

新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望

潘美琪¹, 贺兴², 艾芊², 唐跃中³

(1. 上海交通大学国家电投智慧能源创新学院, 上海市 闵行区 200240;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240;

3. 国网上海市电力公司, 上海市 浦东新区 200122)

Research Status and Prospect of Distributed Energy Resource Dispatching in New Distribution System

PAN Meiqi¹, HE Xing², AI Qian², TANG Yuezhong³

(1. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Minhang District, Shanghai 200240, China;

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200122, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper is to promote the new distribution system to become an energy interaction platform that integrates such functions as the distributed energy management, the new energy consumption, and the regional comprehensive energy collaborative optimization. Starting from the dispatching problems, this paper first discusses the dispatching architecture of the new distribution system for a large number of distributed resource cluster dispatching problems. Based on the principle of hierarchical partitioning, it discusses in two aspects: how to achieve the hierarchical partitioning and how to collaborate after the hierarchical partitioning. The DER aggregation method and the coordinated dispatching methods between different levels, different regions and different energy sources are illustrated respectively. Aiming at the optimization scheduling problem, based on the system situational awareness and the external risk perception, it grasps the global internal and external factors to optimize dispatching. It sorts out the solution methods for the distributed optimization dispatching. Finally, based on the digital twin, we look forward to the future development directions of the intelligent dispatching, providing a reference for the upgrading of the intelligent dispatching.

KEY WORDS: new distribution system; distributed energy resource; optimal dispatch; intelligent dispatch

摘要: 为推动新型配电系统成为分布式能源管理、新能源消

基金项目: 国家自然科学基金项目(52277111); 上海市科学技术委员会项目(21DZ1208300)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52277111); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (21DZ1208300).

纳和区域综合能源协同优化等功能于一身的能源互动平台, 该文从调度问题出发, 首先针对大量分布式资源集群调度问题, 论述新型配电系统调度架构, 并根据分层分区调度原则从如何分层分区和分层分区后如何协同两个方面, 分别论述分布式资源(distributed energy resource, DER)聚合方法和不同层级、不同区域、不同能源间的协同调度方法; 针对优化调度问题, 基于系统态势感知和外界风险感知把握全局内外因素进而优化调度; 针对调度求解问题, 梳理分布式优化求解方法; 最后基于数字孪生展望未来调度智能化发展方向, 为调度智能化升级提供参考。

关键词: 新型配电系统; 分布式资源; 优化调度; 智能调度

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0716

0 引言

随着新能源、柔性负荷等分布式资源(distributed energy resource, DER)的不断渗透, 电力系统呈现出多元化、分布式、复杂化的特点, 为电力系统调控带来颠覆性挑战^[1]。其中, 由于DER直接接入配电网, 调度所面临的局面更为复杂, 新型配电系统需要对量大面广的DER集群管理并协同优化调度, 提高资源利用率, 保障电力系统安全稳定运行。

新型配电系统是接入大量DER、具有源荷双侧不确定性和源荷互动运行模式的配电系统^[2]。与传统配电系统相比, 新型配电系统不再是单纯的电能分配者, 而是集大量小规模DER管理、新能源消纳、区域综合能源协同优化等功能于一身的能源互动平台。新型配电系统调度的难点如下:

1) 新型配电系统下能量单元向扁平化、多元

化发展,如何管理与协同大量 DER,使其在可控性、主观能动性、经济性、稳定性等多方面获得额外增益,是研究难点。

2) 新型配电系统运行面临更多风险因素。DER 的接入使供需双侧不确定性加强,DER 外界环境的随机性与内部响应的不确定性使风险认知更为复杂。调度场景包含众多变量、不确定因素,并且伴随电力系统动态演化,如何系统性地认知电网运行风险,并跟随电力系统实际状态动态调整调度模型是研究难点。

3) 新型配电系统的调度对象不再是少数寡头机组,调度决策计算复杂度增大。在多场景下的推演计算以及如何实现快速求解是未来研究难点。

围绕以上难点,本文将对新型配电系统 DER 调度的研究现状及未来发展方向进行探讨。首先在第 1 节梳理新型配电系统 DER 调度的科学问题。为探讨新型配电系统 DER 涌现现象的内在规律,在第 2 节基于调度架构介绍关键理论与方法;为探讨新型配电系统 DER 调度决策智能的产生途径与提升方法,基于优化调度方法,在第 3 节通过系统内部态势感知提高源荷预测精度,通过外部风险感知增强对不确定因素的应对能力,进而使调度决策

更具科学性、泛化性;基于决策层调度求解问题,在第 4 节总结分布式优化求解方法与算法。目前优化调度方法仍以传统优化调度模型为主,数据驱动的机器学习及深度学习技术逐渐被引入优化调度研究中。基于 DER 监测数据感知系统运行态势做出调度决策,这一过程使数据规模维度减小、信息密度增大,通过挖掘数据潜在信息增强了系统调度能力。但目前调度机制仍以离线策略和人工经验为主,为进一步提升调度智能化、自动化水平,在第 5 节基于数字孪生对新型配电系统 DER 调度机制进行了展望,最后在第 6 节进行总结。

1 新型配电系统 DER 调度的关键科学问题

面向上述新型配电系统 DER 调度研究现状与难点,本文依次提出两个科学问题:1) 新型配电系统 DER 涌现现象的内在规律;2) 新型配电系统 DER 调度决策智能的产生途径与提升方法。科学问题 1 侧重于探究新型配电系统 DER 的协同行为及其工程综合效益(认知);在科学问题 1 的研究基础上,科学问题 2 侧重于探究 DER 调度的最优策略(行动),研究框架如图 1 所示。下面将具体阐述两个科学问题。

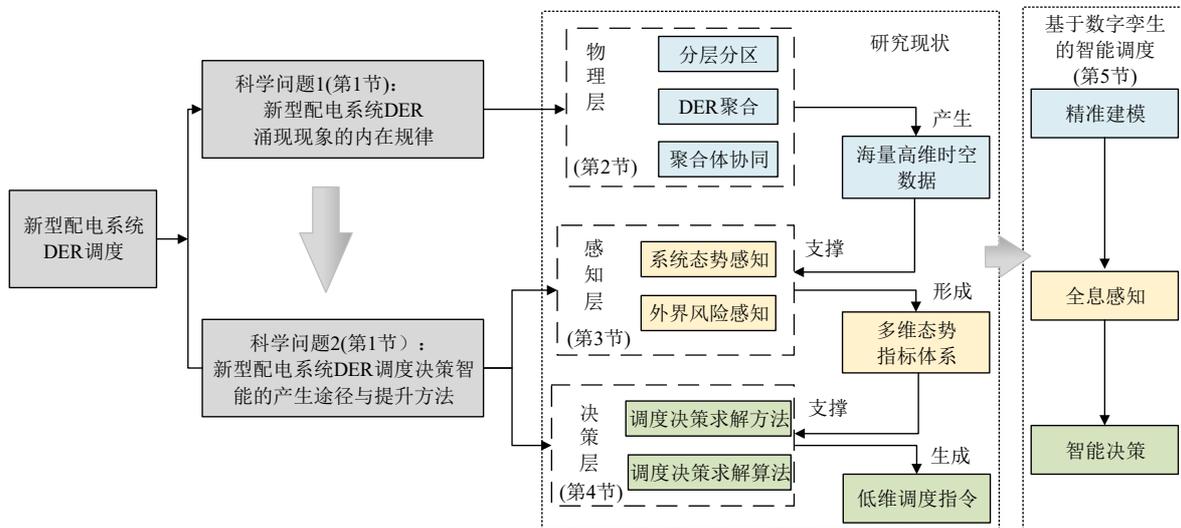


图 1 新型配电系统 DER 调度研究现状

Fig. 1 Research status of DER dispatching in new distribution system

1.1 科学问题 1: 新型配电系统 DER 涌现现象的内在规律

新型配电系统管辖大量特性各异、组态灵活的 DER, DER 间具备较强的互补性。工程经验表明,可以通过协同 DER 组成聚合体(如微网、虚拟电厂等)从而在主观能动性、智能性、经济性、稳定性等多方面产生增益,即发生涌现现象。科学问题 1 旨在分析挖掘 DER 涌现现象的内在规律,从而指导分布式 DER 的组态(configuration)、聚合

(aggregation)、协同(coordination)行为,以期形成分层分区、有序协调、环境适应(adaptive)的调度架构,取得最大工程效益。其难点在于考虑系统的多场景与多目标,环境的周期性与不确定性,多主体的多元化与智能化等因素。

1.2 科学问题 2: 新型配电系统 DER 调度决策智能的产生途径与提升方法

在新型配电系统中,庞大的分布式调度主体数量及高不确定的个体/环境变量对经典优化调度算

法提出挑战。调度决策求解计算量过大,且多个主体间不确定性因素的叠加对调度优化结果产生的影响难以评估。例如,多个调度对象的摄动行为叠加与预测风险叠加会造成电网平衡点漂浮不定甚至突变,进而演化成系统风险。采用数据驱动方法可以在一定程度上解决求解困难的问题,但其对历史数据依赖性较强且可解释性较差。因此,亟需完成电力系统调度理论升级,将调度领域知识与各类数据模型深度融合,形成人机混合增强的调度决策智能生成方法,实现新能源的安全经济消纳等调度目标。

依据这两个科学问题,本文从新型配电系统调度架构、基于态势感知的新型配电系统优化调度方法、优化调度模型求解方法 3 方面梳理研究现状,并展望基于数字孪生的智能调度方法。

