



新型电力系统形态构建的关键机制与技术路径

别朝红^{*}, 李更丰, 肖云鹏, 段超, 邵成成, 李宇骏, 陈晨, 赵天阳, 张耀

西安交通大学电气工程学院, 西安 710049

^{*} E-mail: zhbic@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-07-01; 接受日期: 2025-11-13; 网络版发表日期: 2026-01-14

国家自然科学基金(批准号: U23B6006)资助项目

摘要 新型电力系统是电力行业支撑全社会碳达峰碳中和目标实现的关键载体。本文围绕新型电力系统形态构建, 从物理网架结构与输电形式、电力电量平衡与稳态构建机制、电压-同步-频率-振荡稳定机制、系统故障防御与应急恢复机制、电碳协同的市场机制5个方面, 分析新型电力系统建设进程中的关键挑战。进一步, 在研判国内外研究现状和发展动态的基础上, 探讨科学问题和未来技术路径。最后, 总结新型电力系统形态构建中的关键性与颠覆性技术并提出相关政策扶持建议, 推进清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统建设, 助力保障国家电力能源安全。

关键词 新型电力系统, 电力系统形态, 电力电量平衡, 电力系统安全, 电力系统稳定, 电力市场

1 引言

近年来, 中国积极应对气候变化, 并提出了“双碳”目标。减少化石燃料的使用和大力发展新能源是降低碳排放的根本性措施。截至2024年, 我国现有总发电装机容量29.2亿千瓦, 其中新能源装机容量14.7亿千瓦, 超过全国总装机容量的50.4%。为实现“双碳”目标, 实现电力系统的低碳转型, 亟需构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统。

与传统电力系统相比, 新型电力系统具有高比例新能源接入、高比例电力电子设备接入、发电和用能高自由度等特征, 为其未来形态构建的研判和实现带

来挑战。如图1所示, 随着沙戈荒、海上风电、分布式新能源等规模化发展与柔直、储能、低频输电等新技术融合, 电力系统向“大互联、小平衡”的新型物理架构演进, 电力系统的物理网架结构与输电形式愈发复杂, 呈现直流、交流、工频、低频、集中式与分布式并举, 异步分区与柔性互联共存的新特点, 亟需开展演化分析探明电网稳态、动态、暂态多尺度运行的安全路径, 研究新型电力系统物理架构演化规律。同时, 随着强不确定性规模化新能源接入, 电力电量平衡向概率化、多区域、多主体、源网荷储协同的非完全实时平衡模式转变, 保供应与促消纳难题交织。电力系统面临供需耦合强不确定性、系统运行强开放性、多元

引用格式: 别朝红, 李更丰, 肖云鹏, 等. 新型电力系统形态构建的关键机制与技术路径. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 97-112

Bie Z H, Li G F, Xiao Y P, et al. Key mechanisms and technical paths for the construction of new power system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 97-112, doi: 10.1360/SST-2025-0169

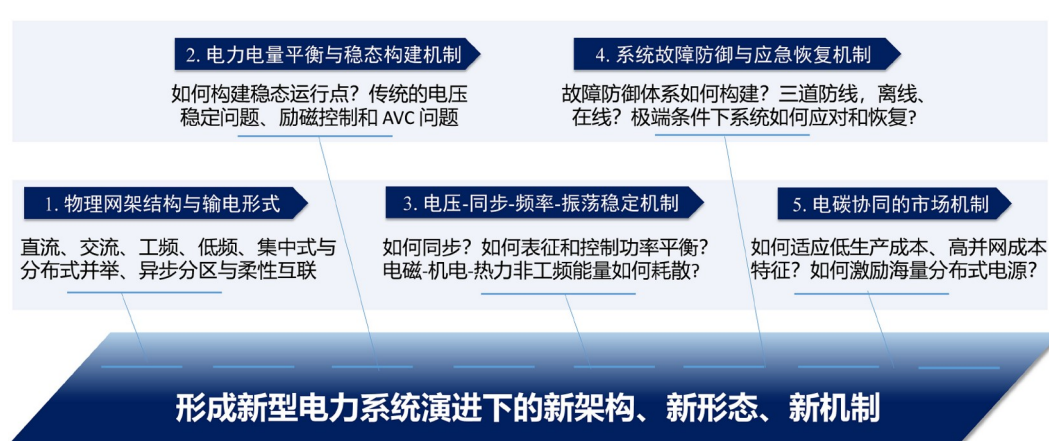


图 1 (网络版彩图)新型电力系统的架构、形态与机制

Figure 1 (Color online) Architecture, form and mechanism of the new power system.

主体强策略性的挑战,亟需研究电力电量平衡与稳态构建机制,揭示高比例强不确定性电源主导的多时间尺度概率化电力电量平衡机理。此外,随着系统同步-平衡机制由同步发电机物理特性主导逐渐转变为电力电子控制特性主导,同步和频率失稳机理复杂化,故障功率冲击全局化、电力电子控制打破传统电力电子控制中电磁-机电-热力动态过程时间尺度分离良好的特性,加剧多尺度振荡风险,亟需探索适应系统本质安全构建机制及其演化规律,研究高度电力电子化系统的电压-同步-频率安全稳定机理和新型振荡耗散机理。针对高比例新能源强不确定性威胁和日益频发的极端自然灾害,亟需构建新型电力系统故障防御与应急恢复机制,提升极端事件的应对能力。最后,针对当前电力市场适应于以燃煤、燃气等火电机组为主的电源结构,难以解决价格效用低下、电力系统减碳需求支撑缺乏、灵活调节和低碳资源规划投资激励欠缺等问题,亟需揭示新型电力系统平衡-安全-绿色-经济多元价值协同机理,构建电碳协同的市场机制。

为此,本文聚焦新型电力系统形态构建的关键机制与技术路径。考虑新型电力系统作为实现“双碳”目标的关键载体,解析新型电力系统的新形态、新架构、新机制,从物理网架结构与输电形式、电力电量平衡与稳态机制、电压-同步-频率-振荡稳定机制、系统故障防御与应急恢复机制、电碳协同的市场机制5个方面,分析新型电力系统演进中的关键挑战,并在研判国内外研究现状和发展动态的基础上,探讨科学问

题和未来技术路径,总结新型电力系统形态构建中的关键性与颠覆性技术并提出相关政策扶持建议,助力推进清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统建设。

2 新型电力系统形态构建的关键挑战

2.1 物理网架结构与输电形式

在“双碳”目标驱动下,沙戈荒大型风光基地、深远海风电集群与分布式新能源的规模化发展,正推动电力系统物理形态向“大互联、小平衡”架构加速演进。这一过程中,电力电子化设备占比攀升与多层级电网耦合特性加剧,物理网架与输电技术面临既要通过特高压/柔直实现跨区资源调配,又需依托分层分区网架维持局部电网稳定的底层矛盾。这要求同步推进网架架构与输电技术创新,构建“分层分区、柔性互联”的新型物理架构。

新型电力系统物理网架结构与输电形式的演化面临地理、技术经济、稳定性边界、多目标决策、推演仿真等多重挑战:地理上,沙戈荒、海上风电等新能源基地远离负荷中心,现有交流网架难以支撑远距离大容量输电;技术经济层面,高比例电力电子设备降低系统惯量,而柔直关键器件可靠性较低,推升单位造价;稳定性方面,新能源机组短路比不足时易引发暂态失稳,需构建动态安全域评估体系;多目标决策方面,网架结构优化需在“大互联”跨区资源调配与“小平

衡”局部自治间实现帕累托最优,需同步处理市场交易(如跨区电价差)、安全约束(N-1准则)、稳定边界(功角/电压稳定)等多元要素;推演仿真方面,物理架构推演需在电网拓扑动态离散变化(如新能源接入、网架扩建)下模拟分析规划方案的技术经济特征,传统推演技术难以实现高维离散空间内非平稳序列的稳定收敛,进而难以辨别网架结构的薄弱环节。

2.2 电力电量平衡与稳态构建机制

实时功率平衡是电力系统运行的基本特征与基本要求,平衡是系统安全稳定运行的先决条件。风电、光伏出力随机、波动特征显著,随着其占比不断提升,电力系统平衡正逐步转向概率性平衡。针对日前、日内等短期问题,电化学储能、机组灵活性改造等应对措施已较为成熟。但随着新能源占比的不断提升,电力电量平衡仍面临以下诸多挑战。

首先,风、光资源具有显著的季节性。我国大部分地区处在温带季风气候区,不同季节风、光资源差异明显,风电、光伏的置信容量和可发电量波动显著,难以与负荷的季节特性完全适配。

其次,风电、光伏出力可能会出现较长持续时间的间歇。实际运行中,连续多日无风无光、小风弱光的天气时有发生,连续多日新能源平均出力维持在较低水平,将超出电化学储能、抽水蓄能等短时储能的调节范围,威胁系统平衡。

最后,风、光出力受气象事件影响显著。风、光、水等可再生能源的电力电量特征本质上取决于风速、光照、降水等气象参数,其资源特性直接受到极端气象事件的影响。近年来,国内外由高温干旱、暴风雪导致的电力供应不足事件屡有发生。随着新能源占比的提升,系统平衡对气象因素的依赖将更加显著。

