

面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力评估与优化: 关键问题与研究架构

司方远¹, 张宁^{1*}, 韩英华², 窦真兰³, 董启环¹, 康重庆¹

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084; 2. 东北大学秦皇岛分校, 河北省 秦皇岛市 066004; 3. 国网上海市电力公司, 上海市 浦东新区 200023)

Fundamental Problems and Research Framework for Assessment and Optimization of the Functional Regulation Capacity of the Regional Integrated Energy System Under the Aggregation of Diversified and Flexible Resources

SI Fangyuan¹, ZHANG Ning^{1*}, HAN Yinghua², DOU Zhenlan³, DONG Qihuan¹, KANG Chongqing¹

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

2. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China;

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200023, China)

ABSTRACT: The regional integrated energy system (RIES) integrates and coordinates diversified and flexible resources to maintain local multi-energy supply-demand balance, optimize the adjustable capacity, realize cross-regional energy complementarity, and improve energy utilization efficiency by sharing the adjustable capacity. It plays an essential role in deeply mining the adjustable potential of massive users and giving full play to the value of system flexibility. First, this paper analyzes the driving force and barriers to building RIES under the aggregation of diversified and flexible resources and systematically reviews the existing research. Then, based on the current research clues, the critical problems of the RIES are analyzed from three aspects: in-depth mining of the spatio-temporal dynamic evolution of the functional regulation capacity of the RIES, optimization of the functional regulation capacity of complex nonlinear dynamic RIES, and optimal coordination of multiple RIES clusters. On this basis, the research framework of the RIES under the aggregation of diversified and flexible resources is proposed from three key issues that jointly affect the stable and economical operation, namely, the assessment of the functional regulation capability, the autonomous coordination and optimization, and the collaborative cluster control of the RIES. Finally, the critical research contents are analyzed and elaborated.

KEY WORDS: regional integrated energy system; flexibility; functional regulation capacity; energy sharing; uncertainty; distributed optimization

摘要: 区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)通过对多元灵活资源的整合与协调, 在本地多能源供需平衡的基础上优化可调节能力, 进而通过共享可调节量实现跨区域能量互济, 有望提升能源利用效率, 在深入挖掘海量用户可调节潜力, 充分发挥系统灵活性价值方面发挥着重要作用。该文首先系统分析多元灵活资源聚合下构建 RIES 的驱动力和瓶颈, 对现有研究概况进行综述。基于当前研究路径, 从 RIES 主动调节能力时空动态演变规律深度挖掘、复杂非线性动态 RIES 主动调节能力优化、多 RIES 集群分布式最优协调 3 个方面, 分析 RIES 研究过程中的关键问题。在此基础上, 从 RIES “主动调节能力评估、自治协调优化、集群协同控制” 3 个共同影响系统经济稳定运行的重点问题提出多元灵活资源聚合下 RIES 的研究架构, 并对关键研究内容进行分析 and 阐述。

关键词: 区域综合能源系统; 灵活性; 主动调节能力; 能量共享; 不确定性; 分布式优化

0 引言

近年来, 以风电、光伏为代表的新能源行业得到迅猛发展。据统计, 2021 年全国发电装机容量约 23.8 亿 kW, 同比增长 7.9%。其中, 风电装机容量约 3.3 亿 kW, 同比增长 16.6%; 太阳能发电装机

基金项目: 国家电网公司科技项目(5100-202199519A-0-5-ZN)。

Science and Technology Project of the State Grid Corporation of China (5100-202199519A-0-5-ZN).

容量约 3.1 亿 kW, 同比增长 20.9%^[1]。然而, 我国当前的能源结构仍以火电为主^[2], 快速、灵活、低碳的调节资源相对不足, 难以有效应对大规模、间歇性新能源接入带来的系统稳定运行和供需平衡等方面的挑战, 仅依赖单一能源系统(如电力系统)有限的调节资源来维持系统能源安全供应的方式逐渐难以为继。构建综合能源系统(integrated energy systems, IES)是用能侧结构形态的演化趋势^[3], 并逐渐成为提高综合能源效率, 消纳新能源, 解决供需平衡问题的重要手段^[4]。

目前, 关于 IES 并没有明确的官方统一定义, 一般指一定区域内煤炭、石油、天然气、电能、热能等多种能源在生产、传输、转换、存储和消费等多个环节跨能源形式、多时空尺度的协调系统。与传统电力系统相比, IES 的“综合”主要表现为以下几个方面:

1) 能源供给结构由可控连续出力的燃煤机组装机占主导, 向强不确定性、弱可控性出力的新能源发电装机占主导, 多种可控机组快速灵活调节的模式转变;

2) 负荷特性由传统的单一性、刚性和纯消费性向多元化、柔性、生产与消费兼具性转变;

3) 能源网络形态由传统单向、逐级输配电向双向、多能流的多能源网络(包括电力网络、热力管网和天然气管网等)协同转变;

4) 运行特性由传统电力系统“源随荷动”供需平衡调节模式、大电网一体化控制模式向跨能源形式源、网、荷、储多环节协调互动模式、多区域自治协同控制模式转变。

相应的, IES 的优势主要体现在以下 2 个方面:

1) IES 通过能量枢纽和多能源网络整合冷热电联产、分布式发电、储能、能源转换设备等可控机组。其中, 能量枢纽是 IES 的重要组成部分, 由可控的冷热电联产、分布式发电、储能和能源转换等设备构成, 利用相关设备参数构建多能源耦合矩阵, 从而可以描述 IES 能源转换环节一次能源输入和多能源输出间的映射关系。能量枢纽中灵活的多能源转换、存储以及快速的爬坡调节能力可以有效平抑新能源出力的间歇性和波动性, 并以此消纳更多新能源出力, 满足多样化的能源需求, 从而进一步提升系统多能源供需平衡能力;

2) IES 充分利用相对低碳、高效的天然气资源逐步取代碳排放量更高的其他化石能源, 具有良好

的环境效益。因此, 发展并构建 IES 有助于推动能源从生产、传输、转换、存储到消费的全环节协调互动与多能互补^[5], 在提升系统运行灵活性, 缓解时段性能源短缺, 促进新能源消纳等方面发挥着重要作用, 是助力我国能源结构优化调整, 实现碳中和目标的重要途径^[6]。

1 区域综合能源系统运营模式

目前, IES 项目主要面向大型能源企业或运营商进行规划和实施, 其基本架构如图 1 所示。然而, 大量具有自产自消、多能互补、多能存储和需求响应潜力但单体可调节容量无法达到系统调节准入量级的中小型用户灵活资源未能被有效利用。为了将这些分散的用户侧灵活资源整合纳入到 IES 优化调度运行中, 本文重点研究城市范围内以智慧能源小镇、智慧社区、工业园区等为主体的区域综合能源系统(regional integrated energy systems, RIES)协调优化问题^[7-8]。

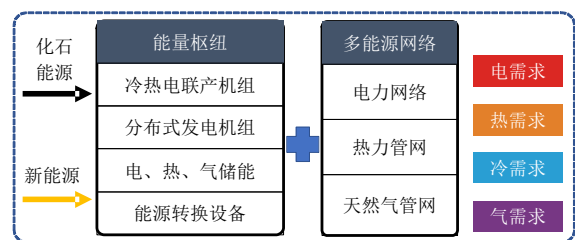


图 1 IES 基本结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic structure of the IES

如图 2 所示, RIES 利用信息-物理融合的技术手段通过信息互联网和多能源网络聚合园区内包括中小型用户(如工业用户、商业用户和居民用户)等的可调节灵活资源, 通过促进园区级多能互补、高度自治和能量共享等方式为全面提高综合能源利用效率和新能源消纳能力提供了新的思路和有力支撑^[9]。具体而言, RIES 信息系统作为决策主体主要包含 RIES 能源管理系统子站, 负责与其他 RIES 能源管理系统子站通信, 存储本地量测终端反馈的 RIES 物理系统各环节运行数据, 并根据最小化本地运行成本制定运行与控制策略下发至控制终端。其中, 控制终端和量测终端分布于 RIES 物理系统的源、网、储、荷各个环节, 是 RIES 信息-物理交互的关键要素。

RIES 物理系统由源、网、储、荷 4 个主要环节构成, 各个环节均包含具有不同调节特性和运行与控制边界的灵活资源, 各类灵活资源及特性如表 1 所示。这里将 RIES 灵活性资源定义为在

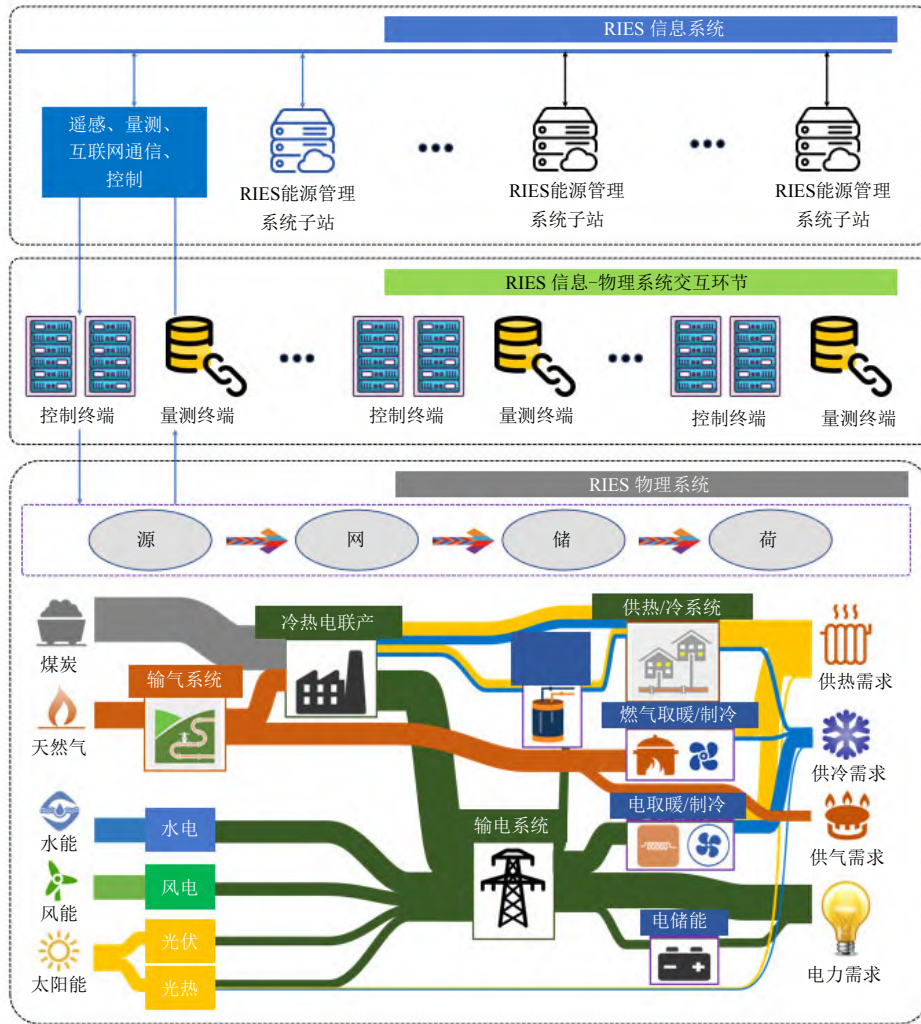


图 2 RIES 的信息-物理交互示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cyber-physical interaction of the RIES

表 1 各类型灵活资源的调节特性及运行与控制边界

Table 1 Regulation characteristics and operation boundaries of flexible resources

环节	灵活资源	调节特性	运行与控制边界
源	新能源机组(风电、光伏、光热、水电等)	间歇性、弱可控性(水电丰、枯水期)	机组出力边界
	燃料机组(热电联产、燃煤机组、燃气机组等)	可控性强、响应速度快	机组出力边界、爬坡能力、启停
网	多能源网络(输/配电网、热力管网、天然气管网)	可控性强、电网响应快、热/气管网迟滞性	节点电压、温度、气压边界
储	多能源存储(蓄电池、储热、储气等)	可控性强、蓄电池响应快、储热/气迟滞性	储能充放及速率、存储容量边界
荷	多能源负荷(电、热、冷、气等负荷)	需求响应特性、多能互补特性	多能源负荷可响应边界

