfer learning[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(1): 63-72(in Chinese).

- [53] WANG Bo, ZHANG Liming, MA Hengrui, et al. Parallel LSTM-based regional integrated energy system multienergy source-load information interactive energy prediction[J]. Complexity, 2019, 2019: 7414318.
- [54] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [55] 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6445-6462.
BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan, et al. Review and prospect of planning of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6445-6462(in Chinese).
- [56] HUANG Wujing, ZHANG Ning, YANG Jingwei, et al. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1452-1464.
- [57] SOROUDI A, MOHAMMADI-IVATLOO B, RABIEE A. Energy hub management with intermittent wind power [M]//HOSSAIN J, MAHMUD A. Large Scale Renewable Power Generation. Singapore: Springer, 2014.
- [58] KIENZLE F, AHČIN P, ANDERSSON G. Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 194-202.
- [59] MOHAMMADI M, NOOROLLAHI Y, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Energy hub: from a model to a concept - A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1512-1527.
- [60] WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Standardized matrix modeling of multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 257-270.
- [61] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4020.
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4020(in Chinese).
- [62] LV Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Optimal day-ahead operation of user-level integrated energy system considering dynamic behaviour of heat loads and customers' heat satisfaction[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(3): 320-326.
- [63] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33(in Chinese).
- [64] 殷爽睿, 艾芊, 曾顺奇, 等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1359-1369.
YIN Shuangrui, AI Qian, ZENG Shunqi, et al. Challenges and prospects of multi-energy distributed optimization for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1359-1369(in Chinese).
- [65] LI Tao, EREMIYA M, SHAHIDEHPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1817-1824.
- [66] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [67] LIU Xuezhi, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [68] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2951.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2951(in Chinese).
- [69] 顾伟, 陆帅, 姚帅, 等. 综合能源系统混合时间尺度运行优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 203-213.
GU Wei, LU Shuai, YAO Shuai, et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 203-213(in Chinese).
- [70] 陈群, 郝俊红, 陈磊, 等. 电-热综合能源系统中能量的整体运输模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 7-13, 69.
CHEN Qun, HAO Junhong, CHEN Lei, et al. Integral transport model for energy of electric-thermal integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 7-13, 69(in Chinese).
- [71] CHEN Dongwen, HU Xiao, LI Yong, et al. Nodal-pressure-based heating flow model for analyzing heating networks in integrated energy systems[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 112491.
- [72] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66-76.
CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10):

- 66-76(in Chinese).
- [73] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(一)支路模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 21-32.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis Theory of generalized electric circuit for multi-energy networks—part one branch model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32(in Chinese).
- [74] 陈彬彬, 孙宏斌, 吴文传, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(三): 稳态与动态潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4820-4830.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (III): steady and dynamic energy flow calculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4820-4830(in Chinese).
- [75] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 436-443.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443(in Chinese).
- [76] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142(in Chinese).
- [77] 黎静华, 黄玉金, 张鹏. 综合能源系统多能流潮流计算模型与方法综述[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 1-11.
LI Jinghua, HUANG Yujin, ZHANG Peng. Review of multi-energy flow calculation model and method in integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3): 1-11(in Chinese).
- [78] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3828.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828(in Chinese).
- [79] 张伟波, 谢玉荣, 杨帆, 等. 多能互补分布式综合供能系统及典型开发方案研究[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 245-251.
ZHANG Weibo, XIE Yurong, YANG Fan, et al. Research on multi-energy complementary distributed integrated energy supply system and typical development scheme [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 245-251(in Chinese).
- [80] 徐飞, 陈磊, 金和平, 等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 149-154.
XU Fei, CHEN Lei, JIN Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operation of pumped storage power station and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 149-154(in Chinese).
- [81] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳, 等. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 88-95.
XU Yujie, CHEN Haisheng, LIU Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 88-95(in Chinese).
- [82] 孟冰冰, 胡林献, 白雪峰, 等. 具有电转气功能的多能源系统消纳弃风效果分析[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 18-23.
MENG Bingbing, HU Linxian, BAI Xuefeng, et al. Analysis on wind power accommodation effect of multi-energy system with P2G function[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 18-23(in Chinese).
- [83] 潘振宁, 王克英, 瞿凯平, 等. 考虑大量EV接入的电—气—热多能耦合系统协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 104-112.
PAN Zhenning, WANG Keying, QU Kaiping, et al. Coordinated optimal dispatch of electricity-gas-heat multi-energy system considering high penetration of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 104-112(in Chinese).
- [84] 刘秀如. 多能互补集成优化系统分析与展望[J]. 节能, 2018, 37(9): 28-33.
LIU Xiuru. Analysis and prospect of multi-energy complementary system[J]. Energy Conservation, 2018, 37(9): 28-33(in Chinese).
- [85] 齐志远, 郭佳伟, 李晓焯. 基于联合概率分布的风光互补发电系统优化配置[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 203-209.
QI Zhiyuan, GUO Jiawei, LI Xiaoyang. Optimal configuration for wind power and solar power hybrid systems based on joint probability distribution of wind speed with solar irradiance[J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(1): 203-209(in Chinese).
- [86] 韩中合, 祁超, 丁敬, 等. 基于太阳能和生物质能的农村分布式供能系统研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3164-3171.
HAN Zhonghe, QI Chao, DING Jing, et al. Research on

