

园区综合能源系统优化运行研究综述

朱建全¹, 刘海欣¹, 叶汉芳¹, 陈嘉俊¹, 陈来军², 梅生伟^{2,3}

(1. 华南理工大学电力学院广东省绿色能源技术重点实验室, 广州 510640;

2. 青海大学新能源学院青海省清洁能源高效利用重点实验室, 西宁 810016;

3. 清华大学电机工程与应用电子技术系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对园区综合能源系统的优化运行问题, 从模型、算法和机制 3 个层面综述了其研究现状及存在的主要问题。在模型层面, 依次讨论了园区综合能源系统的基本优化模型、不确定性模型和博弈模型的研究现状; 在算法层面, 归纳分析了数学规划方法、启发式方法和强化学习在园区综合能源系统优化运行的应用情况; 在机制层面, 概括分析了综合需求侧响应机制、碳交易机制、绿证交易机制及综合能源市场交易机制下园区综合能源系统优化运行的相关研究。最后, 基于园区能源低碳化、市场化、共享化、去中心化及数字化的演变趋势, 对园区综合能源系统优化运行的发展方向进行展望。

关键词: 园区综合能源系统; 优化运行; 低碳; 综合需求侧响应; 博弈论

Review on Optimal Operation of Park-level Integrated Energy System

ZHU Jianquan¹, LIU Haixin¹, YE Hanfang¹, CHEN Jiajun¹, CHEN Laijun², MEI Shengwei^{2,3}

(1. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Institute of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Qinghai Key Lab of Efficient Utilization of Clean Energy, Institute for Renewable Energy, Qinghai

University, Xining 810016, China; 3. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper focuses on the optimal operation of the park-level integrated energy system (PIES), and the current status of research is analyzed from three aspects: model, algorithm, and mechanism. Firstly, the research status of the PIES is expounded from the modeling aspects. The basic optimization model, the uncertainty model, and the game theory-based model are discussed, respectively. Secondly, algorithms employed in the optimal operation of the PIES are summarized, including the mathematical programming method, the heuristic method, and the reinforcement learning method. In addition, the effects of the key mechanisms on the optimal operation of the PIES are discussed. Influences brought by the mechanisms of the integrated demand response, emission trading market, green certificate market, and integrated energy market are outlined and analyzed. Finally, this paper puts forward prospects in the development trends of the optimal operation of the PIES. The opportunities and the challenges of the PIES are discussed from the decarbonization, marketization, energy sharing, decentralization, and digitalization aspects, respectively.

Key words: park-level integrated energy system; optimal operation; low carbon; integrated demand response; game theory

0 引言

园区综合能源系统(park-level integrated energy system, PIES), 又称园区微网综合能源系统^[1], 是指在特定空间范围内, 集成电、热、天然气等多种能

源的终端供能系统^[2]。随着能源的集成发展, 美国、加拿大、德国、日本等多个国家均开展了大量 PIES 的研究与实践。在我国, 随着三亚崖州湾科技城、广州中新知识城商住园区、上海临港物流园区等一大批示范性工业园区、商业园区和物流园区项目的落地, PIES 的优化运行也受到了广泛关注^[3]。

准确的模型是 PIES 优化运行的前提。与单一的电力系统或热力系统不同, PIES 的用能设备和决策主体更为多样, 能源耦合关系及交互决策行为复

基金资助项目: 国家自然科学基金(51977081; 51307064); 广东省自然科学基金(2022A1515011193)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977081, 51307064), Natural Science Foundation of Guangdong Province (2022A1515011193).

杂。此外, PIES 面临着来自不同能源系统的多重不确定性的影响, 这也对其建模分析提出了较大的挑战。

优化算法是支撑 PIES 优化运行的关键。PIES 优化运行问题本质上是一个非凸非线性随机优化问题, 求解难度高^[4]。常用的求解方法包括数学规划方法、启发式方法、强化学习算法等, 这些方法各具特色, 但均在某些方面存在短板, 如何针对 PIES 优化运行问题设计一套更为准确、快速、稳定的优化算法仍有待研究。

运行机制对 PIES 的优化运行具有重要影响。特别是在“双碳”和市场化变革的背景下, PIES 的优化运行目标需要更好地兼顾经济性和低碳化目标。另一方面, 随着碳交易市场、绿证交易市场及综合能源市场的深入发展, PIES 优化运行将逐渐从政策驱动过渡到市场驱动阶段。

围绕前述要求与挑战, 本文重点从模型、算法和机制 3 个方面梳理了 PIES 优化运行的研究进展, 并针对 PIES 能源低碳化、市场化、共享化、去中心化及数字化的演变趋势, 对其未来研究方向进行展望。

1 PIES 优化运行概述

1.1 PIES 的基本特性

PIES 是当前综合能源领域的研究热点^[5]。对比传统能源系统, PIES 主要具有如下特性:

1) 本地性。PIES 存在相当比例的分布式能源, 可实现就地消纳。这使 PIES 成为发展、消纳分布式可再生能源的重要载体^[6]。

2) 多重不确定性。光照强度、风力风向、当地气温、终端负荷需求、能源价格等因素的随机性与波动性均会对 PIES 的能源生产、转换、消费等环节产生影响^[7]。

3) 灵活性。PIES 供需两侧的能源路径多样, 可控主体较多, 这赋予了 PIES 较高的运行灵活性^[8]。

4) 逐利行为复杂。PIES 的投资和运行主体众多, 它们以生产者、消费者、产消者等角色参与市场交易, 逐利行为复杂^[2,9]。

由于存在以上特性, PIES 的运行模式、场景及调度策略较传统能源系统更为复杂, 给 PIES 的优化运行研究带来了较大的挑战。

1.2 PIES 优化运行研究概况

本文将 PIES 优化运行归纳为模型、算法和机制 3 个层面的问题, 具体如图 1 所示。在模型层面,

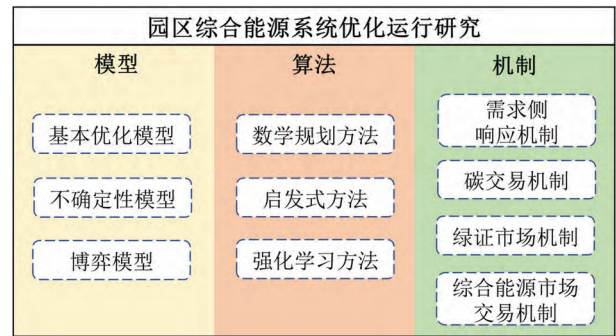


图1 园区综合能源优化运行相关研究

Fig.1 Research of the optimal operation of PIES

根据不同的应用场景, 分别对基本模型、不确定性模型和博弈模型进行分析; 在算法层面, 分别综述了数学规划方法、启发式方法和强化学习在 PIES 优化运行问题的应用现状; 在机制层面, 梳理了需求侧响应机制、碳交易机制、绿证交易机制及综合能源市场交易机制的相关研究及其对 PIES 优化运行的影响情况。

2 PIES 优化运行模型

本章从 PIES 的基本运行特性、不确定性与逐利性出发, 将已有的 PIES 优化运行模型归纳为基本模型、不确定性模型与博弈模型 3 类。

2.1 基本优化模型

2.1.1 园区关键元件

PIES 包含电、热、气、冷、氢等多种能源形式, 并通过各种元件实现能源的生产、汇集、转换和消费^[10]。这些元件模型是 PIES 优化运行的基础, 以下将分别进行介绍。

1) 源侧元件

PIES 的源侧包含分布式风力发电、光伏发电、热泵发电及能源转换设备等元件^[11-12]。其中, 风力发电、光伏发电设备广泛存在于电力系统, 其建模方式大同小异, 此处不再赘述。下文将主要对能源转换设备进行介绍。

