

电碳协同视角下城市配电系统弹性提升规划综述

李更丰^{1,2}, 韩润泽^{1,2}, 周莫斐^{1,2}, 林家琳^{1,2}, 赵天阳^{1,2}, 别朝红^{1,2}

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;

2. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 西安 710049)

摘要: 在“双碳”目标驱动下, 城市配电系统正从“安全-经济”二元平衡向“安全-经济-低碳”三元均衡转型。极端气候事件频发使传统弹性提升规划策略面临安全与低碳的二元对立困境, 亟需通过电碳协同框架破解“非灾降碳”与“灾中失稳”的双重困局。该文立足电碳协同视角, 系统构建了城市配电系统弹性提升规划的理论框架。首先, 阐述了电碳协同的基本概念和传导机制, 明确了“非灾近零碳经济、灾时低碳稳定”的核心目标; 其次, 从场景构建、规划建模、求解方法和策略验证 4 个维度分析了城市配电系统弹性提升规划的关键技术与方法体系; 最后, 识别了多灾害耦合建模、多时间尺度协调机制、多重不确定性分析等关键挑战, 并展望了未来发展方向。研究表明, 电碳协同弹性提升规划已成为城市配电系统高质量转型的重要方向之一, 为构建安全、低碳、经济的新型电力系统提供了理论支撑和技术路径。

关键词: 电碳协同规划; 城市配电系统; 弹性; 低碳转型; 极端事件

Review on Urban Distribution System Resilience Enhancement Planning Under Electricity-carbon Synergy Perspective

LI Gengfeng^{1,2}, HAN Runze^{1,2}, ZHOU Mofei^{1,2}, LIN Jialin^{1,2}, ZHAO Tianyang^{1,2}, BIE Zhaohong^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: Driven by the dual-carbon targets, urban distribution power systems (UDPSs) are transitioning from a dual balance of “safety-economy” to a triadic equilibrium of “safety-economy-low carbon”. The frequent occurrence of extreme weather events has exposed traditional resilience enhancement planning strategies to a binary opposition dilemma between safety and low carbon, urgently requiring an electricity-carbon synergy framework to resolve the dual predicament of non-disaster carbon reduction and disaster-induced instability. This paper systematically constructs a theoretical framework for urban distribution system resilience enhancement planning under the electricity-carbon synergy perspective. Firstly, this paper elaborates on the basic concepts and transmission mechanisms of electricity-carbon synergy, clarifying the core objective of “non-disaster near-zero carbon economy and disaster-time low-carbon stability”. Secondly, this paper analyzes the key technologies and methodological systems for resilience enhancement planning from following four dimensions: scenario construction, planning models, solution methods, and strategy verification. Finally, this paper identifies key challenges including multi-hazard coupling modeling, multi-time scale coordination mechanisms, and multi-uncertainty analysis, and puts forward the prospects in future development directions. The research shows that electricity-carbon synergistic resilience enhancement planning has become one of the important directions for high-quality transformation of urban distribution systems, providing theoretical supports and technical pathways for constructing safe, low-carbon, and economical new power systems.

Key words: electricity-carbon synergy planning; urban distribution power system; resilience; low-carbon transition; extreme events

0 引言

在“双碳”目标驱动下, 城市作为我国碳排放

的主体(占总量的 85%^[1]), 其配电系统正经历深刻的结构性变革。在能耗双控向碳排放双控转型的背景下^[2], 直接与间接碳排放约束共同重塑系统形态。

《2030 年前碳达峰行动方案》^[3]推动工业/建筑/交通领域电气化, 诱发分布式新能源、电动汽车规模化接入, 驱动城市配电系统从无源辐射状向有源互联形态演化。绿电交易、绿证机制等政策工具推广,

基金资助项目: 国家科技重大专项低碳高可靠城市配电系统示范 (2024ZD0800700)。

Project supported by National Science and Technology Major Project Under Grant Low-carbon and High-reliability Urban Distribution Power Systems (2024ZD0800700).

叠加《新形势下配电网高质量发展指导意见》^[4]的安全可靠供应要求, 促使“源-网-荷-储”多元主体在安全低碳约束下重构交互模式。然而, 极端气候事件频发、多发、并发使城市配电系统弹性不足矛盾凸显^[5], 传统弹性提升策略深陷安全与低碳的二元对立: 灾时依赖柴油机组等碳密集型应急电源保障供电能力, 却加剧碳排放; 若片面追求低碳化(如高比例新能源微电网孤岛运行), 则因弱支撑能力诱发二次停电风险, 导致安全与低碳目标在极端场景下难以调和, 亟待通过电碳协同框架突破非灾降碳与灾时失稳的双重困局。

电碳协同规划作为融合配电工程与碳管理科学的前沿交叉方向, 已成为城市配电系统高质量转型的关键路径之一。目前相关研究主要集中在电力系统低碳化技术^[2]、配电系统弹性提升方法^[5]等单一维度, 而针对电碳协同下弹性提升规划的系统性研究仍较为缺乏, 特别是在极端事件下安全与低碳目标协调机制、多维度场景构建方法、“源-网-荷-储”一体化规划模型等关键问题上亟需深入探索。

基于此, 本文立足电碳协同视角, 系统构建城市配电系统弹性提升规划的理论框架与方法体系。首先, 阐述“电碳协同”基本概念与传导机制; 其次, 以构建“非灾近零碳经济、灾时低碳稳定”的城市配电系统为目标, 建立涵盖场景构建、规划模型、求解方法、策略验证 4 个维度的关键技术; 最后, 识别多灾害耦合建模、多时间尺度协调等关键挑战, 为构建安全、低碳、经济的新型电力系统提供理论支撑和技术路径。

1 电碳协同环境下城市配电系统弹性提升规划框架

1.1 城市配电系统特征与发展趋势

城市配电系统是以中低压电网为载体的电能分配网络, 通过“源-网-荷-储”多要素协同实现电能传输、转换与消费, 如图 1 所示。与农村或工业园区配电系统相比, 城市配电系统具有以下显著特点: (1) 负荷密度高且构成复杂。涵盖居民、工商业、市政等多种类型, 呈现时空分布不均匀、峰谷差异明显的特征; (2) 供电可靠性要求分级化。从特级负荷的 99.99% 到一般用户的基本供电质量, 差异化需求推动网架结构向多联络多电源模式转变; (3) 网架结构与运行环境复杂。以 10 kV/35 kV 及以下中低压网络为主体, 受城市规划约束大, 线路走廊受限,

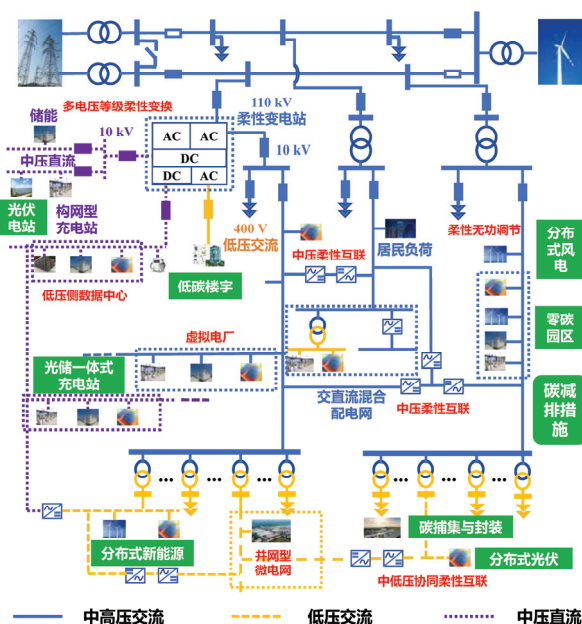


图 1 考虑碳减排措施的典型城市配电系统形态图

Fig.1 Typical urban distribution power systems considering carbon reduction methods

地下电缆比例高, 多电压等级间协同运行复杂。

在“双碳”目标驱动下, 城市配电系统正经历深刻变革: (1) 本地分布式光伏与远端规模化风光渗透率提升, 重构配电系统能源供给结构; (2) 建筑/工业/交通领域电气化率逐步上升, 叠加数据中心、光储充一体化电站、虚拟电厂、碳捕集与封装等新型负荷涌现, 推动供电需求从“经济-可靠”向“经济-可靠-低碳”三重目标演进^[6]; (3) 为平衡新能源波动性与负荷复杂性, 电化学储能、氢储能等调节资源显著增强系统灵活性与碳减排能力; (4) 微电网、中低压柔性互联装置、中压柔性互联技术广泛应用, 支撑故障状态下孤岛持续供电与快速恢复; (5) 分布式发电市场及绿证市场持续推进, 导致多元主体的交互边界技术与经济深度融合。