- distributed energy supply system based on solar energy and biomass energy in rural area[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2019, 40(11): 3164-3171(in Chinese).
- [87] 郭烈锦, 赵亮. 基于可再生能源的分布式多目标供能系统(二)[J]. *西安交通大学学报*, 2002, 36(5): 446-451. GUO Liejin, ZHAO Liang. Distributed multi-objectives power system based on renewable energy(2)[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(5): 446-451(in Chinese).
- [88] 孔慧, 郝勇, 王宏圣, 等. 太阳能高温热化学与甲烷互补的多联产系统[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(4): 691-697. KONG Hui, HAO Yong, WANG Hongsheng, et al. A solar thermochemical polygeneration system integrated with methane[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(4): 691-697(in Chinese).
- [89] 许达, 刘启斌, 隋军, 等. 太阳能与甲醇热化学互补的分布式能源系统研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(9): 1601-1605. XU Da, LIU Qibin, SUI Jun, et al. Research on distributed energy system with solar-methanol thermochemical hybridization[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(9): 1601-1605(in Chinese).
- [90] 王江江, 付超. 太阳能与甲烷化学链燃烧耦合的冷热电联产系统[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(12): 3263-3269. WANG Jiangjiang, FU Chao. Solar-hybrid combined cooling heating and power system integrated with methane chemical looping combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(12): 3263-3269(in Chinese).
- [91] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(22): 5669-5681. WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22): 5669-5681(in Chinese).
- [92] 黄武靖, 张宁, 董瑞彪, 等. 多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5425-5437. HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5425-5437(in Chinese).
- [93] WANG Yi, ZHANG Ning, ZHUO Zhenyu, et al. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: starting from scratch[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1141-1150.
- [94] ZHANG Xiaping, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [95] 管霖, 陈鹏, 唐宗顺, 等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 2934-2941. GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2934-2941(in Chinese).
- [96] 熊文, 刘育权, 苏万煌, 等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(1): 118-126. XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(1): 118-126(in Chinese).
- [97] 任洪波, 徐佩佩, 吴琼. 分布式热电联产系统规划设计理念与方法探析[J]. *电网技术*, 2018, 42(3): 722-729. REN Hongbo, XU Peipei, WU Qiong. Theory and method of planning and design of distributed combined heat and power system[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 722-729(in Chinese).
- [98] 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, 139. 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, 139(in Chinese).
- [99] LI Chengzhou, YANG Yongping, WANG Zhuo, et al. Energy hub-based optimal planning for integrated energy systems considering part-load characteristics and synergistic effect of equipment[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(2): 169-183.
- [100] LI Chengzhou, WANG Ningling, WANG Zhuo, et al. Energy hub-based optimal planning framework for user-level integrated energy systems: considering synergistic effects under multiple uncertainties [J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118099.
- [101] 白牧可, 唐巍, 吴聪, 等. 基于热网-电网综合潮流的用户侧微型能源站及接入网络优化规划[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 84-93. BAI Muke, TANG Wei, WU Cong, et al. Optimal planning based on integrated thermal-electric power flow for user-side micro energy station and its integrating network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 84-93(in Chinese).
- [102] LU Xiaojun, WANG Jun, LIU Gang, et al. 'Station-