2 新型配电系统调度架构

相比于传统配电系统被动接纳 DER,新型配电系统对数量众多、特性各异的 DER 聚合集群并协同管理,可以激发其调控潜力,实现多能互补、能量互济,提高系统运行的稳定性、经济性以及新能源消纳水平。本节先介绍新型配电系统分层分区架构,解决调度整体架构的问题;然后依据不同的聚合原则论述微网、虚拟电厂、能源聚合体 3 种聚合形式,解决在分层分区架构下如何分区的问题;最后梳理协同调度方式,解决分层分区架构下不同层级、不同区域及不同能源之间的协同问题;最终实现配电系统内部层次分明、有序集群、协同互补,为聚合体整体态势感知提供外部端口。

2.1 分层分区架构

随着分布式电源代替寡头电源,新型配电系统呈现出集中-分布式形态^[3]。在集中-分布式形态下,分层分区架构更适合其“统筹信息、分散协调”的调度需求,并且这一架构满足《“十四五”现代能源体系规划》提出的“构建规模合理、分层分区、

安全可靠的电力系统”要求,可以增强配电系统调度的灵活性和新能源就地消纳能力。

集中式调度架构对通信及计算能力的要求较高,并且存在难以保护用户隐私的问题;分布式架构计算更为高效,但同时因局部通信、分散调度而不能很好地把握全局信息^[4]。分层分区架构结合了两者的优势,具有正常状态下协同聚合运行和异常状态下独立分散运行的能力^[3],更契合未来广域多元电力系统调控发展方向。将配网自上而下分为配电网调度层和局部调度层,其中局部调度层面向分区聚合的分布式电源、负荷及储能单元,聚合体作为最低层级并不是仅作为参与者被动地接受配电网调度层的调度指令,而应具有一定的主观能动性,可作为辅助治理者在全局层面实现利益最大化。

2.2 聚合方法

分区聚合方式根据聚合理念有所不同,可分为微网、虚拟电厂、能源组织-细胞等类型,如表 1 所示。关于微网和虚拟电厂的研究较为成熟,涉及调峰调频^[15-19]、容量配置^[20-23]、优化调度^[24-25]等多个领域。微网是地理意义上的区域聚合体,受制于地理辖区的局限性而难以充分激活 DER 的调度潜力^[26]。虚拟电厂(virtual power plants, VPP)是技术意义上的区域聚合体,拟通过通信、量测、控制技术协同(跨地理区域的)DER,从而突破地理桎梏依靠配电系统运营商的指令对 DER 进行管理,实现更广范围的统筹优化。

研究分区聚合组态,不仅需要关注其对外特性,即基于 VPP 等技术将其视为整体参与电力系统运行;还应当关注聚合行为本身,涉及聚合的动机、聚合的对象、聚合体内部成员退出机制等,提升聚合体的灵活性进而提升聚合体对环境的适应性。上海交通大学艾芊团队提出基于仿生学的能源细胞-组织理念,如图 2 所示^[27]。该理念将具有主观能动性的最小单元视为能源细胞,将能源细胞聚合体视为能源组织,将能源生态圈整体视为系统。能源细

表 1 聚合方式对比
Table 1 Comparison of aggregation methods

聚合理念	应用	分类	特点	关键技术
地理位置	微网 ^[5-6]	运行模式: 孤岛运行、 并网运行	对新能源波动性的应对能力及新能源消纳能力有限 ^[7] , 将对大量分布式能源的调控问题转化为微网(可看做一个独立 系统或可控单元)的调控问题 ^[8]	微网控制与管理
互补特性	虚拟电厂 ^[9-12]	商业型虚拟电厂 技术型虚拟电厂	可以实现 DER 的时空互补、功能互补 ^[13]	状态感知与灵活聚合; 信息预测与容量估计 ^[13]
自主性 灵活性 层次性	能源细胞-组织 ^[14]	能源细胞 能源组织	具备更强的交流互动性和分层可控性	能源细胞主动聚合机制;能源 组织内部、组织之间、组织与 配电网的交互机制;运行控制 等方面仍需进一步研究

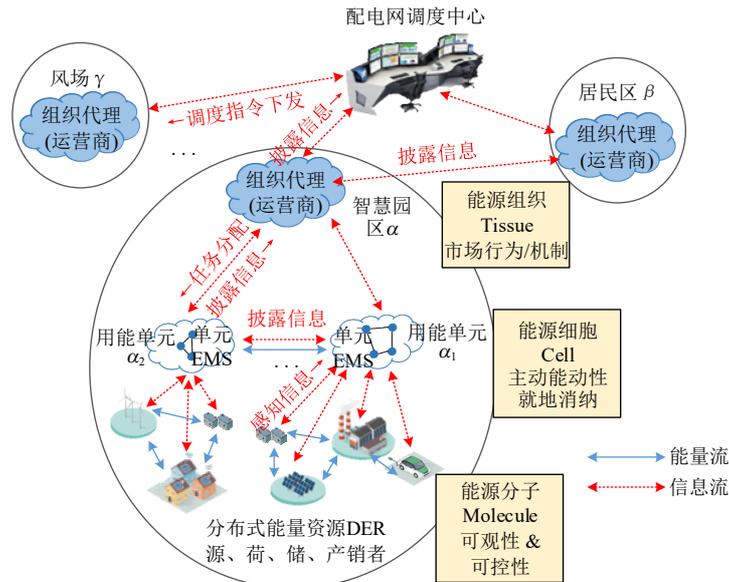


图 2 能源细胞-组织示意图^[27]

Fig. 2 Energy cell organization diagram^[27]

胞在外界环境驱使下可以聚合形成能源组织，这一过程既反映了聚合体内部能源细胞间的优化协同，又很好地体现出配电系统的分层分区架构，适合于刻画不同层级、不同区域间的能量交互^[14]。以配网优化运行为例，可以将微网或 VPP 看作能源细胞，增加细胞之间的电能交互与利益交互，形成微电网群或 VPP 群等能源组织接入配网，从而实现配网-微电网群或配网-VPP 群的协同运行，达到分散自治、集中协调的效果。该理论中能源细胞的聚合机制与交互机制有待进一步研究。

综上所述，分区聚合可以激活 DER 的主观能动性，产生涌现现象，使 DER 以聚合体的身份完成由被动参与者到系统辅助治理者的转变。目前配电网的开环运行模式致使区域间的功率转移必须通过先向上级电网传输能量，再由上级电网分配的方式实现，如何在不影响上级电网安全运行的条件下实现区域间能量互济是需要重点研究的课题^[28]。另一方面，区域之间的协同互动相得益彰，可以实现 $1+1>2$ 的效果。

2.3 协同方法

分区聚合之后需要考虑不同区域、不同层级间的协同调度，下文根据新能源消纳、利益最大化、多能互补等目的梳理协同调度研究现状。协同方式的对比总结如表 2 所示。

2.3.1 不同层级间的协同调度

从电能传输的角度看，配电网相当于输电网的负荷^[47]，目前电网运行过程中输-配电环节调度决策相对割裂，没有考虑配电网作为负荷具有较大的不确定性，难以挖掘可调度资源的调度潜力以消纳

新能源。对于输-配协同，有研究将配电网作为 VPP 实体建立输电网-VPP 双层协同优化模型^[29]；此外还可以通过联络线交换功率将输配电网模型耦合，通过配电网并行优化-输电网层优化决策双层模型实现输-配网协同优化^[30-34]。相似地，含多微网的配电系统可以通过联络线功率，将配网和微网分别等效为电源和负荷，实现微网自治模型和配网优化模型并行求解^[48]。

2.3.2 不同区域间的协同调度

以新能源消纳、减少成本等目标进行优化调度，虽保证了电网的经济性与稳定性，却未没有考虑新型配电系统下资源所有权不一的情况。不同区域间的协同调度需要兼顾多方利益^[35]。

面向发电侧与用电侧的协同调度多采用非合作的主从博弈框架，其博弈过程存在先后顺序，发电侧被视为主导者进行策略制定，用电侧被视为跟随者对发电侧行为进行响应^[36]。文献[37]通过建立发电微网与用电微网之间的 Stackelberg 主从博弈模型协调各微网间的电能交互，在博弈过程中，用户微网根据电价调整购电策略，进而使发电微网发电策略达到均衡，促进了电力交易供需平衡；文献[38]通过分时电价与碳配额双重激励引导电动汽车响应微网调度，实现了提升微网侧新能源消纳能力，降低电动汽车车主经济成本的目标。

面向大规模产消者个体的协同调度多采用非合作的多主体博弈模型或合作博弈模型。文献[39-41]分别基于夏普利值法、核仁法进行收益分配，实现合作联盟的利益最大化；文献[49]针对所有权不一的 DER 协同调度问题，提出了多主体博弈模型，并将