根据能源输入形式的差异, PIES 中的能源转换设备具有以下分类: (1)以电能作为一次能源的设备, 如电锅炉、电转气设备、电解槽、电制冷设备等^[13]; (2)以天然气作为一次能源的设备, 如燃气锅炉、燃气轮机、热电联产(combined heating and power units, CHP)^[14]、冷热电三联产(combined cooling, heating and power units, CCHP)^[8]等。尽管能源转换设备建模已得到较多研究, 但已有研究在建模过程

中容易忽略或过度简化能源转换设备的运行特性,难以充分体现其耦合和转换能源的作用。例如,在对热电联产 CHP 机组进行建模时,一般假定 CHP 机组具有凸运行域。然而,对于含燃气-蒸汽联合循环的 CHP 机组,其实际运行域是非凸的^[14]。此外,CHP 机组的热电比系数常被视为恒定参数,这就忽略了其热电比可调的特性^[15]。

2) 负荷侧元件

PIES 的终端用户类型较多,在运行过程中具有较大的弹性空间。比如,电动汽车(electric vehicle, EV)被视为可移动的分布式储能设备,能作为柔性负荷参与电力负荷削峰填谷^[16]。此外,供热系统的传输时延^[17]、园区建筑的热效应^[18]、热负荷的 2 维可控性^[19]等也可用于综合需求侧响应。但是,这会增加模型的复杂度,给求解带来较大的困难。

3) 储能侧元件

PIES 包含不同形式的储能^[20]。早期以单一的储电、蓄热^[21]、贮气^[22]和储氢^[23]为主。随着多能互补技术的发展,热电联供压缩空气混合储能^[24]、熔融盐压缩空气混合储能^[25]、氢能-天然气混合储能^[26]、电-热混合储能^[27]等混合储能在 PIES 的应用也日益增多。相比于单一储能,混合储能的运行调节方式更灵活,综合储能效率更高^[28]。但是,混合储能系统能量流动的时空特性更为复杂,运行与控制难度加大。因此,文献[24-27]均对问题进行了一定程度的简化,但这又会与实际运行情况产生出入。

2.1.2 能源集线器建模

能源集线器(energy hub, EH)利用耦合矩阵的形式描述多种能源的耦合关系,其数学表达为^[29]

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{\alpha\alpha} & C_{\beta\alpha} & \cdots & C_{\alpha\omega} \\ C_{\alpha\beta} & C_{\beta\beta} & \cdots & C_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\omega} & C_{\beta\omega} & \cdots & C_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix}}_P \quad (1)$$

式中: P 、 L 、 C 分别为能源输入矩阵、输出矩阵和耦合矩阵。EH 模型的数学形式简洁直观,但在实际应用中尚存在以下问题^[29-33]:

1) PIES 具有多条能源传递路径,需引入分配系数表征能量流在不同路径的传递特性。此外,该分配系数还通常被作为决策变量参与优化,这增加了 EH 模型的非线性和求解难度^[30]。

2) PIES 的能源耦合关系复杂,难以直接建立 EH 的耦合矩阵。为此,需要根据能源类型及其聚

合-存储-转换规律,将 PIES 的 EH 整体模型拆分为若干个子 EH 模型,以降低耦合矩阵的建模难度^[29,31]。

3) EH 模型需要根据应用场景逐一构建。为自动生成耦合矩阵,一些学者提出了基于标准化分部建模^[32]和基于图论^[33]的模型自动构建方法,但仍存在可拓展性较差、无法处理随机性等缺陷。

2.2 不确定性模型

PIES 面临不同能源系统的多重不确定性因素的影响。为考虑这些不确定性因素的影响,随机规划、区间线性规划、鲁棒优化、模糊规划和信息间隙决策理论等在 PIES 的优化运行中得到了广泛应用,具体如表 1 所示。从随机性的来源看,已有研究主要关注了风、光、负荷和电价的不确定性,但有关非电能源价格不确定性的研究几乎处于空白状态。从随机性的处理方法看,随机规划和鲁棒规划由于其简明易行、理论完善等特点,在 PIES 的优化运行中最为常见。以下主要按随机性的处理方法进行分类介绍。

2.2.1 随机规划

随机规划(stochastic programming, SP)以概率的形式刻画随机参数,并将不确定性问题转化为确定性问题进行求解。常用的随机规划模型包括期望值模型^[34]、机会约束规划模型^[35]和风险度量模型^[36-37]3 种。其中,期望值模型以期望值的形式给出目标函数,结构简单,求解方便;机会约束规划模型要求在某一置信水平下满足某些约束条件^[38];风险度量模型一般利用条件风险价值等工具规避系统在恶劣场景下的风险。

SP 目前在 PIES 不确定性建模中应用最为广泛,但还存在一定的局限性。一方面,SP 依赖于准确的随机概率分布信息,而这在实际应用中往往难以获得。另一方面,SP 需要考虑大量随机场景,计算负担较重。虽然采用场景削减等技术可减小计算量,但又会在一定程度上损失计算精度。

2.2.2 区间线性规划

区间线性规划(interval linear programming, ILP)以区间的形式刻画不确定性参数。比如,文献[39]采用区间描述工况、气温等因素引发的多能耦合机组运行状态的不确定,建立了基于 ILP 的区间优化运行模型。为保证解的可行性,文献[40]利用增强 ILP 算法求解 PIES 的区间优化问题,并通过额外添加约束条件的方式,将决策结果限制在可行域内。

表 1 PIES 优化运行的不确定性处理方法

Table 1 Uncertainty methods for the optimal operation of PIES

类别	求解	特点	文献	PIES 的随机性				
				出力侧随机	负荷侧随机	主观随机	价格随机	其他
随机规划	常结合蒙特卡洛抽样、点估计、场景削减等方法降低计算量	经济性好; 需给出概率分布, 鲁棒性差、求解时间较长	[34]	—	电热	—	电价	温度
			[35]	光伏	—	—	电价	—
			[36]	风电	—	—	电价	—
			[37]	风、光	—	—	—	—
区间线性规划	分别求解最优和最劣子模型	无需给出概率分布或隶属度函数; 结果以区间形式给出	[39]	—	—	—	—	设备能源转换效率
			[40]	光伏	电	—	—	—
鲁棒优化	利用对偶理论等工具转化内层问题, 寻找鲁棒可行解	鲁棒性好、求解用时较短; 经济性较差, 等价对偶模型转换困难	[42]	风电	—	—	—	—
			[43]	风电	—	—	—	—
			[44]	风电	—	—	—	—
			[45]	风电	—	—	—	—
模糊规划	模糊化约束边界和目标函数等	定量分析带模糊性的不确定性问题; 隶属度函数的建立带有主观性	[47]	光伏	电-热	负荷响应	—	—
			[48]	风、光	—	负荷响应	—	—
信息间隙理论	预设最差或最好目标, 体现风险规避或风险追求的策略方式	给出鲁棒解与机会解; 目标的预设带有主观性	[51]	风、光	电-热-冷	—	—	—
			[52]	—	—	—	电价	—
			[53]	风、光、潮汐	电-气-热	—	—	—

ILP 不需要准确的随机分布信息, 应用方便, 计算高效^[39]。但是, ILP 问题的求解易出现区间扩张问题。当区间等式约束较多时, 求解难度较高, 甚至会出现无解的现象^[41]。

2.2.3 鲁棒优化

鲁棒优化(robust optimization, RO)以不确定集的形式刻画 PIES 的不确定参数。从模型结构看, RO 具有 min-max 和 min-max-min 两种类型。