2.3 电压-同步-频率-振荡稳定机制

新型电力系统的电源结构正经历从同步机主导到电力电子设备主导的结构性变革,系统的频率-电压稳定性机制随之发生根本性转变。传统电力系统的动力学特性由同步机的刚性转轴决定;而在新型电力系统中,系统的动力学特性转而由电力电子设备的控制算法决定。因此,一方面,电力电子设备的高频开关动作与控制器的快速响应特性,导致系统稳定性分析的时间尺度由机电暂态向更快的电磁暂态转变;另一方面,

控制器中的各种限幅和模式切换导致受扰后的系统在不同控制模式间快速、复杂地动态切换,给稳定性分析带来了新的挑战。

与电网的频率保持同步是换流器并网的基本要求。长时间内,这一同步过程通过锁相环(phase locked loop, PLL)来实现,PLL通过测量并网点电压信息,生成频率信号,使得换流器输出的电压电流跟踪并网点的信号,与电网保持同步。因此这一同步策略通常称为跟网型(gird-following, GFL)控制。GFL控制下的换流器基于并网点的电压信息输出指定的有功无功,通常表现为电流源特性。其稳定特性受到并网点电压波动的影响,特别是在弱电网下常常难以锁相,导致系统发生振荡失稳。

因此,近年来兴起了构网型(gird-forming, GFM)控制策略^[1,2],GFM控制模拟传统同步机的动力学特性,通过自建内电势,提供稳定的频率电压信号,在系统中表现为电压源特性,正推广应用于一些缺少同步电源的大规模新能源场站和偏远地区的弱电网场景。然而,GFM设备的动力学仍由控制器主导,其稳定机制并不完全等价于传统同步机,仍需进一步分析;此外,受限于电力电子设备的电流应力限制,其不能像传统同步机一样,在暂态下有5~8倍的过流能力^[3,4],故障下通常切换为限流控制。这就导致尽管构网型设备能够提供类似传统同步机的频率电压支撑,但运行域狭窄,故障后容易失稳。

在系统的小干扰稳定层面,电力电子设备的响应速度快,系统体现出宽频振荡特性,传统的机电暂态模式主导下的振荡模态分析不再适用,系统特征方程的阶数增高,大大增加了分析和计算的复杂度。在暂态稳定层面,GFL换流器在暂态下可能存在新的失稳形态,不再是传统意义上同步机功角的单调失稳^[5]。其低电压穿越策略缺少准确的触发判据,可能因为误判导致大规模新能源的连锁脱网^[6]。此外,不同控制模式间的切换给稳定性分析带来了新的困难,目前对于非线性切换系统的研究匮乏,特别是在系统的切换机理方面。

2.4 系统故障防御与应急恢复机制

针对极端气象灾害导致的电力系统在极端工况下的应急处置,现有研究已经取得了广泛的进展。研究内容包括基于灾害气象模型和历史数据的时序连续故障

预测建模、针对预想故障的预防性风险调度与校正, 以及应对连续故障的系统性预控制框架。然而, 现有研究大多集中在单一故障的处理上, 对灾害引发的连续故障之间的时序相关性分析不足, 同时在调度决策的校验方面也存在缺失, 无法通过风险约束的反馈形成完整的闭环管理体系。

在极端故障后的恢复阶段, 即黑启动恢复过程中, 电力系统需要进行多阶段的源网荷相互协调, 这一过程包括系统分层分区决策、黑启动方案的制定、网架重构决策以及负荷恢复决策。美国阿贡国家实验室能源系统部建立了协同多类可控资源的负荷恢复序贯动作优化策略, 基于供能路径转移的负荷恢复优化策略实现了8000节点系统优化求解时间由小时级至分钟级的转变; 美国加州大学伯克利分校提出了考虑网架构建与负荷恢复协同的机组黑启动模型, 设计了线性规划松弛引导的启发式算法, 应用于美国西部电网, 实现了大规模混合整数规划问题的高效求解。然而, 新型电力系统高比例新能源、大规模电力电子设备接入等特征变化下系统运行方式与故障演化过程面临强不确定性, 系统恢复面临电压、功角和频率多维安全稳定挑战, 现有安全防御与快速恢复技术难以满足强不确定条件下的复杂大电网安全防御需求。

2.5 电碳协同的市场机制

当前, 电力市场主要针对以燃煤、燃气等火电机组为主的电源结构设计, 而在“双碳”目标驱动下, 新能源大规模接入系统, 传统的电力交易机制设计往往表现出价格效用低下、对电力系统减碳需求支撑缺乏、对灵活调节和低碳资源规划投资激励欠缺等问题。电力市场变革也面临众多挑战。一方面, 电源结构复杂演变, 保供应与促消纳的困难交织, 而电网形态的灵活变化, 也使得主配微的多层次协同交易有待统筹。另一方面, 市场主体更加多元化, 差异化主体协调互动也有待激励, 新能源边际发电成本低而系统消纳成本高, 价格机制设计亟待优化调整。因此, 亟需创新市场机制以支撑新型电力系统低碳转型, 解析新型电力系统平衡-安全-绿色-经济多元价值协同机理。

电力市场体系建设应考虑保供应、促转型、稳价格的多重目标, 在时间上, 体现电力商品与服务的价值差异, 提供灵活的交易途径; 在空间上, 向更大范围的资源配置和更小尺度的就地平衡推进, 并综合评价电

力商品的可靠性、安全性、充裕性与减碳价值。如何考虑多元主体差异化运行与成本特性, 通过优化多层次多品种全国统一电力市场体系设计, 形成适应差异化主体的电力市场大规模出清及灵活定价方法, 是新型电力系统市场机制设计的关键挑战之一。

考虑到政策红利和市场激励影响, 风电、光伏等新能源将大量以分布式电源的形式并网。在能源消费革命和再电气化进程的推动下, 涌现出电动汽车等双向互动负荷侧资源, 配用电侧负荷特性与潮流形态发生巨大变化, 负荷曲线形态特性也呈现多时空尺度复杂多重不确定性, 供需互动广度与深度不足。如何针对分布式资源发电迅猛发展的趋势, 适应分布式资源灵活泛在接入特性, 推进本地电力市场机制设计演化, 发挥海量异构分布式资源的灵活运行特性和调控响应潜力, 是本地电力市场交易需求给新型电力系统市场机制设计带来的关键挑战。

针对新能源发电并网的成本特性与火电机组的迥异特征, 如何引导电力市场、碳市场、环境权益市场的机制协同完善, 形成多元主体交易灵活高效、清洁低碳价值精准量化的电力市场体系, 是新型电力系统市场机制设计面临的又一关键挑战。

3 国内外研究现状与发展动态

3.1 物理网架结构与输电形式

针对沙戈荒基地、海上风电与负荷中心跨区输电难题, 国内已形成“特高压交流+柔性直流”混合组网、低频输电等技术路线。李岩等人^[7]提出了基于分层分区的电网强度评估模型, 将新能源基地划分为“核心调节区-缓冲互联区-负荷受端区”, 通过柔直换流站实现跨区功率转移。黄阳等人^[8]分析了柔性低频输电在海上风电中远距离送出时的技术经济边界, 即输送容量在300~2100 MW内, 低频输电方案的上界约为150~210 km。Rajib Datta等人^[9]提出了以中压柔直流汇集与高压直流传输组合的海上风电送出方案, 并从全寿命周期的角度分析其技术-经济折中性。

伴随着电力电子装备在电力系统中的广泛应用, 其在电力系统中的角色由跟网型逐渐演变为构网型。ESIG研究团队^[10]从电力电子装备与电网的交互过程出发, 系统性地分析了构网需求及构网能力的因果困境。贾焦心等人^[11]针对新型电力系统内, 从跟网型装

备与构网型装备并存现状出发,系统分析了电力电子装备混联系统惯量响应的匹配问题. 2023年4月4日,国内首次构网型风电场接入大电网全电磁暂态仿真研究,在新疆天润木垒风电一场(装机容量100 MW)完成仿真测试^[12].

在多目标协同优化与架构推演技术方面,王伟胜^[13]提出了四维联合优化框架,将地理约束(如输电走廊生态敏感度)、技术参数(柔直冗余度 $\geq N-1$)、经济指标($LCOE \leq 0.25$ 元/kWh)和安全边界(功角稳定裕度 $\geq 15\%$)纳入统一模型. 仿真显示,该模型可使跨区输电方案的综合成本降低19%^[13]. 针对传统动态规划法在高维离散空间的“维数灾难”问题,西安交通大学团队开发了基于数据与模型并驱的电网拓扑推演平台,采用分层多智能体架构:上层(区域级)优化跨区功率流,下层(节点级)调节无功补偿设备.

在物理网架结构与输电形式方面,当前研究呈现三大趋势: (1) 技术路线从单一设备创新转向“输电-储能-数字化”系统集成; (2) 方法论从传统物理模型驱动转向“数据-物理”混合驱动^[14,15]; (3) 决策维度从技术经济最优扩展到“能源-生态-社会”多目标均衡.