表2 协同方式对比
Table 2 Comparison of collaborative methods

协同对象	目的	常用方法	特点	难点
不同层级: 输-配电网 配电网-聚合体	新能源消纳 经济性	目标级联分析 ^[29-34]	一般面向输配协同问题 适用于分层架构	求解困难
不同区域: 微网等聚合体	利益最大化 利益平衡	主从博弈 ^[35-38] 合作博弈 ^[39-41]	存在主从递阶结构 ^[36] 通过执行强制约束协议使联盟收益最优 ^[39] 分配策略主要有核仁法、夏普利值法等	主从双方的界定与响应顺序不再 适合源荷界限模糊化的现状 核仁法不适用于含有大规模主体的 模型求解;夏普利值法 不适用于非凸模型 ^[40]
不同能源: 电、热等多能流	多能互补	建立不同的能源模型, 并通过耦合因素进行关联	耦合元件有 电-气耦合:燃气轮机组、热电联产(combined heat and power, CHP)、电转气(power to gas, P2G)电-热耦合:CHP、电锅炉及热泵 电-冷耦合:电制冷机 冷-热耦合:吸收制冷 ^[42] 电-交耦合:电动汽车 气-交耦合:氢燃料汽车、天然气汽车 ^[43]	数据壁垒 隐私保护问题 时间尺度不一致
		将各能源运行约束 纳入模型 ^[44]	电约束、热约束、气约束、冷约束等	求解复杂
		综合能源统一模型	基于数学分析、广义电路理论将其他 能源系统类比电力系统建模 ^[45]	多能流动态特性的 刻画 ^[46]

碳排放作为博弈演化进程的影响因素纳入考虑范畴,实现多主体利益分布公平化及电网运行低碳化。

2.3.3 不同能源间的协同调度

新型配电系统下能源类型多样,对不同能源协同调度可以实现多能互补。文献[42]提出针对最大化减排、最大化收益、最小化弃能等多个目标的电-热-气-冷协同优化模型;文献[44]将负荷曲线、容载比、电源接入容量作为协同指标,提出考虑小水电大量接入的电力系统协同模型;文献[50-52]分别考虑电-气、电-热、热-气耦合特性,协调不同能源系统的时间尺度,从而充分发挥多能互补潜力,提升系统灵活性。

由于异质能源的物理特性迥异,以上研究都是对不同能源分别建模,协同优化面临不同模型参数、结构、原理的差异,彼此间难以兼容致使分析求解困难,而能流传输的共性使多能流统一建模分析成为可能^[53]。目前已有部分学者基于数学分析与广义电路提出了综合能源统一模型理论:在其他能源系统中构建类电力元件^[54-56],或通过端口化建模^[57-58]将复杂网络转化为等值边界信息。但大多数研究通过简化条件、忽略动态过程等方式对时空特征进行刻画^[59],还未能形成成熟的理论体系应用于工程实践^[60]。

3 基于态势感知的新型配电系统优化调度方法

传统调度模式依靠调度员经验与离线分析结

果做出决策,难以全面把握新型配电系统复杂的运行状态。为提高决策的统筹性和科学性,需要基于态势感知掌握系统运行状态及演化趋势,统筹分析系统运行所涉及的内外因素,洞察系统的运行与响应规律,进而辅助调度中心在系统全局态势基础上做出决策。本节从系统自身态势感知及外界风险感知两部分内容梳理新型配电系统优化调度方法。

3.1 系统态势感知

系统内部态势感知可以分解为状态估计和趋势预测两部分。状态估计即对电力系统实时运行状态进行监测与辨识^[61],经典算法为最小二乘估计;趋势预测即对系统故障、负荷需求和电源出力等情况进行预测,经典算法为卡尔曼滤波。以最小二乘理论与卡尔曼滤波理论为代表的经典感知算法依赖于电网参数与机理方程准确性,在计算效率、计算精度、计算复杂度、同频更新等方面存在瓶颈^[62];对于日常开放的场景,特别在以最经济、最低碳排放量为运行目标时,其调度效果难以保证;再者,模型驱动方法的输入参数和分析流程均较为固化,无法灵活有效地处理数据,特别是无法利用数据间的时空相关性;模型自身又是开环的,故可能会因病态、奇异点等现象导致严重偏差的结果,特别是考虑系统中的多元耦合与误差/不确定性的累积效应。

因此,有研究将数据驱动技术引入新型配电系统态势感知领域。数据驱动方法可从系统运行产生的实时/历史数据挖掘有效信息,对网络拓扑结构已知性的依赖度低,故数据驱动的态势感知方法应用

更为广泛，且一定程度上可以实现免模型。现有数据方法包括贝叶斯网络、马尔可夫模型^[63]、人工神经网络^[64]、模糊逻辑方法、随机矩阵理论等，从量测分析的数据体量出发，又可将此类方法分为低维数据驱动和高维数据驱动方法。例如，文献[65]将支持向量机作为合成基础，对多种类型的信息进行融合，以此实现态势感知；随机矩阵在电力领域的应用则可以追溯到 2015 年——贺兴、艾芊团队将其引入电力系统并构建电力大数据分析框架，并开发相应的功能模块部署于实际配网系统。随机矩阵逐渐被应用于电力系统认知、故障检测等领域。文献[66-67]基于随机矩阵理论的衍生模型，提出了适用于低信噪比场景的电网态势感知方法。

通过状态估计与趋势预测准确而全面地刻画系统运行轨迹，是实现调度优化、智能化的基础。系统运行轨迹表征了系统的历史态、现在态和未来态，如何根据已有数据推测系统发展态势并选取合适的指标体系描述系统演进过程是态势感知需要重点研究的内容。

3.2 外界风险感知

相比于传统配电系统，新型配电系统自身态势受外界环境影响更大。外界环境所带来的不确定性使调度面临更多不可控因素，承担更多风险。例如，天气影响可再生能源的出力，交通状况和电价波动影响电动汽车充电行为，源荷双侧不确定性响应动态匹配使电力电量不平衡加剧，调度难度增大^[68]。准确刻画并引入风险可以一定程度上降低外界风险对系统安全稳定运行的负面影响。

3.2.1 风险刻画

调度所面临的风险可以被划分为消纳风险、收益风险、安全风险等，其根源主要是源荷双侧的不确定性。对风险的刻画等同于对不确定性的刻画，风险刻画方法与对应的优化调度模型如表 3 所示。

不确定性可由不确定集合确定性表示，文献[77-80]总结了不确定集合的建模方法。不确定性还可以通过描述事件的概率，并将其转为确定性问题的求解，基于模糊理论，利用 Wasserstein 距离^[78]、KL(Kullback-Leibler)散度^[81]构建模糊集可以刻画光伏发电不确定性、电负荷与气负荷的不确定性；基于概率密度函数，可以体现符合正态分布、Beta 分布的数据特征，但存在不能刻画长时间跨度下新能源出力曲线的多峰、非对称、厚尾、尖峰特性^[74]，目前有研究通过高斯混合模型将多个正态分布曲线加权叠加，可更好地拟合分布式电源出力情况^[68]；基于区间变量，根据历史风光出力、各类负荷等功率误差概率分布，在给定置信度水平下选取功率区间^[71-72]刻画波动范围，或是用区间数表示光照强度的不确定性^[73]；基于机会约束，文献[70]将机组旋转备用约束发生概率设定置信度以刻画响应不确定性；基于场景生成，需要利用场景削减技术选取典型场景^[75]，在多个场景下进行模型求解。

不同于上述将不确定性问题转为确定性问题的思想，人工智能方法的引入降低了对先验知识的依赖性。文献[76]基于数据驱动方法，考虑新能源及电力负荷的混沌特性，对历史数据进行相空间重构，并利用极限学习机算法对风机、光伏出力及各类负荷进行预测，预测值与真实值之间的差异表征了不确定性，提高预测精度对降低风险有着重要意义。

表 3 风险刻画与优化调度方法
Table 3 Risk characterization and optimization dispatching methods

风险刻画方法	实现方式	特点	对应优化模型
不确定集合	置信区间集合	较为保守	鲁棒优化
概率密度函数	正态分布 Beta 分布	拟合效果受限于所选分布函数 ^[68] ；不具备多峰分布刻画能力；难以选择概率分布函数，并且所选概率分布可能与实际分布不同而使准确度较低	随机优化
模糊理论	Prokhorov 度量 Wasserstein 度量 KL 散度 ^[69]	由概率分布构成不确定集合 关键在于通过参数估计或非参数估计确定数据分布	基于距离的 分布鲁棒优化模型
机会约束 ^[70]	约束条件成立的概率不小于 某一置信水平	需要通过解析法、随机模拟法、采样法等 方式将其转为确定性问题。	随机优化
区间变量 ^[71-72]	根据历史经验确定变量的 区间范围	区间优化方法仅需要不确定变量的数值 分布范围，对数据量要求较低 ^[73] 区间变量取值是区间优化的关键 ^[74]	区间优化
生成场景 ^[75]	蒙特卡洛法	需要选取典型场景	随机优化
数据驱动 ^[76]	机器学习 神经网络	不必限制数据分布，泛化性更强 难以获得准确且完备的影响因素数据 ^[76]	基于深度学习的 优化

3.2.2 风险评估

风险评估常用的方法有熵权法^[82]、效用函数、均值-方差、风险值(value at risk, VaR)和条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)等。效用函数通常基于模糊化处理决策者面对风险时的态度与偏好,定性评估风险程度,例如根据其对风险的偏好可以将决策者分为保守、中立、激进3种类型,进而选择不同的效用函数^[83-84];或是通过熵体现不确定性,构造基于效用函数、风险偏好因子的风险决策模型,体现了风险偏好对决策方案的影响^[85-86]。CVaR 具有单调性、次可加性、平移不变性和正齐次性^[87],克服了 VaR 非一致性、非充分性、缺乏次可加性以及不能正确识别风险的缺点^[88],可以实现对风险的量化评估,并将风险成本计入目标函数或建立 CVaR 约束^[91],分析不同置信水平下运行成本变化趋势^[89-91]。

