

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.014

分布式资源助力新型电力系统灵活性提升研究综述

陈郑平¹, 李文忠¹, 陈飞雄², 黄明煌¹, 王芳东¹, 张端鸿¹

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003;

2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:随着新型电力系统建设的持续推进,不确定性影响日益增强,因此亟须提升电力系统的灵活性,以快速响应源荷功率波动,保证系统的安全稳定运行。为此,文中以分布式资源为切入点,对计及分布式资源的新电力系统灵活性提升方法进行综述。首先,从新型电力系统固有特征出发,分析提升新型电力系统灵活性所面临的挑战与技术瓶颈;接着,沿着历史-当前-未来的时间脉络,分别从灵活性量化评估、灵活性优化调度、灵活性配置规划3个角度综述新型电力系统的灵活性提升路径;最后,针对上述角度,归纳总结新型电力系统灵活性提升所面临的关键难题。

关键词:新型电力系统;灵活性提升;分布式资源;灵活性量化评估;灵活性优化调度;灵活性配置规划

中图分类号:TM933

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)02-0145-15

0 引言

灵活性被广泛用于描述系统对净负荷变化的应变和响应能力,是评价电力系统运行状况的重要指标之一^[1]。传统电力系统以火电为主,通过增加可控电源装机容量保障系统的调节能力,系统灵活性相对充足。而随着新型电力系统建设的持续推进,难以调节的光伏和风电机组不断增加,火电机组装机比例呈现逐步下降趋势。能源结构的变迁不仅降低了系统的灵活性,还加速了灵活性资源的消耗,系统灵活性不足的风险显著增加。此外,大规模新能源多分布于远离负荷中心的地区,供需错配导致新能源发电的就地消纳困难,系统平衡和安全性问题更加突出。因此,仅依赖源侧的火电机组爬坡调节能力,难以满足新型电力系统的灵活性需求。

目前关于新型电力系统灵活性提升手段的研究已有许多,如电力辅助服务市场^[2]、机组灵活性改造^[3]、多能系统互补^[4]等。但随着分布式电源、多元负荷和储能的广泛应用,海量分布式资源日益成为新型电力系统灵活性提升的重要支撑。这些资源具备就地调节、智能互动、即插即用^[5]等优势,具有不可忽视的潜在灵活性价值,能够推动传统“源随荷动”能量平衡模式向新型电力系统“源荷互动”的协同模式转变^[6]。目前,如何有效利用分布式资源参与灵活性供给仍面临诸多制约:一方面,分布式资源分布广泛、种类繁多,难以实现统一而有效的控制;另一方面,新型电力系统的灵活性需求受多重不确定因素的影响,在需求变化时分布式

资源的适应性尚显不足,这些因素限制了其在系统灵活性调度、规划中的参与程度。

目前,关于新型灵活资源应用的文献综述多局限于特定类型的灵活资源或其应用的特定环节。文献[7-8]针对规模化灵活资源集群,分别从虚拟电厂和区域综合能源系统的角度,概述了在整合灵活资源过程中的科学问题、技术路线及理论框架。文献[9-10]分别从技术和市场2个维度出发,分析了可调节负荷参与电网调控的平台架构及其在电力辅助服务市场中面临的挑战和关键技术。以上综述文献大多关注单一类型资源的灵活性贡献,尚未从宏观视角综述涵盖多种类型的分布式资源集群,也未能进一步系统评述分布式资源助力新型电力系统灵活性提升时所采用的方法。文中旨在填补上述空白,从分布式资源参与新型电力系统灵活性供给的角度,综述了近年来国内外在分布式资源评估、调度和规划等方面的研究进展,并对比分析了不同技术方法在各自适用场景中的优势与局限性。

首先,从宏观视角阐述利用分布式资源提升新型电力系统灵活性所遇到的挑战;然后,沿着“基于历史数据的灵活性量化评估-立足当前状态的灵活性优化调度-面向未来的灵活性配置规划”的时间脉络,分析归纳对应的灵活性提升方法及研究方向;最后,总结全文,并结合前述方法对分布式资源未来的利用趋势提出建议和设想。

1 新型电力系统特征、相关政策与灵活性提升挑战

1.1 新型电力系统特征

新型电力系统是以新能源为主体,电力电子技

收稿日期:2024-07-02;修回日期:2024-08-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107080);福建省自然科学基金资助项目(2021J05135)

术为支撑,安全高效、清洁低碳、柔性灵活、智慧融合为总体框架的电力系统^[11]。随着新能源开发利用的深入推进,电力系统的供给结构、系统形态与运行特性发生深刻转变,具体对比分析如表1所示。

表1 传统电力系统和新型电力系统特征对比
Table 1 Comparison of characteristics between traditional power system and new power system

特征类型	传统电力系统	新型电力系统
供给结构	以可控连续出力的煤电装机为主导	以强不确定性、弱可控性的可再生能源装机为主导
负荷特性	刚性、纯消费型	柔性、生产与消费兼具型
系统形态	“发-输-变-配-用”单向逐级输电	大电网主导,多种分布式系统兼容互补
运行特性	源随荷动	源荷互动

由于我国能源供给与消耗的逆向分布特征,富裕的风电、水电等资源被输送至负荷中心^[12],且该局面将持续加强。然而,在新型电力系统的建设背景下,传统依靠“大电网”输送资源的发展模式无法全面支撑新能源的发展与消纳,进而对未来电力供应的安全稳定构成隐患。综合考虑供电范围、用户特点、负荷特性等情况,使得电网结构逐渐演变为以集中式大电网为主导、多种分布式系统兼容互补的局面^[13]。其中,大电网主要承担电能输送、电能互济与资源优化配置的职能。而随着分布式可再生能源、电动汽车等各种灵活性资源大规模并网,分布式系统具有并网运行与孤岛运行2种模式,能够有效支撑新型电力系统的能源利用与多元化负荷的发展需求,并实现与大电网的能量交换,从而减少对外部的依赖,提升系统供电的灵活性与可靠性。由此,电力系统将逐渐从传统的单向供电的过程转变为“源-网-荷-储”智能互动循环过程,调度模式也由传统的“源随荷动”逐步转向“源荷互动”,从而实现源荷间协调优化,平衡系统供需关系。

1.2 分布式资源相关政策

新型电力系统的快速发展推动系统灵活性需求逐步攀升。为此,我国提出并完善多项分布式资源相关政策与市场机制,逐步挖掘并发挥其调节潜力,以保障系统供需平衡和稳定运行。

2018年2月,国家发改委、国家能源局正式发布《关于提升电力系统调节能力的指导意见》,旨在解决我国电力系统在适应新形势要求时灵活性不足的问题,从负荷侧、电源侧、电网侧等方面提出措施,以提升电力系统的调节能力与运行效率^[14]。其中提到,应通过开展电力需求响应及用户互动工程示范、鼓励高耗能企业改善生产流程等措施,发

展各类灵活性用电负荷。另指出,要提高电动汽车充电基础设施的智能化水平,促进电动汽车与智能电网的技术融合,实现信息双向互动,以加快推进电力用户侧灵活性提升。

为深入贯彻落实《2030年前碳达峰行动方案》,提出了一系列政策机制以进一步促进分布式资源的发展。2022年1月,国家发改委、国家能源局共同颁布《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》,提出应完善电力需求响应机制,鼓励各类灵活性资源主体参与电力市场交易和系统运行调节^[15]。随后,《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》中提出,应全面提升新型电力系统调节能力和灵活性,支持和指导电网企业积极接入和消纳新能源^[16]。2022年10月,《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》中指出,要持续推动电力需求侧资源开发、应用等配套标准的研制,推动电动汽车、换电站等可控充电负荷纳入电网优化控制,有效拓展电力系统调节资源^[17]。2024年1月,国家发改委、国家能源局聚焦我国电力系统调节能力仍无法完全适应新能源快速发展的关键问题,在《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》中指出,要深入挖掘可调节负荷、分布式电源等资源潜力,支持负荷聚合商、虚拟电厂等主体聚合形成规模化调节能力,推动实施分钟级、小时级需求响应,应对短时电力供需紧张和新能源消纳难题^[18]。

