

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212265

基于 CiteSpace 的能源系统优化调度 研究热点与趋势分析

林俊光^{1,2}, 冯彦皓², 林小杰², 吴凡^{1,2}, 钟 崑², 俞自涛^{2,3}, 叶建君⁴

(1.浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311100;

2.浙江大学热工与动力系统研究所, 浙江 杭州 310027;

3.浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

4.浙江浙能电力股份有限公司萧山发电厂, 浙江 杭州 311251)

[摘要] 能源系统优化调度对保证能源供需平衡有重要作用。对 30 余年国内外该领域发展状况、热点及趋势的量化对比, 通过 CiteSpace 软件对 1990—2022 年中国知网 (CNKI) 和 Web of Science (WoS) 数据库的能源系统优化调度研究进行分析。结果表明: 该领域虽处于常规科学阶段但文献具有高增速, 国内文献增速较国际快且机构间交流密切; 国外热点为微电网的优化算法、不确定性和稳定性控制, 综合能源系统的含储能动态调度, 调度技术的强化学习和博弈论; 国内热点趋势为微电网的算法-动态优化/双层优化/分时电价-多智能体-需求侧管理-深度学习及综合能源系统的不确定性-能源集线器-电转气-综合需求响应-数据驱动-碳交易、碳捕集和强化学习等。由分析结果可见, 启发式算法和深度学习等在未大规模能源系统下有望实现研究范式转变。

[关键词] 能源系统; 优化调度; CiteSpace 软件; 文献计量学; 研究趋势

[引用本文格式] 林俊光, 冯彦皓, 林小杰, 等. 基于 CiteSpace 的能源系统优化调度研究热点与趋势分析[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 1-12. LIN Junguang, FENG Yanhao, LIN Xiaojie, et al. Research hotspots and trends analysis of energy systems optimal scheduling based on CiteSpace[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 1-12.

Research hotspots and trends analysis of energy systems optimal scheduling based on CiteSpace

LIN Junguang^{1,2}, FENG Yanhao², LIN Xiaojie², WU Fan^{1,2}, ZHONG Wei²,
YU Zitao^{2,3}, YE Jianjun⁴

(1.Zhejiang Energy Group Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311100, China;

2.Institute of Thermal Science and Power Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3.State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4.Zhejiang Zheneng Electric Power Co., Ltd., Xiaoshan Power Plant, Hangzhou 311251, China)

Abstract: The optimal scheduling of energy systems is important in ensuring the balance of energy supply and demand. Quantitative comparative studies of the development status, hot spots and trends in this field at home and abroad for more than 30 years, the research of energy systems optimal scheduling was analyzed in the CNKI and WoS databases from 1990—2022 by CiteSpace software. The results show that this field is in the conventional scientific stage but the literature has a high growth rate, the domestic literature growth rate is faster than the international and the inter-institutional exchange is close; the foreign hotspots are optimization algorithms, uncertainty and stability control for microgrids, dynamic scheduling with energy storage for integrated energy system (IES), as well as reinforcement learning and game theory for scheduling technique; the domestic hotspot trends are algorithms, dynamic optimization/bilayer optimization/time-sharing tariffs, multi-intelligent bodies, demand side management and deep learning for microgrids, as well as uncertainty, energy hubs, electricity to gas,

修回日期: 2022-12-12 网络首发日期: 2023-02-27

基金项目: 浙江浙能技术研究院有限公司科技项目 (ZNKJ-2019-087); 国家重点研发计划项目 (2019YFE0126000)

Supported by: Research Project of Zhejiang Energy R&D Institute Co., Ltd. (ZNKJ-2019-087); National Key Research and Development Program (2019YFE0126000)

第一作者简介: 林俊光 (1984), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为综合能源系统集成及优化, linjg_008@163.com。

integrated demand response, data driven, carbon trading, carbon capture and reinforcement learning for IES. The results show heuristic algorithms and deep learning techniques are expected to achieve a paradigm shift in future large-scale energy systems.

Key words: energy system; optimal scheduling; CiteSpace software; bibliometrics; research trend

随着电力体制逐步改革,传统一次能源主导的单一能源系统逐步向多种形式能源并存的多能源系统(multiple energy systems, MES)发展^[1]。MES具有利用率高、清洁安全等优点,将逐步成为当今能源系统发展的主流方向^[2]。能源系统的发展从底层元件(热电联产、冷热电三联供等)开始,经过微(电)网和分布式能源的发展,到如今的能源互联网和综合能源系统,历经了30余年时间^[3-4]。在能源系统演进和研究发展的进程中,包括电压频率控制和功率分配等的优化调度作为能源系统实现平衡供需和提高效率的重要支撑受到广泛关注^[5]。

然而,在30余年的能源系统优化调度学术研究中,相关文献繁杂且数量巨大,作为相关研究人员进入该领域时存在难以整理和难以辨识发展方向的问题。这些问题包括:1)优化调度在不同多能源系统中内涵是否一致,不同系统的优化调度问题有何不同;2)优化调度的研究发展脉络发生了何种变化;3)国内外的研究侧重点是否一致;4)是否出现学科交叉和共性问题等。

国内外对能源系统优化调度有一些综述。周晓倩等^[6]对冷热电三联供(combined cooling, heating and power, CCHP)微网优化调度策略进行了综述;马艺玮等^[5]对微电网的运行控制和优化调度方法进行了综述;黎静华等^[7]对综合能源系统优化调度中的调度模型、调度方法进行了综述。但是,传统综述缺乏从整体角度展示上述问题的答案。

文献计量学是一门量化审查某一学科或其方向现有文献数据的学科,它能够呈现文献的发展规律、发展趋势、研究热点走向、研究者之间的合作网络和文献之间的共引关系等^[8]。CiteSpace软件是一款广泛使用的探索学科领域演化和前沿发展的信息可视化软件,其生成的科学知识图谱和文献统计信息能够体现科学发展模式理论对特定领域的发展规律^[9]。虽有文献使用CiteSpace软件对微电网下储能及电能质量领域进行分析^[10-11],但仍缺乏大时间尺度下优化调度领域的文献计量学分析(包括热电联产、CCHP、微(电)网及综合能源系统等优化调度问题)。本文从优化调度的角度对当今国内外能源系统的研究范围和热点进行文献计量学