现有的风险评估指标较为单一,大多从安全性或经济性角度出发,缺乏评价新型配电系统多重风险及多系统耦合风险^[92]的评估体系。风险评估主要从事事故发生概率和事故严重程度这两个方面考虑。概率型风险评估通过构建事故模型量化分析风险,对高概率低严重事故与低概率严重事故无差别状态抽样加速求解,存在不能区分风险类别、不能反映对严重事故的趋避偏好、且计算效率较低的缺陷,难以满足新型配电系统对风险评估的要求^[93]。

模糊化等级指标可以较好地反映调度人员对低概率严重事故的关心程度,物理意义明确,可解释性较好。例如文献[94]根据事故严重程度将事故分为3个等级,提出风险量化数值表实现不同事故指标相加;并通过取对数转换模糊化概率差异,提高对小概率严重事故的关注度,但此方法存在量化数值缺乏依据等缺陷。

4 优化调度模型求解方法

4.1 调度决策求解方法

在引入风险因素建立优化调度模型后,需要对目标函数进行求解。目标函数往往涉及多主体、多系统、多能流而存在耦合变量,难以求解。集中式优化对通信能力、计算能力要求较高,目前多采用分布式算法,最为常用的有基于拉格朗日松弛的目标级联法(analysis target cascading, ATC)与交替乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM),算法分类如表4所示。

ATC 将复杂问题分解为多层优化问题,上层优化决策变量传至下层,下层模型将其作为目标并把产生的决策变量再传入上层模型,如此反复迭代直至满足收敛条件^[5]。文献[30-32]基于 ATC 对输-配电网进行级联优化。文献[97]对燃气轮机、电锅炉、蓄能装置等进行 DER 建模,实现电网-分布式主体的经济交易与整体系统优化运行。

表4 分布式算法
Table 4 Distributed algorithms

共同点	分布式算法	特点
拉格朗日松弛类	ATC	通常选取联络线交换功率作为耦合变量;需要进行松弛求解 ^[47] ;通常用于解决有层级关系的优化问题
	ADMM	在非凸问题中不能保证收敛 ^[32] ;通常用于解决存在多个并列关系优化变量,且只含等式约束的优化类问题
广义主从分裂类	Benders 分解法	Benders 割的构造较难 ^[95] ;大规模模型下 $N-1$ 子问题数量增加 ^[96]
	异质分解法	异质分解本质是基于最优性条件的分解算法;基于卡罗需-库恩-塔克条件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件进行解耦;只具有局部收敛性

ADMM 通常以功率作为共享变量,将分布式电源系统^[98]、储能系统^[99]、电动汽车集群^[100]、互联微网^[101]、多代理系统^[102]等多主体系统优化问题分解为以设备/微网数量为单位的优化子问题^[100],依次对各组变量进行交替迭代并更新相应的对偶变量,当原始残差与对偶残差均达到收敛条件后停止迭代^[98]。这种解耦方式还可以应用于输配电网、多能耦合系统,文献[103-106]以输配电网边界传输功率、电网-天然气网边界传输天然气量作为耦合变

量,不同系统之间只需要传输少量耦合变量信息即可进行分布式优化求解,通信需求较低,计算压力较小,同时实现了隐私保护。但大多数方法的收敛性均对惩罚因子敏感,参数选择较为困难^[107]。

以 ATC 和 ADMM 为代表的拉格朗日松弛类算法实质上是通过增量线性化引入 0-1 变量,将非线性问题转化成混合整数线性规划求解,并通过凸松弛技术将非凸问题转化为凸优化问题^[108]。

广义主从分裂类算法可以分为 Benders 分解法

和异质分解法，异质分解法使用较少。Benders 分解法是目前电力系统进行调度问题求解的主要方法，其将调度问题分解为最优潮流主问题-短期潮流校验子问题^[95]。其实质是先对松弛的主问题求解，然后通过子问题校核不断增加约束条件限制主问题可行域^[96]，基本流程如图 3 所示。这种方法适用于有限可控的发电机组，海量分布式电源所带来的子问题爆炸现象向传统调度机制提出挑战。

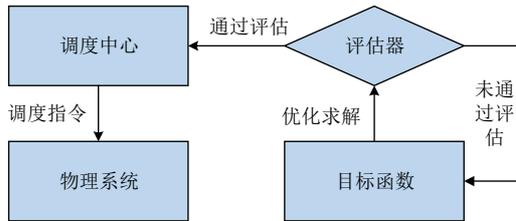


图 3 传统调度机制

Fig. 3 Traditional dispatching mechanism

4.2 调度决策求解算法

调度模型的求解算法可以分为解析法与人工智能算法。传统解析法通过增量线性化引入 0-1 变量将非线性问题转化成混合整数线性规划求解，并通过凸松弛技术将非凸问题转化为凸优化问题。人工智能算法无需上述繁琐的转化过程，适合求解高维复杂问题，主要代表有遗传算法和粒子群算法。粒子群算法通过更新空间中多个粒子的位置和速度来达到全局最优和个体最优，适用于多目标优化问题的求解，相比于容易陷入局部最优的遗传算法应用更为广泛。

5 基于数字孪生的智能调度展望

现行主流调度模型存在多方面不足：1) 对各类资源分别建模，异质能源模型之间存在壁垒，难以实现数据贯通；2) 鲁棒优化、随机优化等优化

方法的决策实质上是将不确定性因素转为确定性因素求解，并且可能违背多时段随机因素实现与多时段决策交替进行的时序逻辑^[109]；3) 安全分析系统基于历史数据离线仿真，决策模型无法实时更新导致决策结果不适用于实际情况，这也正是 2021 年欧洲电网解列的原因之一。此外，新型配电网 DER 调度还需考虑一些新的因素，从而对调度手段提出额外要求：1) 新能源消纳等调度目标要求模拟推演系统演化路径或考虑多重不确定因素，需要根据实际运行环境设置不同的推演算法，并通过安全校核；2) DER 调度对外部环境感知、设备运行态势等预测精度要求较高，需要提供具有更高建模精度、更强分析能力、更快计算速度的技术平台。综上所述，目前的调度方法不能满足动态交互、求解高效的智能决策要求，亟需实现 DER 调度模式升级。

数字孪生技术(digital twin, DT)与数据科学的发展为 DER 智能调度提供了新的解决途径。数字孪生基于建模、感知、决策的 3 个环节重塑了智能调度：1) 建模：在数字空间构建物理实体的孪生系统，通过虚实交互使孪生系统学习并复刻物理系统的特性，确保孪生系统与物理系统同步演化。2) 感知：从对象侧和系统侧挖掘面向调度业务的高价值信息，实现数字孪生平台下的系统轨迹推演、风险评估和关键调度决策因子辨识，可为调度提供全息态势特征。3) 决策：在态势感知指标支撑下实现融合物理机理模型、电力运行大数据和调度领域知识的人机混合增强决策，解决新型配电系统下具有信息不确定性和需求多样性的 DER 优化调度问题。具体路线如图 4 所示。

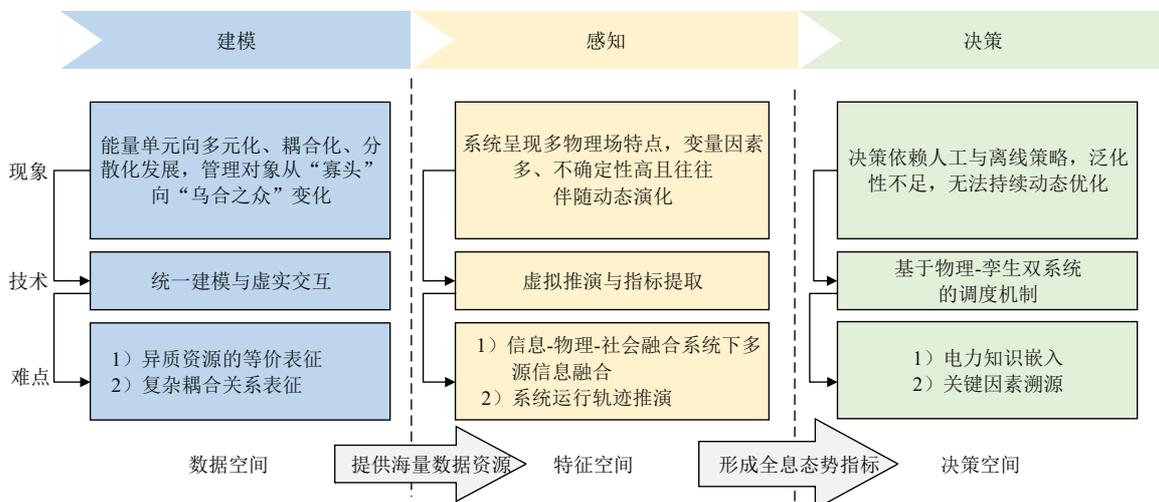


图 4 基于数字孪生的调度智能化升级路线

Fig. 4 Upgrade route for intelligent dispatching based on digital twin

5.1 面向调度的统一建模与虚实交互技术

统一建模与虚实交互是建模环节的关键技术,两者相辅相成,提高调度对象 DER 的认知水平:非机理模式下的孪生模型使基于数据的虚实交互成为可能,虚实交互通过实时数据反馈形成建模-感知-决策环节的闭环,使孪生模型根据调度结果迭代进化、自我更新。