1.3 灵活性提升挑战

面对扰动和不确定性事件,系统灵活性能够尽可能消除或减小来自不确定性因素的负面影响,从而有效保障系统的供电可靠性与安全性。由于电力系统多元兼容互动的运行特征愈发凸显,系统面临的灵活性资源调用挑战与多重不确定性挑战日益复杂。

(1) 灵活性资源调用挑战。由于分布式发电、储能和柔性负荷等具备调节潜力的分布式资源大量并网,用户用能灵活性极大提升,系统双向互动能力进一步加强,源荷界限逐渐模糊^[19]。同时,分布式资源具有容量小、种类多、参数各异、分布广泛等特点,使得系统时空特性更加复杂。不同的技术特性与要求会加剧调用难度,且系统的稳定性与可观可控性会明显降低。为有效改善资源多元化与系统特征复杂化带来的灵活性资源调用问题,须在系统灵活性资源的量化评估、优化调控与规划配置技术方面实现创新突破,以满足系统灵活性资源调用需求。

(2) 多重不确定性挑战。随着可再生能源大规模并网, 源荷两侧的随机性与不可控性进一步加剧, 使得能源供需匹配更加困难, 系统调度复杂性大幅增加。此外, 系统灵活性需求的不确定性日益凸显^[20], 这对系统灵活性调节能力的准确性和响应效率要求更高, 系统调峰调频负担加重, 供电安全与稳定运行机制趋于复杂。针对以上问题, 亟须充分考虑不确定性因素的影响, 寻找有效技术方案以提升系统灵活性调节能力。

2 新型电力系统分布式资源灵活性量化评估

新型电力系统范式下, 风电等新能源大规模并网, 其出力的随机性和波动性使得电力系统的灵活性需求大幅提升, 源侧火电机组维持系统功率平衡的难度日益增加, 因此亟须挖掘电力系统中海量分布式资源的灵活调节能力以提升电力系统的灵活性。分布式资源广泛分布在新型电力系统中, 具有种类繁多、数量庞大和随机性强的突出特点。不同类型分布式资源的响应特性和调节能力差异明显, 有效辨识灵活性分布式资源并通过聚合形式充分发挥分布式资源集群的调节潜力是提升新型电力系统灵活性的重要基础。

2.1 海量灵活性分布式资源辨识及聚合方法

目前, 灵活性分布式资源个体辨识方法主要有3种: 机理建模法、数据驱动法和机理-数据混合驱动法, 各方法的总结如表2所示。

表2 灵活性分布式资源个体辨识方法
Table 2 Flexible distributed resource individual identification methods

辨识方法	原理	优点	缺点	文献
机理建模法	建立被评估对象的物理模型	评估可靠性较高	建模复杂度高、模型关键参数难以获取	[21]
数据驱动法	通过机器学习算法建立调节潜力与强相关影响因素的映射关系	建模复杂度高、评估效率较高	模型训练容易过拟合/欠拟合、模型训练所需数据量大	[22]
机理-数据混合驱动法	物理建模和机器学习相结合	兼具机理建模法和数据驱动法的优点	步骤繁琐、参数调优困难	[23]

机理建模法从被评估对象的物理特性和响应特性角度出发, 建立可调灵活性评估模型。文献[21]针对电解铝等3类典型工业负荷的功率控制特性进行建模, 分析得到典型可调负荷的旋转备用容量。机理建模法充分考虑评估对象的物理运行特性, 所得评估结果可靠性较高, 但该方法依赖模型参数的准确获取, 建模复杂度高, 在评估对象

较多时应用受限。

数据驱动法不关注被评估对象的内部运行机理, 而是深度挖掘与灵活调节潜力强相关的影响因素, 并利用机器学习算法建立其映射关系。文献[22]将室外温度视为强相关因素, 通过回归模型拟合其与灵活调节潜力的线性关系。数据驱动法的建模复杂度较低, 评估效率较高, 但评估结果易受数据质量影响, 存在过拟合或欠拟合的风险。

为弥补机理建模法和数据驱动法的不足, 机理-数据混合驱动法结合了二者优势, 以评估灵活调节潜力。文献[23]对商业楼宇的供暖、通风及空调负荷进行物理建模, 并通过决策树模型分析商业楼宇的灵活潜力。但机理-数据混合驱动法的步骤过于繁琐, 参数调优困难。

上述研究主要从分布式资源个体角度开展灵活调节潜力评估与辨识, 但当系统发生灵活性缺额时, 直接调度灵活性分布式资源个体效率较低, 对数量庞大、类型众多的分布式资源集群进行聚合调控才能充分发挥其灵活调节作用, 因此研究海量分布式资源聚合方法具有重要意义。

在聚合海量分布式资源的过程中, 需要考虑以下难题: 一是分布式资源规模较小、位置分散、数量庞大, 且运行特性差异明显, 因此亟须对特性不同的分布式资源进行有效建模及高效聚合; 二是分布式资源隶属不同决策主体, 行为模式易受社会环境影响而呈现较强不确定性, 如何在聚合过程中考虑分布式资源的不确定性影响有待进一步研究。目前, 分布式资源聚合方法主要有: 同类聚合法、几何聚合法、模拟聚合法和优化聚合法, 各方法的总结如表3所示。

表3 分布式资源聚合方法
Table 3 Distributed resource aggregation methods

聚合方法	原理	优点	缺点	文献
同类聚合法	对同类型分布式资源的灵活调节范围直接进行叠加	计算简单、易于推广	适用场景受限、未考虑资源主体的不确定性	[24]
几何聚合法	通过闵可夫斯基等几何计算对灵活性资源进行聚合	适应性较强、可用于异构资源聚合	大量聚合计算时面临维数灾难问题、未考虑资源主体的不确定性	[25]
模拟聚合法	通过模拟方法生成大量样本, 进行聚合评估	考虑资源主体的不确定性	计算量大、计算成本高	[26]
优化聚合法	以调节潜力为优化目标进行聚合	适用范围广	求解结果可能比较保守	[27]

同类聚合法对同类型分布式资源的灵活调节范围直接进行叠加, 文献[24]建立单一温控负荷的

灵活性量化模型,并通过直接加总得到温控负荷集群的灵活调节能力。同类聚合法计算简单、容易推广,但应用场景受限,仅适用于同类型分布式资源灵活潜力的聚合评估。

几何聚合法则能够实现异构分布式资源的聚合,具有较强的适应性,其通过几何计算对灵活性资源进行聚合,常见的做法是用闵可夫斯基等几何计算对分布式资源的灵活性区域进行聚合处理,从而用于灵活潜力的评估。文献[25]建立个体空调的灵活性评估模型,并通过闵可夫斯基求和算法评估空调集群的灵活调节潜力。但是该方法在聚合大量异构资源时会面临维数灾问题。此外,同类聚合法和几何聚合法并未考虑分布式资源的不确定性,因此学者们提出了模拟聚合法和优化聚合法。

模拟聚合法^[26]基于设备或负荷的运行特性,通过蒙特卡洛等方法模拟生成满足运行范围约束的大量样本数据,进而评估设备或负荷聚合时的灵活调节范围。该方法能有效应对灵活资源运行时的不确定性,但计算量大、计算成本高。

优化聚合法^[27]以聚合资源的灵活调节潜力为优化目标,将灵活性区域上界、下界的求解问题分别转化为最大化、最小化的优化问题,求解得到聚合资源的灵活性区域。优化聚合法适用范围广,可将不确定性因素转化为约束条件并包含在优化问题中进行求解,但该方法所获得的灵活性区域可能比较保守,降低了聚合灵活资源的利用效率。

2.2 聚合资源灵活调节潜力量化评估方法

聚合资源灵活调节潜力的量化评估为市场主体理解分布式资源的潜在灵活调节能力提供了精准的数据支撑,有助于政策制定者和电力市场运营者制定相关的激励机制和政策规则,促进灵活性分布式资源的高效利用。