分析,有助于梳理研究方向并回答上述问题。

1 研究方法

本文采用CiteSpace V5.8.R3软件进行文献计量学分析。Web of Science(WoS)核心数据库和中国知网(CNKI)分别为国内外主流研究成果的阵地^[12],其中WoS包含了IEEE和IET的刊物。根据能源系统演进的特征^[1,3],本文设置WoS搜索式为“TS=(('integrate* energy system\$' OR microgrid\$ OR 'distributed energ*\$' OR 'distributed generation\$' OR 'combined cooling, heating and power' OR 'combined heat* and power*' OR 'power system\$')) AND (dispatch* OR control* OR schedul* OR manage* OR operati*) AND (optim*) NOT TI = (capacit* OR configuration\$ OR plan*)”,同时设置CNKI的搜索关键词为“SU=(('综合能源系统'+ '微网'+ '微电网'+ '分布式能源'+ '分布式发电'+ '冷热电联供'+ '冷热电三联供'+ '冷热电联产'+ '热电联产') * ('调度优化'+ '优化调度'+ '优化调控'+ '调控优化'+ '经济调度'+ '优化运行'+ '运行优化')) AND NOT TI = '容量'”。2个数据库的文献类型限制为“研究论文和综述论文”,搜索时间从1990年1月1日至2022年4月16日,其中WoS数据库进一步限制为核心合集和SCI-Expanded引文索引。通过手动筛选去除无关文献,最终保留待分析的文献数量分别为1 805篇(CNKI)和23 436篇(WoS)。

2 研究现状分析

2.1 文献分布特征统计

本文对WoS数据库和CNKI数据库中相关文献进行数据清洗,去除重名和无关文献,同时合并相同机构/作者名,最终得到文献分布总体特征分别为:717个机构的5 003个作者撰写的1 805篇文献分布于286个期刊(CNKI)和144个国家和地区、8 873个机构的45 053个作者撰写的23 436篇文献分布于954个期刊(WoS)。

2.1.1 文献时间分布

文献时间分布能够反映出国内和世界范围内对能源系统优化调度的研究热度总体变化趋势。

图 1 为能源系统优化调度文献时间分布。由图 1 可见，1990 年以来 CNKI 和 WoS 数据库收录的文献数量随时间的变化可分为 2 个阶段。1) 2005 年以前，全球能源系统优化调度研究较少，且增长缓慢；2) 2006 年以后，随着微网概念提出与发展，相关文献数量呈指数增长趋势。国内文献虽起步较晚，在 2010 年以后才开始进入爆发期，但增速显著高于同时期世界范围内文献增速。由于本文统计时间所限，2022 年的文献并未全部计入。

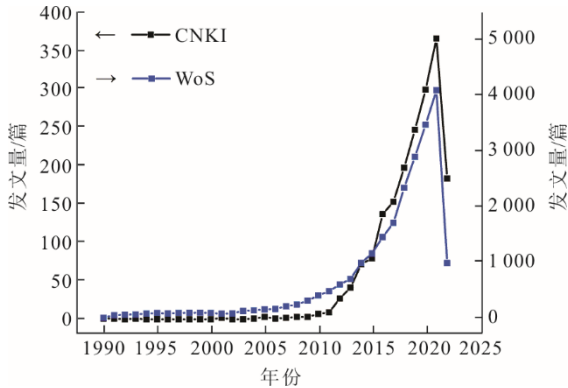


图 1 能源系统优化调度文献时间分布

Fig.1 Time distribution of literature on optimal scheduling of energy systems

2.1.2 文献期刊分布

文献期刊分布能够反映出研究领域的期刊质量和核心期刊。表 1 为能源系统优化调度的文献总数排名前十的中文期刊 (CNKI) 和英文期刊 (WoS) 统计结果。其中 WoS 核心合集中记录的被引用数，NA 为 CNKI 引文数据无被引用数据；期刊自引率为 2021 年数据，CNKI 数据库的期刊自引率来源于维普网；AIS 代表 article influence score，其反映单篇文献的影响力。表 1 中篇均被引数越高且期刊自引率越低，即不考虑作者自引率，期刊影响力越强。

从表 1 可见，在能源系统优化调度中，老牌电力期刊占据了国内主流地位，而如 Energies、Applied Energy、Energy 等能源领域期刊在 WoS 数据库中占据主要位置，表明国际期刊在该主题中有更广的范围和更明显的学科交叉。综合篇均被引数、期刊自引率和 AIS 指标反映出 JCR Q1 区电力领域期刊 IEEE Transactions on Power Systems 和 IEEE Transactions on Smart Grid 的文献质量较高，而 Energies、IEEE Access 等期刊的文献影响力较低。

表 2 为根据布拉德福定律对期刊分布的分析结果。布拉德福定律表明一个学科领域的期刊可分为核心区、相关区和非相关区，且 3 个区的期刊数量

大致符合 $1:n:n^2$ 的关系^[13]。然而，从表 2 可看出 CNKI 和 WoS 数据库的文献不符合布拉德福定律，且非相关区的文献数量较多，表明能源系统优化调度主题分布较零散且涉及学科交叉，难以用单一学科的经验定律进行验证。

表 1 能源系统优化调度文献总数前 10 位期刊
Tab.1 Top 10 journals in terms of total literatures on optimal scheduling of energy systems

来源	期刊	文献/比例/篇 %	总被引次数/次	篇均被引数/次	期刊自引率/%	AIS	
CNKI	电网技术	121	6.70	NA	NA	12.1	NA
	电力系统自动化	106	5.87	NA	NA	14.1	NA
	电力自动化设备	90	4.99	NA	NA	20.7	NA
	电力建设	88	4.88	NA	NA	5.4	NA
	中国电机工程学报	87	4.82	NA	NA	10.6	NA
	电力系统保护与控制	67	3.71	NA	NA	16.8	NA
	电测与仪表	58	3.21	NA	NA	21.6	NA
	电力系统及其自动化学报	58	3.21	NA	NA	11.4	NA
	现代电力	37	2.05	NA	NA	5.4	NA
	电网与清洁能源	35	1.94	NA	NA	13.1	NA
WoS	Energies	1 518	6.48	13 942	9.18	24.2	0.444
	IEEE Transactions on Power Systems	1 496	6.38	83 890	56.08	12.2	2.017
	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	1 432	6.11	41 871	29.24	22.8	0.847
	Applied Energy	1 082	4.62	45 159	41.74	10.0	1.869
	Energy	1 055	4.50	33 401	31.66	17.9	1.236
	IEEE Access	979	4.18	8 645	8.83	14.7	0.613
	IEEE Transactions on Smart Grid	865	3.69	42 265	48.86	9.8	2.591
	IET Generation Transmission & Distribution	828	3.53	14 779	17.85	6.6	0.661
	Electric Power Systems Research	684	2.92	16 837	24.62	15.3	0.656
	Energy Conversion and Management	657	2.80	25 414	38.68	13.9	1.593