1.2 电碳协同的定义与内涵

电碳协同是指在城市配电系统的电能生产、传输、消耗等及电力设备生产、运输、使用、维护等活动中, 直接或间接减少向大气中释放二氧化碳等温室气体的行为^[7]。电碳协同作为城市配电系统转型的核心范式之一, 其演化过程可通过多种理论体系进行描述, 如表 1 所示。文献[2]中将提出将“安全-经济”二元协同优化扩展为“安全-经济-低碳”三元均衡优化, 形成“宏观三元均衡-微观分形优化”的纵向融合框架, 以化解新型电力系统发展的目标

冲突。文献[7]中提出“全链条技术链-多时间尺度市场”的横向协同模式，支撑发电企业、电网企业、用户等不同主体采用技术与经济手段实现碳约束下的安全经济发展。同时，在碳密集型出口、交通等场景，电碳协同更多呈现技术与经济的耦合^[11]。

1.3 电碳协同弹性提升的目标与传导机制

电碳协同弹性提升规划的核心目标是构建“非灾近零碳经济、灾时低碳稳定”的城市配电系统，该目标体现了不同状态下安全与低碳的协调机制。

“非灾近零碳经济”指正常运行状态下，通过高比例新能源接入、储能优化配置、需求响应等手段，实现配电系统碳排放趋近于零的同时保持经济性，体现“低碳优先”的运行理念。“灾时低碳稳定”指极端事件下，优先保障关键负荷供电安全，同时通过微电网孤岛运行、清洁能源应急供电等方式，在确保系统稳定的前提下尽可能降低碳排放，体现“安全为本、兼顾低碳”的应急原则。这一目标为电碳协同规划提供了明确的价值导向，对应的城市配电系统协同演化路径如图 2 所示。

在“双碳”目标与弹性需求双重驱动下，城市配电系统的电碳协同弹性提升呈现出“政策驱动-用户响应-系统演化”的多层级传导特征，如图 3 所示。降碳任务通过政策工具自上而下载导至系统各层级，形成了以用户侧为核心枢纽的协同演化路径。根据供电可靠性要求和碳减排潜力，用户侧呈现差异化响应特征：(1)特级和一级负荷：主要包括党政军机关、指挥中心等，核心诉求是供电可靠性和系统弹性。在极端事件下，这类用户的保供需求是第一目标，碳排放约束可适度放宽，体现了“安全优先”的原则。(2)二级和三级负荷：进一步细分为非灵活负荷和灵活性负荷。非灵活负荷主要为不可调节的刚性用电需求，多为居民负荷；灵活性负荷包括工业、商业和电动汽车等可调节负荷，是电碳协同的核心载体。当系统运行目标转向低碳导向时，建筑、钢铁、化工等高耗能工业用户通过“煤改电”“油改电”等电气化改造和屋顶光伏、分布式风电等分布式电源建设，实现深度降碳^[12]。然而，这种差异化响应对配电系统产生复杂的双重影响：电气化进程推动负荷总量增长，加剧配电系统供电压力；分布式电源大规模接入通过就地消纳减少对系统的供电需求，提升系统分布式支撑能力。这种“负荷增长-供电压力”与“分布式电源-需求减少”的对立统一关系，构成了配电系统电碳协同演化的核心矛盾。

表 1 电碳协同内涵

Table 1 Connotation of electricity-carbon synergy

来源	定义	典型特征	适用对象
文献 [2]	将“碳”元素深度融入电力领域，推动电力系统从“安全-经济”二元平衡转向“安全-经济-低碳”三元均衡	算碳、测碳、降碳、评碳、碳足迹、仿碳	电力系统顶层设计：政策制定者、电网企业战略规划部门
文献 [7]	通过电力调度与碳排放时空尺度上的耦合优化实现减排	电碳市场、碳足迹追踪、调度-交易-碳流协同	电网调度机构、碳交易平台、负荷聚合商、高耗能企业
文献 [8]	以负碳技术为核心，通过电力系统与碳管理链条的跨域耦合，实现能源系统从“碳源”向“碳汇”转型的全球化路径	负碳技术 跨国碳市场 机制	跨国碳信用流转
文献 [9]	政策组合驱动的“电能替代-经济激励”双闭环系统，通过电力-交通设施与市场机制，在低电气化部门实现碳减排边际成本曲线下移，最终达成降碳不减速的转型范式	电能替代与 经济激励改善 正向协同	交通部门
文献 [10]	通过绿电市场与碳交易市场的协同效应，动态优化碳密集型出口产业的用能结构，从而对冲跨境碳成本的政策-技术组合机制	从“技术驱动” 向“规则驱动”	碳密集型出口产业

为化解上述矛盾，需构建“源-网-荷-储”一体化协同规划机制，通过分布式电源、储能、微电网等优化配置实现用户侧资源的升级改造，通过柔性互联、配微协同等方式增强系统城市配电系统的适应性和弹性水平。最终形成“低碳投资-弹性提升-风险下降-成本优化-再投资”的正反馈循环，推进“安全-经济-低碳”三元均衡目标的协同实现。

2 面向低碳城市配电弹性提升的极端场景构建方法

传统电力系统规划在容量配置环节主要采用负荷持续曲线等静态分析工具，该方法通过负荷幅值统计特征指导装机容量决策^[13]，但在时序相关性分析方面存在不足，难以反映负荷的时间演化特征和动态响应过程^[14]。另一方面，电碳协同规划需要将场景构建从传统二维目标扩展为包含经济发展、人口变化、低碳政策和极端事件影响的四维综合场

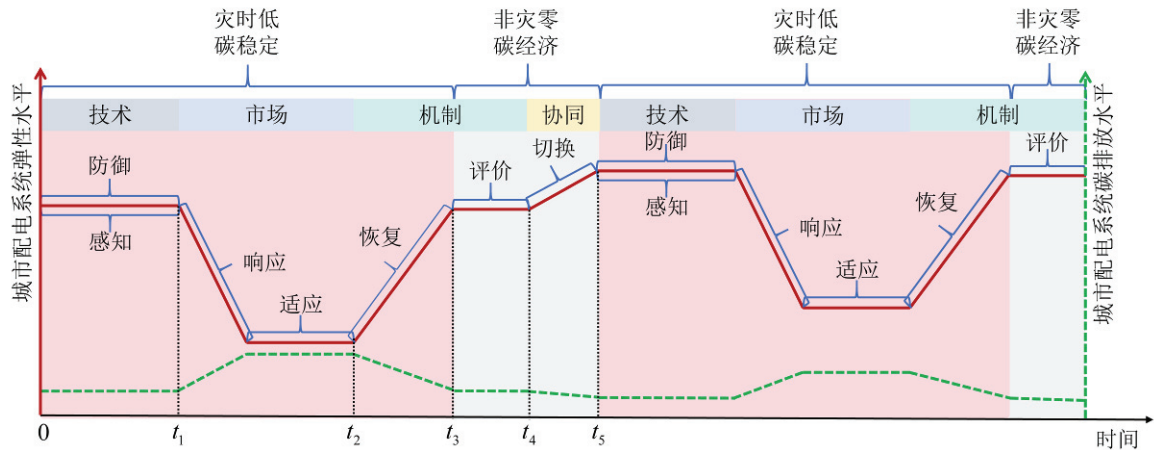


图2 电碳协同视角下系统弹性水平-碳排放强度时变曲线

Fig.2 Time-varying curves of resilience level and carbon emission intensity from the angle of electricity-carbon synergy