3.2 电力电量平衡与稳态构建机制

平衡分析指考虑一次能源特性和设备运行约束,安排发电机运行方式使之满足负荷需求,并评估发电经济性和可靠性的过程,是电力系统规划与运行的基本工具^[16]. 由于通常包括功率和能量两方面内容,平衡分析又被称为“电力电量平衡”. 新能源电力随机、波动、不可控,其大规模接入后,不同时刻的系统供需差异特性更加显著,兼顾最大最小(净)负荷时刻发电安排的调峰平衡^[17]、计及机组爬坡速率的灵活性平衡^[18]等问题也逐渐得到关注. 它们本质上是功率(电力)平衡关系在时间维度上的延展,后文仍以“电力电量平衡”统称系统中的功率与能量平衡关系.

考虑到设备状态、一次能源供给和负荷的不确定性,平衡分析本质是一个如式(1)所示的随机决策问题,主要受以下因素影响: (1) 表征一次能源供给、负荷特性的参数 $\mathcal{R}, \mathcal{L}$; (2) 所涉及的运行约束,长期的 $C_{\text{seasonal}}(\cdot)$ 和短期的 $C_{\text{short}}(\cdot)$; (3) 所涉及的不确定性来源,如新能源出力、负荷随机性和常规机组强迫停运等. 这些因素处理方式不同不仅会影响问题规模、计算效率,还会影响结果准确度.

$$\begin{aligned} \min f(p) \\ \text{s.t. } \Pr(C_{\text{seasonal}}(p, \mathcal{R}, \mathcal{L}) \leq 0) \geq \varepsilon, \\ \Pr(C_{\text{short}}(p, \mathcal{R}, \mathcal{L}) \leq 0) \geq \varepsilon. \end{aligned} \quad (1)$$

早期的平衡分析仅考虑“年最大负荷”和“年总用电量”两个负荷参数,基于历史水文统计,通过系统总可用装机容量(枯水年)与年最大负荷及备用的对比分析电力平衡,考虑一定的机组年利用小时数(平水年)分析电量平衡. 这种简化处理难以反映负荷波动对机组发电量的影响. 为此,文献^[19]提出了持续负荷曲线概念,将机组强迫停运等效为负荷增加,建立了基于卷积运算的随机生产模拟方法. 该方法不仅能考虑源、荷随机性,还能同时提供发电经济性和可靠性指标,在系统规划中广泛应用^[20]. 为实现有限水电电量的高效利用,我国学者提出了等效电量函数法,该方法是国际上公认的效率和精度最优的随机生产模拟算法^[21]. 典型日模拟是另一个广泛使用的电力电量平衡工具,通过典型季节最大负荷日机组运行方式安排,计算系统电力盈余和电量缺口^[22]. 它弥补了随机生产模拟无法考虑负荷时序波动、开展调峰分析的不足,但对长周期电量的估计有偏差(仅考虑最大负荷日),同时也无法提供概率性的指标.

针对大规模新能源接入的挑战,研究者基于风电、光伏的分布特性,构建了(时序)多状态机组模型将其纳入随机生产模拟框架^[23],并引入频率卷积分析波动性影响^[24],但仍无法完整地考虑各类机组的运行约束和协同配合. 在典型日模拟中,采用多场景曲线描述风电、光伏出力的随机性^[25],但仅通过数个典型日或典型场景难以涵盖负荷和新能源出力的全部情形.

有较多研究推荐采用基于8760 h全场景模拟的平衡分析应对新能源随机、波动的挑战^[26,27]. 为此,研究者提出了随机抽样^[28]、ARMA (auto regressive moving average)^[29,30]、随机微分方程^[31]和生成对抗网络^[32]等多种新能源出力序列模拟方法,并借助Copula函数^[33,34]等工具考虑了新能源场站及其与负荷曲线的相关性.

3.3 电压-同步-频率-振荡稳定机制

国内外对于电压-同步-频率-振荡稳定机制的研究从小干扰和暂态稳定性两个方面展开.

对于小干扰稳定性分析,主流研究方法包括状态

空间法^[33~36]和阻抗法^[37]两种。此外还有复转矩分析法^[37]等。状态空间法由传统系统的机电暂态稳定性分析沿用而来,但对于新型电力系统,换流器的控制策略复杂,特征方程阶数高,造成维数灾难。阻抗法在频域下研究系统的输入输出特性,通过阻抗表示系统的开环传递函数,并通过奈奎斯特判据导出了稳定性结论^[38]。在实际工程中阻抗可以通过扫频获得,因此阻抗法适用于黑盒模型,但缺少对稳定机理的解释。复转矩分析法将高阶系统映射到二阶标准系统,可以分析子系统间的交互作用,物理意义明确,但模型降阶存在误差,且适用性有限。文献[39]通过状态方程推导出了GFL换流器并网系统小干扰稳定的解析判据,文献[40]通过状态空间法分析了短路比对于系统小干扰稳定的影响,计算了特定控制下系统的临界短路比。文献[41]建立了 $d-q$ 旋转坐标系下的阻抗模型,得出了稳定性分析结论,即换流器的小干扰失稳是由 $q-q$ 通道的负电阻特性导致的;而文献[42~44]则分别进行了序坐标系和全局极坐标系下的阻抗建模与分析。文献[45]建立了电气转矩模型,指出GFL换流器的小干扰失稳由系统的等效正阻尼决定,并分别给出了系统正阻尼和负阻尼的运行范围。在GFM换流器的小干扰稳定方面,文献[46]通过频域模型研究了不确定线路阻抗下的小干扰稳定性,并通过简单的几何关系给出了系统稳定的直观判据。文献[47]研究了采用直流电压同步的GFM换流器的低频振荡问题,并提出了一种通过 q 轴电压前馈的振荡抑制方法。文献[48]研究了GFL和GFM共同并网下的小干扰稳定性,将特征值问题转化为一个半正定规划问题,给出了系统强度的评估方法。

对于暂态稳定分析,现有的研究仍大多依赖数值仿真,传统的分析策略如等面积法和暂态能量函数法也在近年来的研究中得到了推广。文献[49]发现了GFL换流器的失稳新形态,表现为多摆失稳,并揭示系统稳定边界由一不稳定极限环表示,给出了极限环的存在条件和唯一性定理。文献[50]研究了不同PLL下系统的暂态稳定性,提出了一种自适应PLL的设计方法。对于控制器限幅系统,文献[51]发现了进入限幅的系统轨迹总是从两个固定的点切出,将其定义为“固定切换点”,并提出了将这两点配置在系统的稳定域内实现全局稳定的策略。对于含电流限幅的GFM控制,文献[52]通过将电流限幅转化为相角限幅,揭示了不同子系统间的切换规律;文献[53]通过等面积准则分析

了不同限流策略下的稳定域大小,并给出了最大化系统稳定边界的饱和电流矢量角配置策略。文献[54]研究了电流限幅和控制限幅下的多GFM系统的暂态稳定性,提出了基于能量函数推导保证系统不进入限流模式的临界判据,并提出了一种全局稳定策略。

3.4 系统故障防御与应急恢复机制

目前,国内针对电力系统极端事件风险辨识与防御恢复已开展了较为系统的理论研究和工程示范。在应对自然灾害引发的极端风险评估方面,已经建立包括台风、地震、洪水等灾害的气象模型和电力系统响应模型,通过历史数据和仿真分析,开发了适用于极端气象条件下的电力系统风险评估和应急调度技术。西安交通大学团队构建了极端事件机理建模、高效抽样、故障推演的全链条风险评估理论,成果在广东、西北等省区应用,有效识别了极端事件下电网薄弱环节;南方电网公司在面对台风等极端天气时,已经形成了基于气象预警和电网负荷预测的联合调度机制,以提高电网的抗灾能力和恢复效率;国网浙江温州供电公司开发了台风灾害风险预测平台,集成台风实况监测、停电范围分析、停电用户预测、系统功能评估功能模块,为抗台减灾提供决策支持。

在防御恢复技术方面,分布式能源与微电网为恢复提供了多元可控资源支持,将其纳入电力系统的防御与恢复策略中,尤其是在边远地区和应急供电场景下,为提高电力系统的韧性提供了重要保障。随着新能源的广泛接入,传统的黑启动方案面临挑战,新能源参与的黑启动技术已经得到广泛研究,包括对新能源波动性和低惯性问题的应对策略等。通过创新的储能技术和智能调度算法,逐步形成了适应高比例新能源接入条件下的黑启动方案,为电力系统在极端情况下的快速恢复提供了关键支持。广东电网电力调度控制中心研发了粤港澳大湾区电力系统灾害防御及快速恢复智能调度平台,“信息感知与定量评估”、“自愈恢复优化决策”等功能模块已投入运行;国网河南公司开展了配电网雨洪灾害风险防范与恢复关键技术研究,从灾害场景推演、极限生存与快速恢复等方面提升配电网雨洪应对能力。