表 2 能源系统优化调度期刊分布的布拉德福定律结果
Tab.2 Results of Bradford's law for journal distribution of energy systems optimal scheduling

期刊分类	CNKI			WoS		
	分类标准/篇	期刊数/个	文献数/篇	分类标准/篇	期刊数/个	文献数/篇
核心区	>58	7	617	>979	6	7 562
相关区	11~57	27	602	167~978	23	7 864
非相关区	<10	252	586	<166	925	8 010

2.2 文献合作网络分析

2.2.1 国家合作网络分析

文献的国家分布能够反映出世界范围内活跃的作者的地理位置分布和各个国家的贡献量。本文对 WoS 数据库中的文献进行国家文献总数统计分析，结果见表 3 (按照第一作者所在国家进行分析)。表 3 中中介中心性指国家参与国际合作的频次及桥

储电技术进行了综述, Li Z G 等^[22]考虑了含区域供热管网动态储能的调度。

2) 按照中介中心性排序分析研究热点

文献共被引的中介中心性反映调度技术等学科交叉下的研究热点大小。多目标优化算法^[23-26]占据了前四, 表明多目标、非线性约束、多不确定性下的优化计算问题具有较强的学科交叉性, 对推动优化调度发展起重要的作用并成为研究热点。针对可再生能源和产消者行为的不确定性, 强化学习^[27]和博弈论^[28]等方法的提出突破了传统优化方法的缺陷, 有望形成优化调度方法论新范式。此外, 由于优化调度的工程背景, 早期优化调度试点案例也有较高的中介中心性^[29-31]。

3) 按照 Brust 强度排序分析研究趋势

Brust 强度表示文献研究趋势和研究前沿的转变, 通过各时间段的高 Brust 强度文献可以归纳研究前沿。Brust 强度越高代表研究前沿转变为研究热点的程度越大。2013—2016 年的文献^[32-33]主要关注基于微电网的小规模电力系统优化调度平台的初步运行实践。随着可再生能源的逐步渗透, 2015—2019 年的文献^[19-20,34]关注可再生能源渗透下的输出功率不确定性优化。然后, 2017—2022 年的文献^[16,18]表明优化控制正在成为优化调度的前沿, 考虑可再生能源的微电网优化调度研究热点正逐步从设计运行转变为工程部署。并且, 随着新市场和政策的引入, 研究范式转变有待进一步探讨^[14-15,22]。

表 4 能源系统优化调度中总被引、最高中介中心性和 Brust 强度前 10 位的文献

Tab.4 Top ten literatures in total citations, centrality and Brust intensity in optimal scheduling of energy systems

按照引用数排序			按照中介中心性排序			按照出现时间及 Brust 强度排序			
文献 (引用数)	引用数	类型	文献 (中介中心性)	中介中心性	类型	文献 (Brust 强度)	起止年份	Brust 强度	类型
Olivares D E, 2014 ^[18]	180	R	Moghaddam A A, 2011 ^[23]	0.16	O	Zimmerman R D, 2011 ^[32]	2013—2016	52.23	O
Bertsimas D, 2013 ^[19]	166	O	Yang X S, 2012 ^[24]	0.12	O	Chen C, 2011 ^[33]	2013—2016	40.54	O
Molzahn D K, 2017 ^[16]	161	R	Marzband M, 2017 ^[25]	0.12	O	Bertsimas D, 2013 ^[19]	2015—2018	43.90	O
Li Z G, 2016 ^[22]	152	O	Motevasel M, 2013 ^[26]	0.09	O	Zhang Y, 2013 ^[34]	2015—2018	36.20	O
Luo X, 2015 ^[21]	141	R	Venayagamoorthy G K, 2016 ^[27]	0.09	O	Su W C, 2014 ^[20]	2016—2019	35.08	O
Hirsch A, 2018 ^[14]	134	R	Ma L, 2016 ^[28]	0.08	O	Olivares D E, 2014 ^[18]	2017—2019	57.60	R
Mirjalili S, 2016 ^[17]	133	O	Li H, 2017 ^[29]	0.08	O	Molzahn D K, 2017 ^[16]	2019—2022	42.94	R
Zia M F, 2018 ^[15]	128	R	Zhao B, 2014 ^[30]	0.07	R	Li Z G, 2016 ^[22]	2019—2022	40.75	O
Su W C, 2014 ^[20]	127	O	Prakash S, 2014 ^[35]	0.07	O	Zia M F, 2018 ^[15]	2019—2022	36.55	R
Wang Z Y, 2015 ^[36]	125	O	Shi W B, 2015 ^[31]	0.07	O	Hirsch A, 2018 ^[14]	2020—2022	47.12	R

注: 在 Top 50 selection criteria 下统计, 非 WoS 上的引用总数。

3.2 从关键词聚类时间线分析 CNKI 数据库研究热点及变化

通过关键词的聚类和时间线分析能够更细致地显示研究热点及发展趋势情况, 因此本文重点关注基于 CNKI 数据库中的关键词聚类分析国内优化调度研究热点趋势。本文采用对数似然比 (log likelihood ratio, LLR) 算法得到聚类模块值

(modularity Q) 和聚类平均轮廓值 (silhouette) 分别为 0.457 3 (> 0.3) 和 0.733 8 (> 0.7), 聚类结果较为合理^[37-38]。图 4 为聚类时间线, 它能够展示每个聚类随时间的变化, 从而反映出各个研究方向的发展。从图 4 中节点大小和聚集程度可见, 近十年以来主要有两大聚类的研究方向, 分别为#0 微电网和#2 综合能源系统 (与 WoS 数据库一致)。