当前,已针对聚合资源的灵活性评估开展诸多研究。根据聚合范围的差异,聚合资源灵活性评估可分为同类聚合资源灵活性评估与异构聚合资源灵活性评估。

同类聚合资源灵活性评估通常先对灵活资源个体的运行特性进行建模并量化其灵活调节潜力,再叠加得到同类聚合资源的灵活性,潜力评估过程得到简化。文献[28]通过参数辨识法获取温控负荷运行的关键参数,在单一温控负荷的灵活性量化模型基础上推导得到温控负荷集群的灵活调节潜力。但实际应用中受隐私保护等因素影响,典型灵活资源个体的模型参数获取困难,难以对其运行特性精准建模。此外,该评估方法仅适用于同类分布

式资源,应用范围具有一定局限性。

为克服同类聚合资源灵活性评估方法适用范围受限的不足,异构聚合资源灵活性评估考虑不同类型资源在响应速度、响应容量等特性上的差异,通过构建具有耦合特性的优化模型求解异构聚合资源的灵活调节潜力。文献[29]建立异构灵活资源的单体模型,通过消元法推导异构聚合资源的灵活性可行域,进而评估其灵活调节潜力。但目前不同时间尺度下异构聚合资源的耦合特性研究有待深入。

上述方法重点从聚合对象类别的角度开展聚合资源灵活性评估,未充分考虑分布式资源的不确定性,忽略了各类不确定因素对灵活资源集群调节潜力量化评估的影响,这可能导致评估结果准确性不高。为此,已有学者研究考虑不确定因素的聚合资源灵活调节潜力量化评估方法,主要分为鲁棒优化法、场景生成法、机会约束法,各方法的总结如表4所示。

表4 考虑不确定性的聚合资源
灵活调节潜力量化评估方法

Table 4 Quantitative evaluation methods for flexible regulation potential of aggregated resources considering uncertainty

评估方法	原理	优点	缺点	文献
鲁棒优化法	考虑最恶劣情形并寻找最优解	确保在不确定性条件下决策的稳健性和可靠性	潜力评估结果可能比较保守	[30]
场景生成法	生成大量场景来表征不确定性	降低优化结果的保守性	需要提前获取变量的概率分布、计算量较大	[31]
机会约束法	通过机会约束处理不确定性	提升计算效率	导致非凸问题、增加求解算法的复杂性	[32]

鲁棒优化法在不确定参数取值范围内考虑最恶劣情形并寻找最优解。文献[30]考虑不确定因素对虚拟电厂的影响,提出基于两阶段鲁棒优化的虚拟电厂灵活性评估方法。该方法能够确保在各种不确定性条件下决策的稳健性和可靠性,但得到的潜力评估结果可能比较保守。

场景生成法通过生成大量场景来表征不确定性,降低了优化结果的保守性。文献[31]基于新能源和负荷的出力概率分布生成多个典型场景,优化求解得到所有场景均满足约束条件的灵活性区域顶点。但该方法需要提前获取变量的概率分布,且计算量较大。

机会约束法通过机会约束处理不确定性,基于较少场景进行概率约束建模。文献[32]采用机会

约束应对新能源出力的不确定性,并通过不同置信水平的分位数将其转化为确定性约束,进而优化求解得到灵活性区域。该方法的计算效率较高,但其概率约束可能导致非凸问题,增加求解算法的复杂性。

上述考虑不确定性的潜力评估方法充分考虑分布式资源的随机性,评估过程更贴合实际,有利于提升评估结果的准确性,但在不确定因素耦合的场景下,如何对多重不确定性进行精准建模仍面临巨大挑战。鉴于聚合资源响应边界受分布式资源个体的本质属性、决策过程的随机性以及其它不确定性因素影响,采用概率分位数回归方法描述其在不同置信水平下的灵活性区域。而如何确定聚合灵活资源调控边界的置信区间,以提高对灵活性可行域描述的准确性和系统运行的经济性,仍需要进一步研究。

3 新型电力系统分布式资源优化调度

面对新型电力系统中风电等新能源并网引入的随机性和波动性,迫切需要最大化利用广泛分布且种类繁多的分布式资源,通过高效精确的调度策略优化分布式资源的动态输出,以快速响应功率的供需变化。因此,分布式资源优化调度是提升新型电力系统灵活性的重要手段。

3.1 分布式资源统一优化调度方法

根据运营制度的不同,分布式资源的优化调度可以分为统一调度和分散协同调度2种模式。在统一调度模式下,各调度主体对所辖范围内的分布式资源进行统一建模和优化求解,并兼顾不同资源间的整体效益。然而,不同调度主体对于分布式资源的调度目标与考虑范畴不尽相同。因此,文中基于前文的灵活性量化评估模型,综述分布式资源的统一优化调度方法,主体结构如图1所示。

各调度主体根据自身的调节需求,以调峰成本最低或新能源消纳最大为主要目标函数,对所辖范围内的分布式资源进行统一优化调度,典型文献总结如表5所示。

根据系统内不确定因素的考虑方式,统一优化调度方法可以分为确定性优化和不确定性优化。确定性模型假设系统净负荷已知,基于不同优化目标建立考虑分布式资源约束的优化模型。文献[33]对配电网源、网、荷、储多种分布式资源进行建模,并采用复合型线性化策略,将多目标的非凸非线性优化问题转化为混合整数线性优化问题,实现问题的高效求解;文献[34]提出考虑配电网对灵

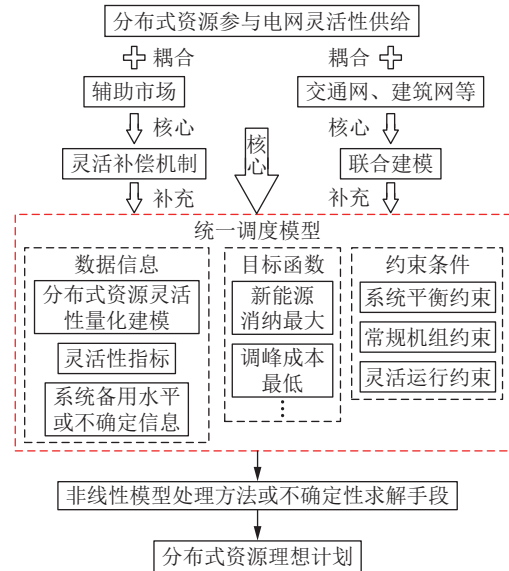


图1 分布式资源统一优化调度框架

Fig.1 The centralized optimization scheduling framework of distributed resources

表5 分布式资源统一调度典型文献总结

Table 5 Summary of typical literature on unified scheduling of distributed resources

文献	对象	输入量建模	目标函数	创新点
[33]	配电网	日前预测曲线	新能源消纳最大、系统运行成本最小	多种分布式资源建模并高效求解
[34]	配电网	日前预测曲线	系统运行成本最小	灵活资源精细化传输模型并高效求解
[35]	输电网	日前预测曲线	系统灵活缺额最小	静态和动态指标结合
[36]	输电网	超短期预测数据	风电消纳最大、系统运行成本最小	模型预测控制算法结合灵活性裕度指标
[37]	输电网	预测误差概率分布	系统运行成本最小	以机会约束形式满足资源-线路双重裕度
[38]	聚合商	日前预测曲线、置信水平	聚合商收益最大	滚动控制算法结合模糊机会约束
[39]	输配协同	日前预测区间	系统运行成本最小	输配网协同荷侧灵活资源并结合区间优化方法

活性资源传输阻塞问题的日前调度方法,通过定义虚拟潮流量可调用功率传输裕度;文献[35]采用静态指标描述各类灵活资源的固有灵活性,采用动态指标评估系统灵活缺额,并以最小化灵活缺额为目标,构建了机组组合动态优化模型。在确定性模型的基础上,文献[36]考虑风电不确定性,提出了一种基于灵活性裕度指标的优化调度方法,利用日内超短期预测数据,采用模型预测控制算法动态调节各灵活性资源的出力状态,从而提高风电的消纳能力,但该方法存在计算量大、对预测信息精度要求高的缺点。为保证系统在一定置信水平下满足运行要求,有学者引入机会约束。文献[37]同时