Min-max 结构下的 RO 旨在将最恶劣场景下的 PIES 优化运行结果控制到最优水平。在这方面, 文献[42]构建了风电不确定性与系统决策者的零和博弈模型, 通过与“最劣搅局者”对抗, 形成 PIES 的鲁棒运行策略。Min-max-min 结构下的 RO 按照不确定性发生前后两个阶段对 PIES 的优化运行问题进行建模, 并借助列与约束 C&CG、Benders 分解等方法, 对不同阶段的问题进行迭代求解, 这相对于 Min-max 结构下的 RO 能更客观地反映不确定性的时序关系^[43]。

此外, 结合了 RO 与 SP 优势的分布鲁棒方法也是近年的一个研究热点。文献[44-45]分别采用 Kullback-Leibler 散度和 Wasserstein 距离刻画实际分布与参考分布之间的距离, 建立了基于分布鲁棒的 PIES 优化运行模型, 有效地协调了 PIES 的经济性与鲁棒性目标。

2.2.4 模糊规划

模糊规划(fuzzy programming, FP)运用模糊数刻画 PIES 的随机参数, 包括三角模糊数、梯形模糊数和高斯模糊数等。在这种情况下, 建立的 PIES 优化运行模型的约束边界与目标函数也是模糊的^[46]。文献[47]利用三角模糊数刻画 PIES 的源、荷双重不确定性, 建立了基于模糊期望约束和模糊机会约束的 PIES 日前优化运行模型。文献[48]考虑了需求响应下用户对价格敏感度的模糊性, 建立了基于 Z-number 的园区优化运行模型, 在表征不确定性的同时, 可以对不确定信息的可信程度加以判断。

FP 可以利用少数样本数据或者经验对 PIES 的不确定性进行描述, 有助于降低对不确定性分布信息的依赖。但是, 这种模糊的不确定性描述方式往往伴随着一定的主观性。

2.2.5 信息间隙决策理论

信息间隙决策理论(information-gap decision technology, IGDT)采用非概率模型的不确定集刻画随机性, 适用于处理 PIES 的单一不确定性因素。IGDT 可以根据不确定性的最大波动幅度, 建立风险追求和风险规避两种决策方案, 以满足鲁棒性和经济性要求^[49-50]。考虑到在风险规避方式下, IGDT 对最差目标的预设存在一定的主观性, 文献[51]提出了基于置信区间的 IGDT 方法。此外, 在 PIES

优化问题上, 文献[52-53]分别将 IGDT 与随机规划、两点估计法及 Cornish-Fisher 级数展开相结合, 在一定程度上克服了传统 IGDT 在处理多重不确定性问题上的局限性。

IGDT 具有鲁棒 IGDT 和机会 IGDT 两种形式, 兼顾了鲁棒优化与机会约束的优势。但是, 目前 IGDT 在 PIES 的应用偏少, 如何更好地利用 IGDT 处理 PIES 的多重不确定性问题也有待进一步研究。

2.3 博弈模型

相对前述模型而言, PIES 的博弈模型可以更好地描述不同利益主体的逐利行为。根据博弈场景的差异, 可以将现有的 PIES 博弈模型分为 3 类, 具体如表 2 和图 2 所示。

1) 博弈 1: 在 PIES 内部主体-园区运营商-上层能源网络之间展开博弈, 主要通过主从博弈的方式描述这 3 个层级的博弈行为。文献[9,54]分别构建了 PIES 用户与 PIES 运营商的主从博弈, 以及 PIES 用户与运营商、PIES 运营商与上层网络的双边主从博弈模型。考虑到在单一供能情况下可能出现 PIES 运营商“垄断定价”问题, 文献[55]进一步增加了 PIES 用户与电网的互动, 建立了 PIES 内部用户-园区运营商-上层网络之间的三方主从博弈模型。

2) 博弈 2: 在 PIES 内部能源消耗者-产消费者-园区运营商之间展开博弈, 主要采用主从博弈、非合作博弈等方式描述园区内部博弈行为。文献[56]建立了次序决策下 EV 用户、光伏产消费者和园区运营商的三方非合作博弈模型; 文献[57]提出一个两阶段的博弈模型, 其中第 1 阶段为用户(能源消费者与能源产消费者)与运营商的主从博弈, 第 2 阶段为能源消费者与能源产消费者之间的联盟博弈; 文献[58]对 EV 用户、能源产消费者和园区运营商等主体进行建模, 建立了基于演化博弈的多主体博弈决策模型。

3) 博弈 3: 在多园区运营商-上层网络之间展开博弈, 侧重于刻画多个 PIES 间的博弈行为, 主要模式包括合作博弈^[59-61]、非合作博弈模型^[62]、拥堵博弈^[63]等。文献[59]设计了多 PIES 的谈判博弈模型, 避免了合作博弈模式下的“舍己为人”现象; 文献[60-61]分别利用讨价还价与 Shapley 值理论, 分配合作博弈下的合作剩余; 文献[62]认为每个运营商总是试图最小化其自身成本, 并利用非合作博弈模型刻画了多个 PIES 间的竞争关系; 文献[63]将系统间的互动行为描述为拥堵博弈模型, 并分别讨论了价格型和激励型综合需求响应(integrated

表 2 基于博弈论的 PIES 优化运行主要工作

Table 2 Major works of optimal operation of PIES based on game theory

文献	博弈论		特点
	模型	场景	
[54]	主从博弈	博弈 1	基于源-荷双侧的主从博弈
[55]	主从博弈	博弈 1	考虑用户侧的有限理性; 考虑可变电设备; 采用精细化电动汽车建模
[56]	非合作博弈	博弈 2	构建了包含不同主体的 PIES 市场交易框架
[57]	混合形式	博弈 2	运营商与用户群开展主从博弈; 用户群内部开展联盟博弈
[58]	演化博弈	博弈 2	基于强化学习的高维多主体博弈
[59]	谈判博弈	博弈 3	保障各个园区的利益, 避免“舍己为人”现象
[60]	合作博弈	博弈 3	采用分布式计算; 基于讨价还价模型分配合作剩余
[61]	合作博弈	博弈 3	基于 Shapley 值分配合作剩余
[62]	非合作博弈	博弈 3	采用分布式计算
[63]	拥堵博弈	博弈 3	采用分布式计算; 考虑动态能源价格; 对结构改变具有鲁棒性

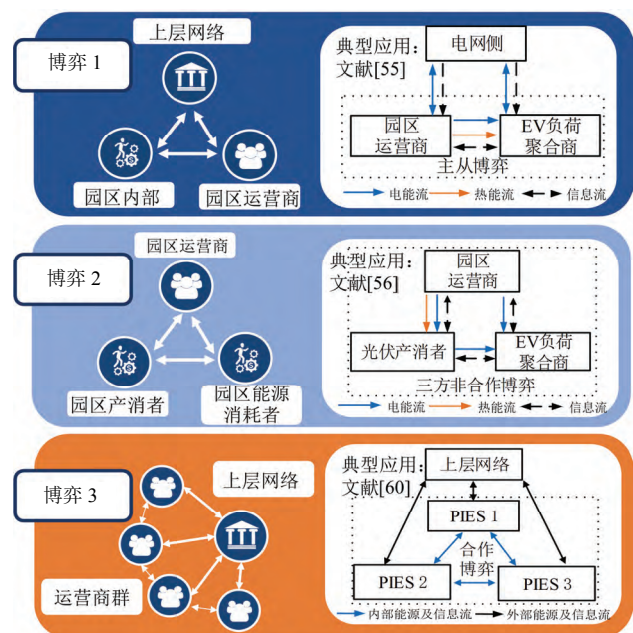


图 2 基于博弈论的 PIES 优化运行

Fig.2 Optimal operation of PIES based on game theory

demand response, IDR)对 PIES 决策的影响。

3 PIES 优化运行求解算法

常用的 PIES 优化运行问题的求解算法可分为数学规划、启发式和强化学习 3 类, 以下将分别进行介绍。

3.1 数学规划方法

数学规划方法属于经典的优化方法,对凸规划问题的计算速度快,且能获得全局最优解。常用的数学规划方法又可细分为混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)^[64-65]、混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)^[21,66-68]等类别。文献[64-65]建立了PIES的MINLP优化模型,并分别利用商业求解器CLPEX和BONMIN进行求解。考虑到利用商业求解器求解MINLP问题容易陷入局部最优,文献[67-68]分别采用一阶泰勒展开、非凸运行域分解的方式,将PIES优化运行的MINLP模型转化为MILP模型进行求解。文献[21]针对PIES优化运行的决策变量多、搜索空间大的问题,进一步采用分支定界法将MILP问题分解为一系列子问题以提高求解速度。