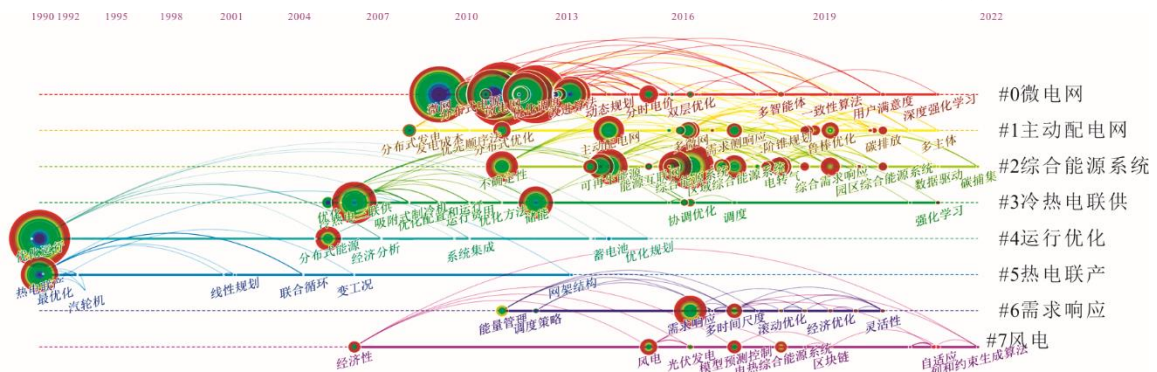


图 4 能源系统优化调度的关键词聚类时间线 (CNKI) Fig.4 Timeline map of keywords cluster for optimal scheduling of energy systems (CNKI)

3.2.1 微电网的研究热点及变化

主要关注微电网中的优化调度问题,它的发展奠定了优化调度的方法论基础。从聚类中的关键词大致可将其分为4个子阶段,本文分别对各阶段的研究热点进行分析。

1) 2009—2012年,主要概念和方法处于萌芽阶段。

2) 2013—2016年,为应对调度中出现的高维目标、非线性约束和动态特性等问题,改进元启发式算法、动态规划、分时电价和双层优化等关键词成为热点。其中,动态特性是优化调度区别于优化配置与优化设计的根本特征,在初期得到了广泛研究^[39-41]。动态规划法能够克服元启发式算法难以收敛至全局极值的问题,能够同时获得多时段的最优调度解序列,但存在计算资源消耗较大和维数灾难等不足;分时电价是一种考虑荷侧需求响应动态特性的方法,它的发展促成了#6需求响应研究方向的产生^[42];双层优化使用松耦合策略解决一些非线性约束难以优化求解的情况,它能够拓展优化调度方法的计算约束限制,从而使得多元目标下的准动态优化调度求解变为可能。双层优化的提出拓展了优化调度能够考虑的目标范围,包括系统间交互(最小微电网与主电网/配电网的交互功率^[43-44])、效率(最小系统整体网损^[45])、环境(最小污染物排放^[44])及需求侧(最大用户满意度^[46])等。

3) 2017—2019年,微电网群是微电网并网的发展方向,其发展重心开始转向多智能体(multi-agent)行为。单一微电网调度被拓展至分布式微电网群间调度,并涉及多智能体间的控制和博弈行为。主要关键词包括多智能体和一致性算法等。多智能体主要关注:①协调多个运营商、用户和调度商等一致性利益行为^[47],②考虑通信延迟的调度控制^[47-48],③基于分布式一致理论分层调度方案^[49-50]等。一致性算法是基于多智能体为基础发展的一类分布式算法,它比ADMM交替方向乘子法、分布式梯度算法更为简洁和鲁棒,因此成为了主流分布式算法^[51]。一致性算法的主要应用包括寻找协调控制律使得各智能体调度趋同^[52]和考虑通信的多智能体调度架构^[48]等。

4) 2020—2022年,微电网优化调度研究趋势侧重于需求侧和计算方法的转变上,主要包括由双层优化方法延伸的市场化下多主体参与的需求侧管理和深度学习(GAN、RNN等)。相对于双层优

化和分时电价,需求侧管理涉及多智能体协调等更大的计算范围^[53]。另外,深度学习对复杂调度情形的计算能力比传统优化方法更鲁棒^[54-55]。因此面对多元调度需求和庞大的调度实体,深度强化学习是今后优化调度发展的重点,另外尚缺乏深度学习和经典优化方法、元启发式算法的结果对比,并在强化学习中引入需求侧和电力系统灵活性的内容。

3.2.2 综合能源系统的研究热点及变化

这一聚类讨论综合能源系统中的优化调度问题,虽然研究方法与微电网优化调度较为类似,但其研究内容的侧重点略有不同。

2015年之前,在综合能源系统概念提出前,不确定性作为可再生能源等源侧设备特性已经受到一定关注。不确定性研究方法中,随机优化、鲁棒优化和区间优化方法仍保持一定的研究热度。随机优化得到的结果虽然比鲁棒优化更具经济性,但是由于需要生成大量场景,计算效率较低,而鲁棒优化得到的结果较为保守^[7]。因此,分布鲁棒优化方法因其具有的独特优势(在时间成本上较随机规划小,在计算结果的保守度上较鲁棒优化小),得到研究人员认可并获得快速发展^[56]。此外,由于分布鲁棒优化方法的NP-hard和非凸性质在一定程度上阻碍了其推广应用,其改进版(两阶段分布鲁棒/可调分布鲁棒方法)被提出以进一步降低计算复杂度并“实时”反映不确定性参数波动这一物理本质^[57-58]。

2015年,随着能源互联网的出现,综合能源系统的优化调度迅速成为热点话题。

2015—2016年,能源集线器(energy hub)在研究初期作为一种稳态的优化计算框架最先被引入,它提供了能源输入和输出的转换关系,使得多能流下的综合能源系统能够以类似微电网一样的优化调度方法求解^[59-60]。值得一提的是,能源集线器最初作为研究方法也来自于微电网^[61]。

2017—2018年,为了有效遏制以风电为代表的确定性,电转气技术(power to gas, P2G)这一新发展的技术迅速成为热点。电转气将剩余电能转换为氢气或甲烷,从而实现长时大规模储能^[62]。电转气技术虽然同样面向不确定性问题,但它以一种较为新颖的技术从物理层面减少不确定性。电转气技术的发展缓解了弃风弃光问题,增强了电气网络间的耦合,具体研究方向有:耦合储能^[63-65]、掺氢P2G^[66]、碳捕集联用^[67]和耦合荷侧的动态特性和随机性^[67-69]等。因此,电转气的研究还通常包含多目