考虑新能源及负荷不确定性,建立考虑资源-线路双重裕度的优化调度模型,并将评估指标作为机会约束条件,以确保系统在特定的置信水平下满足双重裕度;文献[38]对大容量灵活资源调节能力进行滚动在线评估,而对于小容量灵活资源,则结合机会约束和模糊理论处理不确定性,从而为处理分布式资源的不确定性提供有效的优化方法。除此之外,文献[39]针对智能建筑和电动汽车等灵活负荷的不确定性,基于区间优化的两阶段法构建集中式的输配网协同调度框架,从而提升所研究系统的经济性和安全性。

然而,上述方法均不考虑分布式资源的获利情况,无法调动个体利益主体参与系统灵活性供给的积极性,故有学者聚焦分布式资源的市场机制。文献[40]分析了分布式储能聚合商的整体结构以及电网侧的调控模式,从业务范围和交易机制两方面设计了分布式储能聚合商与上层电网公司的市场运营交互模式;文献[41]考虑配电网运营商对需求侧灵活性资源的聚合效应,以购买电力和灵活性资源的总成本最小为目标,建立了考虑电动汽车充放电模式的输配协同能量-灵活性市场出清模型。然而,目前国内的电力市场体系尚未完善,大部分辅助服务市场仅限于火电和可调节水电资源^[42],未能有效激发分布式资源的灵活调节潜力,导致其市场框架和交易模式的构建主要停留在理论层面,缺乏实际应用的经验^[10]。而灵活性补偿是当前分布式资源市场化探索的有效过渡手段。文献[43]建立了灵活性改造火电、可再生能源、储能、需求响应等灵活性资源的成本和价格补偿模型,从调峰补偿标准的角度研究多元灵活性资源的补偿定价方法。不同分布式资源提供单位调节电量所获得的收益相同,但其提供灵活性调节电量的成本却不尽相同,若忽视这一差异将导致无法充分利用成本低、效率高的分布式资源。由此,文献[44]将分布式储能、需求响应负荷等不同主体的灵活性调节电量依据成本由小到大的顺序出清,有效提高了不同资源参与调节的积极性;文献[45]构建了一种基于虚拟报价和边际定价的灵活性补偿机制,能够实现低报价分布式资源优先发电,并补偿高报价资源的机会成本,从而维持系统整体效率最优。未来,随着电力市场化改革的持续推进,如何激励多样化的灵活资源参与市场交易、如何建立分布式资源及相关服务的价格机制是后续研究的重点。

新型电力系统下,交通网和建筑网内均存在大量分布式资源,在满足自身需求的前提下,可为电

网提供灵活性服务。下文将重点介绍交通网和建筑网与电力系统耦合下,分布式资源的调度策略及其研究进展。

电动汽车和移动储能等可移动分布式资源具有空间上的灵活性^[46]。调度主体可以根据可移动分布式资源在交通网中的运动情况,对交通网与电力系统进行联合调度,以优化其调节功率和路径。文献[47]基于电动汽车运行约束,将其动态划分为2类:一类是按用户需求随机充电的常规车组,另一类是根据电网调度指令灵活充放电的可调控车组。在此基础上,文献[48]将电动汽车进一步分为无序充电、有序充电和移动储能3种类型,并根据分布式电源接入情况,设定系统不同运行模式,以提高系统运行效率。文献[49]基于电动车集群的时变灵活性区域,提出了动态交通流最优分配下电动汽车集群灵活性调控的模型,并与最短路径引导策略进行比较,说明了其时空灵活性有助于电力-交通耦合网的协调运行;文献[50]基于马尔科夫链建立电动汽车的路径模型,利用信息间隙决策理论处理充放电的不确定性,同时引入低碳排目标函数,实现了微电网的低碳运行和灵活调度。对于移动储能,文献[51]构建其线性化的运行调度模型,优化其能量充放和路径,以最大限度地减少电网和交通网的总能量损失;文献[52]结合两阶段鲁棒与数据驱动方法,前阶段确定重要线路开关与储能电站位置,后阶段优化开关状态与移动储能,实现了配电网的动态重构策略与移动储能的经济调度。随着可移动分布式资源的普及与相关设施的完善,关于车-网耦合的灵活调度已成为当前研究的热点^[46]。

此外,建筑网是容纳居民分布式资源的主要载体,对其进行统一管理,对于激发居民分布式资源调节潜力和改造智能化、低碳化城市建筑具有重要意义^[10]。文献[53]考虑智能楼宇内部设备运行及外部电网能量平衡约束,建立了可响应外部电网调节信号的楼宇综合运行模型;文献[54]在满足相关舒适度标准的前提下,对建筑网中暖通空调的温度基点进行动态调节,有效利用楼宇的蓄热特性,提高了电网的灵活性。文献[55]总结了在智能楼宇调度管理中运用深度强化学习算法所面临的挑战。目前,建筑网的灵活性调度研究尚处于探索阶段,仍面临诸多挑战,如系统参数难以确定、集成建模难度大、区域协调困难等。

分布式资源的调度受到人文社会、交通物流、环境气候等多方面因素的制约,因此,需要统一调

度的决策主体,考虑复杂因素的交织影响,制定适应不同场景和需求的资源调度策略,以提高分布式资源的全局利用率和稳定性。而统一调度仅适用于多主体统一运营的背景,若不同主体分属于不同运营机构,则需要考虑不同主体间的私密性、竞争性等因素,由此引出分散协同优化调度方法的研究需求。

3.2 分布式资源分散协同优化调度方法

分散式控制方法强调各参与主体的自主决策,仅须交互相邻主体间的少量边界信息,便可实现最优协同调度目标,从而达到分散自治、集中控制的效果。统一调度模式和分散协同调度模式的性能对比如表6所示,相较于统一调度模式,分散协同调度模式由于信息安全性高、可拓展性高、模型复杂度低、即插即用等优点^[56],已在分布式电源、电动汽车、分布式储能、虚拟电厂等分布式资源优化调度中得到广泛应用。

表6 不同调度模式性能对比
Table 6 Performance comparison of different scheduling modes

性能指标	统一调度模式	分散协同调度模式
安全性	低	高
拓展性	低	高
模型复杂度	高	低
灵活性	低	高
可维护性	高	低

目前,对分布式电源、分布式储能和电动汽车进行分散式控制主要是为了获取各主体的最优出力策略。在分布式电源分散控制方面,文献[57]利用交替方向乘子法提出一种分布式优化调度方案,并验证了所提方案具有即插即用的优点;文献[58]针对分布式电源大规模接入造成的主网负荷波动和通信复杂度增加问题,提出考虑削峰填谷的分布式电源集群协同控制方法,在保护各分布式电源集群隐私的前提下,有效平抑净负荷峰谷差,缓解主网调峰压力。为进一步提高配电网灵活性供给能力,文献[59]根据灵活性供需鲁棒平衡指标对分布式电源进行集群划分,并采用分布式算法实现多个分布式电源群间的日内分散协同调度,降低源荷预测精度不足带来的影响。然而,高比例分布式电源大规模并网会引起电压越限、反向潮流、弃风弃光等问题。为解决上述问题,系统中通常会配备一定容量的分布式储能,为电网提供调峰、调频、备用等服务。但由于储能单元数量众多且分布广泛,采用集中式调度方法难以获取同步和全局信

息,导致系统灵活性降低。而分散式调度方法仅须储能单元间交互少量边界信息,即可实现储能充放电功率实时分配,从而显著提升系统的灵活性和鲁棒性。在分布式储能分散式控制方面,文献[60]通过动态改变参考频率的方式,实现了分布式储能单元的能量平衡,并验证了分散式控制即插即用的性能;文献[61]基于改进一致性算法设计了一种储能系统分散式控制策略,能够动态调整每个储能单元的输出功率;文献[62]提出了一种共享储能参与主动配电网辅助服务市场的互动博弈优化模型,在保护共享储能和主动配电网隐私的情形下,可实现主动配电网与共享储能用户的互利共赢。与分布式储能属性相似,电动汽车同样具有能量双向流动属性,但其能量流动与用户的出行行为密切相关,具有隐私保护需求,因此有必要对电动汽车进行分散式控制。在电动汽车充放电分散式控制方面,文献[63]提出了电动汽车分散式充电控制策略,有效解决了集中式控制策略存在的用户信息安全性低、通信要求高、计算成本高的问题;文献[64]提出了一种基于分散式控制的电动汽车有序充电控制系统模型,解决了通信系统故障时的有序充电控制问题,并证明了分散式控制方法具有较强的抗干扰能力;文献[65]提出了电动汽车有序充放电分散式调度方法,表明有序充放电在平抑负荷波动、提升充电站收益等方面优于无序充放电,且分散式调度相较于集中式调度计算效率更高。分散式控制在分布式资源中的应用方法总结如表7所示。