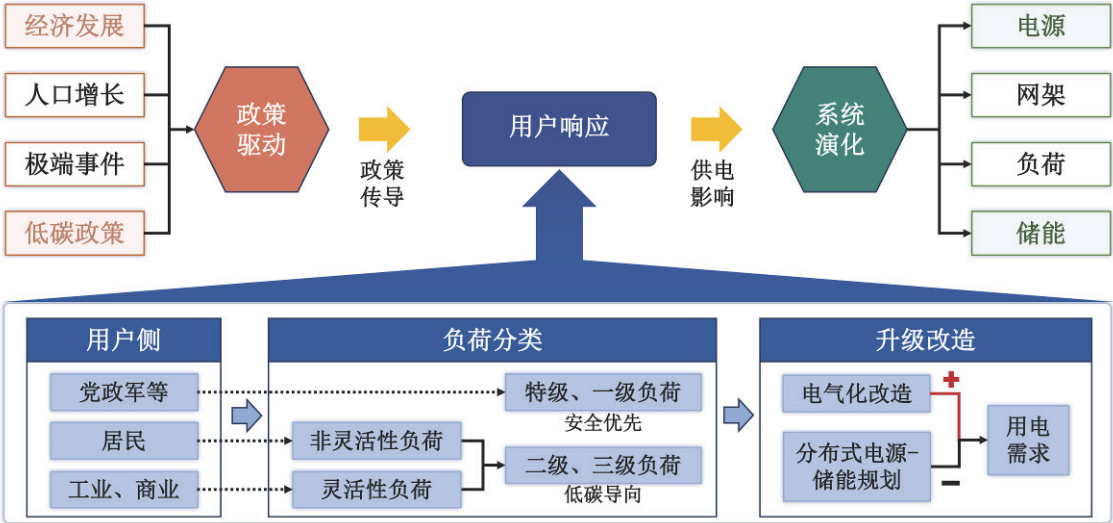


图3 电碳协同视角下城市配电系统弹性提升传导机制图

Fig.3 Propagation mechanism of urban distribution power systems resilience enhancement from the angle of electricity-carbon synergy

景集^[15]。因此,必须采用考虑时序信息的日负荷曲线等具有完整时间信息的描述方法来准确建模复杂情景。然而,这种建模方式的直接后果是数据维度的急剧增加,对计算资源带来了巨大挑战。如何在保持模型精度的前提下有效处理高维数据成为电碳协同弹性提升规划面临的核心技术难题^[16]。

电碳协同下城市配电系统弹性提升规划中的不确定性呈现出前所未有的复杂性。在传统的分布式电源出力波动和用户负荷变化等连续性不确定性基础上^[17],新增了碳排放因子动态变化、碳价格波动等连续性碳排放不确定性,这些因素直接影响电力系统的碳减排效果^[18];同时,极端事件引发的设备故障数量和位置呈现典型的离散随机特征,在极

端自然灾害条件下设备故障呈现出空间聚集性和时间相关性^[19]。源荷因素的连续性随机特征与故障事件的离散性随机属性交织,加之碳排放因子的时变不确定性,使得面向低碳城市配电系统弹性提升规划的极端场景本质上成为一个高维度的离散-连续混合随机场景构建问题。

场景构建主要沿两条路径展开:一是基于历史事件的数据与响应过程的“灾害重现”^[20-22];二是面向尚未观测但潜在重要影响的“新场景涌现”与外推。前者强调对已发生事件的物理足迹与系统响应机制再现,后者侧重对可能情形的包络、放大与不确定扩展,从而支撑策略鲁棒性评估,涵盖规划、运行、市场等策略。在“灾害重现”方向,研究聚

焦历史事件及其引发的故障-恢复链路回放,具体包括直接回放与合成回放两类。文献[20]利用真实台风、冰暴、地震、洪水、山火等灾害足迹与关键设备脆弱性曲线耦合生成故障集,直接对历史事件进行回放;进而,文献[21]通过路径/强度参数扰动与放大,探测更低概率工况,并借助统计学习对失效率进行再采样与合成以扩展样本、量化风险。在系统响应方面,文献[22]对级联故障回放,并引入多阶段/多指标框架的弹性评估指标体系,支撑“极端事件→致灾因子→故障演化→恢复曲线全过程建模”[20]。

对于尚未发生的极端事件及其影响,将带来外生不确定性和内生不确定性两类,前者指来源于系统外部、不受决策变量影响的随机因素,如天气条件、负荷需求等;而内生不确定性则指受系统决策变量影响的不确定性,如防御措施对系统响应的影响[23-24]。为精准构建电碳协同下的规划场景集,学术界形成了几类成熟的方法体系。最早发展的是基于场景生成的方法,利用历史数据和概率分布模型,通过蒙特卡洛仿真、场景树等技术生成大量未来场景,并为每个场景赋予相应的发生概率权重,理论上可以逼近真实的概率分布,为系统提供全面的不确定性描述[25-27]。随后发展的是基于不确定集的方法,该方法通过定义参数变化范围构建相对简单的不确定性集合,无需具体概率分布信息,能够将原本复杂的随机优化问题转化为确定性的优化问题,大幅降低了计算复杂度[28-29]。基于模糊集的方法通过构建概率分布的模糊集合来刻画分布不确定性,通过在最坏分布下优化期望性能,在概率分布信息不完全或存在偏差时仍能提供稳健决策方案[30]。此外,针对不确定性参数依赖过去决策的一类问题,近年来发展了决策依赖不确定性(decision dependent uncertainty, DDU)方法,其核心机制体现为决策变量与不确定参数之间的双向匹配关系[31],但其双向耦合特性显著增加了问题的求解难度[32]。最后,针对历史数据匮乏下的不确定性建模难题,开发了生成对抗网络(generative adversarial networks, GAN)等一系列人工智能方法,对抗网络在训练过程中存在固有的不确定性特征,能够通过对抗训练生成更加丰富和真实的场景样本,显著提升了不确定性集合的覆盖范围[32],使其特别适合于电力系统中的随机性建模,在样本增强、暂态稳定性分析和设备故障诊断等领域发挥重要作用[33],但该方法也面临着

场景数量与计算精度之间的权衡困境,场景过少可能导致覆盖不足,场景过多则会带来维数灾难[20]。

综上所述,构建有效的不确定性集合需要在3个核心原则之间寻求平衡:覆盖度、计算复杂度和置信度。覆盖度原则要求不确定性集合能够充分涵盖系统可能遇到的各种运行情况,确保规划方案在面对未来不确定性时具备足够的适应性。计算复杂度原则强调在保证模型精度的前提下,不确定性集合的构建和求解应具备可接受的计算效率。置信度原则关注不确定性集合在概率保证方面的可靠性,即所构建的不确定性集合能够以一定的置信水平保证系统的安全运行。这3个原则构成了不确定性建模的基本评价框架,决定了不同方法在实际应用中的适用性和有效性。未来,电碳弹性协同规划中的不确定性建模将朝着多方法融合的方向发展。一方面,需要发展自适应的不确定性集合构建方法,能够根据系统运行状态和外部环境的变化动态调整不确定性的描述方式,在保证覆盖度的同时控制计算复杂度。另一方面,应当建立更加精细化的置信度评估体系,结合机器学习和人工智能技术,实现对不确定性集合质量的实时监测和优化调整。此外,随着数字化技术的不断进步,基于大数据和云计算的分布式不确定性建模方法将为解决高维混合不确定性问题提供新的技术路径,有助于实现覆盖度、计算复杂度和置信度3个原则的协调统一。

3 低碳城市配电系统弹性提升规划模型

在“双碳”背景下,配电系统弹性规划面临着多重新挑战。传统配电系统“以碳换电”的规划模式不再适用,电碳协同下的弹性规划需要同时考虑电力安全约束和碳排放约束,在双重约束下优化资源配置,实现弹性提升与碳减排的协调发展[34-35]。因此,针对前文提到的低碳/经济性、可靠性、弹性3类规划目标,本章将从“源-荷-储”等规划要素和“微电网-微电网群-中低压网架-配微电网”等规划载体两个维度,系统阐述电碳协同下城市配电系统弹性提升的规划模型与方法。

3.1 规划要素建模

电碳协同视角下的弹性提升规划需要统筹考虑分布式电源、储能系统、负荷侧资源等多类规划要素的协调配置。这些要素在提升系统弹性的同时,必须兼顾碳减排目标,形成“安全-经济-低碳”的三元均衡。

分布式电源规划建模方面, 源侧主要涵盖风光水等分布式能源选址定容, 进一步可以扩展为电、气、热、冷等多种能源形式的协同优化配置。文献[36]提出了多联供(combined cooling, heating and power, CCHP)和分布式可再生能源的气-电综合配电系统协调运行方法, 通过燃气配电网和制冷或供热系统实现能源的高效利用。多能互补分布式电源通过风光水火储一体化配置, 能够发挥不同能源的互补特性, 在提升系统弹性的同时实现深度脱碳。