标优化,如碳排放最小、弃风光量最少等。今后,新的技术发展也许能够催生优化调度的新热点。

2019—2020 年,作为解决荷侧不确定性的综合需求响应成为关注热点,考虑综合需求响应后调度经济性和新能源消纳水平均得以提升。综合需求响应来源于微电网的需求响应,但其范围和时间尺度更为宽广(包括电气热冷等多元负荷和日前-日内-实时多时间尺度等),使需求可调节范围更大^[70-71]。由于综合能源系统涉及大量多元能源形式和复杂的优化计算流程,且各类源网荷储的动态特性进一步加剧了动态优化调度的困难。因此,突破以能源集线器为代表的稳态优化调度框架显得较为必要。

2021—2022 年,随着机器学习等技术的发展,数据驱动在建模和动态调度中逐渐成为有效的工具,亟需进一步发展根据历史数据进行自主智能优化调度决策的计算框架^[72-73]。另外,根据碳达峰碳中和的发展目标,引入碳交易的综合能源系统优化调度能够兼顾碳排放和市场化行为^[74-75],可以进一步拓展市场化下的综合需求响应问题。另一方面,碳捕集作为一种有效削减大气中二氧化碳的技术,与电转气和储碳的联用也是一个潜在发展方向^[76]。

3.3 从关键词热点突现分析 WoS 和 CNKI 数据库研究趋势

关键词是文献研究内容的凝练,本节分别通过 CNKI 和 WoS 数据库的关键词突现分析指出研究热点的变化。与文献共被引的 *Brust* 强度及时间线图不同,关键词热点突现分析由文献中出现频次而非被引关系得到。因此,本节通过突现分析,可以得到某一时间上突然增加的关键词信息,并共同对 2 个数据库进行时间切片下热点的整体趋势分析。

本文根据 DEAN 原则对所有文献关键词进行手动数据清洗^[37],包括合并重复关键词和删除不相关关键词,得到待分析的突现词。表 5 和表 6 分别为 CNKI 和 WoS 数据库前 10 位突现词,表 5 和表 6 中起始、终止年份为关键词成为热点的时间范围。

从表 5 的突现词中可看到, CNKI 数据库中的研究趋势如下:

1) 传统热电联产背景下的优化运行和经济运行(时间:1990—)。这一时期虽然范围长,但是热点变化不大,且低 *Brust* 强度说明研究较零散。这一时期国内在引入热电联产过程中开始关注经济性优化这一问题,但还未上升到优化理论层面。

2) 微网经济调度运行和微电网优化调度(时

间:2009—)。这一时期主要对微网/微电网进行调度分析,较高的 *Brust* 强度显示了研究的被关注程度大大加强。同时,随着优化理论和算法的建立,优化调度的体系得以完善。

3) 综合能源系统优化调度和需求响应(时间:2019—)。虽然 2015 年综合能源系统就出现,但真正成为热点的时间却较晚,这一时期通过需求响应使得优化调度研究从供给侧转向需求侧,并在智能互联能源网络的背景下进一步提升了优化调度的研究热点范围。

表 5 能源系统优化调度前 10 位突现词 (CNKI)
Tab.5 Top ten emerging words for optimal scheduling of energy systems (CNKI)

关键词	<i>Brust</i> 强度	起始年份	终止年份	热点分布年份
热电联产	3.57	1990	2013	
优化运行	6.70	2005	2017	
优化	4.28	2005	2017	
微网	14.99	2009	2017	
经济调度	4.78	2011	2017	
经济运行	4.19	2012	2018	
微电网	12.54	2014	2018	
综合能源系统	18.02	2019	2022	
区域综合能源系统	3.55	2019	2022	
需求响应	4.49	2020	2022	

表 6 能源系统优化调度前 10 位突现词 (WoS)
Tab.6 Top ten emerging words for optimal scheduling of energy systems (WoS)

关键词	<i>Brust</i> 强度	起始年份	终止年份	热点分布年份
power system	59.11	1991	2014	
optimal power flow	33.10	1991	2015	
power system stabilizer	32.06	1992	2014	
unit commitment	31.42	1992	2016	
genetic algorithm	86.31	1994	2015	
design	37.65	1997	2015	
distributed generation	48.95	2005	2016	
particle swarm optimization	73.10	2006	2016	
differential evolution	28.51	2008	2016	
load forecasting	33.00	2020	2022	

从表 6 的突现词中可看到, WoS 数据库的研究趋势如下:

1) 传统优化调度和稳定性控制(时间:1991—)。这一时期热点主要关注能流的优化和系统稳定性。首先,机组组合问题作为实际工程问题被广泛研究,并在此基础上建立了如穷举法、动态规划法、混合整数规划法等方法,奠定了优化调度

的基本流程。但是这一时期的求解方法较为基础，无法求解高维优化问题。系统稳定性控制是这一时期的另一热点，它的发展表明研究人员对大范围能源系统稳定性的关注。

2) 优化算法(时间:1994—)。这一时期如遗传算法、粒子群算法、差分进化算法等智能算法开始成为研究热点。优化算法的研究为优化调度求解带来新的模式,对优化调度的研究具有重要作用。集中供电的稳定性存在弊端,因而分布式发电是这一时期另一研究热点,且优化算法耦合分布式发电进行稳定性研究也是此时期的主要研究内容。

3) 预测(时间:2020—)。这一时期的研究热点主要是在需求响应背景下对需求侧负荷进行预测,包括传统的用户负荷和电动汽车充电负荷等。此外,基于神经网络和深度学习技术的发展,这一时期研究热点主要体现在数据驱动和协同预测等方面。随着综合能源系统发展,负荷预测将在多时间/空间尺度、多能源系统管理下进一步发展。

4 研究展望

根据托马斯·库恩的科学发展模式理论以及上文的发展趋势分析,目前能源系统的优化调度正处于“前科学-常规科学-反常与危机-科学革命-新常态科学”中的常规科学部分,各个部分的科学研究对象和研究方法呈现继承和延续的态势,尚未出现科学革命和范式转变。但是,随着深度学习方法的兴起,以及碳达峰碳中和及能源市场化的需求,优化调度的研究方法和研究对象可能将发生范式转变。优化调度的研究将从电力学科进一步向能源学科、计算机和经济学科发生转化和交叉融合。

本文通过对 WoS 和 CNKI 数据库的详细热点和趋势分析,提炼出以下几个可能的发展方向。

4.1 微电网方向

随着微电网规模的扩大和稳定性要求的提高,分布式发电是大势所趋。在此背景下,目前现有研究对多智能体间的博弈行为进行了调度研究,也对市场参与下博弈行为进行了初步讨论,但市场化下多主体需求响应等问题仍然有待解决。