表7 分散式控制在分布式资源中的应用
Table 7 Application of distributed control in distributed resources

控制对象	文献	方法特点
分布式电源	[57]	抗干扰,即插即用
	[58]	保护各集群隐私,削峰填谷
	[59]	灵活性供需平衡
分布式储能	[60]	提供快速响应和准确的电流共享性能
	[61]	减少通信量和计算量,避免储能过充过放
	[62]	最大化运行效益
电动汽车	[63]	滚动更新调度结果
	[64]	有序充电控制,抗干扰
	[65]	有序充电控制,削峰填谷

以上研究多从某一类分布式资源出发,研究其最优出力控制策略,实现分布式资源分散协同优化调度。但不同分布式资源可能分属于不同的所有者,不受电网直接控制,且随着大量分布式资源陆续并网接入,配电网的运行管理难度逐年增加。若

能对分布式资源进行聚合调控,则可以从根本上提高电力系统的灵活调节能力。虚拟电厂是一种利用信息技术将分散的可控分布式电源和用户侧资源进行聚合的新型管理方式,具有可突破地理位置限制、增强电网平衡能力、提升分布式资源利用率、降低分布式资源管理难度等优势。在虚拟电厂分散协同控制方面,文献[66]将可信性理论与双层规划相结合,设计了一种双层模糊机会约束规划方法,可以有效调度虚拟电厂中的可控源荷;文献[67-68]基于信息分离、决策协同的思想,构建了一种分散架构下多虚拟电厂的分散协同优化调度模型,实现了系统状态非可观下的多智能体分散式优化决策;文献[69-70]提出了基于纳什谈判理论的多虚拟电厂分散式调度模型,并通过分布式算法进行求解,在保证各电厂数据私密性的基础上,实现了利益公平分配和可再生能源就近消纳。

然而,以上关于分布式资源分散协同优化调度方法的研究均基于理想通信条件,忽视了多主体间信息传输出现的丢包、延迟、噪声等通信故障的影响。在信息传输的安全性方面,虽然分布式算法相较于集中式算法能有效保护大部分的系统信息,但不同主体间边界信息的传输仍存在隐私泄露的风险。若能对边界信息进行处理,便可实现全环节信息的隐私保护,因此如何结合信息加密理论开发一种加密型分布式算法,还需要进一步研究。

4 新型电力系统灵活性规划配置

面对新型电力系统的灵活性需求,有效的分布式资源规划配置是提升系统灵活性的重要途径。通过对分布式资源的精细规划和配置,确保各种分布式资源根据其响应特性和调节能力实现最优利用,从而有效应对系统功率供需变化,增强电力系统应对波动和不确定性的能力,确保电力供应的稳定性和经济性。

4.1 分布式资源统一规划方法

在电力系统规划配置中考虑分布式资源的影响,能够降低系统建设成本,增强系统的新能源消纳能力。在配电网优化配置层面,文献[71-73]分别提出了计及分布式电源、储能、需求响应的配电网系统最优配置方法。但目前输电网与配电网均接入大量新能源发电,若考虑输配网络中分布式资源的协同作用,可以进一步提升系统的新能源消纳能力与经济效益。因此,需要从输配一体化全局视角研究计及分布式资源的电力系统协同规划方法,以充分发挥分布式资源的作用,提升整个系统的灵活

性与经济性。对此,文献[74]提出了集中式与分布式储能的协同规划方法,实现了集中式资源与分布式资源间的互补,进一步提升了系统灵活性;文献[75]考虑电网传输能力对灵活性供需传输的影响以及分布式资源的传输过程,有效提升了规划方案的经济性。

为更深入地挖掘分布式资源在规划配置中的作用,有学者提出灵活性指标,对分布式资源的灵活性进行量化,进而评估所得配置方案的灵活性。文献[76]提出了灵活性包络的概念,实现了分布式电源的灵活性规划;文献[77]通过评估分布式发电系统灵活性的准则,获得了电源最优规划方案;文献[78]考虑各类分布式资源和输电网传输容量,基于Bender分解方法构建了灵活性资源优化配置模型;文献[79]量化了分布式电源和需求响应在系统调度中的贡献,提出了源网荷协调规划模型,提升了系统的灵活性和可再生能源的消纳能力;文献[80]量化了需求侧的灵活性资源,并提出了储能和需求侧响应协同规划模型。

综上,现有研究在分布式资源规划配置方面已取得一定进展,但仍存在以下难题:

(1) 现有研究大多仅考虑了电力网络的分布式资源,但随着电动汽车、分布式群调群控等技术的发展,在规划配置过程中需要考虑交通网、信息网与电网的耦合作用关系。

(2) 现有灵活性评估方法虽然能够量化资源的灵活性裕度,但未能充分表征灵活资源的效能及其产生的社会效益,因此未能有效提升系统配置的能量利用效率和其应对新能源不确定性的能力。

4.2 面向灵活性提升的不确定性规划配置方法

新型电力系统中的源荷不确定性给系统规划配置带来挑战。若未充分考虑系统不确定因素,将导致系统容量配置过于理想化、设备利用率低、系统无法灵活经济运行等问题。目前处理电力系统不确定性规划配置问题的主要方法有:概率法、模糊法、鲁棒优化法和区间优化法等,其特性与具体应用场景如表8所示。

表8 不确定性规划配置方法

Table 8 Uncertainty programming configuration methods

规划配置方法	建模形式	历史数据需求量	保守性	应用场景
概率法	概率密度函数	高	低	历史数据可大量获取
模糊法	隶属函数	中	较低	部分统计特性未知
鲁棒优化法	不确定集	低	高	缺乏统计信息
区间优化法	区间数	低	中	历史数据难以获取

概率法通过蒙特卡洛等抽样方法生成典型场景,并针对典型场景进行规划设计,以此考虑不确定性因素对系统的影响。文献[81]利用概率指标确定未来风力、光伏发电和负荷需求的典型场景,并给出了最佳决策方案;在此基础上,文献[82]进一步考虑了风力和光伏发电的时序性、季节性以及负荷需求的差异性,使所得最优配置方案更符合实际情况,经济性更优。然而,从本质上来讲,概率法为参数估计,需要基于海量历史数据来获取概率密度函数,且该函数受主观先验影响较大,拟合出的模型不一定能反映真实情况。

模糊法利用隶属函数描述不确定变量,该函数可通过拟合历史数据得到。模糊法主要应用于无法获得确切的不确定性变量概率密度函数的情况,例如分析用电行为的不确定性^[83]。与概率法相比,模糊法只需要获取不确定变量的隶属度关系,但可能会导致问题的求解结果达不到精度要求。

鲁棒优化法采用盒式、多面体、椭球等不确定集合描述不确定性^[84]。鲁棒优化法由于不需要获得不确定变量的隶属函数或概率分布,在缺乏统计信息时具有良好的工程应用价值。但该方法只能得到各不确定性变量取极端值时系统的最优配置方案,优化结果保守性高。

与鲁棒优化法类似,区间优化法同样不需要获得不确定性变量的概率密度函数或隶属函数,仅需某一置信水平下不确定性变量的区间变化范围。由于区间优化法建模简便,且能以适度的保守性获取最优方案,因此备受关注^[85]。

综上,现有不确定性规划配置方法已较丰富全面,但仍存在以下难题:

(1) 概率法与模糊法过于依赖历史数据,鲁棒优化法与区间优化法保守性较高。因此,如何结合多种不确定性优化配置方法,在不依赖海量历史数据的前提下获得保守性较低的优化结果,是亟待解决的问题。