负荷侧资源规划建模重点关注电动汽车、需求响应和柔性负荷技术。其中, 电动汽车充电设施规划需要兼顾交通需求与电网支撑能力, 可以通过车网互动(vehicle to grid, V2G)技术实现双向能量交换, 文献[37]建立电动汽车虚拟电厂灵活性量化模型, 实现电动汽车的协同消纳。需求响应则通过激励用户, 改变用电行为, 实现负荷转移、削峰填谷和智能调度, 文献[38]分析了智能电网中居民负荷为需求响应提供的灵活性, 利用智能电表数据评估可用的居民负荷灵活性。这些负荷侧资源在极端事件中可提供弹性支撑, 同时通过优化用电时序降低系统碳排放。

储能系统规划建模包含电化学储能、抽水蓄能、移动储能等各类储能系统优化配置, 不仅能够平抑新能源波动、提供应急电源支撑, 实现电网的时空平衡调节, 还可通过优化充放电策略减少系统碳排放。多元化储能可以发挥各类储能的互补优势, 在不同时间尺度(日前、小时前、实时等)进行分层优化调度, 文献[39]针对风电、光伏、火电、抽水蓄能和电池组成的联合系统, 建立了多时间尺度协调调度模型, 为多元化储能系统的多时间尺度调度提供了系统性解决方案。另外, 移动储能通过将储能装置安装在移动载体上, 实现储能资源的灵活配置和动态调度, 文献[40]结合了分布式数据中心, 实现移动储能的灵活配置和调度。储能参与碳减排的机制建模需要考虑其在碳交易市场中的价值实现路径。

上述规划要素的协调建模需要建立统一的优化框架, 通过构建各要素间的耦合约束关系, 量化其在弹性提升与碳减排方面的协同效应, 为后续规划载体建模提供基础支撑。

3.2 规划载体建模

3.2.1 微电网规划

微电网作为集成分布式电源、储能系统、可控

负荷和能量管理系统的小型发配电系统, 是实现电碳协同弹性提升的重要载体。面向“非灾近零碳经济、灾时低碳稳定”双重目标, 基于“源-荷-储”一体化载体功能, 微电网电碳协同规划需要建立差异化的配置策略和运行机制。

面向“非灾近零碳经济”需求, 微电网规划的核心在于构建内部资源协调优化机制, 实现经济性与低碳性的统筹兼顾。微电网通过并网运行模式与配电网进行双向能量交换, 既可向配电网输送清洁电力, 又可在新能源出力不足时从配电网购电, 实现能量的时空平衡。在经济/低碳目标协同方面, 开发了以下 3 类方法: 文献[41]提出包含用电质量、运行经济成本及碳排放量的多目标优化函数矩阵, 通过 Pareto 前沿法实现经济目标与环境目标的统筹考虑; 文献[42]在微电网运行规划中引入碳交易机制作为约束条件, 将碳减排需求转化为系统运行的硬约束; 文献[43]通过建立实时电价模型和需求弹性模型, 通过碳排放因子将碳成本内化为电价信号, 引导负荷侧响应, 实现多目标优化问题的求解。

面向“灾时低碳稳定”需求, 微电网需要承担极端事件下的重要用户保供的责任, 通过孤岛运行模式为关键负荷提供持续供电, 成为城市配电系统弹性提升的重要技术手段。微电网极端事件保供规划的关键在于两个方面: 一是确保应急容量充足性, 需要综合考虑负荷特性、电源出力特性和储能容量约束, 建立容量充裕度评估模型, 保证在设定的保供时长内能够满足关键负荷的用电需求, 文献[44]提出了一种微电网规模的三阶段规划模型, 基于负荷重要性分级, 确定柴油发动机和分布式电源的配置方案, 在有限的应急容量约束下优先保障医院、数据中心、应急指挥中心等关键设施的供电需求。二是维持孤岛运行的系统稳定性, 需要通过合理的电源配置和控制策略设计确保频率、电压等关键参数在可接受范围内, 文献[45]提出了一种考虑频率特性的主动配电网调度方法, 通过形成可靠的微电网, 在紧急情况下继续为重要用户提供服务。线路上的电源在中断前受到限制, 以确保故障发生时微电网的频率稳定性。

综上所述, 微电网作为城市配电系统弹性提升的核心环节, 需要统筹考虑“非灾近零碳经济”与“灾时低碳稳定”双重需求, 实现碳减排与弹性提升的有机统一, 为城市配电系统的可持续发展提供了重要技术路径。但是, 单一微电网仍因为容量限

制,在新能源持续消纳、负荷不间断供电方面作用有限^[46]。

3.2.2 微电网群规划

在单个微电网规划基础上,微电网群作为多个微电网通过电气连接和信息交互形成的网络化系统,具有显著优势:通过分层协调控制实现频率电压稳定,通过资源共享降低系统成本,通过功率互济提升供电可靠性^[47]。

为了实现微电网群之间的互补配合和稳定运行,需要采用一定的分层协调控制框架,文献[48]提供了基于多智能体系统的微电网群分布式协调控制的全面理论基础,为解决分层协调控制问题提供了系统性方案。文献[49]针对孤岛微电网群的协调控制需求,采用双层间歇通信网络实现分布式协调,上层网络负责微电网群间的功率协调和资源调度,下层网络负责各微电网内部的二次频率/电压控制,有效解决了频率与电压越限风险问题,提升系统可靠性。

在协调配合的基础上,微电网群可以显著改善城市配电系统的经济性和可靠性,文献[50]建立考虑风光互补特征的多微网系统自治经济调度模型,通过优化各微电网的发电计划和功率交换策略,实现运行成本最小化和新能源消纳最大化的协调统一。文献[51]建立微电网群能量调度和电压/无功控制的分层优化策略,实现孤岛运行时可用资源的有效协调,保证重要用户的高质量、长时间的电能供应。

综上所述,微电网群协同规划通过建立分层协调控制架构、优化风光互补配置、强化孤岛运行控制,实现了多微电网的协同优化和系统经济性、可靠性提升,在“非灾近零碳经济”需求上具有显著优势,为城市配电系统的智能化发展提供了重要技术支撑。但在极端事件下,多重故障很可能打破微电网群的连接性,因此在弹性提升方面作用有限。

3.2.3 中低压网架规划

中低压配电系统作为连接高压输电网与用户侧的关键环节,其网架结构直接影响供电可靠性和系统运行经济性。在电碳协同框架下,传统的放射型网架结构面临双向潮流、故障处理复杂等多重挑战,需要向更加灵活、智能、低碳的网架结构演进。

柔性互联技术是解决上述问题的一个优质方案,通过智能软开关(soft open point, SOP)等先进设备,可以实现有功和无功功率的精确控制,能够有

效解决传统机械开关无法处理的环流问题,提升网架运行的灵活性和经济性。文献[52]提出了多微电网与配电网柔性互联的协调规划方法,通过 SOP 的优化配置,提升了系统的运行灵活性和可再生能源消纳能力。文献[53]研究了低压柔性配电系统中柔性互联与储能设备的联合规划方法,通过协调优化电压源变换器和储能系统的安装位置与容量,提升了分布式光伏的接纳能力。

除了传统的交流配电系统规划外,交直流混合配电系统也具有显著优势。直流网络具有功率传输效率高、闭环运行、无需同步、易于控制等优势,特别适合连接分布式光伏、储能系统、电动汽车充电站等直流负荷和电源,避免多次 AC/DC 转换损耗。文献[54]综合考虑谐波交互影响、负荷分布和投资成本等因素,确定 AC/DC 变换器的最优配置方案,有效提升了系统的经济性和可靠性。文献[55]建立了交直流混合配电系统的网络配置规划方法,通过优化算法求解变换器的最佳部署位置和容量,实现功率损耗最小化和供电可靠性最大化。

实现配电系统网架闭环设计乃至闭环运行后,可以通过动态调整网络拓扑结构,有效改善系统的潮流分布、降低网络损耗、提升供电可靠性,同时减少碳排放。文献[56]提出了基于群体优化算法的配电网重构框架,通过网络拓扑的动态调整实现碳排放减少和线损最小化。文献[57]提出了极端事件下的动态网络重构策略,在灾后修复过程中纳入了可调度的 DG、ESS、移动发电机和维修人员,最大化恢复负荷。

综上所述,中低压网架规划主要作用于“非灾近零碳经济”阶段,需要考虑网架结构优化,以提升双向潮流管理和故障处理能力,通过系统性的规划设计,构建适应微电网大规模接入的现代化配电网架,为系统的安全可靠运行提供物理基础。