现有的多智能体一致性控制已经关注到通信延时的影响,但是对系统拓补变化和安全威胁注入等问题仍需要研发更稳定快速响应的控制算法;现有研究关注到市场化下多主体的博弈,然而在高比例可再生能源和多不确定主体下,市场出清价格确

定和博弈优化求解产生了一定难度,仍需要讨论现有的边际电价和经典博弈方法的适用性,或引入强化学习等方法构建更符合实际的博弈模型及其求解策略;现有研究对需求响应进行了系列报道,但是作为一种灵活性资源,电力需求侧管理中的市场机制仍未形成;现有研究对分布式调度进行了简单的探讨,但缺乏复杂微网下分布式调度策略研究。

4.2 综合能源系统方向

碳达峰/碳中和背景下,需求响应技术能够在高比例可再生能源渗透下带来技术转变。现有研究对一些系统部件进行了动态模型建立以精确反映运行情况,但缺乏统一的耦合动态模型及求解框架;现有研究对不确定性进行了广泛地考虑,但仍缺乏耦合供给侧和需求侧的双侧不确定性精确预测技术,包括多种可再生能源、用户侧设备用能及电动汽车用能情况的不确定性等;现有研究充分考虑电转气,但是随着氢能技术的兴起,电转氢技术有待进一步研究;现有的研究初步对含碳捕集的能源系统进行优化调度,但仍需探讨碳捕集与可再生能源耦合参与能源灵活性的研究,且碳捕集技术内部的机理问题也有待深入分析;现有的文献初步对于碳交易市场参与的调度进行了研究,但碳交易市场设计理论仍不完善,且不同设计机制下的碳交易市场与电力现货市场的协同下调度问题需要深入分析;现有研究采用区块链技术进行了初步调度分析,但仍需要进一步完善区块链自身的安全机制和市场融合技术的构建。

4.3 调度技术方向

随着优化调度向大规模、分布式和多优化目标方向发展,启发式算法和深度学习技术是求解大规模优化调度问题的有力武器。现有的数据驱动模型结合深度学习进行调度求解虽然有初步的研究,但是数据的获取和数据质量的评估仍然需要一定的基准,缺乏可信的数据质量检测方法和统一的数据采集和储存管理模式;现有研究虽然已有机器学习或深度学习对负荷预测的案例,但是较长训练时间、对新购置或维修后的设备负荷难以准确预测、需求响应或市场化行为下的负荷难以准确预测等仍需要研究;现有文献采用强化学习等方法对小规模的调度问题进行了研究,但是大规模调度的适用性仍有待考虑;现有文献采用生成对抗网络解决了一些数据/场景生成和数据质量提升的研究,但是仍

有无法解释、缺乏相关标准样本数据集和统一的评价体系等问题；现有文献对于启发式算法在大规模高维多目标调度问题中的高计算时间/资源成本和全局最优的判断标准问题仍未有效地解决。

5 结 论

通过首次对能源系统优化调度进行万篇大规模文献计量学分析，得到以下结论：

1) 从文献分布特征统计发现，能源系统优化调度的文献增速较快，且国内范围的文献增速较国际范围更快。国内文献多分布于老牌电力领域期刊，国际期刊的学科交叉性更强。由于涉及多学科交叉，期刊分布不符合布拉德福定律。

2) 从文献合作网络分析发现，中国在该领域影响力增长迅速且机构间的合作密切，而美国和英国却呈现放缓态势。

3) 从文献共被引分析发现，目前国际上的研究热点为微电网优化调度的优化算法、不确定性和稳定性优化控制等及综合能源系统优化调度的含储能的动态调度问题等，且强化学习和博弈论作为调度技术也是研究热点。

4) 从关键词聚类趋势分析发现目前国内研究热点趋势。微电网优化调度的热点趋势为概念-算法-动态优化/双层优化/分时电价-多智能体-需求侧管理-深度学习技术；综合能源系统优化调度的热点趋势为不确定性-能源集线器-电转气-综合需求响应-数据驱动-碳交易、碳捕集和强化学习等。

5) 从关键词热点突现分析发现，国内研究热点分为传统热电联产下的优化运行、微电网调度运行和综合能源系统优化调度和需求响应 3 个时期；国外研究热点为传统调度和稳定性控制、优化算法和预测 3 个时期。

[参 考 文 献]

[1] 邢通, 谭清坤, 王尧, 等. 我国能源系统演化发展模式研究[J]. 价格理论与实践, 2019, 11: 154-157.
XING Tong, TAN Qingkun, WANG Yao, et al. Research on the evolution and development modes of China's energy system[J]. Price: Theory & Practice, 2019, 11: 154-157.

[2] 高正平, 刘昊宇, 李琥, 等. 从变电站到能源综合服务站:演化路径探讨[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 411-423.
GAO Zhengping, LIU Haoyu, LI Hu, et al. From substation to integrated energy service station: discussion on the evolutionary path[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 411-423.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 168-175.
MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 168-175.

[6] 周晓倩, 余志文, 艾芊, 等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 26-33.
ZHOU Xiaoqian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 26-33.

[7] 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): 2256-2272.
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272.

[8] 秦建华, 李娜, 金泰, 等. 基于 Vosviewer 与 Citespace 对电动汽车充电负荷领域的量化分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4196-4205.
QIN Jianhua, LI Na, JIN Tai, et al. Metrological analysis of electric vehicle charging load based on Vosviewer and Citespace[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 4196-4205.

[9] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.

[10] 张美霞, 于姜赟, 黄旭焱, 等. 基于 CiteSpace 软件的微电网研究热点分析[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(6): 517-522.
ZHANG Meixia, YU Jiangyun, HUANG Xuyan, et al. Hotspot analysis of research and development trend of micro-grid based on information visualization[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(6): 517-522.

[11] SONG D R, MENG W Q, DONG M, et al. A critical survey of integrated energy system: summaries, methodologies and analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 266: 115863.

[12] 张明理, 宋晓辉, 蔺奕存, 等. 基于 CiteSpace 的汽轮机研究进展分析[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 1-9.
ZHANG Mingli, SONG Xiaohui, LIN Yicun, et al. Analysis on research progress of steam turbines based on CiteSpace[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 1-9.