(2) 现有研究虽然已考虑了新能源发电、负荷等不确定因素,但针对电力市场带来的不确定性的研究仍较为缺乏。

5 总结与展望

文中分别从灵活性评估、调度、规划3个层面总结提炼新型电力系统灵活性提升的关键难题与挑战,旨在为克服这些挑战提供思路。

(1) 分布式资源灵活性量化评估。

随着新能源比例不断提升,传统以荷侧为主导

的运行模式已无法满足新型电力系统的灵活调节需求,亟须规模化挖掘潜在的分布式资源以提升电力系统的灵活性。然而,分布式资源类型多样,物理特性和运行特性差异显著,且受资源属性和社会环境共同影响,行为模式存在较强不确定性。现有研究较少深入分析灵活资源行为模式切换对其辨识及可调潜力量化评估的影响,如何在海量异构分布式资源的辨识聚合中准确识别其动态特性和行为模式有待进一步研究。未来研究中,可采用机理-数据混合驱动方法,开展分布式资源个体的行为模式提取技术研究,通过行为预测、意愿博弈等方式识别资源个体的行为模式。

同时,在聚合灵活资源响应能力精准量化方面,海量分布式资源运行特性等隐私信息获取难度大,分布式资源个体行为随机性强、社会行为解析困难,导致聚合灵活资源集群响应能力的可信量化面临巨大挑战。随着人工智能技术的发展,可以通过强化学习等方法辨识资源个体的行为模式切换路径及发生概率,基于特征分析提取影响行为模式切换的关键因素,辨识资源个体在不同场景下的决策偏好,并通过概率区间对资源个体动态特性进行可信表征。

(2) 分布式资源优化调度。

随着新型电力系统建设的持续推进,电网、交通网、建筑网、信息网等复杂系统间的耦合愈加紧密,分布式资源管理作为关键耦合枢纽,正向多系统跨领域智慧融合的模式转变,这也是信息物理社会系统的下层延拓。因此,未来分布式资源优化调度方法应充分考虑其不同子系统间的交互和约束情况,结合不确定性优化技术,实现复杂系统的整体优化和安全运行,从而完整体现分布式资源在提高新型电力系统灵活性方面的作用。

同时,对分布式灵活性资源进行分散协同控制是实现新型电力系统灵活性提升的重要方式之一,但需要依靠先进通信技术实现系统分布式资源的管理与调度。某些分布式资源运营单位为获得超额收益,可能会利用信息的不对等性向相邻单位发布虚假信息,致使优化后的调度方案与系统整体最优方案偏差过大,影响系统运行的效益和可信度。而区块链技术具有去中心化、运行可靠和数据安全等显著特征,能有效保证计算数据的可追溯性和不可篡改性。因此,可将区块链技术应用于多主体分散协调的运行模式,利用区块链技术构建一个去中心化的信息交互平台,使得各个参与者可以通过智能合约进行点对点分散协同优化,保证各区块决策

的公平性。

(3) 分布式资源规划配置。

灵活性规划配置是提升新型电力系统灵活性的重要途径。但现有研究较少关注电力系统以外的分布式资源对系统灵活性的提升作用,因此,未来的分布式资源规划配置方法应关注多网耦合系统的发展。并且,还需要对海量分布式资源的能源品质进行划分,以提升系统配置的能量利用效率。

同时,在规划配置中考虑不确定性因素的影响也是提升系统灵活性的一个重要方式。一方面,需要基于已有不确定性优化配置方法,结合多种方法的优势,提出一种只需少量历史数据且所得方案保守性较低的新方法;另一方面,需要进一步考虑电力市场带来的不确定性影响。

参考文献:

- [1] 肖定垚,王承民,曾平良,等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1569-1576.
XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. A survey on power system flexibility and its evaluations[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1569-1576.
- [2] 刘瑞丰,陈天恩,王睿,等. 构建清洁低碳发展的电力容量和灵活调节服务市场[J]. 中国电力企业管理, 2019(28): 36-40.
LIU Ruifeng, CHEN Tian'en, WANG Rui, et al. Building a clean and low-carbon development power capacity and flexible regulation service market[J]. China Power Enterprise Management, 2019(28): 36-40.
- [3] 潘尔生,田雪沁,徐彤,等. 火电灵活性改造的现状、关键问题与发展前景[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 58-68.
PAN Ersheng, TIAN Xueqin, XU Tong, et al. Status, critical problems and prospects of flexibility retrofit of thermal power in China[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 58-68.
- [4] 邱玥,陆帅,陆海,等. 综合能源系统灵活性: 基本内涵、数学模型与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 16-43.
QIU Yue, LU Shuai, LU Hai, et al. Flexibility of integrated energy system: basic connotation, mathematical model and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 16-43.
- [5] 窦鹏冲. 微网中分布式电源的协调控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
DOU Pengchong. Research on coordinated control method of distributed resources in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [6] 陈心宜,胡秦然,石庆鑫,等. 新型电力系统居民分布式资源管理综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 157-175.
CHEN Xinyi, HU Qinran, SHI Qingxin, et al. Review on residential distributed energy resource management in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 157-175.
- [7] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [8] 司方远,张宁,韩英华,等. 面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力评估与优化: 关键问题与研究架构[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2097-2119.
SI Fangyuan, ZHANG Ning, HAN Yinghua, et al. Fundamental problems and research framework for assessment and optimization of the functional regulation capacity of the regional integrated energy system under the aggregation of diversified and flexible resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2097-2119.
- [9] 宁剑,江长明,张哲,等. 可调节负荷资源参与电网调控的思考与技术实践[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 1-8.
NING Jian, JIANG Changming, ZHANG Zhe, et al. Thinking and technical practice of adjustable load resources participating in dispatching and control of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 1-8.
- [10] 周竞,耿建,唐律,等. 可调节负荷资源参与电力辅助服务市场规则分析与思考[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 120-127.
ZHOU Jing, GENG Jian, TANG Lü, et al. Rule analysis and cogitation for adjustable load resources participating in ancillary service market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 120-127.
- [11] 黎博,陈民铀,钟海旺,等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [12] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [13] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [14] 国家发展改革委,国家能源局. 关于提升电力系统调节能力的指导意见[EB/OL]. (2018-02-28)[2024-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201803/t20180323_962694.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guidance on enhancing the regulation

- capacity of the power system[EB/OL]. (2018-02-28)[2024-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201803/t20180323_962694.html.
- [15] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL]. (2022-01-30)[2024-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Opinions on improving the institutional mechanisms and policy measures for energy green and low-carbon transformation[EB/OL]. (2022-01-30)[2024-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html.
- [16] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案[EB/OL]. (2022-05-14)[2024-05-15]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202205/t20220530_983840.shtml.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Implementation plan for promoting high-quality development of new energy in the new era[EB/OL]. (2022-05-14)[2024-05-15]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202205/t20220530_983840.shtml.
- [17] 国家能源局. 关于印发《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》的通知[EB/OL]. (2022-09-20)[2024-05-15]. https://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm.
National Energy Administration. Notice on issuing the action plan for enhancing standardization of energy carbon peak and carbon neutrality[EB/OL]. (2022-09-20)[2024-05-15]. https://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm.
- [18] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见[EB/OL]. (2024-01-27)[2024-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202402/t20240227_1364257.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guidance on strengthening peak regulation, energy storage, and intelligent dispatching capacity of the power grid[EB/OL]. (2024-01-27)[2024-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202402/t20240227_1364257.html.
- [19] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [20] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [21] 范宇辉, 姜婷玉, 黄奇峰, 等. 基于画像的工业园区需求响应潜力评估[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 41-49.
FAN Yuhui, JIANG Tingyu, HUANG Qifeng, et al. Portrait-based assessment on demand response potential of industrial parks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 41-49.
- [22] WANG K, YIN R X, YAO L Z, et al. A two-layer framework for quantifying demand response flexibility at bulk supply points[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3616-3627.
- [23] ZHANG P, LU X X, LI K P. Achievable energy flexibility forecasting of buildings equipped with integrated energy management system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 122589-122599.
- [24] ABIRI-JAHROMI A, BOUFFARD F. Contingency-type reserve leveraged through aggregated thermostatically-controlled loads: part II: case studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1981-1989.
- [25] 栗子豪, 李铁, 吴文传, 等. 基于 Minkowski Sum 的热泵负荷调度灵活性聚合方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 14-21.
LI Zihao, LI Tie, WU Wenchuan, et al. Minkowski Sum based flexibility aggregating method of load dispatching for heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 14-21.
- [26] HELENO M, SOARES R, SUMAILI J, et al. Estimation of the flexibility range in the transmission-distribution boundary [C]//2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Eindhoven, Netherlands. IEEE, 2015: 1-6.
- [27] CAPITANESCU F. AC OPF-based methodology for exploiting flexibility provision at TSO/DSO interface via OLTC-controlled demand reduction[C]//2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). Dublin, Ireland. IEEE, 2018: 1-6.
- [28] 崔屹峰, 李珍国, 贾清泉, 等. 基于参数辨识与状态估计的温控负荷响应能力动态评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 150-158.
CUI Yifeng, LI Zhenguo, JIA Qingquan, et al. Dynamic evaluation of response potential of thermostatically controlled load based on parameter identification and state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 150-158.
- [29] WEN Y L, HU Z C, YOU S, et al. Aggregated feasible region of heterogeneous demand-side flexible resources: part I: theoretical derivation of the exact model[EB/OL]. (2021-11-09)[2024-05-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.04963>.
- [30] TAN Z F, ZHONG H W, XIA Q, et al. Estimating the robust P-Q capability of a technical virtual power plant under uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4285-4296.
- [31] KALANTAR-NEYESTANAKI M, SOSSAN F, BOZORG M,