3.5 电碳协同的市场机制

针对全国统一电力市场的交易机制与体系设计,

重点聚焦高比例新能源并网带来的消纳需求与电力电量平衡挑战。在电能量市场方面, 当前现货市场采用的分时出清与边际定价方式, 在高比例新能源接入下出现了电价效用不足和不确定性应对难题。针对高比例新能源接入带来的负电价和零电价问题, 文献[55]在现货市场中考虑了基于新能源固定成本的分时容量电价以促使其申报非零价格。文献[56]针对具有较强时段耦合性的储能提出了基于能量块交易的现货市场出清模型。为了处理新能源发电的不确定性, 随机优化、机会约束和鲁棒优化等方法被引入现货市场出清模型以刻画资源的随机波动特性。文献[57]利用机会约束对可再生能源的不确定性进行精准建模, 并将其内化到价格形成的过程中。在辅助服务市场方面, 有学者结合高比例可再生能源并网带来的新需求, 在传统辅助服务产品中增加灵活爬坡、转动惯量等新型交易品种。文献[58]建立了电能量和调频辅助服务市场的均衡分析模型。文献[59]同时兼顾同步机组与可再生能源机组, 构建电能量、惯量与一次调频的交易框架并设计相应的市场机制。

在分布式电力交易研究方面, 随着新型电力系统的建设发展, 海量、异质、分散、泛在的分布式资源不断涌现, 而当前集中组织的批发市场存在准入门槛, 难以适应此类市场主体的并网入市需求, 为此, 国内外开展了分布式电力交易技术的研究。在交易模型与算法方面, 大量文献以端对端交易为研究对象, 引入端对端交易电力交互一致性约束, 其对偶乘子即为端对端交易价格, 并考虑配网使用费用, 建立端对端交易优化模型^[60,61]。此类文献认为各市场主体通过端对端交易形成合作局面, 也有一些文献将端对端交易的市场主体交互描述为非合作博弈。文献[62]采用非合作博弈理论描述了市场主体参与端对端交易的决策过程, 并验证了纳什均衡的存在性。此外, 为了满足分布式新能源就地消纳需求, 有学者提出通过端对端交易实现调节资源在配网内的优化配置, 如文献[63]构建了电能量和备用容量联合的端对端交易机制。在出清方法方面, 由于端对端交易模型中各交易主体相关约束联系较弱, 具有清晰的可分解结构, 因而交替方向乘子、拉格朗日松弛等计及市场主体隐私的分布式求解算法被广泛应用。

在电碳协同的市场机制设计研究方面, 目前我国电力市场和碳市场长期以来呈现相对独立设计和运行

状态, 缺乏有机结合。因此现有研究主要关注电碳协同联动与运作机理, 如多种权证的衔接互认、电碳价格传导关联性问题。在多种权证的衔接互认方面, 我国电碳交易中存在碳排放权、绿证等多种环境权益凭证, 这些权证分属于不同主管部门且彼此缺少衔接互认, 有学者针对此类问题开展不同标的体系的衔接和认证互通机制的研究。文献[64]系统分析了我国碳排放权、绿电绿证等交易机制以及电碳耦合交易的现状。文献[65]结合国内外主流电碳环境权益产品特点及衔接互认经验, 提出不同类型环境权益产品的衔接互认机制。文献[66]设计和评估了若干权证衔接的具体方案, 提出了分阶段逐步并轨可再生电力权证的规划。在电碳价格传导关联性方面, 有学者通过建模推导价格传导率等参数, 以研究电-碳价格传导机理。文献[67]构建了模拟电价和碳价波动性依存关系的Copula函数, 结果表明电价与碳价存在双向格兰杰关系; 文献[68]构建了碳成本转嫁到电价的阈值回归模型, 系统分析了电-碳市场的耦合机制和碳成本传导效果。文献[69]以澳大利亚为例, 探究碳定价机制对电价的影响, 研究成果表明区域市场的碳传递率和排放强度之间存在负相关关系。

4 新型电力系统形态构建的科学问题与技术路径

4.1 物理网架结构与输电形式

在物理网架结构与输电形式方面, 其关键的科学问题为“双碳”目标驱动下新型电力系统物理架构演化规律。“双碳”目标驱动的新型电力系统物理架构演化, 核心在于其必须破解“低碳约束下系统重构的多维矛盾与动态平衡”这一本质挑战。具体而言, “双碳”目标通过碳排放硬约束重塑电力系统演化路径, 迫使物理架构从传统的“源随荷动”向“源荷互动”转型, 而这一过程面临三大核心矛盾: 地理资源错配、动态稳定性退化和多目标协同冲突。这些矛盾的解决要求揭示物理架构演化中“碳流-电力流-信息流”的跨时空耦合机理。因此, 物理架构演化规律的研究本质是探索新型电力系统在“双碳”目标约束下, 如何通过网架重构与输电技术创新实现“安全-低碳-经济”的动态均衡, 其科学价值在于为破解“既要远距离输送新能源、又要维持局部电网强度”的底层矛盾提供理论基石。

为探明“双碳”目标驱动下新型电力系统物理架构演化规律, 需要分析新型电力系统物理架构演化边界, 提出适应“大互联-小平衡”的多级电网物理架构生成机制, 突破支撑平衡-稳定-安全-市场均衡发展的架构方案推演技术。

在演化边界方面, 聚焦“双碳”目标驱动下新型电力系统物理架构的演化边界形成机制, 重点研究地理资源分布、技术经济可行性、动态稳定性阈值与市场机制的多维耦合关系。通过构建碳-电耦合的多尺度评估模型, 解析远距离输电的生态承载能力与电网强度的关联规律; 发展基于数据-物理混合驱动的动态安全域预测理论, 突破传统机电暂态模型对高比例电力电子设备的表征局限性。

针对新型电力系统“主干网广域互联-区域网分层自治-微网灵活互动”的多层级特征, 研究适应源荷不确定性的柔性互联架构生成原理。建立功率传输与市场激励协同驱动的架构设计理论, 探索电网拓扑演化与碳流空间分布的映射关系; 提出基于复杂网络理论的弹性架构评价体系, 量化多层级电网在极端扰动下的结构鲁棒性与功能可恢复性。

面向新型电力系统物理架构规划中安全、稳定、经济、低碳目标的冲突性, 研究多目标协同推演的基础理论。构建市场-物理联合驱动的推演框架, 实现碳成本、电网投资与稳定裕度的动态均衡; 发展信息-物理耦合的故障传播阻断理论, 通过跨域风险传播路径的主动重构提升系统韧性。

4.2 电力电量平衡与稳态构建机制

新型电力系统电力电量平衡的科学问题核心在于高比例可再生能源接入下多维度不确定性耦合与多时空尺度协同机制的建立。随着风光等波动性电源渗透率提升, 系统面临源荷双侧强随机性扰动与灵活调节资源不足的结构矛盾, 需突破传统确定性平衡范式。关键科学挑战包括: 高维不确定性建模与预测技术, 需解决风光出力概率分布时变特性与极端天气事件影响机理; 多时间尺度动态平衡机制设计, 需构建分钟级频率调节、小时级经济调度与中长期容量规划的协同优化框架; 多维灵活资源聚合调控理论, 需揭示储能、需求响应与跨区互济等灵活性资源的时空耦合特性。这些问题本质上要求重构系统平衡的数学描述体系, 发展新型电力电量平衡分析方法, 并需融合气象学、数

据科学等多学科方法实现理论突破。后续研究需从整体系统视角出发, 构建“多源-多尺度-多维度”协同优化与控制的综合框架, 以支撑高渗透可再生能源电网的可靠、安全与经济运行。

在高维不确定性建模与预测技术方面, 应构建开放式耦合分析平台, 将气象观测、机组运行、负荷侧和市场交易等多源异构数据进行融合处理。通过引入时空数据同化、图神经网络与流形学习等技术, 开展可再生出力与负荷需求的联合仿真与特征抽取; 并结合随机过程与测度论, 形成能够刻画风速、光照与负荷三者耦合演化规律的“随机场-概率分布”描述体系, 为下游决策提供高精度的不确定性定量依据。

在多时间尺度动态平衡机制设计方面, 需要设计分层分布式调控架构。在分钟级频率响应层, 可应用模型预测控制与分布式鲁棒优化算法, 实现对储能和可调负荷的快速协同调节; 在小时级经济调度层, 引入随机优化与强化学习方法, 动态更新发电机组启停与交易策略; 在中长期容量规划层, 基于多目标进化算法与情景分析, 优化储能、电网建设及跨区输电通道配置, 实现资源配置的前瞻性布局。

在多维灵活资源聚合调控理论方面, 研究应着力揭示其时空耦合特性与市场激励机制。在技术层面, 需建立储能群组与需求响应的等价建模形式, 并通过混合整数随机优化对其启用策略进行协同决策; 另外, 应当引入区块链与智能合约等新兴技术, 设计面向分布式虚拟电厂和多方参与的交易机制, 保证灵活资源在能量、容量和响应速度等维度上的综合效益最优化。

综上, 多源-多尺度-多维度协同优化框架显著提升可再生能源电网平衡与响应能力。未来需基于高维不确定性建模、多时空尺度协同优化与多维灵活资源聚合调控, 构建开放式平台与分层式架构, 打破传统平衡范式, 实现高渗透可再生能源电网的可靠、安全、经济与可持续运行, 为“双碳”目标提供坚实技术支撑。