[13] 叶光辉, 夏立新, 李纲, 等. 社交博客标签分布的布拉德福定律验证分析[J]. 情报学报, 2018, 37(1): 76-85.
YE Guanghui, XIA Lixin, LI Gang, et al. Bradford's law

- of confirmatory analysis of social blog tag distribution[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2018, 37(1): 76-85.
- [14] HIRSCH A, PARAG Y, GUERRERO J. Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanding issues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 402-411.
- [15] ZIA M F, ELBOUCHIKHI E, BENBOUZID M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects[J]. Applied Energy, 2018, 222(15): 1033-1055.
- [16] MOLZAHN D K, DORFLER F, SANDBERG H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.
- [17] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [18] OLIVARES D E, ETEMADI A H, KAZERANI M, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1904-1919.
- [19] BERTSIMAS D, LITVINOV E, SUN X A, et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 52-63.
- [20] SU W C, WANG J H, ROH J. Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1876-1883.
- [21] LUO X G, WANG J H, CLARKE J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.
- [22] LI Z G, WU W C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 12-22.
- [23] MOGHADDAM A A, SEIFI A, NIKNAM T, et al. Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source[J]. Energy, 2011, 36: 6490-6507.
- [24] YANG X S, HOSSEINI S, GANDOMI A H. Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12: 1180-1186.
- [25] MARZBAND M, AZARINEJADIAN F, SAVAGHEBI M, et al. An optimal energy management system for islanded microgrids based on multiperiod artificial bee colony combined with Markov chain[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(3): 1712-1722.
- [26] MOTEVASEL M, SEIFI A R, NIKNAM T. Multi-objective energy management of CHP(combined heat and power)-based micro-grid[J]. Energy, 2013, 51: 123-136.
- [27] VENAYAGAMOORTHY G K, GAUTAM P K. Dynamic energy management system for a smart microgrid[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(8): 1643-1656.
- [28] MA L, LIU N, ZHANG J H, et al. Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: a game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1930-1942.
- [29] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 12(2): 1-14.
- [30] ZHAO B, ZHANG X S, WANG C S. Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island[J]. Applied Energy, 2014: 1656-1666.
- [31] SHI W B, XIE X R, CHU C C, et al. Distributed optimal energy management in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1137-1146.
- [32] ZIMMERMAN R D, MURILLO S C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 12-19.
- [33] CHEN C, DUAN S G, CAI T, et al. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(3): 258-267.
- [34] ZHANG Y, GATSIS N, GIANNAKIS G B. Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 944-953.
- [35] PRAKASH S, SINHA S K. Simulation based neuro-fuzzy hybrid intelligent PI control approach in four-area load frequency control of interconnected power system[J]. Applied Soft Computing, 2014: 152-164.
- [36] WANG Z Y, CHEN B K, WANG J H, et al. Coordinated energy management of networked microgrids in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 45-53.
- [37] 潘玮, 郑鹏, 黄锦泉, 等. 基于数据清洗“DEAN”流程的健康信息领域研究热点探测[J]. 现代情报, 2018, 38(10): 73-77.
PAN Wei, ZHENG Peng, HUANG Jinqun, et al. Research hotspot detection of health information based on the “DEAN” process of data clean[J]. Journal of Modern Information, 2018, 38(10): 73-77.
- [38] 肖涵彬, 李明, 田世杰, 等. 碳中和背景下碳捕集、利用与封存技术专利发展研究——基于知识图谱的可视化分析[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 122-131.
XIAO Hanbin, LI Ming, TIAN Shijie, et al. Development of patent on carbon capture, utilization and storage technology under carbon neutral background: visual analysis based on knowledge graph[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 122-131.
- [39] 符杨, 蒋一鏊, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的微网经济优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2612-2620.
FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun, et al. Optimal economic dispatch for microgrid considering shiftable loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2612-2620.
- [40] 付蓉, 杨健, 李满礼, 等. 基于改进粒子群算法的微电网多时段经济调度[J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(3): 12-17.
FU Rong, YANG Jian, LI Manli, et al. Microgrid multiperiod economic dispatch based on improved particle swarm[J]. Power Demand Side Management, 2014, 16(3): 12-17.
- [41] 肖浩, 裴玮, 孔力, 等. 综合能源微网运行优化调度方法研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(12): 1-11.
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li, et al. Research on optimal operation method of integrated energy microgrid system[J]. Advanced Technology of Electrical

- Engineering and Energy, 2016, 35(12): 1-11.
- [42] 黄焘, 马溪原, 雷金勇, 等. 考虑分时电价和需求响应的家庭型用户侧微电网优化运行[J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 47-53.
HUANG Tao, MA Xiyuan, LEI Jinyong, et al. Optimal operation of household user-side microgrid considering time-of-use price and demand response[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(4): 47-53.
- [43] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.
HE Lijun, CHEN Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.
- [44] 蒋泽甫, 张彦, 高华, 等. 基于随机模型预测控制的能源互联网双层协调优化调度[J]. 电力大数据, 2020, 23(7): 31-38.
JIANG Zefu, ZHANG Yan, GAO Hua, et al. Two-layer collaborative optimization dispatch for energy internet based on stochastic model predictive control[J]. Power Systems and Big Data, 2020, 23(7): 31-38.
- [45] 吕智林, 廖庞思, 杨啸. 计及需求侧响应的光伏微电网群与主动配电网双层优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 70-78.
LYU Zhilin, LIAO Pangsi, YANG Xiao. Bi-layer optimization of PV multi-microgrid and active distribution network considering demand-side response[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2021, 33(8): 70-78.
- [46] 赵波, 汪湘晋, 张雪松, 等. 考虑需求侧响应及不确定性的微电网双层优化配置方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3284-3295.
ZHAO Bo, WANG Xiangjin, ZHANG Xuesong, et al. Two-layer method of microgrid optimal sizing considering demand-side response and uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3284-3295.
- [47] 高扬, 艾芊. 基于多智能体系统的微电网联络线潮流精确控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 140-146.
GAO Yang, AI Qian. Precise control of tie-line power for microgrid based on multi-agent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 140-146.
- [48] 何永菁, 王玮, 吴学智. 考虑通信延时的分布式电源经济优化调度策略[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3015-3025.
HE Yongjing, WANG Wei, WU Xuezhi. Economic dispatch strategy for distributed generators considering communication delays[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3015-3025.
- [49] 李忠文, 程志平, 张书源, 等. 考虑经济调度及电压恢复的直流微电网分布式二次控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4482-4492.
LI Zhongwen, CHENG Zhiping, ZHANG Shuyuan, et al. Distributed secondary control for economic dispatch and voltage restoration of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4482-4492.
- [50] 赵龙, 张珍珍, 丁坤, 等. 基于分组一致性协议的多微网分层优化调度方法研究[J]. 电力设备管理, 2020(2): 41-43.
ZHAO Long, ZHANG Zhenzhen, DING Kun, et al. Research on multi-micronet hierarchical optimal scheduling method based on packet consistency protocol[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(2): 41-43.
- [51] 乐健, 周谦, 赵联港, 等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 44-54.
LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 44-54.
- [52] 郑伟, 胡长斌, 丁丽, 等. 基于多智能体系统微电网分布式控制研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 177-184.
ZHENG Wei, HU Changbin, DING Li, et al. Research on distributed control of microgrid based on multi-agent system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 177-184.
- [53] 杨欢红, 唐芑芑, 黄文焘. 考虑用户满意度的基于需求侧管理的微电网多目标优化调度[J/OL]. 电测与仪表, 2021: 1-8 [2023-02-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210202.1741.002.html>.
YANG Huanhong, TANG Pengpeng, HUANG Wentao. Multi-objective optimal dispatch of microgrid based on demand side management considering user satisfaction[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021: 1-8 [2023-02-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210202.1741.002.html>.
- [54] 董雷, 刘雨, 乔骥, 等. 基于多智能体深度强化学习的电热联合系统优化运行[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4729-4738.
DONG Lei, LIU Yu, QIAO Ji, et al. Optimal dispatch of combined heat and power system based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4729-4738.
- [55] 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): 819-833.
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): 819-833.
- [56] 郭创新, 丁筱. 综合能源系统优化运行研究现状及展望[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 2-8.
GUO Chuangxin, DING Xiao. Research status and prospect of optimal operation of integrated energy system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 2-8.
- [57] 张刚, 张峰, 张利, 等. 考虑碳排放交易的日前调度双阶段鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5490-5499.
ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Two-stage robust optimization model of day-ahead scheduling considering carbon emissions trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5490-5499.
- [58] 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.
- [59] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.