一定经济运行条件下，对多能源供应或负荷大幅波动具有自主快速响应能力的资源。具体而言，RIES 源侧灵活资源包括新能源机组(风电、光伏、光热、水电等)和燃料机组(热电联产、燃煤机组、燃气机组等)，但二者调节特性存在显著差别：新能源机组因风、光等不确定性而表现出间歇性出力和弱可控性，其中水电存在丰水期和枯水期，呈现季节性差异；相反，燃料机组具有可控性强、响应速度快等优势，在运行与控制过程中除受机组出力边界约束外，还受爬坡、启停等约束。RIES 网侧灵活资源

主要包括输/配电网、热力管网和天然气管网，其控制环节主要由电力电子设备执行，可控性强。然而，区别于输/配电网的调节特性，媒介在热力管网和天然气管网的传输过程存在时延，导致热力管网和天然气管网的调节呈现显著的迟滞性。受线路/管道传输容量限制，多能源网络的运行与控制边界可进一步等效为节点电压、节点温度、和节点气压等的调节边界。特别地，RIES 强调充分利用相对低碳、高效的天然气资源逐步取代碳排放量更高的其他化石能源，而天然气管网是天然气输送和利用的主

要载体,与源侧燃气轮机发电、燃气锅炉供热、天然气热电联产以及用户侧天然气负荷等在时间尺度和空间尺度上密切关联,天然气管网动态特性同时影响着输/配电网、供热管网等的运行,对于保障RIES运行经济性、能源供给安全性以及能源效率提升具有重要作用。RIES储能侧灵活资源主要包括蓄电池、储热和储气等,其对多能源的调节特性与多能源网络中的调节特性相对应,运行与控制边界可进一步等效为多能源存储的充放速率及存储容量边界。RIES负荷侧灵活资源主要包括电、热、冷、气等多能源负荷,用户为应对不同能源价格可灵活调整用能计划及用能方式,因此多能源负荷呈现出显著的需求响应特性和多能互补特性,在多能源负荷可响应边界范围内具有一定程度的可控性。

作为一种多元灵活资源整合调用的运行模式,RIES对于深度挖掘海量灵活资源的重要价值已经得到了广泛的认可^[10-12]。有学者也对RIES运行模式和基本架构进行了分析与探讨^[13-14]。然而综合前期的相关研究来看,在国内推广RIES运行模式的局限性在于:现阶段国内专门针对RIES的理论研究有待进一步完善,相关技术实践与西方发达国家相比还存在一定差距。其主要原因在于现阶段国内综合能源基础设施资源相对匮乏,多能源运营商相对独立运行,缺乏统筹协调,无序的多能互补导致能源浪费现象严重,尚不能达到预期的能效和经济效益。另一方面,终端一体化集成供能项目接入电网的相关技术标准有待进一步完善,接入系统配置要求不明确,缺乏验收依据,导致并网后的系统运行存在安全隐患。此外,现阶段能源的价格机制尚不成熟,相关能源价格暂无明确的核定依据,多种能源价格补贴错综复杂,且综合能源市场化交易机制尚不完善,负荷聚合规则不明,导致终端用户主体的经济利益难以保障,综合需求响应参与度不高,节能增效贡献不足。因此,我国推广RIES及多个RIES协同必须处理好上述问题。

在国内推广RIES运行模式具有较强的必要性:我国开展RIES的潜力十分巨大,例如2021年我国工业用户和城乡居民用户用电总量分别为55090亿kW·h和11743亿kW·h,如果工业负荷和居民负荷中仅有1%的可调节灵活资源(储能、需求响应等)参与RIES,按5%的平均负荷削减率来估算,共可削减约33亿kW·h电力负荷,相当于一台装机容量为100万kW火电机组的全年发电量,则

可节省燃煤约2亿t,实现碳减排约5.4亿t。而目前我国仍有大量用户侧“沉睡”资源有待被“唤醒”,因此非常有必要通过RIES深度挖掘海量用户的灵活性。

在国内推广RIES运行模式也已具备一定的可行性:在硬件设施方面,我国自2017年建设首批多能互补集成优化示范工程以来^[15],结合智能电网技术逐步建设了一批多层次、规模不等的综合能源基础设施,给RIES工作开展和海量用户灵活资源的挖掘营造了良好的硬件环境和技术支撑;在政策支持方面,推进综合能源服务已在全国各省、市、区县引起高度重视,国家能源局2022年全国能源工作会议中提到,在能源创新领域要积极推动综合智慧能源服务新模式^[16],为RIES产业发展注入了新的活力。在此基础上,为进一步加快综合能源产业推广,必须针对RIES优化运行过程中面临的一系列难题展开深入的理论研究。

RIES通过多能互补、高度自治和能量共享等方式提高综合能源利用效率,其基本运行模式是:通过对区域内分布式发电、冷热电联产、储能、多能源转换设备以及多能源负荷等灵活资源进行整合与协调,在确保本地多能源供需平衡的基础上进一步优化剩余可调节能力,然后根据可调节能力的大小向邻近RIES请求能量互济(包括电、热、天然气等多种形式能源),如图3所示,其本质是通过共享“可调节量”来提高整体的能源利用效率。其中,多元灵活资源以及不同RIES主体的聚合需要满足公平性、合理性以及隐私性等准则。具体而言,公平性准则要求对不同功率(为方便对能量聚合的表征和计算,不同形式的能源以功率kW为单位进行统一换算)调节容量的灵活资源或RIES主体的功率分配应与其自身功率调节容量成正比。合理性准则要求充分尊重灵活资源或RIES主体的自主决策权,即功率分配不应影响每个资源自身的正常运行需求。隐私性准则要求灵活资源或RIES主体的运行状态等敏感信息不应被其他资源或RIES主体直接获取。不同聚合准则下RIES的可调节能力不同。此外,在上述聚合准则共同作用下,不同RIES主体因各自灵活资源配置、多能源供需平衡状态的不同,其可调节能力也存在较大差异,这也给不同RIES主体间信息能量交互和优势互补创造了先决条件。在此基础上,作为多元灵活资源整合调用的运行模式,RIES在优化运行过程中需要开展如下

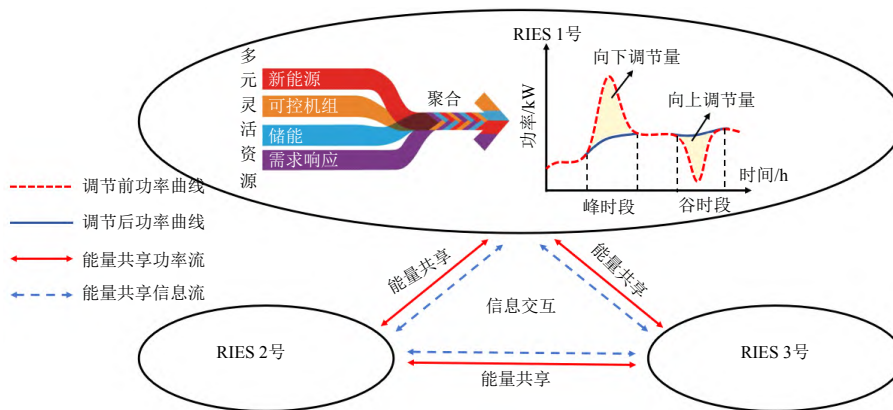


图 3 RIES 主动调节能力及集群能量共享示意图

Fig. 3 Schematic diagram of functional regulation capacity and cluster energy sharing of the RIES

几项工作：

1) 主动调节能力评估。这里将主动调节能力定义为：RIES 通过整合协调本地多元灵活资源，以调节前电、热、天然气等多能源供需平衡功率曲线(以电力供需平衡功率曲线为例，如图 3 红色虚线所示)为基准可上下调节的能力。根据上述定义，多元灵活资源为在一定经济运行条件下，对多能源供应或负荷大幅波动具有自主快速响应能力的资源，其主动性可以具体表现为：RIES 在满足公平性、合理性以及隐私性等聚合准则的基础上，其信息系统作为独立于各灵活资源自主决策权之外的决策主体，可充分调动本地灵活资源和邻近 RIES 主体剩余调节能力，从而拥有全局视角下的自主决策能力，进而通过共享可调节量来提高整体的能源利用效率。特别地，考虑本地多能源供需平衡，基准功率曲线与调节前本地多能源负荷水平密切相关，具体涉及可控机组出力、储能充放、多能源网络节点运行状态等多维决策变量的联合调节。在时间尺度上，调节前后功率曲线形成的面积差值即为 RIES 能量共享下的主动调节量，如图 3 曲线中黄色面积所示。在此基础上，为有效应对新能源出力波动性、多能源负荷需求不确定性以及多能源能量共享等因素对系统多能源供需平衡的影响，RIES 需要提前掌握本地可调节容量，它是 RIES 自治协调优化的前提，同时也是多方能量共享的基础。例如，江苏短期电力市场要求提前 1d 上报需求响应容量^[17]。然而，RIES 和电力系统调节机理存在本质上的区别：电力系统通过需求响应等电力负荷管理措施获得调节能力和调节容量；而在 RIES 中，多种能源形式在生产、传输、转换、存储和消费等多个环节相互耦合，导致影响主动调节能力和调节容

量的关键因素难表征，因此需要考虑多元灵活资源聚合下对 RIES 主动调节能力的构成要素和关键指标进行解析化动态建模和量化评估，并以此为依据，制定最优的自治协调优化和能量共享策略。

2) 自治协调优化。多元灵活资源聚合将推动 RIES 调度运行方式的转变。促进多环节跨能源形式的协调，提高综合能源利用效率已成为 RIES 优化调度运行的重要议题。然而，在能源供给环节，风电、光伏等新能源广泛接入，其间歇性和波动性将使系统安全稳定运行、新能源消纳等问题日益突出；在能源传输环节，多能源网络能量传输惯性存在显著差异，如电能以光速传输，惯性最小，而热能和天然气以管道流体为介质传输，响应速度较慢，惯性较大，导致 RIES 多能源调度存在时间不同步的问题；在能源消费环节，电、热、冷、气等多种能源的耦合与依存关系日益加深，大批电能替代项目衍生出电驱动、电取暖、电制冷等电能替代负荷。源网荷多元化、多时空尺度以及不确定性等问题，极大增加了 RIES 优化调度的复杂度，导致系统多环节难协调，从而限制了 RIES 主动调节能力的提升，难以实现提高综合能源利用效率的预期。因此，需要有效利用多能互补协同潜力^[18]，并综合考虑源荷两侧的不确定性和多能源网络多时间尺度能量传输特性，对系统经济运行和主动调节能力进行日前-实时联合优化调度，以此提升多能源能量共享和多元不确定环境下系统灵活性和应变力^[19]。

3) 集群协同控制。多个 RIES 集群环境下的日前-实时联合优化调度分别由多个 RIES 主体独立完成，各主体需要根据自身主动调节能力的优化结果制定相应的多能源能量共享策略，而能量共享同时

影响着多方 RIES 主动调节能力的优化。在能源管理层面,这种多主体分布式运行模式导致多方供需关系缺乏有序协调,难以达成多能源能量共享的共识(即何种能源在何时何地何方向何方共享多少可调节量)。在信息安全层面,多方直接信息交互容易造成优化调度决策等相关敏感信息被恶意方利用,可能导致整体经济损失和能源供给安全问题,如利用电力系统潮流信息进行窃电^[20]和虚假数据注入攻击^[21]等。上述因素共同导致了 RIES 集群多主体难管控问题。因此,需要突破传统单一 RIES 独立优化调控的视角,从宏观视角出发,制定多方隐私保护分布式协同控制策略,以此促进能源信息高效安全交互,实现集群环境下多方分布式最优协调。

上述 3 个问题互相关联,共同对 RIES 及其集群优化运行产生重要影响。特别地,能量共享既是主动调节能力评估、自治协调优化和集群协同控制 3 项工作紧密结合的纽带,又是促进 RIES 多环节跨能源形式协调、提升系统运行灵活性和能源利用

效率的主要驱动因素。然而,能量共享突破了传统单一 RIES 独立优化调控的视角,导致宏观视角下系统整体耦合关系更加复杂,多主体、多环节协调优化更加困难。因此,能量共享环境下需要进一步考虑解决如下难题:

- 1) 如何完善 RIES 主动调节能力的量化评估方法;
- 2) 如何协调 RIES 主动调节能力的优化和提升;
- 3) 如何制定 RIES 集群多主体分布式协同控制策略。

2 多元灵活资源聚合的 RIES 的研究概况

针对上述难题,本节将从 RIES “主动调节能力评估,自治协调优化,集群协同控制” 3 个方面总结国内外相关研究现状,分析现有研究存在的问题并进一步提炼出后续研究工作面临的关键难点。图 4 给出研究背景、研究工作、研究现状、存在问题和关键难点的整体框架,具体论述如下。