4.3 电压-同步-频率-振荡稳定机制

在多时间尺度下系统的简化分析模型方面, 由于控制结构大多较为复杂, 系统模型的阶数很高, 因此简化的分析模型无论是对于小干扰稳定还是暂态稳定都至关重要。现有模型只考虑同步环节, 在二阶模型的基础上进行改进, 但其适用性始终有一定限制, 全阶模型的计算量又太大, 因此如何建立准确的简化分析模

型, 是一个关键问题. 为此, 需聚焦多机系统的模型和分析. 现有系统中的换流器并网系统大多还是小容量的新能源或储能并入大容量的电网, 因此自然地可以基于单机无穷大系统分析. 然而, 随着系统中同步机组的进一步退出, 新能源场站并网的单机无穷大系统假设可能不再成立, 因此如何考虑不同集群内不同机组间, 不同集群间在稳定机制方面的交互影响, 是一个重要的研究方向. 其不仅需要准确、简单的分析模型, 还需要对应的研究方法. 小干扰方面, 现有的多机互联研究大多基于多馈入系统, 对于更复杂的互联系统缺少研究. 暂态方面, 扩展等面积法仅针对两群失稳的模式, 能量函数法则包含了大量网络和控制简化, 且准确的能量函数难以构造.

在小干扰稳定分析方法与镇定策略方面, 小干扰稳定性分析方法工程上基于扫频的阻抗法应用广泛, 但缺少机理上的研究, 相应的镇定控制器难以设计. 未来的系统更为复杂, 不同控制策略的换流器间交互影响, 如何准确地判断小干扰稳定性, 并给出对应的镇定设计, 是另一个关键问题. 为此, 需关注多控制策略间的协同运行. 多个同种控制策略, 或不同控制策略之间的协同运行, 不仅要保证不同换流器间有功无功的合理分配, 还要保证系统运行方式的小干扰稳定. 现有小干扰分析多侧重于换流器与电网之间的交互, 很少考虑协同运行问题. 然而实际系统中的协同运行却存在困难, 典型的如场站内多个 GFM 的并联运行, 即多个电压源之间的并联. 此外, 跟构网互联系统的失稳机理仍需进一步研究, 相关结论对于系统的网架规划、方式制定和控制器设计具有重要的指导意义.

在切换系统的机理揭示与分析方法方面, 由于换流器控制器的多种限幅, 新型电力系统下的暂态分析模型多为切换系统模型. 如何研究不同子系统之间的切换机理, 并提出对应的稳定性分析方法, 是又一个关键问题. 为此, 需探讨复杂切换系统的切换机理. 现有的切换模型主要建立在单机系统和少量模式切换的基础上, 这种场景尚能推导出若干解析结论. 然而, 当系统扩展到多机互联场景或涉及多个控制器限幅时, 其切换机理呈现出高度复杂性, 传统解析方法难以适用. 为解决这一难题, 可考虑从控制层面寻求突破, 通过优化控制策略确保换流器在暂态过程中避免进入切换状态, 或设计参数或控制使系统在切换后迅速退出. 这一技术路线的关键在于明晰系统切换的动态规律,

因此, 揭示复杂条件下系统切换的内在机理, 建立相应分析理论和方法, 也是未来的重要研究方向之一.

4.4 系统故障防御与应急恢复机制

在气候变化与新型电力系统特征变化双重影响下的复杂故障演变规律和风险量化表征方面, 主要解决内外多重不确定因素与故障机理分析问题. 在外部环境层面, 建立极端事件发生发展趋势、事件时-空演化过程分析方法; 在系统层面, 研究弱惯量、多设备耦合下电力系统故障传播和演化规律, 建立考虑源-网-荷-储弹性资源协同响应的动态模拟方法.

在应对极端场景的安全稳定防御在线自适应决策技术方面, 主要解决新型电力系统的运行方式和故障演变的高度不确定性以及电压、功角和频率等多维度的安全稳定问题相互交织所带来的系统在应对安全稳定性的复杂性. 由于需要在海量异质可控资源中进行时空协同, 安全稳定防御面临巨大的挑战. 当前的安全稳定控制决策方法依赖于离线决策和实时匹配, 存在自适应能力不足、搜索空间有限、控制成本高等问题, 难以应对复杂大电网在强不确定条件下的安全防御需求. 需要开发一种涵盖预防、紧急、校正和恢复控制的全过程、全场景在线自适应决策技术, 以满足极端工况下的需求.

在应急处置控制与常规预防、紧急、校正控制的协调策略方面, 主要解决不同控制行为间相互协调和切换的策略问题. 在正常运行工况下, 完善由预防、紧急和校正控制构成的综合防御框架. 同时, 深入研究在极端工况下应急处置与恢复控制的触发和终止条件, 构建与常规工况相协调的应急处置与恢复控制逻辑. 探讨应急处置和恢复控制在现行调度控制系统中的软硬件配置方式, 并设计应急处置和恢复控制辅助决策系统的部署策略, 确保系统在各种工况下的高效应对能力.

在考虑多维安全稳定约束的新型电力系统多阶段协调快速恢复策略方面, 主要解决多维安全稳定约束的重构与时序相依的复杂多阶段恢复过程优化问题. 建立多维安全稳定约束下运行方式应急调控序贯优化决策方法, 提出保证决策安全性的约束重构与可行性恢复技术, 建立事前资源配置与预防调控、事中故障感知与紧急调控、事后快速恢复协同策略.

围绕新型电力系统形态构建与气候变化下电力系

统内外风险进一步增加带来的安全防御挑战, 分析台风、暴雨洪涝、高温极寒等典型极端事件下新型电力系统复杂故障模型及故障传播机理, 构建风险量化指标体系与薄弱点辨识方法, 突破新型电力系统源-网-荷-储协同规划与快速恢复技术, 构建极端故障条件下电力系统应急调控的马尔可夫决策模型, 提出结合安全强化学习技术的在线决策方法, 以适应新型电力系统的应急处置需求。研究内容包括在多维安全稳定约束下, 开发运行方式的应急调控序贯优化决策方法, 以及在线约束重构和可行性恢复技术, 确保应急处置决策的有效性和安全性。在西北、华中、东南沿海等面临不同极端事件影响的地区开展示范验证。

揭示典型极端事件下高比例新能源电力系统复杂故障机理, 创建计及气候演变、系统运行与故障演化等多维不确定性因素的系统风险评估体系; 提出面向弹性提升的新型电力系统源-网-荷-储协同规划方法以及灾前-灾中-灾后多阶段优化运行策略; 攻克当前基于离线调度决策和实时匹配的电力系统安全稳定控制方法所面临的诸多挑战, 特别是在应对复杂大电网中多维安全稳定问题相互耦合, 以及协调海量可控防御资源时, 表现出明显的局限性。研究开发适应新型电力系统应急处置需求的安全强化学习技术, 提出在多维安全稳定约束条件下的运行方式应急调控序贯优化决策方法, 并引入在线约束重构与可行性恢复技术, 以确保应急处置决策的有效性和安全性。

4.5 电碳协同的市场机制

构建适应高比例新能源接入的新型电力系统的电力市场体系与机制, 其关键科学问题在于揭示新型电力系统平衡-安全-绿色-经济多元价值协同机理, 适应高比例新能源接入特征, 优化全国统一电力市场交易模式与出清定价方法, 面向海量异构分布式资源发展需求, 设计本地电力市场交易模式, 协同电碳耦合关系优化市场机制设计, 形成权衡系统安全、市场高效与低碳价值的电力市场体系。

在适应高比例新能源的全国统一电力市场体系方面, 为构建促进新能源消纳的电力市场机制, 需要在原有的电力市场基础上, 适应新能源发电的运行与成本特征。针对新型电力系统的安全保供与低碳转型需求, 建立经济高效的电力市场多目标协同方法。适应分层分区的调度体制, 构建中长期与现货市场之间的多级

衔接市场, 形成时空协同的全国统一电力市场体系设计。进而, 研究考虑安全-绿色-经济多元价值的交易品种配置, 研究设计多层次多品种市场协同优化与联合出清技术, 形成适应多元主体差异化运行与成本特性的定价方法。同时, 为计及高比例新能源接入的容量价值, 研究设计适应新能源运行行为特征的容量价值评估方法, 构建新型电力系统容量保障机制。研究形成贴合新能源、储能、柔性负荷等差异化成本结构与运行特性资源的定价理论, 解析低边际成本、高消纳成本的市场特征, 基于对系统的成本综合评估, 优化市场出清价格形成机制, 实现对新型电力系统的成本疏导。