3.2.4 配微协同规划

配微协同规划作为城市配电系统弹性提升的综合性解决方案,通过统筹配电网主网架与微电网群的协同优化,实现了系统级的资源配置和运行协调。在电碳协同框架下,配微协同规划需要同时考虑配电系统的网架承载能力、微电网的“源-荷-储”配置以及两者间的功率交互与信息协调,形成“配电网-微电网群”一体化的规划体系^[58]。

配微协同的核心在于建立双层优化架构,实现配电网与微电网群的分层协调规划。文献[59]提出

一种基于交替优化方法的配微电网协同规划策略, 上层利用纳什议价在下层生成的凸子集中解得交易电量和支付策略, 下层利用从上层获得的交易变量局部确定个体规划问题, 将上层双边市场交易出清问题分解为交易电量求解与交易电费求解 2 个子问题, 运用交替方向乘子法对 2 个子问题进行求解。

在功率交互层面, 配微协同需要建立灵活的双向功率交换机制, 实现配电网与微电网群间的能量互济、调峰互补和应急支撑。文献[60]提出了一种两阶段优化方法, 其中下层微电网使用模型预测控制调度其可用资源, 上层配电系统运营商协调微电网之间的电力传输, 有效利用多个微电网中未使用的容量, 同时在紧急情况下保持系统范围的协调。

在碳减排协同方面, 配微协同规划需要建立统一的碳核算和碳交易体系, 实现配电网与微电网群的碳排放协同管理。文献[61]通过跟踪整个配电网和连接的微电网的电力流和相关碳排放来应对碳排放分配的挑战, 在异构系统资产之间分配碳责任, 实现碳减排的协同运行, 文献[62]开发了电力和碳交易协调的纳什均衡分析, 解决排放量超过分配配额时的碳排放分配挑战, 展示了电碳联合市场如何在保持微电网产消者公平碳责任分配的同时实现资源优化配置。

综上所述, 配微协同规划通过建立双层优化架构、实现功率柔性交互、构建双模式运行机制、完善碳减排协同体系, 形成了配电网与微电网群的深度融合, 在“非灾近零碳经济”和“灾时低碳稳定”阶段都具有重要意义, 为城市配电系统的低碳转型和弹性提升提供了系统性解决方案, 是实现新型电力系统目标的重要技术路径。

4 低碳城市配电系统弹性提升规划方法

在电碳协同框架下, 城市配电系统弹性提升规划面临着新能源出力不确定性、碳价格波动、极端事件冲击等多重不确定性因素, 传统确定性规划方法难以有效应对。本章系统阐述面向低碳城市配电系统弹性提升的规划求解方法, 包括随机规划、鲁棒优化、分布鲁棒优化、DDU 规划方法、大规模分解方法和人工智能优化方法, 为实现“安全-经济-低碳”三元均衡提供技术支撑。

随机规划通过概率分布描述不确定性参数, 在期望意义下寻求最优解, 是处理配电系统不确定性规划问题的经典方法, 与前文基于场景生成的极端

场景构建方法相匹配。文献[63]基于两阶段随机规划弹性提升方法, 第一阶段确定设备加固和应急资源配置等投资决策, 第二阶段在台风强度和路径不确定性实现后进行运行优化, 提升配电网的弹性水平; 文献[64]提出了考虑长期不确定性的配电网多阶段随机规划模型, 通过动态规划方法刻画不确定性信息的逐步揭示过程, 实现了配电网长期发展规划的优化决策。

鲁棒优化适用于前文基于不确定集的场景构建方法, 寻求在最坏情况下仍然可行的解, 提供了保守但安全的解决方案, 特别适用于概率分布信息不完全或极端事件影响的情况。文献[65]构建极端事件下“防御-攻击-防御”三层鲁棒优化框架, 通过最坏情况分析确定最优的设备加固策略。列约束生成算法作为求解鲁棒优化的主要方法, 通过主问题与子问题的迭代, 逐步生成最坏情况约束, 文献[66]采用列约束生成算法求解考虑碳交易不确定性的分布鲁棒优化模型, 有效平衡了经济性和鲁棒性。

分布鲁棒优化结合了随机规划和鲁棒优化的优点, 通过构建模糊集刻画概率分布的不确定性, 在最坏分布下优化期望性能, 为处理分布信息不准确问题提供了有效途径。基于 Wasserstein 距离的分布鲁棒优化可以有效刻画分布的不确定性, 文献[67]通过构建基于 Wasserstein 距离的模糊集, 有效处理了可再生能源出力、负荷需求和设备故障等多重不确定性。矩信息约束方法通过已知的分布矩信息构建模糊集, 文献[68]中采用均值、方差等低阶矩信息, 在保证计算可处理性的同时提供合理的保守程度。

DDU 规划方法作为近年来兴起的新兴技术, 专门处理不确定参数随决策变量变化而改变的复杂情况。与传统外生不确定性不同, DDU 方法能够刻画配电系统中投资决策与不确定性参数之间的内在关联, 如设备加固决策影响故障概率分布、储能配置改变需求响应不确定性等双向耦合关系。文献[69]提出了基于 DDU 的可靠性评估建模方法, 通过建立决策变量与不确定性参数之间的函数关系, 实现了运行优化和可靠性评估的耦合建模, 克服了传统方法将两者独立处理的局限性; 文献[70]研究了电池电力机车支持下的韧性机组组合问题中的 DDU 处理方法, 针对机车路径决策引起的决策依赖不确定性, 通过仿射决策规则近似和列约束生成算法, 将原本难以处理的 DDU 问题转化为可求解的混合整数线性规划问题, 有效平衡了模型准确性和计算

复杂度。文献[71]在针对配电网弹性加固中的 DDU 问题，为处理加固决策与系统脆弱性之间的决策依赖关系，文章采用分段线性近似方法对 DDU 集合进行建模，通过引入辅助变量和 McCormick 包络技术实现非线性约束的线性化，并结合 Benders 分解算法显著提升了大规模 DDU 问题的求解效率。

大规模分解方法可以通过问题结构的分解实现高效求解，解决城市配电系统规模不断扩大和电碳协同约束引入下的规划问题维数爆炸难题。Benders 分解通过将原问题分解为主问题和子问题，利用对偶理论构建切割约束，文献[72]提出了增强的 Benders 分解方法，实现了网络化微电网与本地公用电网的隐私保护协同规划运行。交替方向乘子法结合了对偶分解和增广拉格朗日方法的优点，通过引入辅助变量和增广项，实现了更好的收敛性能，文献[73]采用 ADMM 算法求解三层优化问题，实现配电系统运营商、社区微电网和智能住宅建筑的市场行为分布式优化。

随着人工智能技术的快速发展，基于机器学习和智能算法的优化方法在城市配电系统规划中得到广泛应用，能够有效处理非线性、非凸、多目标等复杂优化问题。深度强化学习通过智能体与环境的交互学习最优策略，特别适用于动态环境下的序贯决策问题，文献[12]基于贝叶斯深度强化学习方法实现主动配电网电压控制，通过在线学习不断优化控制策略。遗传算法通过模拟生物进化过程，能够

有效求解多目标、非凸优化问题，文献[74]采用遗传算法和 Pareto 前沿解决方案进行并网微电网的多目标优化配置。混合智能算法通过结合多种智能方法的优势实现优势互补，常见策略包括分层混合、并行混合和自适应混合，文献[48]提出基于多智能体系统的微电网群分布式协调控制方法，通过多算法协同实现了系统级优化。

综上所述，本章系统阐述了面向低碳城市配电系统弹性提升的规划求解方法。随机规划适用于概率信息充分的情况，鲁棒优化适用于最坏情况分析，分布鲁棒优化在两者之间提供了平衡，大规模分解方法解决了计算复杂度问题，而智能算法则为复杂非线性问题提供了新的解决思路。低碳城市配电系统弹性提升规划模型与方法相关文献总结见表 2。

5 低碳城市配电系统弹性提升策略验证方法

城市配电系统在高比例新能源、主动负荷与电碳协同约束下呈现高耦合、高不确定与多时间尺度特征，为避免极端事件下弹性提升策略出现明显的模型偏差、控制失配或碳绩效失真，应当进行弹性提升策略的有效性验证。