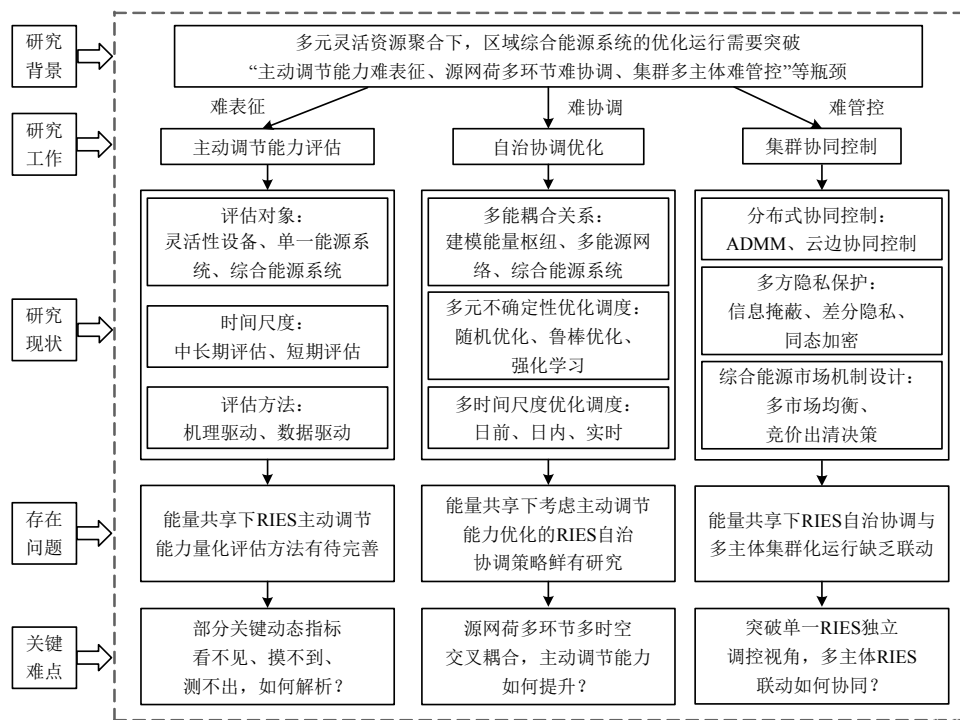


图 4 RIES 的研究背景、研究工作、研究现状、存在问题和关键难点整体框架

Fig. 4 Research background, work, status, existing problems and key difficulties of the RIES

2.1 RIES 主动调节能力评估

目前关于 RIES “主动调节能力” 尚未有统一的定义,针对不同灵活资源聚合场景也存在各种不同的提法,例如“可调节能力”,“调控能力”,“供能能力”,“消纳能力”,“系统灵活性”,“系统弹性”等。本文对于 RIES 主动调节能力的定义为:

RIES 通过整合协调本地多元灵活资源,以调节前电、热、天然气等多能源供需平衡功率曲线为基准可向上/向下调节的能力。近年来,国内外学者对系统主动调节能力评估开展了广泛研究,针对不同灵活资源聚合场景,相关研究的侧重点各有不同,本小节将从不同视角出发对其进行梳理。

2.1.1 从评估对象视角

可分为灵活性设备、单一能源系统、综合能源系统等多个层面。灵活性设备层面多侧重于冷热电联产和分布式发电等可控机组。如文献[22-23]分别评估热电联产机组参与备用容量服务潜力以及分布式发电灵活机组组合的调节能力。单一能源系统层面主要面向以电力系统为核心的能源系统。如文献[24-25]基于功率聚合原理对主动配电网应对电压偏差和功率不平衡的灵活性和调控能力进行量化分析；文献[26]提出一种考虑多能源耦合影响下电力系统灵活性评估方法。综合能源系统层面，主要集中于对多能源复杂耦合约束下系统新能源消纳和供能潜力进行评估。如文献[27-28]分别针对电-气耦合系统和电-热耦合系统的优化调度过程评估了风电消纳能力。此外，文献[29-30]分别考虑系统静态安全约束和可靠性约束对RIES供能能力进行量化评估。特别地，文献[31]考虑多能源网络约束评估能量枢纽灵活性价值，并建立包括系统新能源削减量、失负荷量和线路拥塞程度的具体评估指标。文献[32]基于区间数学分析理论，结合工程实际构建了一种区间化安全域模型，揭示含可再生能源的区域综合能源系统区间化安全域。

2.1.2 从评估时间尺度视角

主要分为中长期调节能力评估和短期调节能力评估，不同时间尺度服务于不同的调节需求。中长期评估通常侧重于对满足未来多能源供需关系变化的灵活调节容量规划建立评估模型，即何时何处投建何种类型的调节资源^[33-34]。如文献[35]建立基于弹性广义储能的多能源系统中长期规划模型，从而为园区级分布式储能设备、管网储能和建筑热容量等灵活调节资源的高效配置和规划提供依据。短期评估通常从日前、日间或实时角度对系统短期调节能力进行评估，从而服务于系统日前、日间或实时的调度计划安排。如文献[36-37]考虑区域供热网络热惯性的影响分别对电-热耦合系统日前和日间优化调度下新能源消纳能力进行量化评估。

2.1.3 从评估方法视角

主要分为机理驱动和数据驱动2类方法。机理驱动方法通常从灵活资源的运行机理、调节特性的角度出发，建立调节能力评估模型。如文献[38]考虑温控负荷运行调控机理构建近似聚合模型，量化了其聚合功率的调控潜力。数据驱动方法不依赖于灵活资源的详细机理模型，运用机器学习等技术分

析其历史数据中的调节规律。如文献[39]提出一种机理和数据混合驱动方法来近似量化工业能源系统在不同运行条件下的灵活性边界。

现有调节能力评估大多从静态视角开展相关研究，如综合能源调度与规划等均为事后静态的调节能力估计，对于系统聚合多元灵活资源具有重要意义。然而，RIES主动调节行为受内部灵活资源聚合状态和外部多能源能量共享等动态环境的联合影响，仅从静态视角估计其调节潜力过于粗糙，例如，对于一些新能源出力和多能源负荷需求波动性和不确定性场景，基于系统调度与规划的事后静态估计与系统实际运行状态往往存在较大偏差，且无法给自治协调优化和集群能量共享策略的制定提供准确的参考，尚缺乏系统调度运行过程中主动调节能力的解析化动态评价指标。因此，能量共享下RIES主动调节能力量化评估方法有待进一步完善。

2.2 RIES 自治协调优化

作为多元灵活资源整合调用的运行模式，RIES在自治协调优化运行过程中需要解决3方面的问题：一是多能复杂耦合关系建模问题；二是多元不确定性优化调度问题；三是优化调度中多时间尺度问题。

2.2.1 多能复杂耦合关系建模问题

RIES聚合大量可调节资源促进电、热、冷、气等能源形式的多能互补及网络化多能流协同优化调度，相关建模研究可分为能量枢纽、多能源网络和综合能源系统3个层面。在能量枢纽层面，文献[40]对能量枢纽的运行、优化规划及求解方法进行较为全面的综述。在此基础上，提出一种能量枢纽标准化矩阵建模和求解方法^[41]。在多能源网络层面，文献[42]基于拉普拉斯变换提出一种多能源网络广义电路分析理论，并在此基础上分别构建多能源网络的支路模型和网络模型^[43]。在综合能源系统层面，为描述多能流传输与分布特性，文献[44]基于源荷二端口网络等值的思想构建综合能源网络时域统一模型，并进一步提出复频域增广模型^[45]。

2.2.2 多元不确定性优化调度问题

RIES在优化运行过程中需要考虑新能源出力和多能源负荷需求等多元不确定性因素的影响，制定最优的调度策略以规避供需失衡及其导致的多能源网络潮流越限等风险^[46-47]。依据优化方法不同，可将现有方法分为3类：1) 随机优化方法。其基本思路是构建系统相关不确定变量的机会约

束模型,并通过限制机会约束的概率,将随机优化问题转化为多概率场景下的优化调度问题^[48-49];

2) 鲁棒优化方法。区别于随机优化方法,其往往不依赖于系统不确定变量的精确概率分布,基于统计区间的不确定性集参数求解恶劣场景下综合能源系统的经济调度或恢复供能方案^[50-52]; 3) 基于强化学习等新型理论的优化方法。如文献[53]系统回顾了利用强化学习求解综合能源系统管理问题的现有研究成果。文献[54-55]基于深度强化学习方法,挖掘并利用风电、光伏、多能负荷等源荷不确定性和波动规律,实现复杂场景下系统优化调度与决策。

2.2.3 优化调度中多时间尺度问题

在多能源网络中,由于电能以光速传播,其暂态过程可以忽略不计,而天然气网络和热力网络依赖管道流体传输能量,二者的暂态过程本质上均可以描述为偏微分-代数方程组^[56-57]。因此,各能源系统的最优调度需要在日前、日内、实时等多时间尺度下相互配合,以规避多能源深度耦合下的潜在风险。为此,国外如 PJM、ERCOT、CAISO 等多个运营商已成立专门工作组,致力于解决综合能源系统时间不同步问题^[58]。此外,文献[59]基于热媒温度的暂态变化特性,探讨热力网络对综合能源系统超短期调度的影响。文献[60]建立包括混合分辨率建模和调度指令周期的系统混合时间尺度运行优化模型。

现有自治协调策略相关研究大多以不确定环境下系统优化运行的经济性为首要目标,对于解决多时间尺度的多能耦合和随机优化决策问题具有重要意义。然而,RIES 主动调节能力与系统应对多元不确定性风险的多能源供需平衡能力呈正相关,且与集群环境下多能源能量共享策略的制定相互影响,仅考虑经济性无法有效提升系统运行的灵活性和鲁棒性,且无法给 RIES 集群化运行提供多能源能量共享的真实边界,导致系统多能源供需平衡难以保障,综合能源利用效率难以提升。因此,需要深入探讨系统源网荷多环节多时空交叉耦合关系,开展能量共享下考虑主动调节能力优化的 RIES 自治协调策略相关研究。

2.3 RIES 集群协同控制

为促进能源信息高效安全交互,实现多方分布式最优协调,RIES 在集群优化运行和能量共享的过程中需要解决 3 方面问题:一是分布式协同控制

问题,二是多方隐私保护问题,三是综合能源市场机制设计问题。

2.3.1 在分布式协同控制方面

需要考虑如何对集群环境下多方供需关系及多能源能量共享进行有序协调^[61-62],其本质是一种分层分布式优化问题,相应的求解方法主要包括目标级联分析法、广义 Benders 分解法、主从博弈法、交替方向乘子法(alternating direction multiplier method, ADMM)等。如文献[63]基于目标级联分析法将 RIES 解耦为上层系统层面经济调度和下层多能微网层面自治能量管理,通过下层多能微网并行计算与上层的迭代求解全局最优调度策略。文献[64]分别基于广义的 Benders 分解、最优条件分解和辅助问题原则等方法求解多能互补微网集群的分布式优化调度问题。文献[65]提出一种用于提升电-气两网调节能力的微网集群分布式协调运行模型。文献[66-67]基于主从博弈方法同时优化多类型综合能源微网的分布式调度策略。文献[68-69]采用 ADMM 算法来协调多方主体间分布式能源信息交互。考虑研究目标和场景的差异,不同的分布式优化算法在收敛速度和求解精度方面各有优势。此外,考虑优化问题的复杂度和多方求解效率,整合云计算与边缘计算的云边协同技术有望解决多方复杂能源信息交互问题。如文献[70]提出一种基于“端-边-云”架构的园区综合能源系统协调优化调度方法,可以有效提升系统运行的经济性与可靠性,并缓解调度中心的计算压力。文献[71]基于云边协同架构将复杂的优化问题分解为多个能量枢纽间能量信息交互子问题来提高求解效率。

2.3.2 在多方隐私保护方面

依据不同的密码学原理可以将现有研究分为 3 类:1) 信息掩蔽。旨在通过线性映射或等效变换来掩蔽特定参数并替换原始最优函数。如文献[72]在基于云平台的能源管理系统中引入信息掩蔽机制,以保护原始决策信息。2) 差分隐私。通过向交互过程添加信息扰动来保护隐私,从而掩盖敏感信息。如文献[73]通过在配电网信息交互中引入差分隐私机制,构造具有随机噪声的最优潮流仿射函数来保护多区域网络敏感信息,但分布式优化算法的收敛性能在很大程度上取决于随机扰动的类型和程度。3) 同态加密。其是基于数学难题计算复杂性理论的密码学技术,对经过同态加密的数据进行处理得到一个输出,将这一输出进行解密,其结