在面向海量异构分布式资源的本地电力市场机制方面, 海量异构的分布式资源与柔性负荷是促进新能源消纳、推动电力系统减碳的重要手段。分布式可再生能源、电动汽车、分布式储能、温控负荷等能够实现电力的就地生产与消纳。随着信息通信与控制技术的发展, 上述资源形态的演化推动大量传统的消费者演化为同时具有生产与消费能力的产消者。产消者分布零散、容量较小、运行与成本特性差异大, 需要有配网侧合适的市场机制加以引导和激励。就现阶段而言, 我国分布式电力市场交易面临着交易模型和交易方式仍不成熟, 分布式能源交易主体多, 交易机制复杂等问题。因此, 需要适应海量异构分布式资源特征, 研究产消者运行交易特性的典型化建模方法。面向差异化海量分布式资源, 构建适应分布式资源大规模动态聚合的产消者交易机制。通过配网定价方法优化设计, 激励分布式资源灵活响应, 并基于本地灵活资源共享, 形成本地电力市场交易机制设计。进而考虑海量多类型市场主体协同互动特征, 形成本地电力市场博弈均衡分析方法, 适应海量主体交互特性, 设计分解协调算法, 实现对海量市场主体博弈均衡的快速高效求解。

在电碳市场协同机制方面, 能源电力行业是我国碳排放占比最高的行业。能源电力系统减碳对于全社会降低碳排放, 早日达成“双碳”目标具有重要作用。亟需从电碳耦合机理出发, 提出电碳市场协同理论与方法。发挥多类型能源系统协同运行对于提升能源系统整体可靠性、经济性与清洁性的显著作用, 构建多能源市场协同机制, 研究分析电-煤-气-热-氢-碳综合能源体系价格传导机理, 协调各类能源市场存在交易时空尺度, 匹配各类能源交易流动性。建立多类型能

源系统多元价值量化与权责分配机制, 针对多品种多类型市场交易, 形成碳排放计量与精准溯源方法, 构建多元减碳的配额制定与低碳价值互认技术, 促进电力市场与碳市场机制高效协同。

5 新型电力系统形态构建中的关键性与颠覆性技术

能源科技的创新突破是保障国家能源安全和绿色转型、实现零碳目标的决定性力量。作为实现“双碳”目标的关键载体, 新型电力系统形态在构建进程中面临高比例可再生能源和电力电子设备的“双高”特征变化, 导致不确定性、非线性和复杂性加剧。随着能源转型进入“深水区”, 全球科技博弈加剧, 能源危机蔓延, 电力行业需勇闯科技“无人区”, 抢占能源革命制高点。本文根据新形势下电力能源系统中技术需求的新趋势, 分析电力转型中的关键性技术和颠覆性技术, 总结技术特征, 细化应用场景, 寻找产业化制约因素, 提出政策扶持建议。

5.1 新型电力系统形态构建中的关键性技术

“双碳”目标下, 新型电力系统是推动能源转型的关键, 技术创新是破解安全-绿色-经济“三角难题”的核心。能源电力行业技术资金密集, 存量系统庞大, 新型电力系统建设是在存量系统上的渐进式迭代升级, 需遵循电力系统技术规律, 未来较长时间内仍以交流技术为基础。关键技术可解决这一发展路径下电力系统面临的源网荷结构变化、运行特性变化等挑战, 包括大规模新能源并网带来的电力电量平衡和安全稳定问题, 海量资源接入后源网荷储广域分散协同调控的复杂性和安全性问题。

(1) 柔性直流技术

柔性直流输电技术利用电压源换流器, 实现灵活控制与四象限运行, 无需无功补偿, 适用于远距离输电、异步电网互联等场景。其在远海风电并网、长距离新能源输送、多端组网和解决能源互济等方面取得重要应用, 如昆柳龙柔直工程等。然而, 产业化仍受设备技术成熟度、控制协调难度以及关键技术依赖进口等制约, 限制了其在高电压、大容量领域的发展。

(2) 构网型设备关键技术

构网型设备通过模仿同步机特性, 实现电压与频

率支撑, 解决弱网下传统并网策略的稳定性问题, 适用于微电网、独立供电系统、弱电网和互联大电网等场景, 对提升新能源高占比电力系统的稳定性和可靠性具有重要意义。目前主要采用构网型储能与调相机用于示范工程, 但受限于控制复杂性、技术标准缺乏和储能容量不足, 需进一步突破。

(3) 面向电力电量平衡挑战的长时储能技术

长时储能可实现跨周期电能存储, 满足电力平衡需求。机械储能成熟但受地理限制, 电化学储能灵活但成本高, 熔盐储热适配热发电, 氢能前景广阔但技术瓶颈多。其在电源侧促进新能源并网, 在电网侧提供调节与应急服务, 在用户侧提升灵活性。然而, 其发展面临技术瓶颈、安全风险、投资高回报慢及市场机制不完善等制约因素。

(4) 碳捕集利用与封存技术

碳捕集利用与封存技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS)通过捕集、利用和封存CO₂, 实现碳资源化或与大气隔绝, 是碳中和电力系统的重要技术路径。CCUS包括从排放源捕集CO₂, 用于化工生产、生物吸收等资源化利用, 以及通过加压封存隔绝CO₂。其可用于燃煤电厂脱碳改造和新型发电系统建设, 但受限于技术成熟度不足、成本高、监测难度大和政策法规不完善等挑战。

(5) 面向海量分布式资源接入的信息通信和网络安全技术

信息通信与网络安全技术可为新型电力系统的智能化、高效性和安全性提供支撑。核心技术包括信息物理融合与数字孪生技术实现实时监控与优化, 云-边-端协同技术提高分布式资源管控效率, 区块链保障数据安全与交易透明, 量子通信增强通信加密与身份认证。这些关键技术有效支撑新型电力系统构建过程中用户侧海量分布式资源接入下的监测、控制、运维等全周期管控。然而, 产业化面临数据传输能力不足、跨业务协调难、标准不统一等挑战。

(6) 面向新型电力系统的通用人工智能技术

人工智能技术利用大模型解决新型电力系统中的复杂优化、实时感知和智能决策问题。电力大模型处理多源异构数据, 通过预训练与微调, 融合多元业务知识, 提升特征提取和多任务泛化能力。然而, 人工智能技术产业化面临数据噪声、信息泄露、透明性缺乏以及模型复杂性等挑战。

上述关键技术将有效支撑电力系统在未来较长时间内的主要形态,即仍以交流技术为基础,存在源网荷结构变化、运行特性变化的特点。关键技术将解决大规模新能源并网带来的安全稳定和电力电量平衡问题,促进远距离大容量功率输送,推动电力系统低碳化进程,以及提升源网荷储广域分散协调中的安全性和有效性。因此,在新型电力系统形态演进中,上述关键技术是针对当前发展阶段面临主要问题需要突破的核心关键。

5.2 新型电力系统形态构建中的颠覆性技术

全球碳中和推动下的能源转型是科技竞争的核心,我国面临保供应、稳增长、促转型的多重挑战,亟需依靠科技创新实现高质量发展。颠覆性技术在新型电力系统和深度脱碳中具有根本性变革影响,是我国在产业变革中赢得竞争优势的关键。

(1) 大功率无线输电技术

大功率无线输电技术包括微波、激光、磁场耦合和电场耦合四种主流技术。磁场耦合和电场耦合研究成熟,适用于消费电子、轨道交通等短距离的供电应用;而微波和激光技术有望实现远距离精准电能传输,适用于偏远地区供电和航天军事应用,但面临效率低、环境影响大等问题。产业化挑战在于技术、经济、安全等方面的制约,需进一步突破和发展。

(2) 高温超导输电技术

高温超导输电技术利用超导材料在低温下电阻为零的特性,实现大容量、低损耗的电力传输。与常规电缆相比,其输电容量可提升至10倍,输电损耗降低至25%~50%,具备高效、环保、体积小和高可靠性的优势。该技术适用于城市中心、高密度供电、远距离输电等场景。然而,相关材料加工复杂、冷却系统成本高,且缺乏大规模生产设备,制约了其产业化进程。

(3) 量子计算技术

量子计算技术利用量子力学原理,通过量子叠加和干涉等特性实现并行计算,能在解决复杂问题上提供指数级加速。它突破传统计算框架,可在极短时间内处理复杂计算问题,可用于电力系统优化、人工智能、材料创新等领域。然而,量子计算仍面临硬件发展路线不统一、技术不成熟、算法复杂和高成本等挑战,制约了其产业化进程。

(4) 可控核聚变技术

可控核聚变技术通过轻原子核聚合释放巨大能量,其能量密度是核裂变的3~5倍,且产生的放射性废物少。其原料来源广,主要来自海水中的氘和氚,具有高能量效率和安全性。可控核聚变有潜力解决全球能源短缺问题,并推动能源转型和碳中和。然而,技术门槛高,面临等离子体自持燃烧、材料耐高温高辐照等挑战,且高成本和公众认知误区也可能制约其产业化进程。

上述颠覆性技术的实现将彻底改变现有的电力系统形态。其中可控核聚变技术将彻底解决现有能源短缺和电力生产的碳中和问题,从源头上改变电能的生产形态;大功率无线输电技术和高温超导输电技术将彻底解决现有电力传输中的效率及安全稳定问题,从根本上改变电能输送形态;量子计算技术将从根本上改变复杂电力系统决策、新材料创新等方面的现有范式,突破复杂计算的瓶颈。因此,上述颠覆性技术对于新型电力系统形态演进将产生变革性的影响,将从根本上改变电能的生产、输送、使用的全流程。