传统验证方法主要依赖稳态仿真和理想化假设，虽然构成了电力系统分析的基础，但在电碳协同弹性策略验证中暴露出严重不足^[75]。稳态方法的根本缺陷在于采用静态碳因子和时间平均化处理，无法捕捉碳排放的瞬时变化和动态响应特征^[76]。传

表 2 低碳城市配电系统弹性提升规划模型与方法对比

Table 2 A study of resilience-enhancement planning models and methods for low-carbon urban distribution systems

参考 文献	目标函数			规划要素				不确定性方法				
	经济/低碳	可靠性	弹性	源	网	荷	储	随机规划	鲁棒优化	分布鲁棒优化	决策依赖不确定性规划	人工智能方法
[36]	√	√		√								√
[37]	√			√		√		√				
[40]		√					√	√				
[41]	√			√			√					√
[43]	√			√								√
[44-45]	√		√	√	√				√			√
[50]	√	√		√				√				
[52]	√	√		√	√			√				
[53,56]	√	√			√							√
[54]	√	√			√			√				√
[57]			√	√				√				
[59]	√			√								√
[67]	√			√			√			√		
[70]			√	√						√	√	
[71]			√		√			√	√		√	

注：“√”表示有此项。

统稳态分析忽略了电力电子设备的快速响应、新能源出力的随机波动、以及碳价格的实时变化对系统碳排放的即时影响, 导致碳减排效果评估出现显著偏差^[7]。此外, 稳态方法无法反映系统在扰动后的动态恢复过程中碳排放的激增现象, 也无法准确评估弹性措施启动时的碳足迹变化。更为关键的是, 稳态验证无法处理多因素交互作用下的复杂反馈机制, 特别是在极端天气事件下电碳协同约束的动态演化过程, 这些局限性使得传统稳态方法难以为实际工程应用提供可靠的验证依据^[7]。

相较于传统稳态验证方法仅能提供静态时刻的碳排放快照, 考虑暂态过程的精确验证方法通过引入实时碳因子动态计算和边际碳排放建模, 实现了从静态评估向动态跟踪的根本性转变^[77-78]。电磁暂态仿真突破了稳态方法无法捕捉微秒级碳排放变化的局限, 为零排放系统的精确建模和实时优化提供了技术基础^[79]; 机电暂态仿真克服了稳态分析忽略新能源机组动态特性的不足, 重点分析发电机组启停过程、调频调压响应与碳减排的动态协调关系^[80-81]; 数字孪生平台解决了传统方法缺乏实时反馈验证的问题, 通过构建物理-数字空间实时碳排放映射, 实现高保真度电碳协同模型的动态验证^[82-83]; 硬件在环仿真弥补了纯数值仿真无法验证实际设备响应的缺陷, 通过关键设备的真实响应测试验证控制器硬件与碳管理系统的协调效果^[84-85]。

由于暂态验证方法在考虑气候变化长期影响时会带来维数爆炸的难题, 长周期气候气象精准仿真验证方法构建了多年度、多灾种的动态综合验证体系。该方法突破了暂态分析在长期气候建模中面临的计算复杂度指数增长问题, 通过降维建模技术和多尺度时间解耦, 将气候变化的慢变过程与电力系统的快变过程分离处理, 有效解决了全时域精细化仿真带来的计算负担^[86-87]。多速率仿真技术通过构建不同时间尺度的解耦算法, 将秒级的电力系统暂态过程与年代际的气候演化过程分层处理。快变量采用细时间步长进行高精度仿真, 慢变量则采用粗时间步长进行长期趋势分析, 通过插值和外推技术实现不同时间尺度间的信息传递^[88]。变形技术(morphing techniques)通过对历史气象数据进行统计变形, 生成未来气候情景下的极端天气序列, 避免了对所有可能气候状态的穷举计算^[89-90]。

基于联合国气候变化大会(COP)气候协议框架的标准化气候模型为长周期仿真提供了统一的数据

交换和模型集成基础。通过采用 IPCC(政府间气候变化专门委员会)推荐的气候情景模型, 结合 RCP(代表性浓度路径)和 SSP(共享社会经济路径)情景设定, 实现了气候变化长期趋势与电力系统碳排放模型的无缝集成^[91-92]。在以上仿真验证的基础上, 通过真型实验、示范工程等实践验证, 才能确保弹性提升策略的有效性, 实现工程应用。

综上所述, 低碳城市配电系统弹性提升策略的验证需要构建涵盖“稳态-暂态-长周期-实践”的多层次验证体系, 实现计算精度与效率的平衡优化。未来发展趋势将朝着验证流程规范化、精度评估标准化方向演进, 通过多保真度建模策略和自适应精度调节机制, 在保证验证准确性的同时提高计算效率。随着量子计算、边缘计算等新兴技术的融合应用, 以及国际标准化进程的推进, 电碳协同弹性策略验证方法将更加成熟和完善。同时, 数字孪生技术与人工智能的深度融合将推动验证方法向智能化、自动化方向发展, 实现从被动验证向主动优化的转变, 为构建安全、经济、低碳的新型配电系统提供坚实的技术支撑和科学保障。

6 结论

在“双碳”目标驱动下, 城市配电系统正经历从“安全-经济”二元平衡向“安全-经济-低碳”三元均衡的深刻转型。本文立足电碳协同视角, 系统构建了城市配电系统弹性提升规划的理论框架, 阐述了电碳协同下城市配电系统的核心要素变化。

1) 在场景构建方面, 综述了“灾害重现”和“新场景涌现”两类建模方法, 针对“新场景涌现”方法, 面对多重不确定性, 综述了基于场景生成、不确定集、模糊集、决策依赖不确定性、人工智能的处理方法。

2) 在规划模型方面, 构建了“微电网、微电网群、中低压网架和配微协同”的多目标、多主体规划框架。

3) 在规划方法方面, 发展了随机规划、鲁棒优化等不确定性处理方法。在策略验证方面, 建立了涵盖稳态-暂态-长周期的多层次验证体系, 突破了传统稳态方法的局限性。

尽管如此, 当前研究仍面临多灾害耦合建模、多时间尺度协调机制、高比例可再生能源系统稳定性控制等关键挑战。未来研究将朝着智能化、精准化、系统化方向发展, 为电碳协同弹性提升提供强大支撑。