- [60] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [61] 王斐, 牛铭, 佟宇梁. 多代理技术在 Energy Hub 中的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(11): 28-32.
WANG Fei, NIU Ming, TONG Yuliang. Application of multi-agent system in energy hub[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(11): 28-32.
- [62] 刘志坚, 刘瑞光, 梁宁, 等. 含电转气的微型能源网日前经济优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 2): 535-543.
LIU Zhijian, LIU Ruiguang, LIANG Ning, et al. Day-ahead optimal economic dispatching strategy for micro energy-grid with P2G[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(Suppl.2): 535-543.
- [63] 陈维荣, 冉韵早, 韩莹, 等. 考虑两阶段P2G的区域综合能源系统优化调度[J/OL]. 西南交通大学学报, 2021: 1-9 [2023-02-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20211230.0937.002.html>
CHEN Weirong, RAN Yunzao, HAN Ying, et al. Optimal scheduling of regional integrated energy systems under two-stage P2G[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021: 1-9 [2023-02-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20211230.0937.002.html>.
- [64] 施泉生, 丁建勇, 晏伟, 等. 基于能量流含 P2G 电-热系统风电消纳优化运行[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 394-400.
SHI Quansheng, DING Jianyong, YAN Wei, et al. Optimal operation of wind power accommodation in electric-thermal system with P2G based on energy flow model[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(5): 394-400.
- [65] 王亭岭, 刘国庆, 赵迪迪. 含电转气及储能的综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(10): 1-10.
WANG Tingling, LIU Guoqing, ZHAO Didi. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system including power-to-gas and energy storage[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(10): 1-10.
- [66] 严思韵, 王晨, 周登极. 含氢能气网掺混运输的综合能源系统优化研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 10-16.
YAN Siyun, WANG Chen, ZHOU Dengji. Optimization of integrated electricity and gas system considering hydrogen-natural-gas mixture transportation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 10-16.
- [67] 田丰, 贾燕冰, 任海泉, 等. 考虑碳捕集系统的综合能源系统“源-荷”低碳经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3346-3355.
TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, et al. “Source-load” low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture system[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3346-3355.
- [68] 马一鸣, 周夕然, 董鹤楠, 等. 考虑电转气与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 118-127.
MA Yiming, ZHOU Xiran, DONG Henan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering power-to-gas and load inertia[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 118-127.
- [69] 张亚迪, 孙欣, 谢敬东, 等. 考虑电转气和可平移负荷的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 100-109.
ZHANG Yadi, SUN Xin, XIE Jingdong, et al. Optimized operation of regional integrated energy system considering power-to-gas and shiftable load[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 100-109.
- [70] 江叶峰, 熊浩, 胡宇, 等. 考虑电热综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 电力建设, 2019, 40(12): 61-69.
JIANG Yefeng, XIONG Hao, HU Yu, et al. Optimal dispatching of virtual power plants considering comprehensive demand response of electricity and heat loads[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(12): 61-69.
- [71] 李廷钧, 韩肖清, 杜欣慧. 计及能量互保行为的综合能源园区多时间尺度调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 164-172.
LI Tingjun, HAN Xiaoqing, DU Xinhui. Multi-time scale dispatching for integrated energy park considering energy transfer behavior[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 164-172.
- [72] 陈龙, 韩中洋, 赵珺, 等. 数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 283-294.
CHEN Long, HAN Zhongyang, ZHAO Jun, et al. Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems[J]. Control and Decision, 2021, 36(2): 283-294.
- [73] 许明前, 陈富燕. 基于数据驱动分布式鲁棒的热-电-气综合能源系统日前经济调度优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(11): 66-73.
XU Mingqian, CHEN Fuyan. Day-ahead economic dispatching of heat-electricity-gas integrated energy system based on data-driven distributed robust optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(11): 66-73.
- [74] 杨柳, 张超, 蒋勃, 等. 考虑用户满意度的虚拟电厂热电联合低碳经济调度模型[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 40-45.
YANG Liu, ZHANG Chao, JIANG Bo, et al. A combined low-carbon economic dispatching model for virtual power plant considering customer satisfaction index[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 40-45.
- [75] 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.
- [76] 王义军, 李梦涵, 齐岩. 计及碳捕集电厂综合灵活运行方式的含 P2G 综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 43(1): 1-8.
WANG Yijun, LI Menghan, QI Yan. Low-carbon economic dispatching of integrated energy system with P2G considering comprehensive and flexible operation mode of carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 43(1): 1-8.

(责任编辑 杜亚勤)