5.3 相关技术的政策扶持建议

电力科技创新是推动能源转型和实现“碳达峰”、“碳中和”目标的关键动力。在电力系统转型中,关键性技术确保系统安全性和可靠性,颠覆性技术则提供全新发展路径。因此,需要集中力量突破技术瓶颈,并超前部署颠覆性技术。通过政策与技术创新双轮驱动,构建全面支持体系。以下从推动科技研发、标准建设、示范工程、产业协同、政策支持和风险防控6个方面提出建议,为技术突破和高效落地提供保障。

(1) 聚焦关键设备研发与技术创新研究

加大柔性直流、高温超导等技术的基础研究投入,提升核心设备技术水平,针对人工智能技术,加强算力与数据分析能力的提升。

(2) 推进标准体系建设与规范制定

制定相关技术综合性行业标准,完善技术参与市场机制,结合实际应用场景优化规范体系,鼓励行业参与全球技术标准的制定。

(3) 建设示范工程与应用推广

推动示范工程建设,以验证和优化关键技术方案,改造常规直流工程,设立专项基金降低初期成本,分阶段进行应用推广。

(4) 加强产业链协同与资源优化

引导上下游企业合作, 形成完整产业链, 支持柔性直流输电和高温超导输电基础设施建设, 推动数据共享与电力大模型平台建设, 加速技术创新.

(5) 提供长期性与连续性政策支持

制定技术发展目标与优先级, 确保政策连续性, 设立专项基金、提供税收优惠, 激励技术创新并支持金融机构提供绿色融资.

(6) 加强风险防控与安全保障

完善法律法规, 保证技术合法运行, 健全技术的风险评估机制与全生命周期安全监管机制, 强化从业人员的工程伦理教育, 并建立应急响应机制.

6 结论

本文立足于“双碳”目标下加快构建新型电力系统

的紧迫需求, 结合电力系统当前发展现状, 分析新型电力系统构建进程中面临的关键挑战, 解析新型电力系统形态构建的科学问题与技术路径. 重点针对物理网架结构与输电形式、电力电量平衡与稳态构建机制、电压-同步-频率-振荡稳定机制、系统故障防御与应急恢复机制、电碳协同的市场机制五个方面, 提出了新型电力系统形态构建与演化进程中的新架构、新形态、新机制. 最后, 探讨了新型电力系统形态构建中的关键性与颠覆性技术, 分析其技术特征和产业化应用对电力系统形态特性产生的影响, 并从推动科技研发、标准建设、示范工程、产业协同、政策支持和风险防控6个方面提出政策建议, 通过政策与技术创新双轮驱动为技术突破提供有力保障. 本文为新型电力系统形态结构的构建和演化提供了有益的参考, 助力推进清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统建设, 保障国家电力能源安全.

参考文献

- Li Y, Gu Y, Green T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: A duality theory. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 4541–4554
- Lasseter R H, Chen Z, Pattabiraman D. Grid-forming inverters: A critical asset for the power grid. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2020, 8: 925–935
- Liu Y, Geng H, Huang M, et al. Dynamic current limiting of grid-forming converters for transient synchronization stability enhancement. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2024, 60: 2238–2248
- Liu T, Wang X, Liu F, et al. A current limiting method for single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters during symmetrical faults. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 4751–4763
- Lu Y, Du Z, Li Y, et al. Nonlinear damping property and limit cycle of VSC. *IEEE Trans Power Deliver*, 2022, 37: 4485–4488
- National Grid ESO. Technical report on the events of 9 August 2019. Technical report. 2019. <https://www.neso.energy/document/152346/download>
- Li Y, Zhou B H, He J W, et al. Challenges and countermeasures of the AC relay protection in grid-forming MMC integrated with large-scale renewable generations in deserts (in Chinese). *High Volt Eng*, 2025, 51: 489–506 [李岩, 周博昊, 何佳伟, 等. 沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统中交流继电保护面临的挑战与对策. *高电压技术*, 2025, 51: 489–506]
- Huang Y, Tao Y Z, Kong Z D, et al. Techno-economic analysis of flexible low-frequency transmission systems for offshore wind farm integration (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2024, 48: 4865–4875 [黄阳, 陶永政, 孔志达, 等. 海上风电柔性低频输电系统的技术经济分析. *电网技术*, 2024, 48: 4865–4875]
- Roy J, Liu H, Ndiaye I, Datta R. DC collection and transmission for offshore wind farms. In: *Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Piscataway: IEEE, 2023. 337–343
- Matevosyan J, High Share of Inverter-Based Generation Task Force. Grid-forming technology in energy systems integration. Technical report, 2022, <https://www.esig.energy/wp-content/uploads/2022/03/ESIG-GFM-report-2022.pdf>
- Jia J X, Shen Z Y, Qin B S, et al. Review on inertia response matching problem of hybrid power systems with grid-forming and grid-following power electronic devices (in Chinese). *Elect Power Autom Equip*, 2024, 44: 77–89 [贾焦心, 沈钟毓, 秦本双, 等. 构网型和跟网型电力电子装备混联系统惯量响应的匹配问题综述. *电力自动化设备*, 2024, 44: 77–89]
- Zhai W H, Duan Q X, Xu Z. China's first electromagnetic transient simulation test of a grid-forming wind farm (in Chinese). *China Electr Power*

- News, 2023-04-12(002) [翟文辉, 段青熙, 徐志. 国内完成首次构网型风电场电磁暂态仿真测试. 中国电力报, 2023-04-12(002)]
- 13 Wang W. Evolution path and challenges of new-type power system toward carbon neutrality goals (in Chinese). 2023 [王伟胜. 面向双碳目标的新电力系统演进路径与挑战. 2023. <https://www.345wk.com/doc/19277.html>]
- 14 Shao Z, Zhai Q, Guan X. Physical-model-aided data-driven linear power flow model: An approach to address missing training data. *IEEE Trans Power Syst*, 2023, 38: 2970–2973
- 15 Wang Q, Li F, Tang Y, et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control. *IEEE Trans Power Syst*, 2019, 34: 4557–4568
- 16 Wang X F. Power System Optimization Planning (in Chinese). Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990 [王锡凡. 电力系统优化规划. 北京: 水利电力出版社, 1990]
- 17 Zhang H Y, Yin Y H, Shen H, et al. Peak-load regulating adequacy evaluation associated with large-scale wind power integration (in Chinese). *Proc CSEE*, 2011, 31: 26–31 [张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 大规模风电接入后的系统调峰充裕性评估. 中国电机工程学报, 2011, 31: 26–31]
- 18 Guo J S, Wang M Q, Han X S, et al. Dynamic economic dispatch considering adaptive look-ahead time scale (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2025, 49: 107–113 [郭俊劭, 王明强, 韩学山, 等. 考虑自适应前瞻时间尺度的动态经济调度. 电力系统自动化, 2025, 49: 107–113]
- 19 Booth R. Power system simulation model based on probability analysis. *IEEE Trans Power Apparatus Syst*, 1972, PAS-91: 62–69
- 20 Nakamura S. A review of electric production simulation and capacity expansion planning programs. *Int J Energy Res*, 1984, 8: 231–240
- 21 Wang X F. EEF approach to power system probabilistic modeling (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 1984, 6: 16–29 [王锡凡. 电力系统随机生产模拟的等效电量函数法. 西安交通大学学报, 1984, 6: 16–29]
- 22 Li X, Jiang C. Short-term operation model and risk management for wind power penetrated system in electricity market. *IEEE Trans Power Syst*, 2011, 26: 932–939
- 23 Bie Z, Zou X, Wang Z, Wang X. Studies on models and algorithms of the power system probabilistic production simulation integrated with wind farm. In: *Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Piscataway: IEEE, 2009. 1–7
- 24 Zhang J T, Cheng H Z, Hu Z C, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms (in Chinese). *Proc CSEE*, 2009, 29: 34–39 [张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟. 中国电机工程学报, 2009, 29: 34–39]
- 25 Wang J, Shahidehpour M, Li Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation. *IEEE Trans Power Syst*, 2008, 23: 1319–1327
- 26 Palmintier B S, Webster M D. Heterogeneous unit clustering for efficient operational flexibility modeling. *IEEE Trans Power Syst*, 2014, 29: 1089–1098
- 27 Du E, Zhang N, Kang C, et al. A high-efficiency network-constrained clustered unit commitment model for power system planning studies. *IEEE Trans Power Syst*, 2019, 34: 2498–2508
- 28 Leite A P, Borges C L T, Falcao D M. Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites. *IEEE Trans Power Syst*, 2006, 21: 1493–1501
- 29 Billinton R, Yi Gao R, Karki R. Composite system adequacy assessment incorporating large-scale wind energy conversion systems considering wind speed correlation. *IEEE Trans Power Syst*, 2009, 24: 1375–1382
- 30 Lucheroni C, Boland J, Ragno C. Scenario generation and probabilistic forecasting analysis of spatio-temporal wind speed series with multivariate autoregressive volatility models. *Appl Energy*, 2019, 239: 1226–1241
- 31 Chen X S, Lin J, Liu F, et al. Ito stochastic process model for renewable power generation (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 83–95+376 [陈晓爽, 林今, 刘锋, 等. 新能源发电的伊藤随机过程模型. 中国电机工程学报, 2020, 40: 83–95+376]
- 32 Chen Y, Wang Y, Kirschen D, et al. Model-free renewable scenario generation using generative adversarial networks. *IEEE Trans Power Syst*, 2018, 33: 3265–3275
- 33 Zhang B, Shen J J, Cheng C T, et al. Peak-shaving method for hydro-wind complementary systems based on C-vine Copula theory (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 5523–5535 [张博, 申建建, 程春田, 等. 基于C藤Copula理论的水风互补系统调峰方法. 中国电机工程学报, 2022, 42: 5523–5535]
- 34 Pan X, Wang L L, Xu Y Q, et al. A wind farm power modeling method based on mixed copula (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2014, 38: 17–22 [潘雄, 王莉莉, 徐玉琴, 等. 基于混合Copula函数的风电场出力建模方法. 电力系统自动化, 2014, 38: 17–22]
- 35 Kundur P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994
- 36 Wang X F, Fang W L, Du Z C. Modern Power System Analysis (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003 [王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力