总体而言,数学规划方法具有严格的理论基础,且已成功开发了多种商业求解器,应用方便。但是,数学规划方法在求解大规模非线性问题时的计算效率较低,甚至可能出现不可解的情况。

3.2 启发式方法

启发式方法主要根据经验或规则对问题的最优解进行随机搜索,直至满足给定的收敛条件。遗传算法^[69-70]、粒子群算法^[1,71-73]、人工蜂群^[74]、贪婪-变邻域蛛网^[75]等多种启发式方法均已在PIES优化运行中得到了成功应用。其中,文献[1]采用粒子群算法求解PIES的多目标优化问题;文献[75]采用贪婪-变邻域蛛网算法求解PIES的站-网协同优化问题。考虑到启发式方法在寻优过程中可能产生大量不和解和易陷入局部最优的问题,文献[70,74]分别从先知种群和差分进化的角度进行改进,显著提高了PIES优化问题的求解质量。

本质上,启发式方法操作简单,且不依赖于模型的性质,应用方便。但是,已有启发式方法的求解质量普遍不稳定,且求解时间随问题规模增大而急剧增长,这也在一定程度上限制了启发式方法在大规模PIES优化运行问题的应用。

3.3 强化学习

强化学习是一种新型的机器学习方法,近年来在PIES优化运行问题中倍受关注。已有用于求解PIES优化运行问题的强化学习方法,包括Q学习^[58,76-77]、深度Q网络^[78]、深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)^[79-80]等。文献[77]综合Q学习和MILP数学规划的优势,提出了一种改

进的Q学习算法,在求解PIES双层实时经济调度时具有较快的收敛速度;文献[78]采用经验回放和冻结网络参数机制,提升了深度Q网络算法的性能;文献[80]利用DDPG解决因离散动作造成的次优决策问题,提高了多PIES协调优化问题的求解效率。

强化学习可以利用大量的决策经验,在求解高维非线性问题时能避免出现“维数灾”现象^[81]。但是,强化学习需要采用大量的历史信息进行训练,一旦训练效果不好,强化学习的决策效果将大打折扣。此外,迁移学习^[82]、深度学习^[83]和深度强化学习^[84]等机器学习算法在PIES优化运行的应用也值得深入探究。

4 PIES 优化运行机制

运行机制对PIES的优化运行具有重要影响^[85]。图3概况了需求侧响应机制、碳交易、绿证交易及综合能源市场交易等机制下PIES的优化运行情况,以下将进行具体分析。

4.1 需求侧响应机制

PIES可参与IDR,以提高其运行灵活性^[86]。与传统电力需求响应(demand response, DR)类似,IDR可通过能源价格(价格型IDR)或激励(激励型IDR)的方式引导用户主动调整用能计划。但是,IDR的响应不局限于削减或平移负荷,还可通过主动调整能源转换设备出力、终端负荷用能替代等方式优化园区整体用能情况^[87]。PIES的综合需求响应方案如图4所示。

从图4可知,PIES综合需求侧响应主要有2种方式:

1) 终端用户直接参与IDR。在大部分情况下,该响应方式需要配置可削减或可转移负荷。文献[88]基于激励型IDR,建立了直接负荷控制下的PIES优化运行模型。文献[15]认为PIES的部分负荷的用能具有可替代性,能够更好地提升IDR的调节效果。

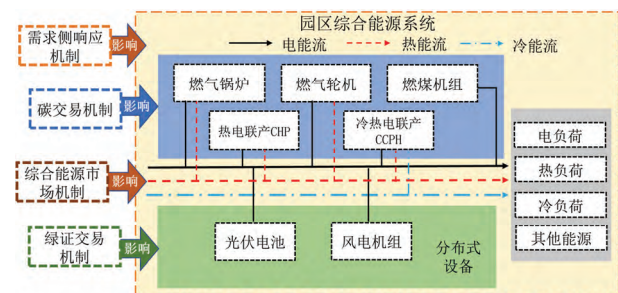


图3 PIES 优化运行机制

Fig.3 Optimal operation mechanism of PIES

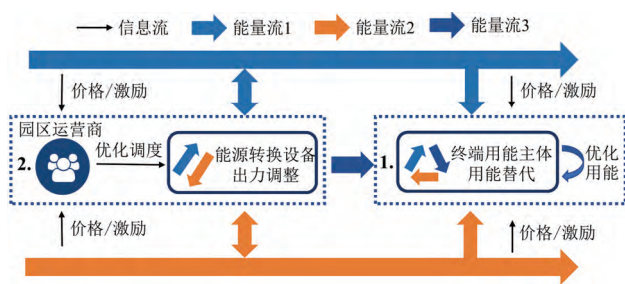


图4 PIES 综合需求侧响应方案

Fig.4 Integrated demand response scheme of PIES

但是, 该文仅考虑了天然气对电能的单向替代, 并未涉及不同能源间的相互替代问题。

2) 以负荷聚合商的形式参与 IDR。该方式可通过 PIES 能源间的相互转化开展需求侧响应, 能减少(甚至无需)终端负荷用能削减或转移。文献[89]利用了 PIES 各供能系统的耦合关系参与 IDR, 有效提高了 PIES 的可再生能源消纳能力及经济效益。文献[90]发现, 由于园区设备或能源特性的差异, 它们的需求响应速度是不同的, 忽略后将导致决策过于理想化。

随着 EV 的普及, 其参与 PIES 的 IDR 问题也受到了广泛研究。EV 具有无序和有序充放两种模式^[91]。EV 的无序充放可能拉大 PIES 用电负荷的峰谷差; 而 EV 的有序充放电则可有目的地控制其充放时间及能量, 从而起到削峰填谷的效果^[92]。为实现 EV 有序充放电, 文献[8,58]分别提出了基于车联网技术(vehicle to grid, V2G)及用户价格敏感度的 EV 需求响应模型, 可更好地挖掘 EV 的需求调节潜力。但上述文献只考虑了 EV 对电能的需求响应, 其他 IDR 模式(如燃气汽车对天然气的需求响应)的研究仍有所欠缺。

除了理论研究外, 已有较多国家在社区乃至城市层面对 IDR 进行了实践, 较具代表性的包括英国曼彻斯特项目、欧盟 E-DeMA 项目、中国延庆能源互联网项目等。这些 IDR 项目的激励机制、响应特性和调控模式各具特色, 起到了显著的节能减排效果, 受篇幅所限, 本文不再展开介绍。

4.2 碳交易机制

在碳交易市场上, 碳排放配额可被作为商品进行交易^[85]。根据定价方式的差异, 碳交易可分为单一碳价交易、阶梯碳价交易和市场出清碳价交易 3 种。

1) 单一碳价交易

单一碳价交易是指按照某一固定单价格对碳

进行交易。文献[93]建立了计及单一碳价交易的 PIES 鲁棒随机优化运行模型; 文献[94]建立了含单一碳价交易的多 PIES 经济调度模型, 并讨论了碳交易机制对引导 PIES 降碳的作用。单一碳价交易的规则简单, 建模及求解难度低, 但未能反映碳交易市场的实时供需关系, 主要适用于碳交易市场建设初期^[95]。