参考文献 References

- [1] 郑颖, 逯非, 刘晶茹, 等. 我国典型城市化石能源消费 CO₂ 排放及其影响因素比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3315-3327. ZHENG Ying, LU Fei, LIU Jingru, et al. Comparative study on CO₂ emissions from fossil energy consumption and its influencing factors in typical cities of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3315-3327.
- [2] 易俊, 赵明欣, 秦晓辉, 等. 电碳协同理论技术探索与实践[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025: 1-17[2025-08-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242745>. YI Jun, ZHAO Mingxin, QIN Xiaohui, et al. Research on exploration and practice of electric-carbon coordination theory and technology[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-17[2025-08-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242745>.
- [3] 国务院. 2030 年前碳达峰行动方案[R]. 北京: 国务院, 2021. State Council. Peak carbon action programmer by 2030[R]. Beijing, China: State Council, 2021.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于新形势下配电网高质量发展的指导意见[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2024. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding opinions on high-quality development of distribution networks under the new situation[R]. Beijing, China: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2024.
- [5] 别朝红, 卞艺衡, 张理寅, 等. 新型电力系统应对极端事件的风险防范与应急管理关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7049-7067. BIE Zhaohong, BIAN Yiheng, ZHANG Liyin, et al. Key technologies of risk prevention and emergency management against extreme events for new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7049-7067.
- [6] QIU J, ZHAO J H, WEN F S, et al. Challenges and pathways of low-carbon oriented energy transition and power system planning strategy: a review[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(6): 5396-5416.
- [7] 马超, 秦晓辉, 刘晓瑞, 等. 新型电力系统电碳协同研究综述: 量化方法、关键技术与应用展望[J/OL]. 高电压技术, 2025: 1-20[2025-08-04]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250639>. MA Chao, QIN Xiaohui, LIU Xiaorui, et al. Review of research on electricity carbon collaboration in new type power systems: quantitative methods, customs construction technologies and application prospects[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-20[2025-08-04]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250639>.
- [8] LYONS M, DURRANT P, KOCHHAR K. Reaching zero with renewables: capturing carbon[R]. Abu Dhabi, United Arab Emirates: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [9] CUI Q, LI X F, BAI X X, et al. How the synergy effect between renewable electricity deployment and terminal electrification mitigates transportation sectors' carbon emissions in China?[J]. Transport Policy, 2025, 166: 135-147.
- [10] LIN B Q, ZHAO H S. Green electricity system dynamics under the carbon border adjustment mechanism[J]. Renewable Energy, 2026, 256: 124069.
- [11] YUAN M, THELLUFSEN J Z, LUND H, et al. The electrification of transportation in energy transition[J]. Energy, 2021, 236: 121564.
- [12] KARLSSON I, ROOTZÉN J, TOKTAROVA A, et al. Roadmap for decarbonization of the building and construction industry—a supply chain analysis including primary production of steel and cement[J]. Energies, 2020, 13(16): 4136.
- [13] KHODAEI A, SHAHIDEHPOUR M. Microgrid-based co-optimization of generation and transmission planning in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1582-1590.
- [14] LEUNG C K, KO J, GUO C L. Weathering the storm: analyzing the impact of extreme climate events on energy consumption across 141 countries[J]. Innovation and Green Development, 2025, 4(3): 100255.
- [15] LIAO W, LIU D, XUE Y S, et al. Power generation expansion planning considering natural disaster scenarios under carbon emission trajectory constraints[J]. Applied Energy, 2024, 361: 122832.
- [16] GULAKHMADOV A, TAVLINTSEV A, PANKRATOV A, et al. A statistical-based approach to load model parameter identification[J]. IEEE Access, 2021, 9: 66915-66928.
- [17] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2764-2774. YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.
- [18] 刘哲远, 邢海军, 程浩忠, 等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 169-178. LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, et al. Bi-level optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission flow and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 169-178.
- [19] 李明昊, 杨祺铭, 李更丰, 等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 93-104. LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 93-104.
- [20] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [21] BURPEE D, DABAGHI H, JACKSON L, et al. U. S. -Canada power system outage task force: final report on the implementation of task force recommendations[R]. Washington, USA: United States Federal Energy Regulatory Commission, 2006.
- [22] 叶畅, 苗世洪, 李姚旺, 等. 基于改进不确定边界的主动配电网鲁棒优化调度[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4084-4095. YE Chang, MIAO Shihong, LI Yaowang, et al. Robust optimal scheduling for active distribution network based on improved uncertain boundary[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4084-4095.
- [23] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084-4095. LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.
- [24] LIN Y L, BIE Z H. Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1266-1279.
- [25] ROALD L A, POZO D, PAPAVALIOU A, et al. Power systems

- optimization under uncertainty: a review of methods and applications[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 214: 108725.
- [26] LI K, YANG F, WANG L P, et al. A scenario-based two-stage stochastic optimization approach for multi-energy microgrids[J]. *Applied Energy*, 2022, 322: 119388.
- [27] OSIFEKO M, MUNDA J. Scenario-based stochastic optimization for renewable integration under forecast uncertainty: a South African power system case study[J]. *Processes*, 2025, 13(8): 2560.
- [28] DONG Y C, ZHANG H L, WANG C, et al. Robust optimal scheduling for integrated energy systems based on multi-objective confidence gap decision theory[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 228: 120304.
- [29] VERÁSTEGUI F, LORCA A, OLIVARES D E, et al. An adaptive robust optimization model for power systems planning with operational uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4606-4616.
- [30] LIU M, KONG X Y, MA C, et al. Multi-stage fully adaptive distributionally robust unit commitment for power system based on mixed approximation rules[J]. *Applied Energy*, 2024, 376: 124051.
- [31] CHEN Y, WEI W. Robust generation dispatch with strategic renewable power curtailment and decision-dependent uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(5): 4640-4654.
- [32] TAN T, YANG M, XIE R, et al. Adjustable robust optimization with decision-dependent uncertainty for power system problems: a review[J]. *Energy Conversion and Economics*, 2025, 6(3): 155-169.
- [33] WANG Y, HUG G, LIU Z J, et al. Modeling load forecast uncertainty using generative adversarial networks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106732.
- [34] 马 钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(19): 6931-6945.
MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(19): 6931-6945.
- [35] 刘瀚琛, 王 冲, 鞠 平. 双碳背景下综合能源电力系统弹性分析与提升研究综述[J]. *电气工程学报*, 2023, 18(2): 108-124.
LIU Hanchen, WANG Chong, JU Ping. Review on resilience analysis and enhancement of integrated energy power systems considering dual carbon goal[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, 18(2): 108-124.
- [36] JIANG Y B, XU J, SUN Y Z, et al. Coordinated operation of gas-electricity integrated distribution system with multi-CCHP and distributed renewable energy sources[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 237-248.
- [37] 严 欢, 胡俊杰, 黄旦莉, 等. 考虑电动汽车虚拟电厂灵活性和高比例光伏接入的配电网规划[J]. *电力建设*, 2022, 43(11): 14-23.
YAN Huan, HU Junjie, HUANG Danli, et al. Distribution network planning considering the flexibility of EV virtual power plants and high penetration of PV[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(11): 14-23.
- [38] ALRUMAYH O, BHATTACHARYA K. Flexibility of residential loads for demand response provisions in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6284-6297.
- [39] XIA S W, DING Z H, DU T, et al. Multitime scale coordinated scheduling for the combined system of wind power, photovoltaic, thermal generator, hydro pumped storage, and batteries[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2227-2237.
- [40] EL-SAYED W, AWAD A, AZZOUZ M, et al. Mobile energy storage for inverter-dominated isolated microgrids resiliency enhancement through maximizing loadability and seamless reconfiguration[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, 10(4): 89-102.
- [41] 苏家鹏, 金安君. 研究成本及碳排放的微电网发电运行的优化模型[J]. *可持续发展*, 2022, 12(5): 1486-1500.
SU Jiapeng, JIN Anjun. Studies of microgrid power operation optimization model considering cost and carbon emission[J]. *Sustainable Development*, 2022, 12(5): 1486-1500.
- [42] 田福银, 马 骏, 王 灿, 等. 基于双层主从博弈的综合能源系统多主体低碳经济运行策略[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 184-193.
TIAN Fuyin, MA Jun, WANG Can, et al. Multi-agent low-carbon and economy operation strategy of integrated energy system based on Bi-level master-slave game[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 184-193.
- [43] 赵 峰, 罗 鑫, 高锋阳. 考虑网内实时电价的微电网经济优化运行研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(9): 53-60.
ZHAO Feng, LUO Xin, GAO Fengyang. Research on optimal operation for micro-grid considering real-time price[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2020, 41(9): 53-60.
- [44] WANG Y, ROUSIS A O, STRBAC G. A three-level planning model for optimal sizing of networked microgrids considering a trade-off between resilience and cost[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5657-5669.
- [45] CAI S, XIE Y Y, ZHANG Y P, et al. A simulation-assisted proactive scheduling method for secure microgrid formation under static and transient islanding constraints[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(1): 272-285.
- [46] 楼冠男, 王 雷, 林 达, 等. 微电网协同运行关键技术综述[J]. *浙江电力*, 2025, 44(6): 3-19.
LOU Guannan, WANG Lei, LIN Da, et al. Review on key technologies for coordinated operation of microgrid cluster[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2025, 44(6): 3-19.
- [47] PAN W J, SHITTU E. Policies and power systems resilience under time-based stochastic process of contingencies in networked microgrids[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2024, 71: 9460-9480.
- [48] HAN Y, ZHANG K, LI H, et al. MAS-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: a comprehensive overview[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(8): 6488-6508.
- [49] CHEN Z Y, YU X H, XU W Y, et al. Modeling and control of islanded DC microgrid clusters with hierarchical event-triggered consensus algorithm[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2021, 68(1): 376-386.
- [50] 吉 祥, 谢 敏, 曾 东, 等. 考虑风光互补特征的多微网系统自治经济调度模型[J]. *浙江电力*, 2022, 41(10): 97-105.
JI Xiang, XIE Min, ZENG Dong, et al. Autonomous economic dispatch of multi-microgrid systems considering complementarity between wind and solar power[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2022, 41(10): 97-105.
- [51] AWAL M A, YU H, TU H, et al. Hierarchical control for virtual oscillator based grid-connected and islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(1): 988-1001.
- [52] YANG Y H, PEI W, HUO Q H, et al. Coordinated planning method of multiple micro-grids and distribution network with flexible interconnection[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 2361-2374.
- [53] LI J G, ZHANG L, ZHANG B, et al. Coordinated planning for flexible interconnection and energy storage system in low-voltage distribution networks to improve the accommodation capacity of photovoltaic[J]. *Global Energy Interconnection*, 2023, 6(6): 700-713.
- [54] AHMED H M A, ELTANTAWY A B, SALAMA M M A. A planning