- et al. Characterizing the reserve provision capability area of active distribution networks: a linear robust optimization method[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2464-2475.
- [32] WANG S Y, WU W C. Stochastic flexibility evaluation for virtual power plant by aggregating distributed energy resources[EB/OL]. (2020-11-02)[2024-05-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.16170>.
- [33] 姜云鹏, 任洲洋, 李秋燕, 等. 考虑多灵活性资源协调调度的配电网新能源消纳策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(7): 1820-1835.
- JIANG Yunpeng, REN Zhouyang, LI Qiuyan, et al. An accommodation strategy for renewable energy in distribution network considering coordinated dispatching of multi-flexible resources[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(7): 1820-1835.
- [34] 刘帅, 李华强, 武姝凝, 等. 考虑灵活性资源传输精细化建模的配电网优化运行[J/OL]. *电网技术*: 1-15[2023-12-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0398>.
- LIU Shuai, LI Huaqiang, WU Shuning, et al. Optimizing the operation of distribution network by considering the refined modeling of flexible resource transmission [J/OL]. *Power System Technology*: 1-15[2023-12-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0398>.
- [35] 刘英琪, 谢敏, 韦薇, 等. 高比例风电接入的电力系统灵活性评估与优化[J]. *电力建设*, 2019, 40(9): 1-10.
- LIU Yingqi, XIE Min, WEI Wei, et al. Assessment and optimization for power system flexibility with high proportion of wind power[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(9): 1-10.
- [36] 黄鹏翔, 周云海, 徐飞, 等. 基于灵活性裕度的含风电电力系统源荷储协调滚动调度[J]. *中国电力*, 2020, 53(11): 78-88.
- HUANG Pengxiang, ZHOU Yunhai, XU Fei, et al. Source-load-storage coordinated rolling dispatch for wind power integrated power system based on flexibility margin[J]. *Electric Power*, 2020, 53(11): 78-88.
- [37] 臧延雪, 边晓燕, 梁思琪, 等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 15-26.
- ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 15-26.
- [38] 袁晓冬, 费骏韬, 胡波, 等. 资源聚合商模式下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(22): 17-26.
- YUAN Xiaodong, FEI Juntao, HU Bo, et al. Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(22): 17-26.
- [39] MANSOURI S A, NEMATBAKHS E, JORDEHI A R, et al. An interval-based nested optimization framework for deriving flexibility from smart buildings and electric vehicle fleets in the TSO-DSO coordination[J]. *Applied Energy*, 2023, 341: 121062.
- [40] 季宏岩. 分布式储能聚合商参与需求响应的运行优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- JI Hongyan. Study on operational optimization model of distributed energy storage aggregators participating in demand response[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [41] 姜涛, 吴成昊, 李雪, 等. 考虑电动汽车充放电的输配协同能量-灵活性市场出清机制[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(7): 210-224.
- JIANG Tao, WU Chenghao, LI Xue, et al. Clearing mechanism of energy and flexibility markets with transmission and distribution coordination considering charging and discharging of electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 210-224.
- [42] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(6): 1662-1677.
- WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [43] 田圆, 陈红坤, 刘颖杰, 等. 辅助服务市场背景下灵活性资源调峰补偿价格决策方法[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(9): 154-161, 188.
- TIAN Yuan, CHEN Hongkun, LIU Yingjie, et al. Compensation price decision method for peak shaving of flexible resources in context of ancillary service market[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(9): 154-161, 188.
- [44] 潘郑楠, 邓长虹, 徐慧慧, 等. 考虑灵活性补偿的高比例风电与多元灵活性资源博弈优化调度[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(S1): 56-69.
- PAN Zhengnan, DENG Changhong, XU Huihui, et al. Game optimization scheduling of high proportion wind power and multiple flexible resources considering flexibility compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(S1): 56-69.
- [45] 钟佳宇, 陈皓勇, 陈武涛, 等. 含灵活性资源交易的电力市场实时出清[J]. *电网技术*, 2021, 45(3): 1032-1041.
- ZHONG Jiayu, CHEN Haoyong, CHEN Wutao, et al. Real-time clearing of electricity markets with flexible resource transactions[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(3): 1032-1041.
- [46] 崔岩, 胡泽春, 段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 981-994.
- CUI Yan, HU Zechun, DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charging demands[J]. *Power System*

- Technology, 2022, 46(3): 981-994.
- [47] 王毅, 陈进, 麻秀, 等. 采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 77-85.
WANG Yi, CHEN Jin, MA Xiu, et al. Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 77-85.
- [48] 胡福年, 徐伟成, 陈军. 计及电动汽车充电负荷的风电-光伏-光热联合系统协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 10-20.
HU Funian, XU Weicheng, CHEN Jun. Coordinated scheduling of wind power photovoltaic solar thermal combined system considering electric vehicle charging load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 10-20.
- [49] 刘志坚, 戴景, 杨灵睿. 考虑电力-交通耦合网动态协调的EV集群灵活性挖掘与优化调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 127-137.
LIU Zhijian, DAI Jing, YANG Lingrui. Flexibility mining and optimal scheduling for electric vehicle clusters considering dynamic coordination of power-transportation coupling network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 127-137.
- [50] 王萍萍, 许建中, 闫庆友, 等. 计及灵活性负荷资源需求响应和不确定性的楼宇微网调度双层优化模型[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 128-140.
WANG Pingping, XU Jianzhong, YAN Qingyou, et al. A two-level scheduling optimization model for building microgrids considering demand response and uncertainties of flexible load resources[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 128-140.
- [51] KWON S Y, PARK J Y, KIM Y J. Optimal V2G and route scheduling of mobile energy storage devices using a linear transit model to reduce electricity and transportation energy losses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1): 34-47.
- [52] 孙伟卿, 刘唯, 张婕. 高比例可再生能源背景下配电网动态重构与移动储能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 80-90.
SUN Weiqing, LIU Wei, ZHANG Jie. Collaborative optimization for dynamic reconfiguration of distribution network and mobile energy storage in background of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 80-90.
- [53] ROCHA P, SIDDIQUI A, STADLER M. Improving energy efficiency via smart building energy management systems: a comparison with policy measures[J]. Energy and Buildings, 2015, 88: 203-213.
- [54] 陈厚合, 李泽宁, 靳小龙, 等. 集成智能楼宇的主动配电网建模及优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6550-6563.
CHEN Houhe, LI Zening, JIN Xiaolong, et al. Modeling and optimization of active distribution network with integrated smart buildings[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6550-6563.
- [55] YU L, QIN S Q, ZHANG M, et al. A review of deep reinforcement learning for smart building energy management[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12046-12063.
- [56] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035-4049.
YANG Jun, HOU Junhao, LIU Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4035-4049.
- [57] 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.
- [58] 陈灵, 黄兴华, 张功林, 等. 考虑削峰填谷的分布式电源集群协同控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 8-15.
CHEN Ling, HUANG Xinghua, ZHANG Gonglin, et al. Distributed generations clusters collaborative control method considering peak load shifting[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 8-15.
- [59] 赵晶晶, 朱炯达, 李振坤, 等. 考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 61-71.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 61-71.
- [60] GUAN Y J, MENG L X, LI C D, et al. A dynamic consensus algorithm to adjust virtual impedance loops for discharge rate balancing of AC microgrid energy storage units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4847-4860.
- [61] 梁海峰, 丁政, 李鹏. 基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 59-71.
LIANG Haifeng, DING Zheng, LI Peng. Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 59-71.
- [62] 彭大健, 肖浩, 裴玮, 等. 基于ADMM的共享储能参与电网辅助服务的分布式优化模型[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 1-8.
PENG Dajian, XIAO Hao, PEI Wei, et al. Distributed optimization model of shared energy storage participating in power grid auxiliary service based on ADMM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 1-8.