2) 阶梯碳价交易

阶梯碳价交易需要根据碳交易量设定不同交易区间的价格。与单一碳价交易相比, 阶梯碳价交易对 PIES 的碳排抑制能力更强^[96]。文献[97]以 PIES 的运行成本最小和能效水平最高为目标, 构建了阶梯碳价下 PIES 的多目标优化运行模型。与单一碳价交易类似, 阶梯碳价也需要提前给定, 因而依然无法反映碳交易市场的实时供需关系^[95]。

3) 市场出清碳价交易

相对前两种碳交易方式而言, 市场出清碳价交易可以充分体现市场的供需关系, 发挥市场的资源配置作用^[95]。但是, 市场出清碳价交易需要建立完善的配套机制, 交易过程复杂, 且在实施过程中面临碳价波动过大等市场风险, 主要适用于碳交易市场发展的高级阶段。

当前, 欧美发达国家已拥有较为成熟的碳交易平台与机制, 韩国等亚洲国家也通过立法等手段推动碳交易市场的发展。中国在北京、上海、深圳等 7 地设立了碳交易试点, 并将逐步推广以形成全国性的碳交易市场。

4.3 绿证交易机制

在绿证交易市场上, 证书认购者可在绿证认购平台上申请认购可再生能源配额(绿证)。文献[98]针对多 PIES 的优化运行问题, 分析了绿证交易机制对 PIES 的综合成本及碳排放量的影响, 但需提前给定绿证价格, 并未体现其实时供需关系; 文献[99]提出了基于联盟区块链的 PIES 优化运行模型, 并揭示了绿证交易对 PIES 运行模式及成本的影响机理。但是, 该文献提出的 PIES 物理模型相对简单, 难以准确描述 PIES 的实际运行特性。尽管碳交易市场和绿证交易市场对 PIES 的影响机理不尽相同, 但两者在增加绿电、减少碳排放上的目标是一致的, 如能打破这两个市场之间的壁垒, 构建碳-证联合交易市场, 无疑有利于获取更大的综合效益^[100]。

在绿证交易的实践方面, 以美国、日本、英国和瑞典为代表的一些发达国家已开展了大量的工

作。这些国家一般结合可再生能源配额制,建立起相对完善的绿证交易期货和现货市场,以促进可再生能源的消纳和发展。目前,我国的绿证交易仍处于初级阶段,以自愿认购为主。但从国家的相关政策看,我国于近期发展更为完善的绿证交易市场的可能性较大^[101]。

4.4 综合能源市场交易机制

在综合能源市场下,园区运营商可以通过市场竞争的方式,实现电能、天然气、氢气、热(冷)力等多种能源的优化配置^[102]。目前,已有较多综合能源市场交易机制方面的研究。比如,文献[103-104]分别提出了电-气及电-热的联合交易模型;文献[105]则在综合能源交易的基础上,进一步考虑了阶梯式碳交易机制,提出了综合能源市场多供能主体均衡竞价策略。但是,上述文献主要侧重于综合能源交易模型的均衡求解,有关综合能源市场交易架构、机制设计及PIES对其适应性方面的研究相对较少^[106]。

目前,已有较多国家正在积极推动能源市场从单一能源交易往综合能源交易方面转变^[107]。但是,综合能源交易远比单一的能源交易复杂,要建立一套具备实际应用条件、完善、高效的综合能源交易机制仍任重道远。

5 PIES 优化运行展望

在政策、市场和技术的共同推动下,未来PIES优化运行呈现出新的发展态势,主要包括:能源低碳化、市场化、共享化、去中心化及数字化等,以下将分别进行介绍。

5.1 “双碳”战略下的PIES优化运行

随着“双碳”战略持续推进,低碳理念已逐渐渗透到PIES的能源生产、转换、存储、消费等环节,“碳减排”、“碳零排”和“碳负排”成为PIES的重要发展方向^[85]。比如,大量高排放机组被逐步改造为低排放机组,甚至会被直接淘汰,以实现“碳减排”。随着可再生能源对传统化石能源的替代,某些园区也将实现“碳零排”。此外,某些园区还可将二氧化碳转化为生物质能源加以利用,从而减少大气中的二氧化碳含量,实现“碳负排”。在这种背景下,PIES的优化运行目标也将由传统的用能成本最小往“碳减排”、“碳零排”和“碳负排”方向转变,以促进PIES的低碳、经济发展。

5.2 能源市场化变革下的PIES优化运行

随着能源市场不断开放,能源交易门槛将逐渐

降低,使负荷聚合商、充电桩运营商甚至一些小型的产消者得以进入能源市场。为满足这些市场主体的需求,各种市场交易模式和品种不断涌现^[108]。比如,园区与园区、园区与电厂间的B2B(business-to-business)交易,用户与用户之间的C2C(customer-to-customer)交易,用户与园区间的C2B(customer-to-business)交易。如何更好地体现能源的商品属性,以支撑不同主体之间的自由、广泛交易,将成为PIES的优化运行的重要发展方向。

5.3 共享理念下的PIES优化运行

随着共享经济的盛行,能源共享也受到了越来越多的关注^[109]。能源共享将使传统PIES能源生产消费模式发生重大改变,有利于提高能源利用效率,实现共享主体之间的互利共赢。比如,各PIES间的能源共享,可充分利用分散、闲置的能源资源,减少对能源设备的投资及升级改造;各用户间的光伏共享和储能共享,可实现能量在不同用户、不同时段的余缺互济^[110]。在共享理念下,PIES的优化运行既要追求整体效益最优,又要实现效益在不同主体间的公平分配。如何将工程博弈论^[111]用于指导PIES的优化运行,以更好地协调不同主体的利益,将成为一个值得深入研究的问题。

5.4 能源区块链架构下的PIES优化运行

区块链具有去中心化、信息安全性高等优势,与PIES多主体协同运行天然契合^[112]。比如,针对PIES的多主体决策问题,可利用区块链中的实用拜占庭容错等共识算法,保证各区块对决策的参与度;在PIES的多主体信息交互过程中,可采用区块链中的分布式账本存储记录历史信息,实现信息及错误溯源,提高信息的可靠性;面对可能存在的信息篡改问题,还可通过区块链中的哈希运算等技术提高数据篡改的难度,并利用共识机制避免被篡改数据对整体决策的影响,确保PIES的信息安全^[113]。这种信息结构的变化也将引发PIES运行模式由集中式向分散式转变,传统的集中优化算法难以适用,分散优化成为能源区块链架构下PIES优化运行的必然选择。

5.5 数字孪生背景下的PIES优化运行

作为工业大数据、边缘计算、人工智能等技术的集成,数字孪生概念自提出以来就受到了学术界和工业界的广泛关注^[114]。数字孪生可以建立一个映射物理系统的虚拟系统,并基于数据驱动实现该虚拟系统的动态发展,以更好地揭示物理世界某些难

以被发现的变化规律。将数字孪生应用于PIES, 有利于实现PIES生产-传输-存储-消费的全景观测与动态演化, 支撑PIES的高效调度与控制^[115]。在这种背景下, 如何实现数字模型与物理模型的融合, 解决物理模型实际运行条件受限及数字模型数据不足等问题, 对于提高PIES的运行决策精度具有重要意义。