果与用同一方法处理未加密的原始数据得到的输出结果保持一致，致力于在加密状态和非加密状态下获得相同的优化计算结果。如文献[74-75]通过将同态加密算法和对偶子梯度算法相结合，提出了隐私保护分布式优化方法来求解配电网多区域最优潮流问题。

2.3.3 在综合能源市场机制设计方面

完善合理的综合能源价格机制和市场化交易机制是激励灵活资源和 RIES 主体参与集群和多能源市场的有效手段。依据市场层级不同，现有研究主要聚焦 2 类问题：一是多能源多市场均衡协同问题，旨在促进不同能源市场之间的高效协同和价格均衡。如文献[76]提出一种基于多市场均衡的综合能源市场机制设计，以不同能源当量价格激励电力、热力和天然气等多市场交易，从而扩大资源优化配置空间，通过少量信息交互促进多品类能源市场的价格均衡。文献[77-78]通过评估多能源产消者参与综合能源市场潜力，获得了电力市场、天然气市场和碳排放市场协同博弈下的价格均衡点。二是多利益主体参与市场的竞价出清决策问题，旨在有效应对复杂多变的综合能源市场环境，在实现多区域能源资源优化分配的基础上，提升市场参与主体的经济效益。如文献[79]提出一种基于区域互联的能源零售市场双边竞价出清策略，有效提升了多区域多能源供需双方利益。文献[80]研究需求侧综合能源站实时市场竞标与能量管理协同优化策略，基于滚动优化理论实现了多时间尺度下多能源市场竞标和最优能量管理。文献[81]研究考虑商业楼宇和分布式电源等市场主体参与气-电 RIES 的市场定价策略，通过分解的节点边际价格激励市场主体调节运行方式，从而获得最优定价策略。文献[82]提出了一种多主体利益制衡的综合能源系统日前-实时出清方法，通过构建产能商、运营商和负荷聚合商的出清决策模型，实现了各主体利益均衡。

综上，单个 RIES 自治协调优化与多个 RIES 主体集群环境运行实际上是内在耦合、相互关联的，然而现有研究大多将二者分开单独考虑和优化。若只考虑多个 RIES 分布式自治，这种自下而上的控制模式将导致多方供需关系不明且多能源能量共享难以有序协调，使系统整体面临经济损失风险；若只考虑通过集群或中心机构协调多个 RIES 主体分布式交互，这种自上而下的控制模式将导致集群调度指令与 RIES 本地决策之间的不一致性与

矛盾，决策主体不明。此外，现有针对多能源能量信息交互的隐私保护机制尚未完善。现阶段多个子能源系统运营相对独立运营，尚缺乏完善合理的综合能源价格机制和多能源市场化交易机制。因此，统筹 RIES 自治协调与多主体集群化运行之间的联动关系，探究能量共享下多个 RIES 主体集群隐私保护分布式协同控制，以有效支撑综合能源服务市场建设，是需要进一步探究的重要问题。

2.4 国内外典型城市级 RIES 示范应用案例

针对 RIES 的实际工程落地已有较多示范应用案例^[83]，表 2 列出国内外典型城市级 RIES 工程示范项目。其中，早在 2008 年，德国 E-DeMa 项目应用能源路由器成功实现对电、热、天然气等多能源的传输、转换和分配利用^[84]。2010 年，为提高能源利用效率，加拿大耶洛奈夫镇通过整合太阳能、地源热泵、潮汐发电、生物质能发电供热等资源对小镇 RIES 进行了升级改造^[85]。2011 年，欧盟的 ELECTRA 项目利用网元互联构成的分层分布式网络进行了电网电压与频率控制、用户建筑物多能源负荷管理、储能与分布式能源协调以及电力市场优化运行等多方面示范应用^[86-87]。2012 年，英国曼彻斯特大学开发了一种综合电-热-气-水系统与用户交互平台，从创新能源利用模式、多能源需求响应

表 2 国内外典型城市级 RIES 示范应用案例
Table 2 Typical city level RIES demonstration application cases worldwide

年度	地区	示范工程	工程特点
2008	德国	E-DeMa 项目	多能源产消者一体化整合
2010	加拿大	耶洛奈夫镇能源示范项目	小镇多能源系统改造整合
2011	欧盟	ELECTRA 项目	分层分布式网元互联概念
2012	英国	曼彻斯特能源系统示范项目	综合电-热-气-水系统与用户交互平台
2014	日本	柏叶智慧城市项目	区域-楼宇-家庭综合智慧能源一体化管理
2016	中国	上海崇明智能电网综合示范工程	岛内多能源接入 电网分层分区就地消纳
2017	中国	天津中新生态城示范项目	冷、热、电多能源梯次高效利用
2017	中国	海西州多能互补集成优化国家示范工程	集风-光-热-蓄-调-荷于一体的多能互补
2018	中国	苏州同里小镇综合能源示范项目	多能协同互补的区域能源互联创新示范
2021	中国	宁波智慧能源管理服务系统	综合智慧能源数字化服务新业态
2022	中国	《北京市“十四五”时期城市管理发展规划》	城市综合能源管理可复制可推广新模式

和节能等角度出发,缓解当地能源短缺问题^[88]。受限于能源资源禀赋,日本是最早开展 RIES 研究的亚洲国家,早在 2016 年率先提出构建智慧城市能源系统,倡导利用新一代信息技术促进区域-楼宇-家庭综合智慧能源一体化管理。

相比之下,我国城市级 RIES 示范工程项目起步较晚,早期具有代表性的示范应用案例主要有上海崇明智能电网综合示范工程^[89]、天津中新生态城示范项目^[90]、海西州多能互补集成优化国家示范工程^[15]、以及苏州同里小镇综合能源示范项目^[91]等,不同地域因其能源资源禀赋的差异,示范工程的多能互补能源利用形式各有特色。近年来,物联网、云计算、人工智能、5G 等技术的兴起,给 RIES 的发展和工程落地带来了新机遇。例如宁波智慧能源管理服务系统充分利用“大云物移智”等技术打造了综合智慧能源数字化服务新业态^[92]。2022 年 4 月,《北京市“十四五”时期城市管理发展规划》指出以区域综合能源规划为引领,在综合智慧能源示范应用的基础上,积极推进延庆区、“三城一区”、大兴国际机场临空经济区、城市副中心等重点区域能源互联网规模化示范应用^[93]。

整体来看,我国自 2017 年建设首批多能互补集成优化示范工程以来,建设了一批多层次、规模不等的 RIES 基础设施,但现阶段多能源运营商相对独立运行,缺乏统筹协调,终端一体化集成供能项目接入电网的相关技术标准有待进一步完善,综合能源市场化交易机制尚不健全,多主体 RIES 集群化运行缺乏有效联动,因此现阶段鲜有城市级多 RIES 集群协同的示范应用案例。

3 多元灵活资源聚合的 RIES 研究的关键问题及研究思路

3.1 多元灵活资源聚合下 RIES 研究的关键问题

结合多元灵活资源聚合的 RIES 的研究综述与发展动态,针对 RIES 主动调节能力评估与优化的基础问题,本文认为多元灵活资源聚合下 RIES 研究的关键问题包括 3 个方面:一是主动调节能力时空动态演变规律深度挖掘;二是复杂非线性动态 RIES 的主动调节能力优化;三是多个 RIES 主体集群下多方分布式最优协调。下面具体阐述 3 个关键问题。

3.1.1 主动调节能力时空动态演变规律深度挖掘

新能源、可控机组、储能以及需求响应等多元灵活资源的聚合与外部天气环境、系统容量配置、

供需平衡状态、指令响应情况等多种因素密切相关,在这些因素的复杂耦合作用下,RIES 多能源能量调控呈现出复杂性、时变性和不确定性等特点。为准确评估更广泛场景下 RIES 主动调节能力,需要深入分析上述因素耦合作用下系统对多能源主动调节行为的内在机理。因此,综合运用统计分析、机理建模、数值优化等多学科理论,对影响主动调节能力的关键指标进行解析化动态建模,从而深度挖掘主动调节能力时空动态演变规律,以此形成一套科学完善的 RIES 主动调节能力量化评估方法是本文需要解决的关键问题之一。

3.1.2 复杂非线性动态 RIES 的主动调节能力优化

多元灵活资源聚合下,RIES 在源荷两侧均面临着不确定性问题,如新能源出力波动、多能源负荷需求难以准确预测等,使得系统面临不同程度的供需失衡及网络潮流越限风险。为增加系统应对这些风险的灵活性和鲁棒性,并提升与其他 RIES 多能源能量共享潜力,需要在保障系统自身经济稳定运行的同时优化其对多能源的主动调节能力。然而,系统源网荷跨能源形式、多环节、多时空交叉耦合使得 RIES 自治协调优化模型呈现复杂非线性动态特性,导致系统多能源供需平衡难以保障,综合能源利用效率难以提升。因此,综合考虑主动调节能力与系统多能源转换、供需平衡、网络潮流安全等运行状态的潜在关联与复杂耦合约束,对系统运行经济性和主动调节能力进行联合优化,以此提升多能源能量共享和多元不确定环境下系统灵活性和应变力是本文需要解决的关键问题之一。

3.1.3 多个 RIES 主体集群下多方分布式最优协调

单个 RIES 主动调节能力往往有限,参与集群的目的是共享能量以维持自身经济稳定运行,其中多方能量共享影响了 RIES 自治协调下的主动调节能力评估和优化,同时主动调节能力的大小又对 RIES 集群下多方最优能量共享策略的制定产生影响。因此,RIES 自治协调与集群化运行实际上是内在耦合、相互关联的,然而现有研究大多将二者分开单独考虑和优化,存在多方供需关系不明、决策主体不明、多能源能量共享缺乏有序协调、信息交互缺乏安全保障等问题。因此,统筹 RIES 自治协调与多主体集群化运行之间的联动关系,构建考虑多方安全计算的多个 RIES 主体集群隐私保护分布式协同控制模型,以此促进能源信息高效安全交

互，实现多方 RIES 主体分布式最优协调是本文需要解决的关键问题之一。

3.2 多元灵活资源聚合的 RIES 研究思路

根据上述分析，本节从关键问题的本质出发，结合现有成熟的方法论体系，给出对应的研究思路。

3.2.1 面向多元灵活资源聚合的 RIES 主动调节能力量化评估方法研究

研究多元灵活性资源聚合下 RIES 异质能源时空耦合特性分析方法，结合能量枢纽多能源转换、储能、多能源网络和需求响应等的调控机理，科学表征 RIES 对电、热、天然气等多种形式能源的主动调节规律；根据以上规律，深入分析 RIES 主动调节能力的构成要素，包括多能源调节容量、调节时长、调节速率等，研究影响主动调节能力的关键指标解析化建模方法；结合系统新能源消纳和多能源供需平衡状态，研究整合上述关键指标的 RIES 主动调节能力评估方法，形成一套科学完善的量化评估方法。具体研究内容包括：

1) 多元灵活资源聚合下 RIES 主动调节规律分析。结合前述多元灵活资源的调节特性和多能耦合特性，厘清考虑新能源机组出力不确定性的 RIES 源网荷供需互动关系，从而明确新能源机组出力不可控变量，以及包含燃料机组出力、爬坡、启停，输/配电网节点电压，热力管网节点供热温度，天然气管网节点气压，多能源储能充放及速率，以及多能源负荷可响应量等可控变量及边界；

2) 影响 RIES 主动调节能力关键指标解析化建模。将上述变量及边界代入能量枢纽多能源转换模型和多能源网络潮流模型，经多能源潮流分解计算得到表征 RIES 主动调节能力的关键指标，即基于电、热、天然气供需平衡功率曲线的向上/下调节容量、向上/下调节时长和向上/下调节速率；

3) 全方位多指标的 RIES 主动调节能力量化评估。综合考虑未来一段时间内 RIES 运行的新能源可消纳量，多能源供需平衡状态，以及上述调节容量、调节时长、调节速率关键指标，采用可量化的度量方式，对 RIES 主动调节能力进行全方位多指标量化评估。

3.2.2 考虑主动调节能力优化的单个 RIES 自治协调方法研究

研究单个 RIES 自治协调优化场景下，同时考虑新能源出力和多能源负荷需求的源荷两侧不确定性及其描述方法，分析其导致的系统供需失衡及

多能源网络潮流越限风险；为有效应对上述风险，利用主动调节能力量化评估结果并结合多能源网络能量传输的多时间尺度特性，研究考虑单个 RIES 主动调节能力提升的日前-实时联合随机优化调度建模方法；深入分析导致优化模型非线性的相关特征，如多能源转换设备和多能源网络约束等，根据非线性模型转化与等效原理，研究 RIES 日前-实时联合随机优化调度模型的高效求解方法。具体研究内容包括：