- approach for the network configuration of AC-DC hybrid distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2203-2213.
- [55] BIAN X H, YUAN C Q, TANG J R, et al. AC/DC hybrid electrical power distribution network planning approach with network topology-variables considering harmonic interaction influence in port[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 214: 115483.
- [56] LIN W C, HSIAO C H, HUANG W T, et al. Network reconfiguration framework for CO₂ emission reduction and line loss minimization in distribution networks using swarm optimization algorithms[J]. *Sustainability*, 2024, 16(4): 1493.
- [57] YE Z G, CHEN C, CHEN B, et al. Resilient service restoration for unbalanced distribution systems with distributed energy resources by leveraging mobile generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(2): 1386-1396.
- [58] CHEN B, WANG J H, LU X N, et al. Networked microgrids for grid resilience, robustness, and efficiency: a review[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 18-32.
- [59] 王书征, 吴守豪, 吴志, 等. 风光不确定条件下考虑双边交易的配电网协同规划[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(3): 97-107, 227. WANG Shuzheng, WU Shouhao, WU Zhi, et al. Collaborative planning of distribution-grid and micro-grid considering bilateral transactions under wind-solar uncertain conditions[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(3): 97-107, 227.
- [60] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(6): 2869-2879.
- [61] GU C J, LIU Y K, WANG J X, et al. Carbon-oriented planning of distributed generation and energy storage assets in power distribution network with hydrogen-based microgrids[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(2): 790-802.
- [62] ZHU Z Q, CHAN K W, BU S Q, et al. Nash equilibrium estimation and analysis in joint peer-to-peer electricity and carbon emission auction market with microgrid prosumers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5768-5780.
- [63] HOU H, TANG J Y, ZHANG Z W, et al. Resilience enhancement of distribution network under typhoon disaster based on two-stage stochastic programming[J]. *Applied Energy*, 2023, 338: 120892.
- [64] HAN Q, LI W J, YANG N, et al. Multi-stage stochastic planning of distribution networks considering long-term uncertainty[C]//2024 5th International Conference on Clean Energy and Electric Power Engineering (ICCEPE). Yangzhou, China: IEEE, 2024: 434-441.
- [65] 卞艺衡, 别朝红. 面向弹性提升的智能配电网远动开关优化配置模型[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(3): 33-39. BIAN Yiheng, BIE Zhaohong. Resilience-enhanced optimal placement model of remote-controlled switch for smart distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(3): 33-39.
- [66] JIA T T, CHEN H Y, ZENG X, et al. Mitigating risk and emissions in power systems: a two-stage robust dispatch model with carbon trading[J]. *Processes*, 2024, 12(11): 2497.
- [67] LI J K, XU Z Y, LIU H, et al. A Wasserstein distributionally robust planning model for renewable sources and energy storage systems under multiple uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(3): 1346-1356.
- [68] BABAEI S, ZHAO C Y, FAN L. A data-driven model of virtual power plants in day-ahead unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 5125-5135.
- [69] HU B, PAN C C, SHAO C Z, et al. Decision-dependent uncertainty modeling in power system operational reliability evaluations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5708-5721.
- [70] YANG X, LIU X H, ZHAO T Y, et al. Distributionally robust resilient unit commitment supported by battery-electric locomotives under decision-dependent uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2025, 16(5): 4197-4212.
- [71] MA D L, CAO X Y, ZENG B, et al. Proactive robust hardening of resilient power distribution network: decision-dependent uncertainty modeling and fast solution strategy[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 14953-14966.
- [72] LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M. Privacy-preserving collaborative operation of networked microgrids with the local utility grid based on enhanced Benders decomposition[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2638-2651.
- [73] MANSOURI S A, NEMATBAKHS E, RAMOS A, et al. A robust ADMM-enabled optimization framework for decentralized coordination of microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2025, 21(2): 1479-1488.
- [74] JAHANGIR H, AHMADIAN A, GOLKAR M A. Multi-objective sizing of grid-connected micro-grid using Pareto front solutions[C]//2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA). Bangkok, Thailand: IEEE, 2015: 1-6.
- [75] ZHANG Y, ZHAO X G, ZHOU Y, et al. Impact of combined environmental policies on carbon emission reduction: a system dynamics analysis[J]. *Utilities Policy*, 2025, 94: 101912.
- [76] MISCONEL S, LEISEN R, MIKURDA J, et al. Systematic comparison of high-resolution electricity system modeling approaches focusing on investment, dispatch and generation adequacy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111785.
- [77] LIU J J, ZHAO H, WANG S Y, et al. Real-time emission and cost estimation based on unit-level dynamic carbon emission factor[J]. *Energy Conversion and Economics*, 2023, 4(1): 47-60.
- [78] TIAN Y X, REN X, LI K K, et al. Carbon dioxide emission forecast: a review of existing models and future challenges[J]. *Sustainability*, 2025, 17(4): 1471.
- [79] WEI T, LI H X, MIAO J F. Integration and development path of smart grid technology: technology-driven, policy framework and application challenges[J]. *Processes*, 2025, 13(8): 2428.
- [80] LIU Z H, XI L, QUAN Y, et al. Brain-inspired collaborative power dynamic dispatch for the digital twin smart generation system[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, 61(1): 1420-1430.
- [81] ARRAÑO-VARGAS F, KONSTANTINOU G. Modular design and real-time simulators toward power system digital twins implementation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(1): 52-61.
- [82] WU C H, CUI Z X, XIA Q, et al. An overview of digital twin technology for power electronics: state-of-the-art and future trends[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(9): 13337-13362.
- [83] LIU Y S, QING X L, CHEN G P. One-cycle digital twin-based multiparameter identification of power electronic converters with simple implementation and high accuracy[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 3537311.
- [84] GUPTA S, SHUKLA A, ABUSARA M. Integrated co-simulation and hardware-in-the-loop testing for microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(9): 9082-9094.
- [85] SALVADORI F, LEANDRO P G M, SOARES M B, et al. Hardware-in-the-loop (HIL) simulation: modeling, characterization and analysis of a distributed energy resources in a microgrid network[C]//IECON 2024-50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Chicago, USA: IEEE, 2024: 1-6.

[86] MING H, LIN M Y, GAO C W, et al. Towards the prospect of carbon-neutral power system 2060: a power-meteorology-society systematic view[J]. Heliyon, 2024, 10(6): e27970.

[87] ZEYRINGER M, PRICE J, FAIS B, et al. Designing low-carbon power systems for Great Britain in 2050 that are robust to the spatio-temporal and inter-annual variability of weather[J]. Nature Energy, 2018, 3(5): 395-403.

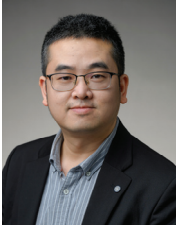
[88] 夏 越, 陈 颖, 杜松怀, 等. 综合能源系统多时间尺度动态时域仿真关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 97-110.
XIA Yue, CHEN Ying, DU Songhuai, et al. Key technologies for multi-time-scale dynamic time-domain simulation of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 97-110.

[89] RODRIGUES E, FERNANDES M S, CARVALHO D. Future weather generator for building performance research: an open-source morphing tool and an application[J]. Building and Environment, 2023, 233: 110104.

[90] GAO Y N, DONG H, HU L J, et al. A morphing-based future scenario generation method for stochastic power system analysis[J]. Sustainability, 2024, 16(7): 2762.

[91] ANDERSON O, BRACKEN C, BURLEYSON C D, et al. Improved decarbonization planning through climate resiliency modeling[J]. IEEE Access, 2024, 12: 128494-128508.

[92] AKPAN J, OLANREWaju O. Towards a simplified and integrated model for climate-energy resources and systems planning[C]//2024 IEEE 12th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). Oshawa, Canada: IEEE, 2024: 134-144.



李更丰(通信作者)
1984—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事弹性电力系统及其恢复力评估、用户与电网友好互动、综合能源系统的规划与可靠性等方面的研究
E-mail: gengfengli@xjtu.edu.cn

LI Gengfeng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-09-16 修回日期 2025-09-26 编辑 陈 蔓