参考文献 References

- [1] 周灿煌, 郑杰辉, 荆朝霞, 等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1687-1696.
ZHOU Canhuang, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Multi-objective optimal design of integrated energy system for park-level Microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1687-1696.
- [2] 黄子硕, 何桂雄, 闫华光, 等. 园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 10-18.
HUANG Zishuo, HE Guixiong, YAN Huaguang, et al. Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 10-18.
- [3] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [4] 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.
- [5] 王 奖, 邓丰强, 张勇军, 等. 园区能源互联网的规划与运行研究综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 24-32, 55.
WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, et al. Review on planning and operation research of park energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 24-32, 55.
- [6] 谭 涛, 史佳琪, 刘 阳, 等. 园区型能源互联网的特征及其能量管理平台关键技术[J]. 电力建设, 2017, 38(12): 20-30.
TAN Tao, SHI Jiaqi, LIU Yang, et al. Characteristics of industrial park energy internet and key technologies of its energy management platform[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12): 20-30.
- [7] 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.
- [8] 郭 尊, 李庚银, 周 明, 等. 计及综合需求响应的商业园区能量枢纽优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2439-2447.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Optimal operation of energy hub in business park considering integrated demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2439-2447.
- [9] 马 丽, 刘 念, 张建华, 等. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3655-3661.
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Distributed energy management of community energy internet based on leader-followers game[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3655-3661.
- [10] 黎静华, 朱梦姝, 陆悦江, 等. 综合能源系统优化调度综述[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2256-2269.
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2269.
- [11] 陈沼宇, 王 丹, 贾宏杰, 等. 考虑 P2G 多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3067-3077.
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3067-3077.
- [12] 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.
- [13] 项鹏飞, 葛磊蛟, 周震震, 等. 计及 SOFC 余热回收的氢-冰储能典型园区微网优化配置模型[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 105-114.
XIANG Pengfei, GE Leijiao, ZHOU Zhenzhen, et al. Optimal configuration model of microgrid in typical hydrogen-ice energy storage park considering SOFC waste heat recovery[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 105-114.
- [14] ABDOLMOHAMMADI H R, KAZEMI A. A benders decomposition approach for a combined heat and power economic dispatch[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 71: 21-31.
- [15] 施锦月, 许 健, 曾 博, 等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2959-2966.
SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [16] 宋晓通, 吕倩楠, 孙 艺, 等. 基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3744-3754.
SONG Xiaotong, LÜ Qiannan, SUN Yi, et al. Interactive strategy of electric vehicles and integrated energy system based on electricity price guidance[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3744-3754.
- [17] 徐业球, 彭思成, 廖清芬, 等. 考虑用户互补聚合响应与热能传输延时的综合能源园区运营商两阶段短期优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 152-163.
XU Yeyan, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Two-stage short-term optimal dispatch of MEP considering CAUR and HTTD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 152-163.
- [18] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-590.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-590.
- [19] 邹云阳, 杨 莉, 冯 丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19.
ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.

- [20] 史昭娣, 王伟胜, 黄越辉, 等. 多能互补发电系统储能和储热容量分层优化规划方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3263-3271.
SHI Zhaodi, WANG Weisheng, HUANG Yuehui, et al. Hierarchical optimization planning for electrical energy and heat storage capacity in multi-energy complementary generation system[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3263-3271.
- [21] 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.
- [22] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 8-13, 22.
QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13, 22.
- [23] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 507-516.
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on stackelberg game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516.
- [24] 薛小代, 刘彬卉, 汪雨辰, 等. 基于压缩空气储能的社区微能源网设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3306-3313.
XUE Xiaodai, LIU Binhui, WANG Yuchen, et al. Micro energy network design for community based on compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3306-3313.
- [25] 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 Wanhuan, 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.
- [26] 刘继春, 周春燕, 高红均, 等. 考虑氢能-天然气混合储能的电-气综合能源微网日前经济调度优化[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 170-178.
LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, et al. A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy storage system in microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 170-178.
- [27] 滕云, 孙鹏, 罗桓桓, 等. 计及电热混合储能的多源微网自治优化运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5316-5324.
TENG Yun, SUN Peng, LUO Huanhuan, et al. Autonomous optimization operation model for multi-source microgrid considering electrothermal hybrid energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5316-5324.
- [28] 谢石晓, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [29] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179-186.
- [30] ALMASSALKHI M, HISKENS I. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs[C]// Proceedings of the 17th Power Systems Computation Conference. Stockholm, Sweden: [s.n.], 2011.
- [31] BECCUTI G, DEMIRAY T, BATIC M, et al. Energy hub modelling and optimisation: an analytical case-study[C]// Proceedings of 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2015: 1-6.
- [32] 王雄儒. 综合能源系统的能源集线器建模及优化运行控制[D]. 济南: 山东大学, 2021.
WANG Xiongru. Energy hub modeling and optimized operation control for integrated energy system[D]. Jinan, China: Shandong University, 2021.
- [33] WANG Y, ZHANG N, KANG C Q, et al. Standardized matrix modeling of multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 257-270.
- [34] GOOD N, KARANGELOS E, NAVARRO-ESPINOSA A, et al. Optimization under uncertainty of thermal storage-based flexible demand response with quantification of residential users' discomfort[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2333-2342.
- [35] EMRANI-RAHAGHI P, HASHEMI-DEZAKI H. Optimal scenario-based operation and scheduling of residential energy hubs including plug-in hybrid electric vehicle and heat storage system considering the uncertainties of electricity price and renewable distributed generations[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102038.
- [36] NAJAFI A, FALAGHI H, CONTRERAS J, et al. Medium-term energy hub management subject to electricity price and wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2016, 168: 418-433.
- [37] 李康平, 张展耀, 王飞, 等. 基于GAN场景模拟与条件风险价值的独立型微网容量随机优化配置模型[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1717-1725.
LI Kangping, ZHANG Zhanyao, WANG Fei, et al. Stochastic optimization model of capacity configuration for stand-alone microgrid based on scenario simulation using GAN and conditional value at risk[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1717-1725.
- [38] NEMIROVSKI A, SHAPIRO A. Convex approximations of chance constrained programs[J]. SIAM Journal on Optimization, 2007, 17(4): 969-996.
- [39] 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.
- [40] 白牧可, 王越, 唐巍, 等. 基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3963-3970.
BAI Muke, WANG Yue, TANG Wei, et al. Day-ahead optimal dispatching of regional integrated energy system based on interval linear programming[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3963-3970.
- [41] 郭均鹏, 李汶华. 区间线性规划的标准型及其最优值区间[J]. 管理科学学报, 2004, 7(3): 59-63.
GUO Junpeng, LI Wenhua. Standard form of interval linear programming and its optimal objective interval value[J]. Journal of Management Sciences in China, 2004, 7(3): 59-63.
- [42] 朱兰, 王吉, 唐陇军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 116-125.
ZHU Lan, WANG Ji, TANG Longjun, et al. Robust stochastic optimal dispatching of integrated energy systems considering refined power-to-gas model[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 116-125.
- [43] 李驰宇, 高红均, 刘友波, 等. 多园区微网优化共享运行策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 29-36.