1) 考虑源荷不确定性的 RIES 供需失衡及多能源网络潮流越限风险分析。有效度量 RIES 运行过程中新能源机组出力和多能源负荷等不确定性因素对调度决策的影响至关重要，需要兼顾多能源转换过程的多可控变量协调以及多能源网络潮流安全边界等复杂耦合约束，以此提升风险度量准确率；

2) 考虑主动调节能力提升的 RIES 日前-实时联合随机优化调度模型建模。在上述风险度量的基础上，日前调度阶段根据系统经济性最优安排燃料机组的出力、启停计划，多能源储能充放计划和多能源负荷需求响应计划。实时运行阶段通过调节多能源储能充放速率和多能源网络节点可控变量，应对不确定性并提升 RIES 主动调节能力。两阶段调度通过设备运行约束相互耦合，整体形成混合整数非线性规划模型，属于一种非确定性多项式 NP-hard 问题；

3) 基于非线性等效的 RIES 日前-实时联合随机优化调度模型高效求解。对于上述调度模型中存在的非线性项或双线性项，如电网模型中节点电压和支路电流的乘积，热力管网模型中节点供给温度和供给质量的乘积等等，通过引入若干中间整数变量将双线性项松弛为线性模型，由此可将上述模型转化为适用性更广、收敛性更好的混合整数线性规划模型进行求解。

3.2.3 面向能量共享的多个 RIES 主体集群分布式协同控制方法研究

以主动调节能力评估和自治协调优化后 RIES 主动调节能力大小为驱动力和依据，分析集群环境下多方 RIES 主体间多能源能量共享和供需互动潜力；为充分保护多方主体之间信息交互过程的隐私，研究考虑多方安全计算的多个 RIES 主体集群分布式协同控制建模方法；基于隐私保护分布式一致性理论，研究 RIES 集群分布式协同控制模型的高效求解方法。具体研究内容包括：

1) 集群环境下多方 RIES 主体间多能源能量共享和供需互动分析。经上述 RIES 自治协调优化, 多个 RIES 主体集群环境下各主体的主动调节能力存在差异。在系统经济性和资源优化配置等目标的驱动下, 需进一步协调多个 RIES 主体间多能源能量共享, 依据主动调节能力大小将各 RIES 主体划分为供需双方, 并分析双方供需互动潜力, 确定能量共享边界;

2) 考虑多方安全计算的多个 RIES 主体集群分布式协同控制建模。在 RIES 自治协调优化的基础上, 结合上述多主体供需互动分析, 进一步建立分布式协同控制模型, 同时在信息交互环节引入加密机制以保护各方主体的隐私信息;

3) 基于隐私保护分布式一致性理论的多主体协同控制模型高效求解。隐私保护和分布式算法收敛性是多主体协同控制的关键, 因此多主体协同模型的高效求解需要将信息加密机制和供需双方一致性准则有机结合, 以确保算法的收敛性和隐私保护性能。

本文旨在通过理论研究攻克 RIES 及其集群优化运行决策过程中面临的难题, 提升 RIES 主动调节能力及其在集群多能源能量共享中的灵活性和价值, 推动 RIES 运行模式在国内的发展, 促进海量灵活资源的深度挖掘与高效利用, 具体研究目标如下:

1) 建立科学完善的 RIES 主动调节能力量化评

估方法, 实现影响 RIES 主动调节能力的关键指标可建模、信息可获取的研究目标;

2) 提升多元不确定环境下系统灵活性, 实现 RIES 主动调节能力可优化、对多元不确定环境可应变的研究目标;

3) 促进多个 RIES 主体集群下多方能源信息高效安全交互, 实现多能源能量可共享、多主体联动有序协同的研究目标。

图 5 给出了关键问题、研究思路和研究目标的逻辑关系。研究思路 1 中 RIES 多能源主动调节能力量化评估结果为研究思路 2 中自治协调优化提供量化指标输入, 同时为研究思路 3 中 RIES 集群分布式协同控制提供多方能量共享供需匹配依据; 研究思路 2 中 RIES 自治协调优化结果一方面为研究思路 1 中多能源主动调节能力量化评估提供自治策略, 另一方面为研究思路 3 中 RIES 集群分布式协同控制提供主动调节能力的边界条件; 研究思路 3 中 RIES 集群分布式协同控制结果为研究思路 2 中自治协调优化提供多能源能量共享策略。3 个研究内容之间紧密关联、相互支撑, 共同致力于解决 RIES 及其多主体集群优化运行与决策过程中面临的难题, 实现影响 RIES 主动调节能力的关键指标可建模、信息可获取, 主动调节能力可优化、对多元不确定环境可应变, 多能源能量可共享、多主体联动有序协同等研究目标。

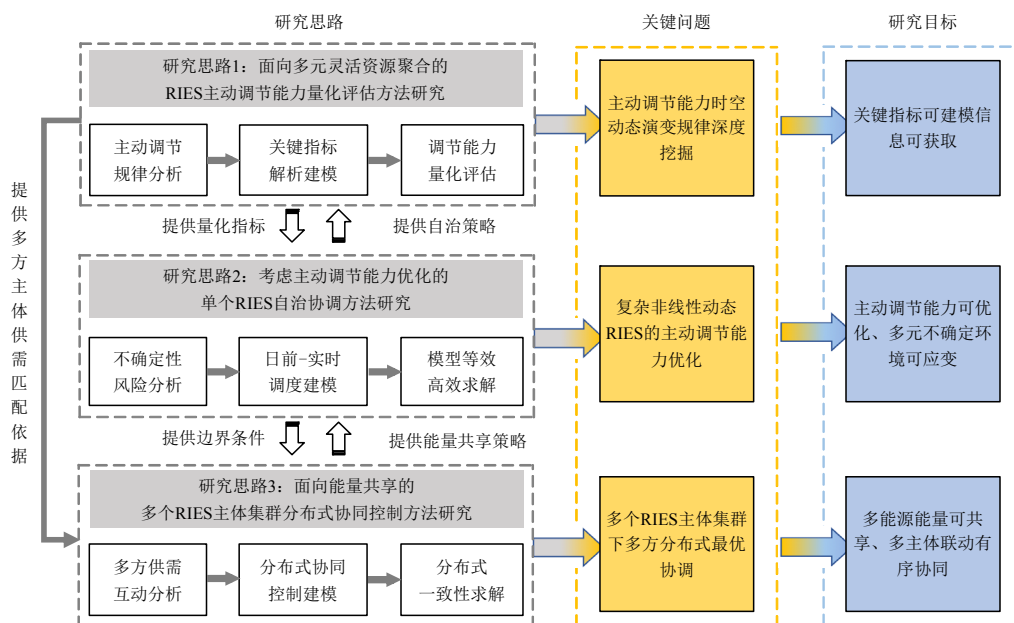


图 5 关键问题、研究思路和研究目标的逻辑关系

Fig. 5 Logical relationship between critical problems, potential solutions, and goals

4 多元灵活资源聚合的 RIES 的研究架构与关键技术

本文总体研究架构如图 6 所示。以 RIES 为研究对象，采用“主动调节能力评估→自治协调优化→集群协同控制”的技术路线。其中，RIES 主动调节能力量化评估结果为自治协调优化提供必要

输入，同时为集群协同控制提供多方主体供需匹配依据；RIES 自治协调优化结果一方面为调节能力评估提供自治策略，另一方面为集群协同控制提供多能源主动调节能力的边界条件；RIES 集群协同控制结果为自治协调优化提供多能源能量共享策略。下面结合具体问题阐述实现研究目标需要突破的关键技术。

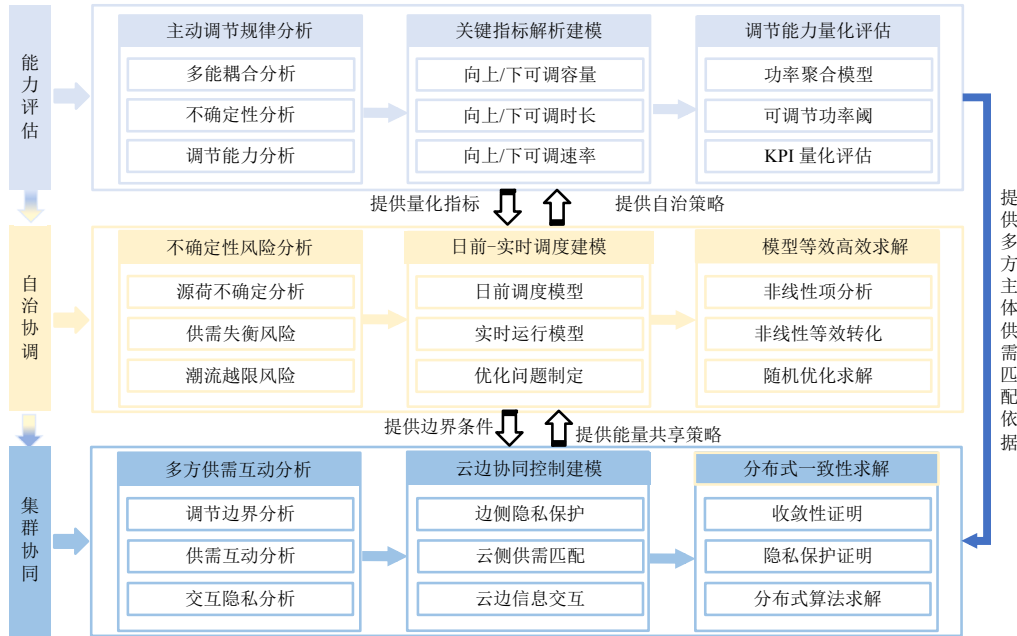


图 6 多元灵活资源聚合的 RIES 总体研究架构

Fig. 6 Overall research framework of the RIES under the aggregation of diversified and flexible resources

4.1 面向多元灵活资源聚合的 RIES 主动调节能力量化评估

为了更加全面准确地把握 RIES 主动调节能力时空动态演变规律，量化主动调节能力给 RIES 及其集群优化运行带来的灵活性价值，需要对影响 RIES 主动调节能力的关键指标进行解析化动态建模，从而形成一套能量共享下 RIES 主动调节能力量化评估方法。

面向多元灵活资源聚合的 RIES 主动调节能力量化评估如图 7 所示。首先，根据能量枢纽中可控机组、多能源转换、多能源存储等设备的运行机理分析多能耦合特征。在此基础上，进一步分析源荷两侧的不确定性，如源侧的风电和光伏，负荷侧的多能源负荷等，从而明确系统中的可控变量与不可控变量。此外，不同能源类型有各自转换约束，因此需要分析多种能源类型源网荷互动关系，以深入剖析 RIES 对不同能源类型的调节能力，进一步挖掘多元灵活资源聚合下 RIES 主动调节规律；其次，将上述可控/不可控变量及边界代入能量枢纽多能源转换模型和多能源网络潮流模型，经多能源潮流

分解计算得到表征 RIES 主动调节能力的关键指标，主要包括基于电、热、天然气供需平衡功率曲线的向上/下调节容量、向上/下调节时长和向上/下调节速率，其中向上/下调节速率指单位时间 Δt 内的向上/下调节容量。因此，向上/下调节容量=向上/下调节速率 \times 向上/下调节时长，据此规则并结合多能源转换机理进行解析化建模。最后，根据功率聚合原理分析上述关键指标下多种能源形式聚合功率及可调节功率域。综合调节容量、调节时长、调节速率等解析模型以及新能源消纳、多能源供需平衡状态，借鉴企业绩效管理理论中可科学量化表征的关键业绩指标(key performance indicator, KPI)模型^[94]，其是一种可量化的度量方式，对决定工作成效的关键活动业绩的上升或下降进行度量。KPI 模型对主动调节能力进行全方位、多指标量化评估，形成一套标准化、通用的 RIES 主动调节能力量化评估方法。