系统分析. 北京: 科学出版社, 2003]

- 37 Middlebrook R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators. In: Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Piscataway: IEEE, 1976. 366–382
- 38 Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters. *IEEE Trans Power Electron*, 2011, 26: 3075–3078
- 39 Li Y, Du Z. Stabilizing condition of grid-connected VSC as affected by phase locked loop (PLL). *IEEE Trans Power Deliver*, 2022, 37: 1336–1339
- 40 Zhou J Z, Ding H, Fan S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter. *IEEE Trans Power Deliver*, 2014, 29: 2287–2296
- 41 Wen B, Boroyevich D, Burgos R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters. *IEEE Trans Power Electron*, 2016, 31: 675–687
- 42 Vieto I, Sun J. Sequence impedance modeling and analysis of type-III wind turbines. *IEEE Trans Energy Convers*, 2018, 33: 537–545
- 43 Xin H H, Li Z H, Dong W, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters (in Chinese). *Proc CSEE*, 2017, 37: 1277–1292 [辛焕海, 李子恒, 董炜, 等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据. *中国电机工程学报*, 2017, 37: 1277–1292]
- 44 Cespedes M, Sun J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2014, 29: 1254–1261
- 45 Wu X, Du Z, Li Y, et al. Stability analysis of grid-connected VSC dominated by PLL using electrical torque method. *IEEE Trans Energy Convers*, 2022, 37: 1864–1874
- 46 Yu J, Qi Y, Deng H, et al. Evaluating small-signal synchronization stability of grid-forming converter: A geometrical approach. *IEEE Trans Ind Electron*, 2022, 69: 9087–9098
- 47 Zhao L, Jin Z, Wang X. Small-signal synchronization stability of grid-forming converters with regulated DC-link dynamics. *IEEE Trans Ind Electron*, 2023, 70: 12399–12409
- 48 Shi Q, Dong W, Wang G, et al. Grid strength assessment method for evaluating small-signal synchronization stability of grid-following and grid-forming converters integrated systems. *J Modern Power Syst Clean Energy*, 2025, 13: 55–65
- 49 Li Y, Lu Y, Tang Y, et al. Conditions of existence and uniqueness of limit cycle for grid-connected VSC With PLL. *IEEE Trans Power Syst*, 2024, 39: 706–719
- 50 Wu H, Wang X. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 3573–3589
- 51 Li Y, Tang Y, Lu Y, et al. Synchronization stability of grid-connected VSC with limits of PLL. *IEEE Trans Power Syst*, 2023, 38: 3965–3976
- 52 Li Y, Lu Y, Yang J, et al. Transient stability of power synchronization loop based grid forming converter. *IEEE Trans Energy Convers*, 2023, 38: 2843–2859
- 53 Rokrok E, Qoria T, Bruyere A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 1519–1531
- 54 Li Y, Lu Y, Yang J, et al. Synchronization stability of multiple VSGs embedded power system with controller limits. *IEEE Trans Power Syst*, 2025, 40: 834–849
- 55 Xia Q, Yang Z F, Lai X W, et al. Electricity market design based on temporal pricing of renewable capacity (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2022, 46: 1771–1779 [夏清, 杨知方, 赖晓文, 等. 基于分时容量电价的新型电力现货市场设计. *电网技术*, 2022, 46: 1771–1779]
- 56 Liu D N, Li Z, Xu E F, et al. Flexible block order trading clearing model for new power systems (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2022, 46: 4150–4162 [刘敦楠, 李竹, 徐尔丰, 等. 面向新型电力系统的灵活能量块交易出清模型. *电网技术*, 2022, 46: 4150–4162]
- 57 Dvorkin Y. A chance-constrained stochastic electricity market. *IEEE Trans Power Syst*, 2020, 35: 2993–3003
- 58 Qu Y, Xiao Y, Wang X, et al. The equilibrium analysis and potential modifications on the China pilot electricity spot market. *Energy Economics*, 2023, 122: 106693
- 59 Badesa L, Matamala C, Zhou Y, et al. Assigning shadow prices to synthetic inertia and frequency response reserves from renewable energy sources. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2022, 14: 12–26
- 60 Azim M I, Tushar W, Saha T K. Cooperative negawatt P2P energy trading for low-voltage distribution networks. *Appl Energy*, 2021, 299: 117300
- 61 Zhu Y, Xiao Y, Wang X, et al. Enhancing distribution system resilience with peer-to-peer transactions. *IEEE Trans Power Syst*, 2025, 40: 907–

- 62 Jiang Y, Zhou K, Lu X, et al. Electricity trading pricing among prosumers with game theory-based model in energy blockchain environment. *Appl Energy*, 2020, 271: 115239
- 63 Guo Z, Pinson P, Chen S, et al. Chance-constrained peer-to-peer joint energy and reserve market considering renewable generation uncertainty. *IEEE Trans Smart Grid*, 2021, 12: 798–809
- 64 Dong J Z, Guo H Y, Jiang T, et al. Research on electricity-carbon coupling trading in the new-type power system (in Chinese). *Proc CSEE*, 2025, 45: 5752–5771 [董九舟, 郭鸿业, 姜涛, 等. 新型电力系统的电碳耦合交易研究. *中国电机工程学报*, 2025, 45: 5752–5771]
- 65 Shang N, Chen Z, Leng Y. Mutual recognition mechanism and key technologies of typical environmental interest products in power and carbon markets (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 2558–2578 [尚楠, 陈政, 冷媛. 电碳市场背景下典型环境权益产品衔接互认机制及关键技术. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 2558–2578]
- 66 Wang X H, Jiang Y X, Chen Q X, et al. On tradeable certificates of emissions reduction and their interactions (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2023, 47: 594–603 [王心昊, 蒋艺璇, 陈启鑫, 等. 可交易减排价值权证比较分析和衔接机制研究. *电网技术*, 2023, 47: 594–603]
- 67 Shang N, Lu Z L, Chen Z, et al. Empirical analysis of electricity and carbon price correlation based on VAR model and Copula theory (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2023, 47: 2305–2317 [尚楠, 卢治霖, 陈政, 等. 基于向量自回归模型和Copula理论的电碳价格相关性实证分析. *电网技术*, 2023, 47: 2305–2317]
- 68 Wang H, Feng T, Zhong C. Effectiveness of CO₂ cost pass-through to electricity prices under “electricity-carbon” market coupling in China. *Energy*, 2023, 266: 126387
- 69 Nazifi F, Trück S, Zhu L. Carbon pass-through rates on spot electricity prices in Australia. *Energy Economics*, 2021, 96: 105178

Key mechanisms and technical paths for the construction of new power system

BIE ZhaoHong, LI GengFeng, XIAO YunPeng, DUAN Chao, SHAO ChengCheng, LI YuJun, CHEN Chen, ZHAO TianYang & ZHANG Yao

School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

The new power system serves as a key carrier for achieving the national goals of carbon peaking and carbon neutrality. This paper focuses on the structural formation of the new power system and analyzes the critical challenges encountered during its development from five perspectives: the physical grid architecture and transmission forms, the mechanisms for power-energy balance and steady-state construction, the voltage-synchronization-frequency-oscillation stability mechanisms, the system fault defense and emergency recovery mechanism, and the electricity-carbon coordinated market mechanism. Furthermore, based on a comprehensive assessment of domestic and international research progress and development trends, this study explores the underlying scientific issues and future technological pathways. Finally, the paper summarizes the key and disruptive technologies essential for shaping the new power system and proposes relevant policy recommendations, aiming to advance the construction of a clean, low-carbon, secure, adequate, economically efficient, supply-demand coordinated, and flexible-intelligent power system, thereby contributing to national energy security.

new power system, power system morphology, power-energy balance, power system security, power system stability, electricity market

doi: [10.1360/SST-2025-0169](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0169)