- LI Chiyu, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. Optimal sharing operation strategy for multi park-level microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 29-36.
- [44] 高晓松, 李更丰, 肖 遥, 等. 基于分布鲁棒优化的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2245-2253. GAO Xiaosong, LI Gengfeng, XIAO Yao, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2245-2253.
- [45] 朱 兰, 李孝均, 唐晓军, 等. 考虑相变储能与建筑蓄能特性的微网分布鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2308-2318. ZHU Lan, LI Xiaojun, TANG Longjun, et al. Distributionally robust optimal operation for microgrid considering phase change storage and building storage[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2308-2318.
- [46] 刘宝砚, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. LIU Baoding, ZHAO Ruiqing. Stochastic programming and fuzzy programming[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 1998.
- [47] 林文智, 杨 苹, 陈芯羽, 等. 计及需求响应不确定性的园区综合能源系统日前经济优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 9-20. LIN Wenzhi, YANG Ping, CHEN Xinyu, et al. Day-ahead optimal economic dispatch of park integrated energy system considering uncertainty of demand response[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 9-20.
- [48] 林顺富, 曾旭文, 沈运帆, 等. 考虑灵活性需求的园区综合能源系统协同优化配置[J/OL]. 电力自动化设备, 2022: 1-15[2022-05-23]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202204079>. LIN Shunfu, ZENG Xuwen, SHEN Yunwei, et al. Collaborative optimal configuration of park-level integrated energy system considering flexibility requirement[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2022: 1-15[2022-05-23]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202204079>.
- [49] BEN-HAIM Y. Information gap decision theory: decisions under severe uncertainty[M]. San Diego, California, USA: Academic Press, 2001.
- [50] 于雪菲, 张 帅, 刘琳琳, 等. 基于信息间隙决策理论的碳捕集电厂调度[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版), 2022: 1-7[2022-05-09]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.26.008>. YU Xuefei, ZHANG Shuai, LIU Linlin, et al. Carbon capture power plant scheduling based on information gap decision theory[J/OL]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022: 1-7 [2022-05-09]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.26.008>.
- [51] 彭春华, 郑 聪, 陈 婧, 等. 基于置信间隙决策的综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5593-5603. PENG Chunhua, ZHENG Cong, CHEN Jing, et al. Robust optimal dispatching of integrated energy system based on confidence gap decision[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5593-5603.
- [52] DOLATABADI A, JADIDBONAB M, MOHAMMADI-IVATLOO B. Short-term scheduling strategy for wind-based energy hub: a hybrid stochastic/IGDT approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 438-448.
- [53] 孔德政, 张 靖, 何 宇, 等. 区域综合能源系统 IGDT-MPC 双层能量优化调度[J/OL]. 电网技术, 2021: 1-12[2022-05-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1794>. KONG Dezheng, ZHANG Jing, HE Yu, et al. IGDT-MPC bi-layer energy optimal scheduling of regional integrated energy system[J/OL]. Power System Technology, 2021: 1-12[2022-05-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1794>.
- [54] 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.
- [55] 帅轩越, 王秀丽, 吴 雄. 用户侧有限理性下基于主从博弈与电热需求响应的综合能源微网优化运行[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 25-31. SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong. Optimal operation of integrated energy microgrid based on leader-follower game and electricity and heat demand response under user-side limited rationality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 25-31.
- [56] 杨 铮, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向综合能源园区的三方市场主体非合作交易方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 32-39, 47. YANG Zheng, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Non-cooperative trading method for three market entities in integrated community energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 32-39, 47.
- [57] 徐业琰, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于综合需求响应和博弈的区域综合能源系统多主体日内联合优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2506-2516. XU Yeyan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Multi-player intraday optimal dispatch of integrated energy system based on integrated demand response and games[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2506-2516.
- [58] 刘 洪, 李吉峰, 葛少云, 等. 基于多主体博弈与强化学习的并网型综合能源微网协调调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 40-48. LIU Hong, LI Jifeng, GE Shaoyun, et al. Coordinated scheduling of grid-connected integrated energy microgrid based on multi-agent game and reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 40-48.
- [59] 李 鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于谈判博弈的多微网综合能源系统多目标联合优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3680-3688. LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Multi-objective union optimal configuration strategy for multi-microgrid integrated energy system considering bargaining games[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3680-3688.
- [60] 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/OL]. 电网技术, 2021: 1-12[2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20211202.1449.003.html>. HUANG Haitao, CHEN Xi, ZHA Junji. Partition autonomous energy cooperation community and joint optimal scheduling for multi park integrated energy system[J/OL]. Power System Technology, 2021: 1-12[2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20211202.1449.003.html>.
- [61] BAHMANI R, KARIMI H, JADID S. Cooperative energy management of multi-energy hub systems considering demand response programs and ice storage[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 106904.
- [62] SHEIKHI A, RAYATI M, BAHRAMI S, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 675-683.
- [63] SOBHANI S O, SHEYKHHA S, MADLENER R. An integrated two-level demand-side management game applied to smart energy hubs with storage[J]. Energy, 2020, 206: 118017.
- [64] HEIDARI A, MORTAZAVI S S, BANSAL R C. Stochastic effects of ice storage on improvement of an energy hub optimal operation including demand response and renewable energies[J]. Applied Energy,

- 2020, 261: 114393.
- [65] THANG V V, HA T, LI Q H, et al. Stochastic optimization in multi-energy hub system operation considering solar energy resource and demand response[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 141: 108132.
- [66] 丁泉, 窦晓波, 钱国明, 等. 电力现货市场环境下游区型综合能源系统多阶段联合优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 56-63.
DING Quan, DOU Xiaobo, QIAN Guoming, et al. Multi-stage joint optimal operation of park-level IES in electricity spot market[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 56-63.
- [67] 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.
- [68] ALIPOUR M, MOHAMMADI-IVATLOO B, ZARE K. Stochastic scheduling of renewable and CHP-based microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(5): 1049-1058.
- [69] 李相俊, 马锐, 王上行, 等. 考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 62-70.
LI Xiangjun, MA Rui, WANG Shangxing, et al. Operation control strategy for energy storage station after considering battery life in commercial park[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 62-70.
- [70] 陈永龙, 朱金大, 杨冬梅, 等. 基于多方利益博弈的园区级综合能源系统经济优化运行技术研究[J]. *高电压技术*, 2021, 47(1): 102-110.
CHEN Yonglong, ZHU Jinda, YANG Dongmei, et al. Research on economic optimization operation technology of park-level integrated energy system based on multi-party interest game[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 102-110.
- [71] 仇书山, 毛承雄, 马春艳, 等. 基于能源路由器的配电网与综合能源微网群协同运行优化[J/OL]. *高电压技术*, 2022: 1-13 [2022-05-09]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20211463>.
QIU Shushan, MAO Chengxiong, MA Chunyan, et al. Cooperative operation optimization of distribution network and multi-microgrid integrated energy system based on energy router[J/OL]. *High Voltage Engineering*, 2022: 1-13 [2022-05-09]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20211463>.
- [72] 徐青山, 李淋, 盛业宏, 等. 冷热电联供型多微网主动配电系统日前优化经济调度[J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1726-1734.
XU Qingshan, LI Lin, SHENG Yehong, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution power system with combined cooling, heating and power-based microgrids[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1726-1734.
- [73] 王仕俊, 平常, 薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. *中国电力*, 2018, 51(8): 77-84.
WANG Shijun, PING Chang, XUE Guobin. Synergic optimization of community energy internet considering the shared energy storage[J]. *Electric Power*, 2018, 51(8): 77-84.
- [74] ZARE M, NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, et al. New stochastic bi-objective optimal cost and chance of operation management approach for smart microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(6): 2031-2040.
- [75] 黄伟, 柳思岐, 叶波. 考虑源-荷互动的园区综合能源系统站网协同优化[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 44-53.
HUANG Wei, LIU Siqi, YE Bo. Station-network cooperative optimization of integrated energy system for park considering source-load interaction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(14): 44-53.
- [76] FORUZAN E, SOH L K, ASGARPOOR S. Reinforcement learning approach for optimal distributed energy management in a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5749-5758.
- [77] 聂欢欢, 张家琦, 陈颖, 等. 基于双层强化学习方法的多能园区实时经济调度[J]. *电网技术*, 2021, 45(4): 1330-1336.
NIE Huanhuan, ZHANG Jiaqi, CHEN Ying, et al. Real-time economic dispatch of community integrated energy system based on a double-layer reinforcement learning method[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(4): 1330-1336.
- [78] 刘俊峰, 陈剑龙, 王晓生, 等. 基于深度强化学习的微能源网能量管理与优化策略研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3794-3803.
LIU Junfeng, CHEN Jianlong, WANG Xiaosheng, et al. Energy management and optimization of multi-energy grid based on deep reinforcement learning[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3794-3803.
- [79] 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.
- [80] 李昊, 刘畅, 苗博, 等. 考虑冷热电互补及储能系统的多园区综合能源系统协调优化调度[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1482-1491.
LI Hao, LIU Chang, MIAO Bo, et al. Coordinative optimal dispatch of multi-park integrated energy system considering complementary cooling, heating and power and energy storage systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(5): 1482-1491.
- [81] 高阳, 陈世福, 陆鑫. 强化学习研究综述[J]. *自动化学报*, 2004, 30(1): 86-100.
GAO Yang, CHEN Shifu, LU Xin. Research on reinforcement learning technology: a review[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(1): 86-100.
- [82] 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*, 2020, 38(1): 63-72.
- [83] 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.
- [84] 吴笑民, 郭雨, 郑景文, 等. 多能互补智慧园区能源系统优化运行方法[J/OL]. *高电压技术*, 2022: 1-9 [2022-06-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220129>.
WU Xiaomin, GUO Yu, ZHENG Jingwen, et al. Optimal operation method of multi-energy system complementary for power system of smart park[J/OL]. *High Voltage Engineering*, 2022: 1-9 [2022-06-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220129>.
- [85] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 821-833.
- [86] 曾鸣, 武赓, 李冉, 等. 能源互联网中综合需求侧响应的关