- and-network - coordinated planning of integrated energy system considering integrated demand response [J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 39-47.
- [103] LIU Xiaou. Energy station and distribution network collaborative planning of integrated energy system based on operation optimization and demand response [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(6): 4888-4909.
- [104] 陈娟, 黄元生, 鲁斌. 区域能源互联网"站-网"布局优化研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(3): 675-684. CHEN Juan, HUANG Yuansheng, LU Bin. Research on "stations-pipelines" layout and optimization of regional energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(3): 675-684(in Chinese).
- [105] 刘洪, 郑楠, 葛少云, 等. 考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 52-64. LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 52-64(in Chinese).
- [106] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 80: 219-239.
- [107] YAN Ruijing, WANG Jiangjiang, LU Shuaikang, et al. Multi-objective two-stage adaptive robust planning method for an integrated energy system considering load uncertainty[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 235: 110741.
- [108] WANG Meng, YU Hang, LIN Xiaoyu, et al. Comparing stochastic programming with posteriori approach for multi-objective optimization of distributed energy systems under uncertainty[J]. *Energy*, 2020, 210: 118571.
- [109] JING Rui, ZHU Xingyi, ZHU Zhiyi, et al. A multi-objective optimization and multi-criteria evaluation integrated framework for distributed energy system optimal planning[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 166: 445-462.
- [110] GUO Li, LIU Wenjian, CAI Jiejun, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 74: 433-445.
- [111] YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A multi-objective collaborative planning strategy for integrated power distribution and electric vehicle charging systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1811-1821.
- [112] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(13): 63-69, 98. WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(13): 63-69, 98(in Chinese).
- [113] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(7): 2-13. CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(7): 2-13(in Chinese).
- [114] 胡源, 别朝红, 李更丰, 等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 45-53. HU Yuan, BIE Zhaohong, LI Gengfeng, et al. Integrated planning of natural gas network and composite power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 45-53(in Chinese).
- [115] MOTAMEDIA, ZAREIPOUR H, BUYGI M O, et al. A transmission planning framework considering future generation expansions in electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(4): 1987-1995.
- [116] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(1): 2-14. YANG Ting, ZHAO Liyuan, WANG Chengshan. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1): 2-14(in Chinese).
- [117] MAGO P J, HUEFFED A K. Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(10): 1628-1636.
- [118] PANTALEO A M, CAMPOREALE S, SHAH N. Natural gas - biomass dual fuelled microturbines: comparison of operating strategies in the Italian residential sector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(2): 686-696.
- [119] 伊放. 计及变工况特性的园区综合能源系统规划研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020. YI Fang. Research on optimal configuration of the park-level integrated energy system considering off-design characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2020(in Chinese).
- [120] GUAN Tingting, LIN Haiyang, SUN Qie, et al. Optimal configuration and operation of multi-energy