首先,统一建模需要基于物理实体(physical entity, PE)建立面向调度任务的虚拟实体(virtual entity, VE)泛化模型,VE 需要满足多类调度需求,统筹考虑功率、容量等电气量与电价、气候因素等非电气量,形成由关键参数、成本函数与约束条件组成的泛化业务模型结构体;对关键参数构建线性、多项式、指数等拟合函数形式,进一步建立关键参数的泛化模型约束集;面向不同的调度需求,确定 DER 调度的时间尺度等要素,探究外部因素影响机理,利用理论经验推导、数据挖掘等进行典型特征提取;建立聚合体的泛化 VE,实现不同调控颗粒度下 VE 的灵活聚合,但异质资源的等价表征和复杂耦合关系表征是其难点。VE 在虚拟系统推演仿真的过程中保持与 PE 实时交互以提升 VE 准确度。

孪生系统与物理系统的虚实交互可以通过以深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)为代表的的人工智能算法实现。深度强化学习具有强大特征提取能力,无需人为假定不确定性^[110],计算速度快、鲁棒性强、可实现自适应学习^[111]。目前在电力系统常用的是演员-评判家(asynchronous advantage actor-critic, A3C)框架下的多种改进算法:基于 Actor(策略)-Critic(价值)框架的近端策略优化(proximal policy optimization, PPO)算法^[111-112]、深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)算法^[113]、柔性演员-评论家(multi-agent soft actor-critic, MASAC)算法^[114-116]、异步优势演员-评判家网络^[117-118]等。基于深度强化学习建立的调度模型能够根据历史数据学习源荷数据的概率分布,通过感知-行动-评价-学习的方式实现与物理系统的交互,并根据实时数据动态更新孪生模型。

孪生模型还与不同调度业务场景有关,孪生模型的颗粒度由调度目标决定,覆盖范围小至 DER 设备大至配电系统全局。由于各专业的实际业务需求中,电力设备的运行状态监测、运维检修都是无法规避的业务操作,建模环节的主要应用目标是基于虚拟系统对电力设备进行状态监测分析并辅助

运维,保障设备安全稳定运行,实现对电力设备的全寿命周期管理和 DER 调度潜力认知。除此之外,在物理量测数据不足情况下,虚拟系统可以生成大量相似的虚拟数据,和物理数据一起为态势感知提供海量数据资源。

5.2 面向调度的虚拟推演与指标提取技术

虚拟推演和指标提取是感知环节的关键技术,其中虚拟推演是指标提取的基础:虚拟推演为感知提供多种调度场景,便于提取适合多种调度目标的感知指标;另一方面,感知指标的有效性也需要在不同的调度场景推演中得到验证。

虚拟推演^[26]改变现有调度理论的不确定性决策方式,将优化问题转变为数据驱动的机器学习问题,通过批量仿真得到不同场景下的运行点。通过调度知识对运行点进行评价形成带标签样本集,进一步设计数据驱动方案实现智能调度,从而避免调度对象增多而导致的维数灾等问题。

在信息-物理-社会系统^[119]视角下,调度决策的制定需要基于计及多源不确定性的多维态势指标体系(系统安全性、可靠性、经济性、低碳性等)^[27]。指标提取依赖于态势感知技术,例如主成分分析等高维数据降维技术、深度神经网络等大数据分析技术、多任务学习模型自适应融合技术、嵌入专业知识的深层特征提取技术。更重要的是,需要深入研究多源信息融合技术,引入交通、天气等外界影响因素,构建面向未来系统运行发展态势的多维指标体系,实现预测、预知、预防,确保新能源安全经济消纳,配电系统安全稳定运行。

5.3 基于物理-孪生双系统交互的调度机制

围绕数据的建模-感知-决策流程实际是数据赋能的过程:态势感知技术从低信息密度的海量高维时空数据中挖掘特征信息,形成可以反映系统态势的高信息密度多维指标体系,决策器根据态势指标做出低维调度决策。并且,基于 DT 建立的物理-孪生双系统不是静态封闭的“离线训练、在线决策”模型,而是与物理系统形成交互闭环,通过自优化和再优化流程,实时交互数据,通过人机混合增强持续提升调度智能化水平,相应机制如图 5 所示。

1) 基于数字孪生系统完成虚拟空间调度决策自优化:将决策器生成的调度策略与传统的基于规则或优化的调度策略进行比较,得到针对单场景的有效性评估结果;基于历史数据和仿真数据,构建电网运行场景库,进而分析多运行场景之间的拓扑相似度和调度计划相似度,对不同场景下的调度策

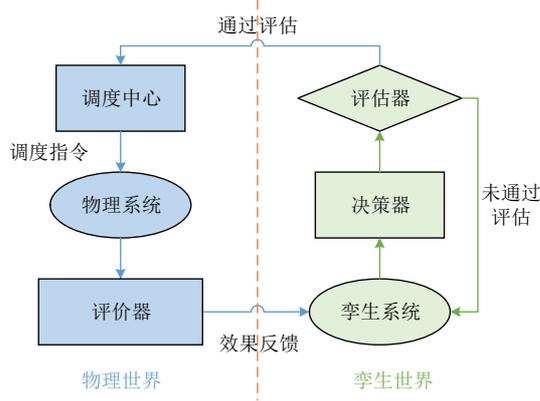


图5 基于物理-孪生双系统交互的调度机制

Fig. 5 Dispatching mechanism based on the interaction between physical and twin systems

略可移植特性进行验证，得到考虑多场景的泛化性评估结果。若通过则将决策传达至调度中心，若未通过评估，则需要决策器再次迭代优化。简而言之，孪生系统使调度决策在真实世界实施之前，在孪生世界中低成本地试错并从中凝练发现共性知识，完成孪生系统内部自优化，降低调度决策失误风险。

在这一过程中，如何使决策器充分学习电力知识是未来的重点研究内容。新型配电系统调度是一个高度专业化的知识领域，调度决策指令的生成在依靠 DRL 等智能算法之外还需要嵌入电力调度理论和专家经验。其中，电力调度理论用于构建深度强化学习奖励函数及约束决策空间边界，专家经验用于指导选取模型参数。

2) 基于真实电网环境完成物理在环系统再优化：调度中心对通过评估的调度指令下发给物理系统，评价器根据多维评估体系对物理系统状态进行评价，分析所提出的调度决策产生偏差的原因并给出改进方向和建议，从而使 DT 系统基于实际决策效果再次优化。自优化与再优化过程都需要根据评估/评价结果更新优化孪生系统与决策器模型，对哪些参数更新、如何更新等问题涉及关键决策变量溯源技术，属于未来重点研究内容。

综上所述，基于数字孪生实现智能调度是一个技术逐步成熟、循序渐进、反复迭代的过程，是需要通过若干个独立或者复合的场景和项目逐步验证的建设过程。针对于每个不同的建设阶段，可能需要解决一个或者多个关键技术瓶颈，并且这些技术瓶颈可能需要通过多个阶段的分别建设共同完成。如统一建模、虚实交互、虚拟推演、指标提取等关键技术，在具体业务场景中将贯穿于业务的数据交互、算法、应用等多个模块与环节。

6 结论

本文从调度架构、基于态势感知的优化调度方法、调度模型求解方法 3 部分梳理新型配电系统调度研究现状，并基于数字孪生对未来的智能化调度前景进行展望。新型配电系统是进行电能分配、新能源消纳、能源交易、多能协同的综合平台，基于 DER 聚合体进行分层分区协同调度，可以提高系统有序性和灵活性；优化调度模型和求解方法都逐步引入机器学习、深度学习算法，有效提高了调度的智能化水平，但距离实现自动化智能调度仍有距离：

1) 在协同调度方面，对多能流系统的建模尚处于初级阶段，需要进一步研究能够有效平衡精度与效率的多时间尺度、多异质能流模型。

2) 在态势感知方面，随着与外界系统的耦合加深，需要进一步研究政策、能源、战争等因素对新型配电系统的影响，利用异源时空大数据分析实现能源聚合体及系统精准态势感知，建立有效的风险规避机制，提高电力系统对非典型极限场景的应对能力。

3) 在优化调度方面，目前的调度优化方法难以全方位考虑不确定性因素，无法适用于全场景；均基于“离线训练、在线决策”模式，模型仅根据历史数据训练，未接收来自决策效果的反馈，不能持续动态更新模型并及时根据真实情况调整决策。需要进一步基于 DT 研究可自适应动态优化的决策生成模型，以及适用于组合爆炸情况的安全校核机制，形成智能决策闭环，实现决策模型动态优化与策略智能水平持续提升。

参考文献

- [1] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002-5016.
LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5002-5016(in Chinese).
- [2] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035(in Chinese).
- [3] 赵鹏臻, 谢宁, 殷佳敏, 等. 适应新型电力系统发展趋势的配电网集中-分布式形态及其分层分区方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 94-100.
ZHAO Pengzhen, XIE Ning, YIN Jiamin, et al. Centralized-distributed pattern of distribution network and its hierarchical partition method adapting to development trend of new power system[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 94-100(in Chinese).
- [4] 郝广涛, 韩学山, 梁军, 等. 传统电力系统和高比例可再生能源电力系统调度与控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 10-19.