- 键问题及展望[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3391-3398.
- ZENG Ming, WU Geng, LI Ran, et al. Key problems and prospects of integrated demand response in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3391-3398.
- [87] 徐 箴, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7194-7205.
- XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205.
- [88] BAHRAMI S, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650-658.
- [89] 艾 欣, 陈政琦, 孙英云, 等. 基于需求响应的电-热-气耦合系统综合直接负荷控制协调优化研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1160-1169.
- AI Xin, CHEN Zhengqi, SUN Yingyun, et al. Study on integrated DLC coordination optimization of electric-thermal-gas coupling system considering demand response[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1160-1169.
- [90] 刘天琪, 卢 俊, 何 川, 等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 261-268.
- LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 261-268.
- [91] 吴红斌, 侯小凡, 赵 波, 等. 计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 77-84, 99.
- WU Hongbin, HOU Xiaofan, ZHAO Bo, et al. Economical dispatch of microgrid considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 77-84, 99.
- [92] 吕祥梅, 刘天琪, 刘 绚, 等. 考虑高比例新能源消纳的多能源园区日前低碳经济调度[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1586-1597.
- LÜ Xiangmei, LIU Tianqi, LIU Xuan, et al. Low-carbon economic dispatch of multi-energy park considering high proportion of renewable energy[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(12): 1586-1597.
- [93] 李 鹏, 杨莘博, 魏澄宙, 等. 计及能源政策的园区综合能源系统鲁棒随机优化模型[J/OL]. 中国电力, 2022: 1-12[2022-05-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20220228.1412.004.html>.
- LI Peng, YANG Shenbo, WEI Chengzhou, et al. Robust stochastic optimization model of the park's integrated energy system considering impact of energy policy[J/OL]. Electric Power, 2022: 1-12 [2022-05-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20220228.1412.004.html>.
- [94] 顾海飞, 喻 洁, 李 扬, 等. 环境约束下含多能园区的新型城镇双层组合优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2441-2452.
- GU Haifei, YU Jie, LI Yang, et al. Bi-level joint optimization economic dispatch of new-type town with multi-energy parks under environmental constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2441-2452.
- [95] 万文轩, 冀亚男, 尹 力, 等. 碳交易在综合能源系统规划与运行中的应用及展望[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 39-48.
- WAN Wenxuan, JI Ya'nan, YIN Li, et al. Application and prospect of carbon trading in the planning and operation of integrated energy system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 39-48.
- [96] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48-55.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermo-electric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48-55.
- [97] 任德军, 刘自发, 高 峰, 等. 考虑碳交易机制与需求响应的园区综合能源系统电热协同运行优化研究[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 119-130.
- REN Dejun, LIU Zifa, GAO Feng, et al. Electrothermal coordinated operation optimization of park integrated energy system considering carbon trading mechanism and demand response[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 119-130.
- [98] 骆 钊, 卢 涛, 马 瑞, 等. 可再生能源配额下多园区综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 8-14.
- LUO Zhao, LU Tao, MA Rui, et al. Optimal scheduling of multi-park integrated energy system under renewable portfolio standard[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 8-14.
- [99] 张力波, 童立敏. RPS 下园区能源互联网联盟区块链电力交易策略[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 570-580.
- ZHANG Libo, TONG Limin. Consortium blockchain power trading strategy of park-level energy internet under RPS[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(3): 570-580.
- [100] 骆 钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 248-255.
- LUO Zhao, QIN Jinghui, LIANG Junyu, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system with carbon-green certificate coordinated trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 248-255.
- [101] 赵新刚, 武晓霞. 绿色证书交易的国际比较及其对中国的启示[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2019(3): 1-8.
- ZHAO Xingang, WU Xiaoxia. International comparison of tradable green certificates and its enlightenment to China[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2019(3): 1-8.
- [102] 谈金晶, 李 扬. 多能源协同的交易模式研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6483-6496.
- TAN Jinjing, LI Yang. Review on transaction mode in multi-energy collaborative market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6483-6496.
- [103] 孙庆凯, 王小君, 王 怡, 等. 基于多智能体 Nash-Q 强化学习的综合能源市场交易优化决策[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 124-133.
- SUN Qingkai, WANG Xiaojun, WANG Yi, et al. Optimal trading decision-making for integrated energy market based on multi-agent Nash-Q reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 124-133.
- [104] CHEN Y, WEI W, LIU F, et al. Energy trading and market equilibrium in integrated heat-power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4080-4094.
- [105] 彭春华, 张海洋, 孙惠娟, 等. 碳交易机制下综合能源市场多供能主体均衡竞价策略[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 463-471.
- PENG Chunhua, ZHANG Haiyang, SUN Huijuan, et al. Balanced bidding strategy for multiple energy suppliers in the integrated energy market under carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 463-471.
- [106] 练依情, 郭祚刚, 喻 磊, 等. 市场出清机制下综合能源服务商竞争策略[J]. 南方电网技术, 2019, 13(7): 10-16, 42.

- LIAN Yiqing, GUO Zuogang, YU Lei, et al. Competition strategy of integrated energy service provider under pool-based market mechanism[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(7): 10-16, 42.
- [107] 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.
- [108] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
- CHEN Qixin, LIU Dunnan, LIN Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy internet (1)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056.
- [109] 陈玥, 刘锋, 魏韡, 等. 需求侧能量共享: 概念、机制与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 1-11.
- CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 1-11.
- [110] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 2-8, 16.
- KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8, 16.
- [111] 梅生伟, 刘锋, 魏韡. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- MEI Shengwei, LIU Feng, WEI Wei. Engineering game theory and applications in power systems[M]. Beijing, China: Science Press, 2016.
- [112] 沈翔宇, 陈思捷, 严正, 等. 区块链在能源领域的价值、应用场景与适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 18-29.
- SHEN Xiangyu, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Analysis on value, application scenarios and applicability of blockchain in energy industry[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 18-29.
- [113] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4022.
- ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022.
- [114] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2028.
- PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028.
- [115] 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.



朱建全

1982—, 男, 博士, 副教授

主要研究方向为电力系统优化、电力市场、综合能源系统等

E-mail: zhujianquan@scut.edu.cn

ZHU Jianquan

Ph.D.

Associate professor



LIU Haixin

Corresponding author

刘海欣(通信作者)

1996—, 女, 硕士生

主要研究方向为综合能源系统优化运行

E-mail: 1795400437@qq.com

收稿日期 2022-05-31 修回日期 2022-07-03 编辑 程子丰