- [63] 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.
- [64] 杨冰,王丽芳,廖承林,等.分布式电动汽车有序充电控制系统模型[J].电力系统自动化,2015,39(20):41-46.
YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin, et al. Distributed coordinated charging control system model for large-scale electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 41-46.
- [65] 程杉,王贤宁,冯毅焜.电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J].电力系统自动化,2018,42(1):39-46.
CHENG Shan, WANG Xianing, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [66] 段翩,朱建全,刘明波.基于双层模糊机会约束规划的虚拟电厂优化调度[J].电工技术学报,2016,31(9):58-67.
DUAN Pian, ZHU Jianquan, LIU Mingbo. Optimal dispatch of virtual power plant based on bi-level fuzzy chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 58-67.
- [67] 李翔宇,赵冬梅.分散架构下多虚拟电厂分布式协同优化调度[J].电工技术学报,2023,38(7):1852-1863.
LI Xiangyu, ZHAO Dongmei. Distributed coordinated optimal scheduling of multiple virtual power plants based on decentralized control structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1852-1863.
- [68] 何奇琳,艾芊.基于自律分散控制的多区域虚拟电厂优化调度策略[J].水电能源科学,2019,37(6):187-191.
HE Qilin, AI Qian. Optimal scheduling strategy of multi-region virtual power plant based on autonomous decentralized control[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(6): 187-191.
- [69] YAN X Y, GAO C W, MING H, et al. Optimal scheduling strategy and benefit allocation of multiple virtual power plants based on general Nash bargaining theory[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 152: 109218.
- [70] 谢宏伟,严强,李扬,等.市场模式下兼顾区域负荷特性的多虚拟电厂分布式协调优化[J].电力自动化设备,2023,43(5):199-209.
XIE Hongwei, YAN Qiang, LI Yang, et al. Distributed coordination optimization of multiple virtual power plants considering regional load characteristics in market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 199-209.
- [71] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化,2016,40(13):147-158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [72] 朱晓荣,鹿国徽.计及灵活性的配电网储能优化配置[J].现代电力,2020,37(4):341-352.
ZHU Xiaorong, LU Guowei. Optimal allocation of energy storage systems considering flexibility in distribution network[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(4): 341-352.
- [73] 王华伟,程小虎,赵蒙蒙,等.面向分布式光伏消纳的中压配电网储能规划模型和求解方法[J].电力建设,2023,44(9):58-67.
WANG Huawei, CHENG Xiaohu, ZHAO Mengmeng, et al. Method for energy storage planning in medium-voltage distribution networks for distributed photovoltaic consumption[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 58-67.
- [74] 林芝羽,李华强,苏韵掣,等.计及灵活性承载度的电网评估与扩展规划方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):46-57.
LIN Zhiyu, LI Huaqiang, SU Yunche, et al. Evaluation and expansion planning method of a power system considering flexible carrying capacity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 46-57.
- [75] NOSAIR H, BOUFFARD F. Flexibility envelopes for power system operational planning[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 800-809.
- [76] MARTÍNEZ CESEÑA E A, CAPUDER T, MANCARELLA P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 348-357.
- [77] 黄启航,马雪,白左霞,等.面向灵活资源配置的电力系统超短期优化调度[J].中国电力,2019,52(6):104-110,120.
HUANG Qihang, MA Xue, BAI Zuoxia, et al. Ultra-short-term optimal scheduling of power system orienting to flexible resources configuration[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 104-110, 120.
- [78] 王建学,李清涛,王秀丽,等.大规模新能源并网系统电源规划方法[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3114-3124.
WANG Jianxue, LI Qingtao, WANG Xiuli, et al. A generation expansion planning method for power systems with large-scale new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3114-3124.
- [79] MARNERIS I G, BISKAS P N, BAKIRTZIS E A. An integrated scheduling approach to underpin flexibility in European power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 647-657.
- [80] 翟一唯.考虑网络约束的电力系统灵活性评价与优化配置[D].济南:山东大学,2018.
ZHAI Yiwei. Studies on power system flexibility evaluation and optimal allocation considering power network constraints[D]. Jinan: Shandong University, 2018.

- [81] 孟安波, 林艺城, 殷豪. 计及不确定性因素的家庭并网风-光-蓄协同经济调度优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 162-173.
MENG Anbo, LIN Yicheng, YIN Hao. Synergetic scheduling optimization method of grid-connected home wind-solar-storage system considering uncertainty factors[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 162-173.
- [82] 林顺富, 刘持涛, 李东东, 等. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1409-1421.
LIN Shunfu, LIU Chitao, LI Dongdong, et al. Bi-level multiple scenarios collaborative optimization configuration of CCHP regional multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1409-1421.
- [83] 姚志力, 王志新. 计及风光不确定性的综合能源系统两层级协同优化配置方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4521-4531.
YAO Zhili, WANG Zhixin. Two-level collaborative optimal allocation method of integrated energy system considering wind and solar uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4521-4531.
- [84] 张勇军, 林晓明, 许志恒, 等. 基于弱鲁棒优化的微能源网调度方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 75-82.
ZHANG Yongjun, LIN Xiaoming, XU Zhiheng, et al. Dispatching method of micro-energy grid based on light robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 75-82.
- [85] 陈泽兴, 林楷东, 张勇军, 等. 电-气互联系统建模与运行优化研究方法评述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 11-23.
CHEN Zexing, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. A review of modeling and optimal operation of integrated electricity-gas system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 11-23.

作者简介:



陈郑平

陈郑平(1982), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事智能电网调控工作(E-mail: czp820118@163.com);

李文忠(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 从事智能电网调控工作;

陈飞雄(1990), 男, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统协同优化控制。

Summary of research on improving the flexibility of new power systems with distributed resources

CHEN Zhengping¹, LI Wenzhong¹, CHEN Feixiong², HUANG Minghuang¹, WANG Fangdong¹, ZHANG Duanhong¹

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: With the continuous advancement of new power system construction, the impact of uncertainty is becoming increasingly prominent. Consequently, it is urgent to enhance the flexibility of new power systems to respond to fluctuations in source load power and ensure the safe and stable operation of the system. To this end, this paper reviews methods for improving the flexibility of new power systems considering distributed resources. Firstly, based on the inherent characteristics of the new power system, the challenges and technical bottlenecks in improving the flexibility of the new power system are analyzed. Secondly, following the historical-current-future timeline, this paper summarizes the flexibility improvement paths of the new power system from three perspectives: flexibility quantification evaluation, flexibility optimization scheduling, and flexibility configuration planning. Finally, the key challenges in enhancing the flexibility of new power systems are summarized from the three aforementioned aspects.

Keywords: new power systems; improved flexibility; distributed resources; flexibility quantitative evaluation; flexibility optimization scheduling; flexible configuration planning

(编辑 陆海霞)