- HAO Guangtao, HAN Xueshan, LIANG Jun, et al. Review of dispatch and control methods for tradition power system and high-rate renewable energy generation power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(9): 10-19(in Chinese).
- [5] 杨晓辉, 张柳芳, 吴龙杰, 等. 含考虑 IDR 的冷热电联供微网的主动配电网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 19-28.
- YANG Xiaohui, ZHANG Liufang, WU Longjie, et al. Economic optimal dispatch of an active distribution network with combined cooling, heating and power microgrids considering integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 19-28(in Chinese).
- [6] 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]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5024-5036.
- 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]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5024-5036(in Chinese).
- [7] 刘迎澍, 陈曦, 李斌, 等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3804-3820.
- LIU Yingshu, CHEN Xi, LI Bin, et al. State of art of the key technologies of multiple microgrids system[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3804-3820(in Chinese).
- [8] 马艺玮, 杨莘, 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(in Chinese).
- [9] 孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3534-3544.
- SUN Huijuan, LIU Yun, PENG Chunhua, et al. Optimization scheduling of virtual power plant with carbon capture and waste incineration considering power-to-gas coordination[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3534-3544(in Chinese).
- [10] 张立辉, 戴谷禹, 聂青云, 等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 154-163.
- ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, et al. Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 154-163(in Chinese).
- [11] 陈登勇, 刘方, 刘帅. 基于阶梯碳交易的含 P2G-CCS 耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2042-2053.
- CHEN Dengyong, LIU Fang, LIU Shuai. Optimization of virtual power plant scheduling coupling with P2G-CCS and doped with gas hydrogen based on stepped carbon trading[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2042-2053(in Chinese).
- [12] 仲悟之, 黄思宇, 崔杨, 等. 考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3424-3432.
- ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, et al. W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source-load uncertainty [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3424-3432(in Chinese).
- [13] 葛鑫鑫, 付志扬, 徐飞, 等. 面向新型电力系统的虚拟电厂商业模式与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 129-146.
- GE Xinxin, FU Zhiyang, XU Fei. Business model and key technologies of virtual power plant for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 129-146(in Chinese).
- [14] 赵海兵, 张焕云, 葛杨, 等. 细胞-组织认知下的主动配电系统双层多目标控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 81-91.
- ZHAO Haibing, ZHANG Huanyun, GE Yang, et al. Bi-level multi-objective control strategy of active distribution system under the cognition of cell-tissue theory[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 81-91(in Chinese).
- [15] 李嘉媚, 艾芊, 殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 37-55.
- LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-55(in Chinese).
- [16] 李嘉媚, 艾芊. 考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 1-7.
- LI Jiamei, AI Qian. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 1-7(in Chinese).
- [17] ROMINGER J, KERN F, SCHMECK H. Provision of frequency containment reserve with an aggregate of air handling units[J]. Computer Science-Research and Development, 2018, 33: 215-221.
- [18] GALUS M D, KOCH S, ANDERSSON G. Provision of load frequency control by PHEVs, controllable loads, and a cogeneration unit[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4568-4582.
- [19] KOLENC M, NEMČEK P, GUTSCHI C, et al. Performance evaluation of a virtual power plant communication system providing ancillary services[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 149: 46-54.
- [20] 高军伟, 陈泽雄, 郑欣, 等. 含光伏的冷热电联供园区微网多类型储能协调鲁棒优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 56-66.
- GAO Junwei, CHEN Zexiong, ZHENG Xin, et al. Coordinated robust optimal allocation of multiple types energy storage devices in the CCHP campus microgrid with photovoltaic[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 56-66(in Chinese).
- [21] 孙亮, 李佳雯, 杨心贺, 等. 含相变储能的冷热电联供型微网多目标优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 60-66.
- SUN Liang, LI Jiawen, YANG Xinhe, et al. Multi-objective optimal configuration of combined cooling, heating and power microgrid with phase change material energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 60-66(in Chinese).
- [22] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 11-24.
- BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 11-24(in Chinese).
- [23] 刘雨佳, 樊艳芳, 郝俊伟, 等. 基于碱性电解槽宽功率率适应模型的风光氢热虚拟电厂容量配置与调度优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 48-60.
- LIU Yujia, FAN Yanfang, HAO Junwei, et al. Capacity configuration and optimal scheduling of a wind-photovoltaic-hydrogen-thermal virtual power plant based on a wide range power adaptation strategy for an alkaline electrolyzer[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 48-60(in Chinese).
- [24] 范添圆, 王海云, 王维庆, 等. 计及主/被动需求响应下基于合作博弈的微网-配电网协调优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 453-462.
- FAN Tianyuan, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Coordinated optimization scheduling of microgrid and distribution network based on cooperative game considering active/passive demand response[J].

- Power System Technology, 2022, 46(2): 453-462(in Chinese).
- [25] WANG Yao, AI Xin, TAN Zhongfu, et al. Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 510-519.
- [26] 贺兴, 潘美琪, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(二): 面向复杂系统涌现现象的虚拟仿真推演框架[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-13[2023-04-18].
HE Xing, PAN Meiqi, TANG Yuezhong, et al. System theory on perception of energy internet of things based on digital twins and metaverse (II): virtual simulation and analytical deduction framework for emergency phenomenon in complex system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13[2023-04-18](in Chinese).
- [27] 贺兴, 陈昱昱, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法研究(一): 概念、挑战与研究框架[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-13[2023-04-03].
HE Xing, CHEN Minyu, TANG Yuezhong, et al. System theory study on situation awareness of energy internet of things based on digital twins and metaverse (I): concept, challenge, and framework[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13[2023-04-03].
- [28] 唐巍, 张起铭, 张璐, 等. 新型配电系统多层次交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 2-17.
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17(in Chinese).
- [29] 赵晋泉, 杨婷, 姚建国, 等. 电力现货市场下输配协同传输阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 107-114.
ZHAO Jinquan, YANG Ting, YAO Jianguo, et al. Transmission congestion management based on transmission and distribution coordination in spot power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 107-114(in Chinese).
- [30] 张旋, 张玉敏, 吉兴全, 等. 计及电-气-热综合能源系统的输配协同优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4256-4266.
ZHANG Xuan, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Synergetic optimized scheduling of transmission and distribution network with electricity-gas-heat integrated energy system[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4256-4266(in Chinese).
- [31] LI Peng, WU Qiuwei, YANG Ming, et al. Distributed distributionally robust dispatch for integrated transmission-distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1193-1205.
- [32] 张玉敏, 张旋, 吉兴全, 等. 计及电-气-热 IES 动态特性的输配协同机组组合[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8576-8591.
ZHANG Yumin, ZHANG Xuan, JI Xingquan, et al. Synergetic unit commitment of transmission and distribution network considering dynamic characteristics of electricity-gas-heat integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8576-8591(in Chinese).
- [33] 蔡杰, 王廷涛, 徐小琴, 等. 考虑输配协同的电网机组组合与技改计划联合优化模型[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 174-183.
CAI Jie, WANG Tingtao, XU Xiaoqin, et al. Joint optimization model of power grid unit commitment and technical transformation plan considering transmission and distribution coordination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 174-183(in Chinese).
- [34] 李傲伟, 柳璐, 程浩忠, 等. 高比例可再生能源接入下考虑输配协同的输电网规划测试系统[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 19-27.
LI Aowei, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Transmission expansion planning test system considering transmission and distribution coordination with integration of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 19-27(in Chinese).
- [35] 黄慧, 李永刚, 刘华志. 基于改进 Nash-Q 均衡迁移算法的源网荷储协同优化策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 48(8): 71-77, 107.
HUANG Hui, LI Yonggang, LIU Huazhi. Collaborative optimization strategy of source-grid-load-energy storage based on improved Nash-Q equilibrium transfer algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 48(8): 71-77, 107(in Chinese).
- [36] 王海洋, 李珂, 张承慧, 等. 基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5435-5444.
WANG Haiyang, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy system based on stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5435-5444(in Chinese).
- [37] 练小林, 李晓露, 曹阳, 等. 考虑多主体主从博弈的多微网协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 85-93.
LIAN Xiaolin, LI Xiaolu, CAO Yang, et al. Coordinated optimization scheduling of multi-microgrid considering multi-agent leader-follower game[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(1): 85-93(in Chinese).
- [38] 李咸善, 陈敏睿, 程杉, 等. 基于双重激励协同博弈的含电动汽车微电网优化调度策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2286-2295.
LI Xianshan, CHEN Minrui, CHENG Shan, et al. Research on optimal scheduling strategy of microgrid with electric vehicles based on dual incentive cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2286-2295(in Chinese).
- [39] 帅轩越, 王秀丽, 吴雄, 等. 计及条件风险价值下基于合作博弈的多微网协同优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 130-137.
SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Cooperative optimal scheduling of multi-microgrids based on cooperative game considering conditional value at risk[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 130-137(in Chinese).
- [40] 冯昌森, 沈佳静, 赵崇娟, 等. 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 85-93.
FENG Changsen, SHEN Jiaying, ZHAO Chongjuan, et al. Cooperative game-based coordinated operation strategy of smart energy community[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 85-93(in Chinese).
- [41] CHIS A, KOIVUNEN V. Coalitional game-based cost optimization of energy portfolio in smart grid communities[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1960-1970.
- [42] 徐文涛, 张晶, 马红明, 等. 计及多能转化效率的区域综合能源系统协同优化模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(10): 98-106.
XU Wentao, ZHANG Jing, MA Hongming, et al. Research on the collaborative optimization model of comprehensive energy system considering multi-energy conversion efficiency[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(10): 98-106(in Chinese).
- [43] 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).
- [44] 马临超, 齐山成, 杨星磊, 等. 富含上网小水电的电力系统协同规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 69-74.
MA Linchao, QI Shancheng, YANG Xinglei, et al. Collaborative planning method of power system with rich small hydropower[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 69-74(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(一):