4.2 考虑主动调节能力优化的单个 RIES 自治协调

RIES 主动调节能力的大小同时影响着集群环境下多能源能量共享策略的制定，且系统源网荷跨

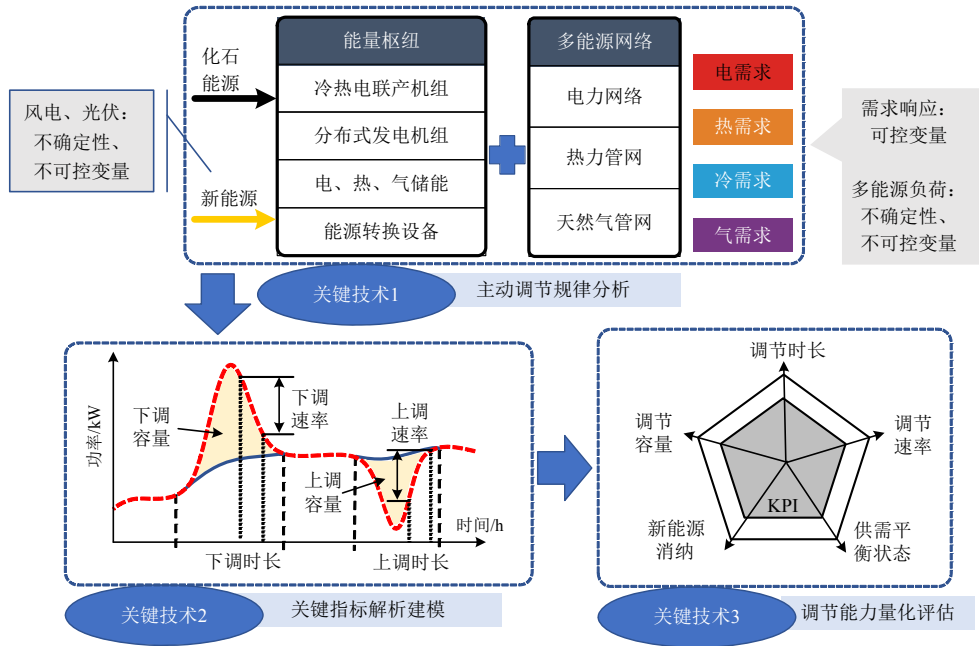


图7 多元灵活资源聚合的RIES主动调节能力量化评估

Fig. 7 Quantitative evaluation of functional regulation capacity of the RIES under the aggregation of diversified and flexible resources

能源形式、多环节、多时空交叉耦合使得 RIES 自治协调优化模型呈现复杂非线性动态特性，仅考虑经济性无法有效提升系统运行的灵活性和鲁棒性，且无法给 RIES 集群化运行提供多能源能量共享的真实边界，导致系统多能源供需平衡难以保障，综合能源利用效率难以提升。上述原因导致传统的 RIES 经济调度模型不再适用，需要在传统模型的基础上进一步扩展主动调节能力风险成本及其与系统多能源转换、供需平衡、网络潮流安全等运行约束的潜在关联与复杂耦合约束，对系统经济性和主动调节能力在日前和实时 2 个时间尺度上进行两阶段联合优化，在保障系统自身经济稳定运行的同时提升其对多能源的主动调节能力。

考虑主动调节能力优化的单个 RIES 自治协调如图 8 所示。首先，借鉴金融学中条件风险价值 (conditional value at risk, CVaR) 理论，结合主动调节能力 KPI 量化评估结果、多能源源荷功率统计数据及经济调度所需数据等边界条件，形成系统风险成本目标函数，包括切负荷风险成本、弃风弃光风险成本、潮流越限风险成本以及主动调节能力 KPI 综合指标。其次，引入多能源调节裕度与供需失衡风险耦合、调节裕度与潮流越限风险耦合等关联约束，在传统日前随机调度模型的基础上形成考虑主动调节能力优化的 RIES 自治协调模型。最后，通过引入中间整数变量及其耦合约束，对风险成本和

关联约束中的非线性项进行线性化，降低模型的复杂度，进而将该模型转化为等效的混合整数线性规划问题 (mixed integer linear programming, MILP)，在模型求解方面，基于拉格朗日松弛放松非敏感约束，从而进一步加快求解速度，整体实现风险模型的高效、可靠与高精度求解，提升多元不确定环境下系统运行的灵活性和应变力。

4.3 面向能量共享的多个 RIES 主体集群分布式协同控制

RIES 本地自治协调优化与集群环境运行实际上是内在耦合、相互关联的，然而现有研究大多将二者分开单独考虑和优化，存在多方供需关系不明、决策主体不明、多能源能量共享缺乏有序协调、信息交互缺乏安全保障等问题。新兴的多方安全计算架构，如云边协同，通过边缘侧并行计算并在云侧进行加密信息交互将多主体分布式优化和信息交互隐私保护 2 个环节有机整合^[95]，有望解决此类多个 RIES 主体集群隐私保护分布式协同控制问题。

面向能量共享的多个 RIES 主体集群分布式协同控制如图 9 所示。其中，云边协同控制架构强调边缘侧 RIES 分布式自治协调及其优化决策信息在云侧的高效安全交互^[96-98]。首先，在边缘侧并行执行解决方案 2 中的考虑主动调节能力优化的单个 RIES 自治协调，根据主动调节能力 KPI 的优化结果制定集群环境下多能源能量共享边界。然后，运

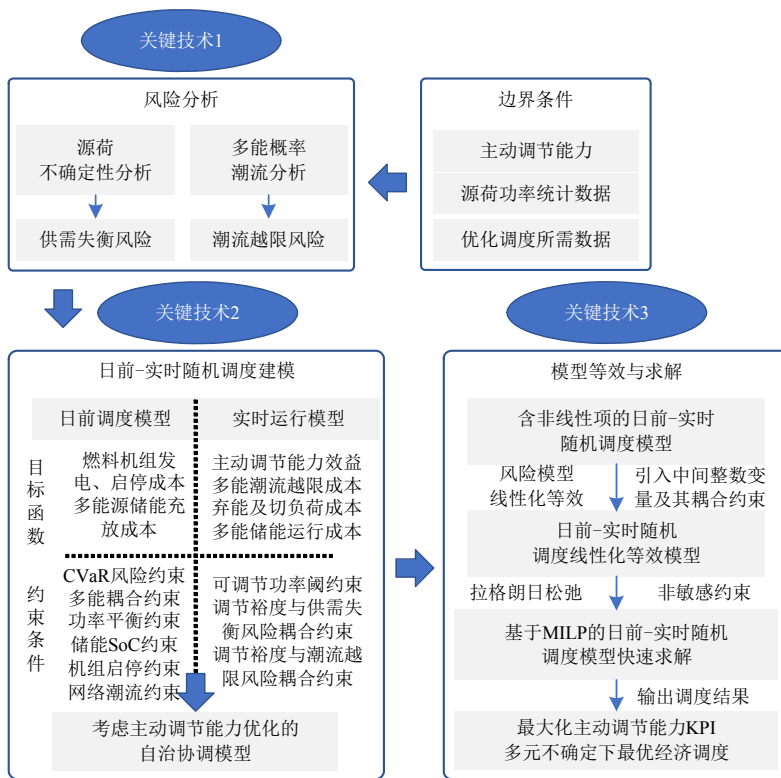


图 8 考虑主动调节能力优化的单个 RIES 自治协调

Fig. 8 Autonomous coordination of a single RIES considering optimization of the functional regulation capability

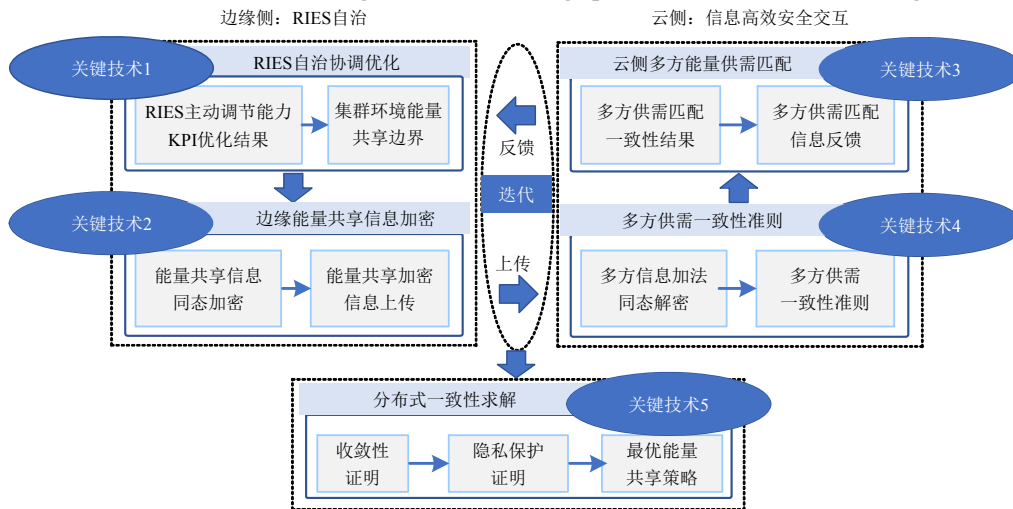


图 9 面向能量共享的多个 RIES 主体集群分布式协同控制

Fig. 9 Distributed cooperative control of multiple RIES agent clusters for energy sharing

用密码学中同态加密理论, 实现边缘侧 RIES 多能源能量共享信息加密, 并将加密信息上传至云侧。其次, 云侧执行多方信息加法同态解密(结果仅为供需双方共享数据之差, 不包括各方真实信息), 依据能量偏差最小构建多方供需一致性准则, 据此计算多方供需一致性匹配结果, 并反馈给边缘侧 RIES。边缘侧 RIES 根据反馈信息调整多能源能量共享策略, 并再次上传相关信息与云侧进行迭代更新。最后, 运用分布式优化和同态加密理论证明上述迭代过程的收敛性和隐私保护性能, 实现多个 RIES 主

体集群高效安全的多方信息交互和能量共享。

5 结论

本文面向城市范围内以工业园区为主体的区域综合能源系统, 利用信息互联网和多能源网络融合的技术手段广泛聚合大量具有自产自消、多能互补、多能存储和需求响应潜力的用户侧可调节灵活资源, 通过促进区域内多能互补、高度自治和跨区域多能源能量共享等方式提升系统供需平衡能力和能源利用效率。然而, 综合前期研究来看, 多元

灵活资源聚合下区域综合能源系统的优化运行需要突破“主动调节能力难表征、源网荷多环节难协调、集群多主体难管控”等瓶颈,且跨区域多能源能量共享增加系统整体耦合的复杂度以及多主体、多环节协调优化的难度。为此,进一步围绕多能源能量共享环境下区域综合能源系统“主动调节能力评估、自治协调优化、集群协同控制”开展研究:

1) 提出了面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力量化评估方法,为自治协调优化提供量化指标,也为后续集群多主体供需匹配提供依据; 2) 基于条件风险价值理论,提出了考虑主动调节能力优化的区域综合能源系统自治协调方法; 3) 基于上述内容,利用云边协同架构提出了面向能量共享的区域综合能源系统集群分布式协同控制方法。

本文旨在通过理论研究攻克区域综合能源系统主动调节能力时空动态演变规律深度挖掘、复杂非线性动态系统主动调节能力优化、集群多主体分布式最优协调等关键难题,实现影响主动调节能力的关键指标可建模、信息可获取,主动调节能力可优化、对多元不确定环境可应变,多能源能量可共享、多主体联动有序协同的目标。研究成果将为区域综合能源系统优化运行提供理论支撑,实现海量灵活资源的深度挖掘,进而提升综合能源利用效率和系统灵活性价值。

展望未来,综合智慧能源技术已成为引领能源行业变革、实现创新绿色发展的不竭动力。传统能源行业无论是在其所处的外部发展环境,还是在其内在发展模式上,都将面临巨大的转变。新能源发电技术、电力电子技术、储能技术、能源互联网技术等广泛引入将使得能源行业呈现出明显的开放特性与全新的发展理念,并对能源系统的源、网、荷、储多个环节及其规划、运行、调度与控制等产生深远影响。未来能源系统形态终将演化为以新能源为主体,以节能降碳为发展目标,以能源用户为中心,以多元化服务市场为载体,以数字化、智能化为核心驱动力的综合智慧能源体系。希望本文能够为综合智慧能源系统优化运行理论、方法、机制的研究与实践提供参考与借鉴。

致 谢

本文部分研究工作还得到了国家自然科学基金(52207112)和中国博士后科学基金(2022M711761)等项目的资助,特此感谢!