- complementary distributed energy systems[J]. *Energy Procedia*, 2018, 152: 77-82.
- [121] PETKOV I, GABRIELLI P. Power-to-hydrogen as seasonal energy storage: an uncertainty analysis for optimal design of low-carbon multi-energy systems [J]. *Applied Energy*, 2020, 274: 115197.
- [122] MOHAMMADI M, NOOROLLAHI Y, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs - A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 89: 33-50.
- [123] CHICCO G, MANCARELLA P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization[J]. *Energy*, 2009, 34(3): 261-273.
- [124] AYELE G T, HAURANT P, LAUMERT B, et al. An extended energy hub approach for load flow analysis of highly coupled district energy networks: illustration with electricity and heating[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 850-867.
- [125] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 113-120, 141.
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with cchp and energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 113-120, 141(in Chinese).
- [126] 张淑婷, 陆海, 林小杰, 等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. *高电压技术*, 2021, 47(1): 93-101.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 93-101(in Chinese).
- [127] 于雪风, 徐桂芝, 刘其辉, 等. 含电转气及电转热的园区综合能源系统建模与优化运行[J]. *电力需求侧管理*, 2020, 22(1): 58-63, 80.
YU Xuefeng, XU Guizhi, LIU Qihui, et al. Modeling and optimal scheduling of integrated energy system for parks including power to gas and power to heat[J]. *Power Demand Side Management*, 2020, 22(1): 58-63, 80(in Chinese).
- [128] 施泉生, 丁建勇, 刘坤, 等. 含电、气、热 3 种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 269-276, 293.
SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 269-276, 293(in Chinese).
- [129] 李宏仲, 房宇娇, 肖宝辉. 考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3130-3138.
LI Hongzhong, FANG Yujiao, XIAO Baohui. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3130-3138(in Chinese).
- [130] 姚帅, 顾伟, 张雪松, 等. 热网特性对于综合能源系统超短期调度的影响[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 83-90.
YAO Shuai, GU Wei, ZHANG Xuesong, et al. Effect of heating network characteristics on ultra-short-term scheduling of integrated energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 83-90(in Chinese).
- [131] 朱承治, 陆帅, 周金辉, 等. 基于电-热分时间尺度平衡的综合能源系统日前经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(6): 138-143, 151.
ZHU Chengzhi, LU Shuai, ZHOU Jinhui, et al. Day-ahead economic dispatch of integrated energy system based on electricity and heat balance in different time scales[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(6): 138-143, 151(in Chinese).
- [132] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(23): 6791-6803.
WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6791-6803(in Chinese).
- [133] 王磊, 周建平, 朱刘柱, 等. 基于分布式模型预测控制的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(13): 57-65.
WANG Lei, ZHOU Jianping, ZHU Liuzhu, et al. Multi-time-scale optimization scheduling of integrated energy system based on distributed model predictive control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(13): 57-65(in Chinese).
- [134] 刘玉奇, 臧传治, 王悦, 等. 基于随机经济模型预测控制的电热综合能源系统运行优化[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(7): 14-21.
LIU Yuqi, ZANG Chuanzhi, WANG Yue, et al. Optimal operation of electricity-heating integrated energy system based on stochastic economic model predictive control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(7): 14-21(in Chinese).

- [135] 刘志欣, 程林, 周章, 等. 基于场景聚类分析的综合能源系统鲁棒运行策略[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(10): 9-19.
LIU Zhixin, CHENG Lin, ZHOU Zhang, et al. Robust operation strategy of multi-energy system based on scenario clustering analysis[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(10): 9-19(in Chinese).
- [136] 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.
PAN Hua, LIANG Zuofang, XIAO Yuhan, et al. Optimal operation of regional integrated energy system under multiple scenes[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 484-492(in Chinese).
- [137] 韩子娇, 李正文, 张文达, 等. 计及光伏出力不确定性的氢能综合能源系统经济运行策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 99-106.
HAN Zijiao, LI Zhengwen, ZHANG Wenda, et al. Economic operation strategy of hydrogen integrated energy system considering uncertainty of photovoltaic output power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 99-106(in Chinese).
- [138] 祁晓敏, 孔力, 熊煌, 等. 源荷储协调的冷热电综合能源系统随机优化运行[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(3): 10-21.
QI Xiaomin, KONG Li, XIONG Huang, et al. Stochastic optimal operation of integrated cooling, heating and power energy system considering coordination of source-load-storage[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(3): 10-21(in Chinese).
- [139] 雷金勇, 郭祚刚, 陈聪, 等. 考虑不确定性及电/热储能的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 169-175.
LEI Jinyong, GUO Zuogang, CHEN Cong, et al. Two-stage planning-operation co-optimization of IES considering uncertainty and electrical / thermal energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 169-175(in Chinese).
- [140] 蒋超凡, 艾欣. 计及多能耦合机组不确定性的综合能源系统运行优化模型研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2843-2852.
JIANG Chaofan, AI Xin. Integrated energy system operation optimization model considering uncertainty of multi-energy coupling units[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2843-2852(in Chinese).
- [141] JU Liwei, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, 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.
- [142] 王杰, 刘念. 多主体综合能源系统分布式优化运行方法[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 98-104, 115.
WANG Jie, LIU Nian. Distributed optimal operation method of integrated energy system with multi-agents [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 98-104, 115(in Chinese).
- [143] 顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3119-3129.
GU Jie, BAI Kaifeng, SHI Yajun. Optimized operation of regional integrated energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3119-3129(in Chinese).
- [144] 赵鹏翔, 李振, 王楠, 等. 基于源荷双侧主从博弈的园区综合能源系统运行优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 109-116, 122.
ZHAO Pengxiang, LI Zhen, WANG Nan, et al. Operation optimization strategy for district integrated energy system based on stackelberg game between supply and demand sides[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9): 109-116, 122(in Chinese).
- [145] 王新迎, 赵琦, 赵黎媛, 等. 基于深度 Q 学习的电热综合能源系统能量管理[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 10-18.
WANG Xinying, ZHAO Qi, ZHAO Liyuan, et al. Energy management approach for integrated electricity-heat energy system based on deep Q-learning network [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 10-18(in Chinese).
- [146] 李振, 赵鹏翔, 王楠, 等. 基于强化学习的园区综合能源系统多主体运行优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(12): 60-68.
LI Zhen, ZHAO Pengxiang, WANG Nan, et al. Multi-agent operation optimization of district integrated energy system based on reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(12): 60-68(in Chinese).
- [147] 王庆刚, 杨谋存, 朱跃钊, 等. 可再生能源多能互补热电气联产系统评价方法综述[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 937-950.
WANG Qinggang, YANG Moucun, ZHU Yuezhao, et al. Review on evaluation methods of combined heating, power and biogas system coupled with renewable energy[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 937-950(in Chinese).
- [148] 张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3706-3713.

- ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3706-3713(in Chinese).
- [149] 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, 64.
- 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, 64(in Chinese).
- [150] 徐聪, 刘泰秀, 隋军, 等. 多能源热互补分布式能源系统的节能率评价方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 151-157.
- XU Cong, LIU Taixiu, SUI Jun, et al. Evaluation method for energy saving ratio of distributed energy system with multi-energy thermal complementarity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 151-157(in Chinese).
- [151] 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).
- [152] 屈小云, 吴鸣, 李奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153-163.
- QU Xiaoyun, WU Ming, LI Qi, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 153-163(in Chinese).
- [153] 白树伟, 甘中学. 分布式能源系统综合评价方法及评价指标体系[J]. 煤气与热力, 2016, 36(1): 31-36.
- BAI Shuwei, GAN Zhongxue. Comprehensive evaluation method and evaluation index system of natural gas distributed energy system[J]. Gas & Heat, 2016, 36(1): 31-36(in Chinese).
- [154] 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): 3214-3222.
- DONG Fugui, ZHANG Ye, SHANG Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214-3222(in Chinese).
- [155] 李更丰, 黄玉雄, 别朝红, 等. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 12-21.
- LI Gengfeng, HUANG Yuxiong, BIE Zhaohong, et al. Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 12-21(in Chinese).
- [101] 黄伟, 杨子力, 柳思岐. 基于物元可拓模型的特色小镇能源系统综合评价[J]. 现代电力, 2020, 37(5): 448-455.
- HUANG Wei, YANG Zili, LIU Siqi. Comprehensive energy system evaluation of new energy featured towns based on matter-element extension model[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(5): 448-455(in Chinese).
- [157] 金璐, 何伟, 闫华光, 等. 基于改进 TOPSIS 的乡镇综合能源系统效益综合评价方法[J/OL]. 电测与仪表, 2022[2022-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210429.1417.020.html>.
- JIN Lu, HE Wei, YAN Huaguang, et al. Comprehensive evaluation method for benefits of township integrated energy system based on improved TOPSIS [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022 [2022-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210429.1417.020.html>(in Chinese).
- [158] 蒋润花, 曾蓉, 李洪强, 等. 考虑气候条件及建筑类型等因素的分布式冷热电三联产系统的多目标优化及评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3206-3213.
- JIANG Runhua, ZENG Rong, LI Hongqiang, et al. Multi-objective optimization and evaluation of distributed cchp system considering influence of climate condition and building type[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3206-3213(in Chinese).
- [159] 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).



李承周

在线出版日期: 2022-09-22。

收稿日期: 2022-03-22。

作者简介:

李承周(1994), 男, 博士研究生, 主要从事分布式能源系统规划、固体氧化物燃料电池 BOP 组件一体化设计、电力生产大数据的研究, chengzhou_li@ncepu.edu.cn;

王宁玲(1975), 女, 工学博士, 副教授, 主要从事电力生产大数据、火电机组过程节能理论与数据挖掘方法的研究工作, epower2004@163.com。

(实习编辑 张文鑫)