- 时域二端口模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6509-6520.
- 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): 6509-6520(in Chinese).
- [46] 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).
- [47] 张旭, 王洪涛. 高比例可再生能源电力系统的输配协同优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 67-75, 115.
- ZHANG Xun, WANG Hongtao. Optimal dispatch method of transmission and distribution coordination for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 67-75, 115(in Chinese).
- [48] 谢敏, 吉祥, 柯少佳, 等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电网自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921.
- XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921(in Chinese).
- [49] 韩海腾, 魏恬恬, 周亦洲, 等. 考虑碳排放的含产消者多主体博弈协同调度策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4238-4246.
- HAN Haiteng, WEI Tiantian, ZHOU Yizhou, et al. Cooperative dispatch strategy of multi-agent gaming including prosumers considering carbon emission[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4238-4246(in Chinese).
- [50] TAN Jin, WU Qiuwei, HU Qinran, et al. Adaptive robust energy and reserve co-optimization of integrated electricity and heating system considering wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114230.
- [51] 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.
- [52] CHEN Xi, WANG Chengfu, WU Qiuwei, et al. Optimal operation of integrated energy system considering dynamic heat-gas characteristics and uncertain wind power[J]. Energy, 2020, 198: 117270.
- [53] YAO Shuai, GU Wei, LU Shuai, et al. Dynamic optimal energy flow in the heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 179-190.
- [54] YANG Jingwei, ZHANG Ning, BOTTERUD A, et al. Situation awareness of electricity-gas coupled systems with a multi-port equivalent gas network model[J]. Applied Energy, 2020, 258: 14029.
- [55] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 436-443.
- CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443(in Chinese).
- [56] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142.
- CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142(in Chinese).
- [57] LU Shuai, GU Wei, MENG Ke, et al. Thermal inertial aggregation model for integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2374-2387.
- [58] YANG Jingwei, ZHANG Ning, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 560-570.
- [59] 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).
- [60] 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).
- [61] 刘晟源, 林振智, 李金城, 等. 电力系统态势感知技术研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 229-239.
- LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, LI Jincheng, et al. Review and prospect of situation awareness technologies of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 229-239(in Chinese).
- [62] 黄蔓云, 卫志农, 孙国强, 等. 数据挖掘在配电网态势感知中的应用: 模型、算法和挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6588-6598.
- HUANG Manyun, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review of distribution system situation awareness based on data mining: modeling, algorithms and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6588-6598(in Chinese).
- [63] 段斌, 陈明杰, 李辉, 等. 基于电能质量态势感知的分布式发电主动运行决策方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 176-181.
- DUAN Bin, CHEN Mingjie, LI Hui, et al. Decision method of proactive operation for distributed generation based on power quality situation awareness[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 176-181(in Chinese).
- [64] 李刚, 唐正鑫, 李纪锋, 等. 智能电网安全态势感知与组合预测[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(11): 1-7.
- LI Gang, TANG Zhengxin, LI Jifeng, et al. Security situation awareness and combination forecasting in smart grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(11): 1-7(in Chinese).
- [65] LU Jie, YANG Xiaowei, ZHANG Guangquan. Support vector machine-based multi-source multi-attribute information integration for situation assessment[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(2): 1333-1340.
- [66] 周忠强, 韩松. 基于样本协方差矩阵最大特征值的低信噪比环境电网异常状态检测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 113-119.
- ZHOU Zhongqiang, HAN Song. MESCM based abnormal state detection of power system in low SNR environment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 113-119(in Chinese).
- [67] 周忠强, 韩松, 李洪乾. 基于 Spiked 模型的低信噪比环境电网异常状态检测[J]. 电测与仪表, 2018, 55(18): 90-96.
- ZHOU Zhongqiang, HAN Song, LI Hongqian. Spiked population model based abnormal state detection of power system in low SNR environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(18): 90-96(in Chinese).
- [68] 许寅, 李佳旭, 王颖, 等. 考虑光伏出力不确定性的园区配电网日前运行计划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 85-91, 105.

- XU Yin, LI Jiayu, WANG Ying, et al. Day-ahead operation plan for campus distribution network considering uncertainty of photovoltaic output[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5): 85-91, 105(in Chinese).
- [69] 胡博, 谢开贵, 邵常政, 等. 双碳目标下新型电力系统风险评述: 特征、指标及评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(5): 1-15.
- HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(5): 1-15(in Chinese).
- [70] 高晗, 李正烁. 考虑电转气响应特性与风电出力不确定性的电气综合能源系统协调调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 24-30.
- GAO Han, LI Zhengshuo. Coordinated scheduling of integrated electricity-gas energy system considering response characteristic of power-to-gas and wind power uncertainty[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 24-30(in Chinese).
- [71] 罗平, 周濠炳, 徐林, 等. 基于区间优化的冷热电联供型多微网日前优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(9): 137-146.
- LUO Ping, ZHOU Haobing, XU Lin, et al. Day-ahead optimal scheduling of multi-microgrids with combined cooling, heating and power based on interval optimization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(9): 137-146(in Chinese).
- [72] 郭祚刚, 徐敏, 于浩, 等. 考虑多重不确定性的园区综合能源系统区间优化调度[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 121-128, 141.
- GUO Zuogang, XU Min, YU Hao, et al. Interval optimal dispatching of community integrated energy system considering multiple uncertainties[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 121-128, 141(in Chinese).
- [73] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(2): 163-175.
- YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(2): 163-175(in Chinese).
- [74] 刘丽军, 张嫣, 徐启峰. 一种考虑功率不确定性影响及配电网灵活性需求的区间优化调度方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4654-4663.
- LIU Lijun, ZHANG Yan, XU Qifeng. An interval optimal scheduling method considering the influence of power uncertainty and the flexibility of distribution network[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4654-4663(in Chinese).
- [75] YAO Li, WANG Xiuli, DING Tao, et al. Stochastic day-ahead scheduling of integrated energy distribution network with identifying redundant gas network constraints[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 4309-4322.
- [76] 侯慧, 王晴, 薛梦雅, 等. 计及源荷不确定性及需求响应的离网型微电网两阶段日前经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 73-85.
- HOU Hui, WANG Qing, XUE Mengya, et al. Two-stage economic day-ahead dispatch of an islanded microgrid considering uncertainty and demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 73-85(in Chinese).
- [77] 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.
- [78] 曾捷, 童晓阳, 范嘉乐. 计及需求响应不确定性的电气耦合配电网系统动态分布鲁棒优化[J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1877-1886.
- ZENG Jie, TONG Xiaoyang, FAN Jiale. Dynamic distributionally robust optimization of integrated electric-gas distribution system considering demand response uncertainty[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(5): 1877-1886(in Chinese).
- [79] JIANG Ruiwei, WANG Jianhui, GUAN Yongpei. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 800-810.
- [80] 刘斌, 刘锋, 王程, 等. 适用于鲁棒调度的风电场出力不确定性集合建模与评估[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(18): 8-14.
- LIU Bin, LIU Feng, WANG Cheng, et al. Uncertainty set modeling and evaluation of wind farm power output for robust dispatch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(18): 8-14(in Chinese).
- [81] 周计晨, 吕胤杰, 杨诚之, 等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 66-73.
- ZHOU Jichen, LÜ Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch considering uncertain wind power output[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 66-73(in Chinese).
- [82] 郝如海, 智勇, 祁莹, 等. 基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1): 73-78.
- HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 73-78(in Chinese).
- [83] 丁小东, 庄河, 黄修莉, 等. 基于CARA效用函数的报童决策偏差形成机理[J]. *控制与决策*, 2016, 31(2): 287-296.
- DING Xiaodong, ZHUANG He, HUANG Xiuli, et al. Formation mechanism of newsvendor decision bias based on CARA utility function[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(2): 287-296(in Chinese).
- [84] 马倩, 王昭聪, 潘学萍, 等. 新电改环境下基于效用函数的电网投资决策评价方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(12): 198-204.
- MA Qian, WANG Zhaocong, PAN Xueping, et al. Evaluation method of power grid investment decision based on utility function under new electricity reform environment[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(12): 198-204(in Chinese).
- [85] 李茹霞, 扈文秀, 齐晓亮. 区间二型模糊集效用函数和熵在风险决策中的应用[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(5): 102-109.
- LI Ruxia, HU Wenxiu, QI Xiaoliang. The applications of utility function and entropy of interval type-2 fuzzy set in risk decision-making[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(5): 102-109(in Chinese).
- [86] 梅孔椿, 张凤晓, 毛军军, 等. 基于交叉熵与风险偏好的多属性决策分析[J]. *计算机工程*, 2018, 44(8): 204-211.
- MEI Kongchun, ZHANG Fengxiao, MAO Junjun, et al. Multi-attribute decision making analysis based on cross-entropy and risk preference[J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(8): 204-211(in Chinese).
- [87] 郑义, 白晓清, 苏向阳. 考虑风电不确定性的 ϕ -散度下基于条件风险价值的鲁棒动态经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(2): 63-70.
- ZHENG Yi, BAI Xiaqing, SU Xiangyang. Robust dynamic economic dispatch considering uncertainty of wind power based on conditional value-at-risk under ϕ -divergence[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(2): 63-70(in Chinese).
- [88] 张涛, 刘景, 杨晓雷, 等. 计及主/被动需求响应与条件风险价值的微网经济调度[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3292-3302.
- ZHANG Tao, LIU Jing, YANG Xiaolei, et al. Economic dispatch of microgrid considering active/passive demand response and conditional value at risk[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3292-3302(in Chinese).
- [89] 陈寒, 唐忠, 鲁家阳, 等. 基于CVaR量化不确定性的微电网优