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2021 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2022-01-26)[2022-01-28]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
The National Energy Administration. The National Energy Administration releases 2021 national electricity industry statistical data [EB/OL]. (2022-01-26)[2022-01-28]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- [2] 辛保安, 陈梅, 赵鹏, 等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6919-6930.
XIN Baoan, CHEN Mei, ZHAO Peng, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6930(in Chinese).
- [3] 别朝红, 任彦哲, 李更丰, 等. “双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 3-15.
BIE Zhaohong, REN Yanzhe, LI Gengfeng, et al. Morphological structure and development path of urban energy system for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 3-15(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170.
ZHOU Xiaoxin, ZENG Rong, GAO Feng, et al. Development status and prospects of the Energy Internet[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2017, 47(2): 149-170(in Chinese).
- [6] 陈胜, 卫志农, 顾伟, 等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革: 多能流协同技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 3-12.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12(in Chinese).
- [7] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,

- 39(7): 198-207(in Chinese).
- [8] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305-1315.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1315(in Chinese).
- [9] 司方远, 汪晋宽, 韩英华, 等. 信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 84-97.
SI Fangyuan, WANG Jinkuan, HAN Yinghua, et al. Multilevel peer-to-peer co-optimization for cyber-physical intelligent energy systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 84-97(in Chinese).
- [10] WANG Wei, HUANG Shuhao, ZHANG Guangming, et al. Optimal operation of an integrated electricity-heat energy system considering flexible resources dispatch for renewable integration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 699-710.
- [11] LIU Nian, WANG Jie, WANG Lingfeng. Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat-electricity energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1139-1151.
- [12] 邱玥, 陆帅, 陆海, 等. 综合能源系统灵活性: 基本内涵、数学模型与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 16-43.
QIU Yue, LU Shuai, LU Hai, et al. Flexibility of integrated energy system: basic connotation, mathematical model and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 16-43(in Chinese).
- [13] SI Fangyuan, WANG Jinkuan, HAN Yinghua, et al. Cost-efficient multi-energy management with flexible complementarity strategy for energy internet[J]. Applied Energy, 2018, 231: 803-815.
- [14] SI Fangyuan, HAN Yinghua, ZHAO Qiang, et al. Cost-effective operation of the urban energy system with variable supply and demand via coordination of multi-energy flows[J]. Energy, 2020, 203: 117827.
- [15] 国家能源局. 国家能源局关于公布首批多能互补集成优化示范工程的通知[EB/OL]. (2017-01-25) [2022-01-28]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto82/201702/t20170206_2500.htm.
The National Energy Administration. Notice on the release of the first batch of demonstration projects for integrated optimization of multi-energy complementarity by the National Energy Administration [EB/OL]. (2017-01-25) [2022-01-28]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto82/201702/t20170206_2500.htm.
- [16] 国家能源局. 2022 年能源工作怎么干? 路线图来了 [EB/OL]. (2021-12-24)[2022-01-28]. http://www.nea.gov.cn/2021-12/24/c_1310391384.htm.
The National Energy Administration. How to carry out energy work in 2022? The roadmap is here [EB/OL]. (2021-12-24)[2022-01-28]. http://www.nea.gov.cn/2021-12/24/c_1310391384.htm.
- [17] 国家能源局江苏监管办公室. 江苏电力市场用户可调负荷参与辅助服务市场交易规则(试行)[EB/OL]. (2020-11-10)[2022-01-28]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-11/20201110100742.htm>.
JiangSu Energy Regulatory Office of National Energy Administration of the People's Republic of China. Trial rules for participation of Jiangsu power market users in adjustable load for ancillary services market transactions [EB/OL]. (2020-11-10)[2022-01-28]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-11/20201110100742.htm>.
- [18] 贾宏杰, 穆云飞, 侯恺, 等. 能源转型视角下城市能源系统的形态演化及运行调控[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 49-62.
JIA Hongjie, MU Yunfei, HOU Kai, et al. Morphology evolution and operation regulation of urban energy system from perspective of energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 49-62(in Chinese).
- [19] 黄武靖, 司方远, 张宁, 等. 面向韧性的城市能源系统安全规则提取及优化运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 1-8.
HUANG Wujing, SI Fangyuan, ZHANG Ning, et al. Resilience oriented security rules extraction and operation optimization of urban energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 1-8(in Chinese).
- [20] WEN Mi, XIE Rong, LU Kejie, et al. FedDetect: a novel privacy-preserving federated learning framework for energy theft detection in smart grid[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 6069-6080.
- [21] YIN Xuefei, ZHU Yanming, HU Jiankun. A subgrid-oriented privacy-preserving microservice framework based on deep neural network for false data injection attack detection in smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1957-1967.
- [22] ZHOU Yifan, HU Wei, MIN Yong, et al. Integrated power and heat dispatch considering available reserve of combined heat and power units[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1300-1310.
- [23] ZHANG Lingxi, CAPUDER T, MANCARELLA P. Unified unit commitment formulation and fast multi-service LP model for flexibility evaluation in sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 658-671.
- [24] JI Haoran, WANG Chengshan, LI Peng, et al. Quantified analysis method for operational flexibility of active

- distribution networks with high penetration of distributed generators[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 706-714.
- [25] 边晓燕, 孙明琦, 董璐, 等. 计及灵活性聚合功率的源-荷分布式协调调度[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(17): 89-98.
BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, DONG Lu, et al. Distributed source-load coordinated dispatching considering flexible aggregated power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(17): 89-98(in Chinese).
- [26] ZHAO Yufei, WANG Chengfu, ZHANG Zhenwei, et al. Flexibility evaluation method of power system considering the impact of multi-energy coupling[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(6): 5687-5697.
- [27] 王程, 汪松, 毕天姝. 含燃气发电综合能源系统风电消纳能力评估[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2192-2201.
WANG Cheng, WANG Song, BI Tianshu. Wind power accommodation capability assessment of integrated energy systems with gas-fired units[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2192-2201(in Chinese).
- [28] 巩志皓, 王程. 基于风险的电-热综合能源系统风电消纳能力评估[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(4): 325-332.
GONG Zhihao, WANG Cheng. Risk-based admissibility assessment of wind generation in integrated electric-heat systems[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(4): 325-332(in Chinese).
- [29] 骆柏锋, 穆云飞, 何伟, 等. 计及静态安全约束的电-气耦合综合能源系统供电能力评估方法[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(5): 433-440.
LUO Bofeng, MU Yunfei, HE Wei, et al. Load supply capability assessment method for integrated electricity-gas system considering static security constraints[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(5): 433-440(in Chinese).
- [30] 葛少云, 曹雨晨, 刘洪, 等. 考虑可靠性约束的综合能源微网供能能力评估[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 31-37.
GE Shaoyun, CAO Yuchen, LIU Hong, et al. Evaluation of energy supply capability for multi-energy microgrid considering reliability constraint[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 31-37(in Chinese).
- [31] 胡俊杰, 刘雪涛, 王程. 考虑网络约束的能量枢纽灵活性价值评估[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(5): 1799-1812.
HU Junjie, LIU Xuetao, WANG Cheng. Value evaluation of energy hub flexibility considering network constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1799-1812(in Chinese).
- [32] 王丹, 李思源, 贾宏杰, 等. 含可再生能源的区域综合能源系统区间化安全域研究(一): 概念、建模与降维观测[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3188-3203.
WANG Dan, LI Siyuan, JIA Hongjie, et al. Research on interval security region of regional integrated energy system integrated with renewable energy sources(Part I): concepts, modeling and dimension reduction observation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3188-3203(in Chinese).
- [33] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 147-158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 147-158(in Chinese).
- [34] LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Probabilistic flexibility evaluation for power system planning considering its association with renewable power curtailment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3285-3295.
- [35] HUANG Wujing, ZHANG Xi, LI Kangping, et al. Resilience oriented planning of urban multi-energy systems with generalized energy storage sources[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(4): 2906-2918.
- [36] LI Xue, LI Wenming, ZHANG Rufeng, et al. Collaborative scheduling and flexibility assessment of integrated electricity and district heating systems utilizing thermal inertia of district heating network and aggregated buildings[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114021.
- [37] WEI Wei, WU Jingwen, MU Yunfei, et al. Assessment of the solar energy accommodation capability of the district integrated energy systems considering the transmission delay of the heating network[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 130: 106821.
- [38] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(19): 5519-5528.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(19): 5519-5528(in Chinese).
- [39] XU Xiandong, SUN Wenqiang, ABEYSEKERA M, et al. Quantifying the flexibility from industrial steam systems for supporting the power grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 313-322.
- [40] 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).
- [41] 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.
- [42] 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).
- [43] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(二)网络模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 10-21.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks — part two network model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 10-21(in Chinese).
- [44] 张苏涵, 顾伟, 姚帅, 等. 综合能源网络统一建模及其应用(一): 时域二端口模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6509-6521.
ZHANG Suhan, GU Wei, YAO Shuai, et al. Unified modeling of integrated energy networks in time domain and its applications(I): two-port models in time domain [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6509-6521(in Chinese).
- [45] 张苏涵, 顾伟, 姚帅, 等. 综合能源网络统一建模及其应用(二): 复频域增广模型与时、频模型对比[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5798-5810.
ZHANG Suhan, GU Wei, YAO Shuai, et al. Unified modeling of integrated energy networks in time domain and its applications(II): augmented model in complex frequency domain and comparison between time/frequency domain models[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5798-5810(in Chinese).
- [46] 司方远, 韩英华, 袁怀通, 等. 计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 97-107.
SI Fangyuan, HAN Yinghua, YUAN Huaitong, et al. Multi-objective optimization scheduling for integrated electricity and heating system including hybrid power flow constraints[J]. Control and Decision, 2022, 37(1): 97-107(in Chinese).
- [47] SI Fangyuan, WANG Jinkuan, HAN Yinghua, et al. Risk-averse multiobjective optimization for integrated electricity and heating system: an augment epsilon-constraint approach[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 5142-5153.
- [48] HUO Da, GU Chenghong, MA Kang, et al. Chance-constrained optimization for multienergy hub systems in a smart city[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1402-1412.
- [49] CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Multi-linear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1970-1979.
- [50] CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Adaptive robust day-ahead dispatch for urban energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1379-1390.
- [51] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3090-3100.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Two-stage robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering network constraints and uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3090-3100(in Chinese).
- [52] LI Jiaxu, XU Yin, WANG Ying, et al. Resilience-motivated distribution system Restoration considering electricity-water-gas interdependency[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4799-4812.
- [53] 熊珞琳, 毛帅, 唐漾, 等. 基于强化学习的综合能源系统管理综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(10): 2321-2340.
XIONG Luolin, MAO Shuai, TANG Yang, et al. Reinforcement learning based integrated energy system management: a survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(10): 2321-2340(in Chinese).
- [54] 乔骥, 王新迎, 张擎, 等. 基于柔性行动器-评判器深度强化学习的电-气综合能源系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 819-832.
QIAO Ji, WANG Xinying, ZHANG Qing, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-gas system with soft actor-critic deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 819-832(in Chinese).
- [55] 杨挺, 赵黎媛, 刘亚闯, 等. 基于深度强化学习的综合能源系统动态经济调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 39-47.
YANG Ting, ZHAO Liyuan, LIU Yachuang, et al. Dynamic economic dispatch for integrated energy system based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 39-47(in Chinese).
- [56] WANG Cheng, WEI Wei, WANG Jianhui, et al. Strategic offering and equilibrium in coupled gas and electricity

- markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 290-306.
- [57] CHEN Yue, WEI Wei, LIU Feng, et al. Energy trading and market equilibrium in integrated heat-power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4080-4094.
- [58] CONEJO A J, CHEN Sheng, CONSTANTE G E. Operations and long-term expansion planning of natural-gas and power systems: a market perspective [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1541-1557.
- [59] 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).
- [60] 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).
- [61] 王怡, 王小君, 孙庆凯, 等. 基于能量共享的综合能源系统群多主体实时协同优化策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 56-65.
- WANG Yi, WANG Xiaojun, SUN Qingkai, et al. Multi-agent real-time collaborative optimization strategy for integrated energy system group based on energy sharing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 56-65(in Chinese).
- [62] XU Da, WU Qiuwei, ZHOU Bin, et al. Distributed multi-energy operation of coupled electricity, heating, and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2457-2469.
- [63] 武梦景, 万灿, 宋永华, 等. 含多能微网群的区域电热综合能源系统分层自治优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 20-29.
- WU Mengjing, WAN Can, SONG Yonghua, et al. Hierarchical autonomous optimal dispatching of district integrated heating and power system with multi-energy microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 20-29(in Chinese).
- [64] 周晓倩, 艾芊, 林琳, 等. 多能互补微网集群分布式优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3678-3686.
- ZHOU Xiaoqian, AI Qian, LIN Lin, et al. Distributed optimal dispatch of interconnected CCHP microgrids [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3678-3686(in Chinese).
- [65] 滕云, 弓玮, 冷欧阳, 等. 用于提升电-气两网调节能力的微网集群协调运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 642-655.
- TENG Yun, GONG Wei, LENG Ouyang, et al. Coordination operation model of microgrid cluster for improving electricity-gas networks regulation capability [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 642-655(in Chinese).
- [66] 杨丽君, 李慧翔, 吕雪皎, 等. 多电-热综合能源微网的热能分级分时利用市场交易策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8046-8057.
- YANG Lijun, LI Huixiang, LV Xuejiao, et al. Market trading strategy of thermal hierarchical time sharing utilization in multi electric-thermal integrated energy microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8046-8057(in Chinese).
- [67] 帅轩越, 马志程, 王秀丽, 等. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 679-687.
- SHUAI Xuanyue, MA Zhicheng, WANG Xiuli, et al. Optimal operation of shared energy storage and integrated energy microgrid based on leader-follower game theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 679-687.
- [68] ZHANG Huaguang, LI Yushuai, GAO D W, et al. Distributed optimal energy management for energy internet[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3081-3097.
- [69] 黄海涛, 陈曦, 查俊吉. 多园区综合能源系统分区自治式能量合作社区及联合优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2955-2963.
- HUANG Haitao, CHEN Xi, ZHA Junji. Partition autonomous energy cooperation community and its joint optimal scheduling for multi-park integrated energy system[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2955-2963(in Chinese).
- [70] 李昊, 张静, 刘畅, 等. 基于“端-边-云”架构的园区综合能源系统协调优化调度[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 623-634.
- LI Hao, ZHANG Jing, LIU Chang, et al. Coordinated and optimized dispatching of park integrated energy system based on "End Edge Cloud" architecture[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 623-634(in Chinese).
- [71] PENG Huan, XIONG Ruoyu, FENG Ting. A cloud-fog based adaptive framework for optimal scheduling of energy hubs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(8): 5681-5688.
- [72] XIN Shujun, GUO Qinglai, WANG Jianhui, et al. Information masking theory for data protection in future cloud-based energy management[J]. IEEE Transactions on

- Smart Grid, 2018, 9(6): 5664-5676.
- [73] DVORKIN V, FIORETTO F, VAN HENTENRYCK P, et al. Differentially private optimal power flow for distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 36(3): 2186-2196.
- [74] CHENG Zheyuan, YE Feng, CAO Xianghui, et al. A homomorphic encryption-based private collaborative distributed energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5233-5243.
- [75] WU Tong, ZHAO Changhong, ZHANG Y J A. Privacy-preserving distributed optimal power flow with partially homomorphic encryption[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4506-4521.
- [76] 王剑晓, 夏清, 李庚银, 等. 基于多市场均衡的综合能源市场机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5789-5802.
WANG Jianxiao, XIA Qing, LI Gengyin, et al. Mechanism design for integrated energy markets based on multi-market equilibrium[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5789-5802(in Chinese).
- [77] CHEN Sheng, CONEJO A J, SIOSHANSI R, et al. Equilibria in electricity and natural gas markets with strategic offers and bids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1956-1966.
- [78] CHEN Sheng, CONEJO A J, WEI Zhinong. Conjectural-variations equilibria in electricity, natural-gas, and carbon-emission markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4161-4171.
- [79] 黄德裕, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于区域互联的能源零售市场双边竞价出清策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 1-12.
HUANG Deyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Energy retail market double auction clearing strategy for interconnected regions[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 1-12(in Chinese).
- [80] 殷爽睿, 艾芊, 姜子卿, 等. 需求侧综合能源站实时市场竞标与能量管理协同优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4490-4501.
YIN Shuangrui, AI Qian, JIANG Ziqing, et al. Collaborative optimal strategy of real-time market bidding and energy management for integrated energy station on the demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4490-4501(in Chinese).
- [81] 王俊, 徐箭, 柯德平, 等. 考虑多市场主体参与的气电区域综合能源系统市场定价策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 18-26.
WANG Jun, XU Jian, KE Deping, et al. Market pricing strategy for gas-electricity integrated energy system considering multiple market entities[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 18-26(in Chinese).
- [82] 崔杨, 闫石, 王铮, 等. 多主体利益制衡的综合能源系统日前-实时出清方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 68-76.
CUI Yang, YAN Shi, WANG Zheng, et al. Day-ahead and real-time clearing method of integrated energy system considering interest balance between multiple entities [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 68-76(in Chinese).
- [83] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10(in Chinese).
- [84] E-Energy[EB/OL]. (2014-12-05)[2022-11-29]. <https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/e-energy-abschlussbroschuere.html>.
- [85] WEIS T M, ILINCA A. Assessing the potential for a wind power incentive for remote villages in Canada[J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 5504-5511.
- [86] PERTL M, CARDUCCI F, TABONE M, et al. An equivalent time-variant storage model to harness EV flexibility: forecast and aggregation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 1899-1910.
- [87] CALVO-GALLARDO E, ARRANZ N, ARROYABE J. Analysis of the European energy innovation system: Contribution of the Framework Programmes to the EU policy objectives[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298: 126690.
- [88] 景锐, 周越, 吴建中. 赋能零碳未来——英国电力系统转型历程与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 87-98.
JING Rui, ZHOU Yue, WU Jianzhong. Empowering zero-carbon future — experience and development trends of electric power system transition in the UK [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 87-98(in Chinese).
- [89] 郭茹, 杨海真. 崇明生态岛可再生能源产业发展路径[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(8): 1204-1209.
GUO Ru, YANG Haizhen. Roadmap of renewable energy industry development in Chongming ecoisland[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(8): 1204-1209(in Chinese).
- [90] 李琼. 天津中新生态城动漫园三联供能源系统优化分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
LI Qiong. Energy system optimization and analysis of cartoon and comics park in Tianjin Sino-Singapore Eco-City[J]. Tianjin: Tianjin University, 2012(in Chinese).

- [91] 韩超, 黄河, 冯蒙霜, 等. 苏州同里新能源小镇绿色建筑技术体系[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(05): 70-77.
HAN Chao, HUANG He, FENG Mengshuang. Green building technology system of Tongli new energy town in Suzhou[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(05): 70-77(in Chinese).
- [92] 郑玉平, 王俊, 杨志宏, 等. 城镇能源互联网示范应用综述: 现状、经验及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 153-166.
ZHENG Yuping, WANG Jun, YANG Zhihong, et al. Review on demonstration application of urban energy internet: present situation, experience and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 153-166(in Chinese).
- [93] 北京市人民政府. 北京市人民政府关于印发《北京市“十四五”时期城市管理发展规划》的通知[EB/OL]. (2022-04-12)[2022-11-29].
http://www.beijing.gov.cn/zhengce/gfxwj/sj/202204/t20220412_2672524.html.
The People's Government of Beijing Municipality. Notice from the People's Government of Beijing Municipality on printing and issuing the '14th Five-Year Plan for the development of urban management in Beijing [EB/OL]. (2022-04-12)[2022-11-29].
http://www.beijing.gov.cn/zhengce/gfxwj/sj/202204/t20220412_2672524.html.
- [94] ZHANG Tianhan, LIU Shengyuan, QIU Weiqiang, et al. KPI-based real-time situational awareness for power systems with a high proportion of renewable energy sources[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(4): 1060-1073.
- [95] SI Fangyuan, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Distributed optimization for integrated energy systems with secure multi-party computation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(9): 7655-7666.
- [96] SI Fangyuan, HAN Yinghua, WANG Jinkuan, et al. Connectivity verification in distribution systems using smart meter voltage analytics: a cloud-edge collaboration approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(6): 3929-3939.
- [97] SI Fangyuan, HAN Yinghua, XU Qinqin, et al. Cloud-edge-based we-market: autonomous bidding and peer-to-peer energy sharing among prosumers[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(4): 1282-1293.
- [98] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1597-1607.
WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1607(in Chinese).



司方远

在线出版日期: 2023-03-24。

收稿日期: 2022-10-27。

作者简介:

司方远(1992), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为低碳综合能源系统的优化规划、运行与控制, fysi@bjtu.edu.cn;

*通信作者: 张宁(1985), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划与运行、多能源系统、可再生能源并网, ningzhang@tsinghua.edu.cn;

韩英华(1979), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为智能电网优化控制、工业人工智能、边缘计算与边云协同应用, yhhan723@126.com;

窦真兰(1980), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为综合能源系统、能源互联网、风力发电、氢能、储能、微网等, douzhlan@126.com;

董启环(1992), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为新型电力系统、低碳能源技术, qdong7@tsinghua.edu.cn;

康重庆(1969), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划、低碳电力技术、负荷预测、电力经济等, cqkang@tsinghua.edu.cn。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)

Fundamental Problems and Research Framework for Assessment and Optimization of the Functional Regulation Capacity of the Regional Integrated Energy System Under the Aggregation of Diversified and Flexible Resources

SI Fangyuan¹, ZHANG Ning^{1*}, HAN Yinghua², DOU Zhenlan³, DONG Qihuan¹, KANG Chongqing¹

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments
(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University); 2. Northeastern University at Qinhuangdao;
3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company)

KEY WORDS: regional integrated energy system; flexibility; functional regulation capacity; energy sharing; uncertainty; distributed optimization

The regional integrated energy system (RIES) integrates and coordinates multiple flexible resources to maintain local multi-energy supply-demand balance, optimize the functional regulation capacity, realize cross-regional energy complementarity, and improve energy utilization efficiency by sharing the functional regulation capacity. It plays an essential role in deeply mining the adjustable potential of massive users and giving full play to the value of system flexibility.

This paper focuses on the RIES and carries out around three critical issues that jointly affect the system's economical and stable operation, namely evaluation of functional regulation capacity, autonomous coordination and optimization, and collaborative cluster control, as shown in Fig. 1. The quantitative evaluation method of functional regulation capacity in the RIES for multiple flexible resource aggregation is studied, which provides quantitative indicators for autonomous coordination and optimization and provides a basis for multi-agent supply and demand matching of the collaborative cluster control. Based on the conditional value at risk theory, the

autonomous coordination method of the RIES considering the optimization of functional regulation capacity is investigated. Finally, based on the former two research contents, the distributed collaborative control method of the RIES cluster for energy sharing will be explored by using cloud-edge collaborative architecture.

This paper aims to overcome critical problems such as the deep mining of the spatio-temporal dynamic evolution law of RIES functional regulation capacity, the optimization of RIES functional regulation capacity with complex nonlinear dynamic factors, and multi-party distributed coordination and secure interaction to obtain available vital indicators and information, enhance functional regulation capacity, adapt to uncertainties, and realize multi-party linkage, orderly collaboration, and secure sharing.

The research outcome will provide theoretical support for the optimal operation of the RIES, realize deep mining of massive flexible resources, and thus enhance comprehensive energy efficiency and the value of system flexibility.

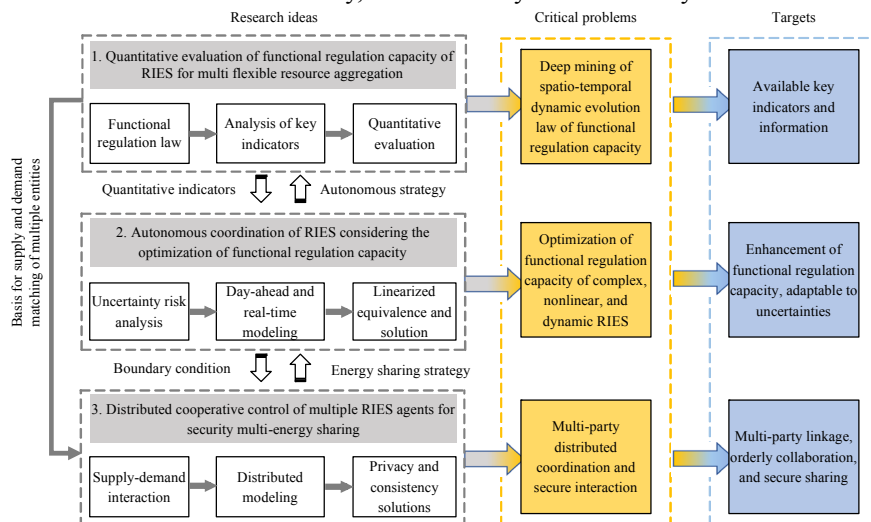


Fig. 1 Logical relationship between critical problems, potential solutions, and goals