- 化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 105-115.
CHEN Han, TANG Zhong, LU Jiayang, et al. Research on optimal dispatch of a microgrid based on CVaR quantitative uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 105-115(in Chinese).
- [90] 钟雅珊, 付聪, 钱峰, 等. 考虑广义储能和条件风险价值的综合能源系统经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 54-63.
ZHONG Yashan, FU Cong, QIAN Feng, et al. Economic dispatch model of an integrated energy system considering generalized energy storage and conditional value at risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 54-63(in Chinese).
- [91] 殷加球, 赵冬梅. 基于全概率风险度量的电力系统备用风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 156-162.
YIN Jiafu, ZHAO Dongmei. Reserve risk assessment method of power system based on total probability risk measure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 156-162(in Chinese).
- [92] 王春义, 李彪, 汪媛, 等. 综合能源系统风险识别与分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 28-39, 55.
WANG Chunyi, LI Biao, WANG Yuan, et al. Risk identification analysis of integrated energy system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 28-39, 55(in Chinese).
- [93] 别朝红, 潘超琼, 陈叶, 等. 能源转型下新能源电力系统概率风险评估[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(7): 1-11.
BIE Zhaohong, PAN Chaoqiong, CHEN Ye, et al. Probabilistic risk assessment of new energy power system in the context of energy transition: a review[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(7): 1-11(in Chinese).
- [94] 何晓峰, 林子钊, 徐希, 等. 基于模糊化事故等级指标的调度风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 98-104.
HE Xiaofeng, LIN Zizhao, XU Xi, et al. A dispatch risk assessment method based on fuzzification accident rating index[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 98-104(in Chinese).
- [95] 赵晋泉, 张振伟, 姚建国, 等. 基于广义主从分裂的输配电网一体化分布式无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 108-115.
ZHAO Jinquan, ZHANG Zhenwei, YAO Jianguo, et al. Heterogeneous decomposition based distributed reactive power optimization method for global transmission and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 108-115(in Chinese).
- [96] 荆朝霞, 陈达鹏, 谭慧娟, 等. 城市输电网最大供电能力改进 Benders 算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4373-4384.
JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, TAN Huijuan, et al. An improved benders decomposition applied to total supplying capability problem of city transmission network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4373-4384(in Chinese).
- [97] 姚璐, 赵维兴, 李舒佳, 等. 基于目标级联分析法的分布式主体可交易能源模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 256-264.
YAO Lu, ZHAO Weixing, LI Shujia, et al. Transactive energy model of distributed agents based on analytical target cascading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 256-264(in Chinese).
- [98] 夏世威, 邹唯薇, 张茜, 等. 基于交替方向乘子法的电力系统分散式经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 100-106.
XIA Shiwei, ZOU Weiwei, ZHANG Qian, et al. Decentralized economic dispatch for power system based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 100-106(in Chinese).
- [99] 李相俊, 盛兴, 闫士杰, 等. 基于交替方向乘子法的超大规模储能系统分布式协同优化[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1681-1688.
LI Xiangjun, SHENG Xing, YAN Shijie, et al. Distributed cooperative optimization for ultra-large-scale storage system based on alternating direction multiplier method[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1681-1688(in Chinese).
- [100] 吕仁周, 白晓清, 李佩杰, 等. 基于交替方向乘子法的电动汽车分散式充电控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 56-63.
LYU Renzhou, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. Decentralized charging control of electric vehicles based on alternate direction method of multiplier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 56-63(in Chinese).
- [101] 王程, 刘念. 基于交替方向乘子法的互联微电网系统分布式优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2675-2681.
WANG Cheng, LIU Nian. Distributed optimal dispatching of interconnected microgrid system based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2675-2681(in Chinese).
- [102] 张世旭, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 基于自适应步长 ADMM 的配电网分布式鲁棒优化调度策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 81-92.
ZHANG Shixu, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Distributed robust optimal dispatch for active distribution networks based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 81-92(in Chinese).
- [103] 赵冬梅, 王浩翔, 陶然. 基于改进交替方向乘子法的输配电网分散协调鲁棒优化调度模型[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1138-1150.
ZHAO Dongmei, WANG Haoxiang, TAO Ran. Decentralized coordination robust optimal scheduling model for transmission and distribution networks based on improved alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1138-1150(in Chinese).
- [104] 徐小琴, 王博, 赵红生, 等. 基于交替方向乘子法及最优潮流的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 18-27.
XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Coordination planning method of a transmission and distribution network based on alternating direction method of multipliers and optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 18-27(in Chinese).
- [105] 兰鹏, 沈晓东, 吴刚, 等. 基于交替方向乘子法的输-配-天然气系统分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 21-30.
LAN Peng, SHEN Xiaodong, WU Gang, et al. Distributed optimal scheduling for transmission-distribution-natural-gas system based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 21-30(in Chinese).
- [106] 王旭, 别朝红. 基于交替方向乘子法的电气互联系统分布式协同规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 107-117.
WANG Xu, BIE Zhaohong. Distributed co-planning of electricity and natural gas systems based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 107-117(in Chinese).
- [107] 陈哲, 王槽裕, 郭创新, 等. 基于风险的多区互联电力系统分布式鲁棒动态经济调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 113-122.
CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Risk-based distributed robust dynamic economic dispatch for interconnected multi-regional power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 113-122(in Chinese).
- [108] 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(in Chinese).
- [109] 翟桥柱, 周玉洲, 李轩, 等. 非预期性与全场景可行性: 应对负

- 荷与可再生能源不确定性的现状、挑战与未来[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6418-6432.
- ZHAI Qiaozhu, ZHOU Yuzhou, LI Xuan, et al. Nonanticipativity and all-scenario-feasibility: state of the art, challenges, and future in dealing with the uncertain load and renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6418-6432(in Chinese).
- [110] 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).
- [111] 刘必晶. 基于深度强化学习的综合能源系统优化调度[J/OL]. 现代电力, 2022: 1-8[2023-04-16]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0296>.
- LIU Bijing. Optimal dispatch of integrated energy system based on deep reinforcement learning[J/OL]. Modern Electric Power, 2022: 1-8[2023-04-16]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0296>(in Chinese).
- [112] 蔺伟山, 王小君, 孙庆凯, 等. 计及安全约束的综合能源系统深度强化学习优化调度策略研究[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1970-1978.
- LIN Weishan, WANG Xiaojun, SUN Qingkai, et al. Optimal dispatch strategy of integrated energy system based on deep reinforcement learning considering security constraints[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1970-1978(in Chinese).
- [113] 严干贵, 阚天洋, 杨玉龙, 等. 基于深度强化学习的分布式电采暖参与需求响应优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4140-4147.
- YAN Gangui, KAN Tianyang, YANG Yulong, et al. Demand response optimal scheduling for distributed electric heating based on deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4140-4147(in Chinese).
- [114] 巨云涛, 陈希, 李嘉伟, 等. 基于分布式深度强化学习的微网群有功无功协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 115-125.
- JU Yuntao, CHEN Xi, LI Jiawei, et al. Active and reactive power coordinated optimal dispatch of networked microgrids based on distributed deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 115-125(in Chinese).
- [115] 邓柏荣, 陈俊斌, 丁巧宜, 等. 融合电网运行场景聚类的多任务深度强化学习优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 978-987.
- DENG Bairong, CHEN Junbin, DING Qiaoyi, et al. Multi-task deep reinforcement learning optimal dispatching based on grid operation scenario clustering[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 978-987(in Chinese).
- [116] 刘敦楠, 王玲湘, 汪伟业, 等. 基于深度强化学习的大规模电动汽车充换电负荷优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 36-46.
- LIU Dunnan, WANG Lingxiang, WANG Weiye, et al. Optimal scheduling of electric vehicle load for large-scale battery charging and swapping based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 36-46(in Chinese).
- [117] 张虹, 申鑫, 穆昊源, 等. 基于 Multi-Agent 异步深度强化学习的居民住宅能耗在线优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 117-127.
- ZHANG Hong, SHEN Xin, MU Haoyuan, et al. Research on online optimal dispatching of residential energy consumption based on Multi-Agent asynchronous deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 117-127(in Chinese).
- [118] 杜蕙, 林涛, 李轻言, 等. 电力-天然气互联系统协同安全机制: 现状, 问题与挑战[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3764-3776.
- DU Hui, LIN Tao, LI Qingyan, et al. Coordinated security mechanism for electric-gas interconnect systems: status, problems, and challenges [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3764-3776(in Chinese).
- [119] 刘念, 余星火, 王剑辉, 等. 泛在物联网的配用电优化运行: 信息物理社会系统的视角[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 1-12.
- LIU Nian, YU Xinghuo, WANG Jianhui, et al. Optimal operation of power distribution and consumption system based on ubiquitous internet of things: a cyber-physical-social system perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 1-12(in Chinese).



潘美琪

在线出版日期: 2023-09-06。

收稿日期: 2023-05-04。

作者简介:

潘美琪(1998), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为故障识别、数字孪生, E-mail: panmeiqi@sjtu.edu.cn;

贺兴(1986), 男, 副研究员, 硕士生导师, 通信作者, 主要研究方向为电力系统大数据分析、随机矩阵、数字孪生、元宇宙, E-mail: hexing_hx@126.com;

艾芊(1969), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统人工智能、电能质量等, E-mail: aiqian@sjtu.edu.cn;

唐跃中(1970), 男, 正高级工程师, 研究方向为电力企业信息化、数字化电网、企业管理等, E-mail: tangyz@sh.sgcc.com.cn。

(责任编辑 徐梅)