

新型电力系统的安全风险、关键问题与应对策略

汤广福¹, 周静^{2*}, 庞辉¹, 刘章丽², 范征², 朱昱东², 王新颖¹, 孙为民², 薛峰³, 周保荣⁴

(1. 北京怀柔实验室, 北京 101407; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 国网电力科学研究院有限公司, 南京 211006; 4. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510700)

摘要: 新型电力系统呈现出高比例可再生能源、高比例电力电子设备的特征, 需要结合能源安全视角, 系统识别新型电力系统在技术演进、结构转型、市场机制等维度面临的关键问题并提出可操作的应对策略。本文在把握电力系统发展现状的基础上, 从电力供应、电力运行、电力基础设施、产业链供应链、极端情景五个方面出发, 全面剖析了新型电力系统伴生的安全风险; 提出了以电力保供与恢复、灵活互济、综合防御为核心的电力安全支撑体系, 凝练了极端事件下电力保供与恢复、高比例新能源电力系统的安全可靠运行等电力保供与恢复体系相关问题, 海-陆新能源发展下大电网形态、新型电力系统灵活性资源、新能源入市与全国统一电力市场等电力灵活互济体系相关问题, 分布式资源聚合下数字化安全防护、应对强不确定性的电力自适应安全防护、能源系统耦合下跨能源跨领域安全防护等综合防御体系相关问题。从增强电力保供与恢复能力、加强电力灵活互济、筑牢电力系统综合防御体系等角度提出了未来新型电力系统的发展思路, 以助力电力系统安全、稳定、高质量转型, 并为能源安全与绿色低碳转型提供有效支撑。

关键词: 新型电力系统; 电力安全; 保供与恢复; 灵活互济; 综合防御

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A

Security Risks, Key Issues, and Response Strategies of New-Type Power System

Tang Guangfu¹, Zhou Jing^{2*}, Pang Hui¹, Liu Zhangli², Fan Zheng², Zhu Yudong²,
Wang Xinying¹, Sun Weimin², Xue Feng³, Zhou Baorong⁴

(1. Beijing Huairou Laboratory, Beijing 101407, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211006, China; 4. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The new-type power system exhibits the characteristics of high proportions of renewable energy and power electronic equipment. From the perspective of energy security, it is necessary to identify the key issues faced by the new-type power system in terms of technological evolution, structural transformation, and market mechanisms, and propose actionable response strategies. Considering the development status of current power systems, this study analyzes the safety risks associated with new-type power systems from five aspects: power supply, power operation, power infrastructure, industrial chain, and extreme scenarios. A power security support system focusing on power supply guarantee and restoration, flexible mutual assistance, and comprehensive defense is proposed. Specifically, the study summarizes the issues related to power supply guarantee and recovery under extreme events as well as the reliable operation of power systems with a high proportion of renewable energy. In terms of flexible mutual assistance, related

收稿日期: 2025-12-01; 修回日期: 2026-03-20

通讯作者: *周静, 中国电力科学研究院有限公司教授级高级工程师, 研究方向为能源电力战略规划; E-mail: zhoujingjing_1@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源安全战略研究”(2022-JB-05)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

issues include the configuration of a large power grid amidst the development of marine-land renewable energy, flexible resources for new-type power systems, entry of renewable energy into the market, and establishment of a national unified power market. Regarding comprehensive defense, related issues involve digital security protection in the context of distributed resource aggregation, adaptive security defense against strong uncertainties, and cross-energy, cross-domain security defense under energy system coupling. Furthermore, development ideas for future new-type power systems are proposed from the perspectives of enhancing power supply and restoration capabilities, strengthening flexible mutual assistance in power supply, and establishing a comprehensive defense system. These efforts aim to facilitate the safe, stable, and high-quality transformation of the power system, and provide effective support for energy security and the transition to a green, low-carbon energy system.

Keywords: new-type power system; power security; power supply guarantee and restoration; flexible mutual assistance; comprehensive defense

一、前言

实施碳达峰、碳中和战略，是我国对国际社会作出的郑重承诺，也是实现经济高质量发展的必然要求。《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（2021年）指出，推动经济社会全面绿色转型，构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。在能源发展进程中，安全、成本、环境构成三大关键维度^[1]。随着能源结构转型不断深入、传统与非传统风险交织、地缘竞争冲突与气候变化效应相互放大，我国能源安全面临更为复杂严峻的挑战^[2,3]。能源安全对我国整体能源形势和经济社会发展至关重要，《2024年能源工作指导意见》提出将能源安全置于首要位置。

电力系统作为能源转型的核心枢纽，是实现高比例新能源安全高效利用的关键载体。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》（2025年）提出，加快建设新型能源体系，着力构建新型电力系统，全面提升电力系统互补互济和安全韧性水平；对抽水蓄能、新型储能等调节性资源作了部署建议，凸显了电力系统作为能源体系中枢与核心的地位。新型电力系统具有高比例可再生能源接入、高比例电力电子设备应用、多能互补综合利用、数字化智能化发展、清洁低碳转型等特征^[4]，以新能源为主体也带来三个方面的挑战：新能源随机波动性强，时空分布不均，威胁电力充裕性；新能源电源弱支撑导致电网“空心化”，电力系统传统的物理特性被稀释或替代，故障冲击增大、调节与耐受能力不足；系统匹配的调节与安全成本上升，多行业协调难度大，构成经济性与体制机制挑战^[5]。

为了应对新型电力系统的新特征与新挑战，国内外研究已从多维度展开^[6]。在发电方面，针对海

上风电资源丰富但发展受限的现状，主要从风电机组、输电工程、海洋技术、运维等维度梳理了关键技术需求、行业发展瓶颈、应对措施建议^[7]；煤电是能源保供“压舱石”，相关研究聚焦锅炉、汽轮机、发电机等主机设备的灵活运行技术，通过耦合储能和智能控制来提升燃煤机组的调峰与支撑能力^[8-10]。在电网形态方面，针对不同区域应用场景，提出相适应的交直流联合运行路径^[11,12]。在配电网方面，探索智能微网在分布式能源接入中的作用与技术挑战，研究发展路线规划^[13,14]。在电力市场方面，剖析当前建设挑战，提出设立激励与约束相容的动态输配电价机制建议，促进运营效率提升^[15,16]。在储能方面，聚焦构网型储能提升新型电力系统稳定性方面的核心作用，关注并网测试技术标准的统一与完善，探讨构网型储能在高比例新能源场景下的稳定机理^[17,18]。

在能源转型、能源安全并重的背景下，电力系统作为多种能源绿色转换的核心枢纽，重要性凸显，与能源全局、经济社会发展的关联更加紧密。应将电力系统置于更宏观的能源体系、国家总体安全框架中加以审视^[19]，以切实保障国家能源安全并推动绿色转型。本文立足新型电力系统的发展形势并识别在电力供应、电力运行、基础设施建设、产业链供应链、极端情景方面伴生的风险，提出构建以电力保供与恢复、灵活互济、综合防御为核心的电力安全支撑体系，凝练出相应的关键问题；针对相应体系和关键问题，研判可操作的应对措施，形成保障能源安全的新型电力系统发展思路，助力电力系统安全、稳定、高质量转型。

二、新型电力系统伴生的安全风险

随着新能源大规模接入、电力电子设备比例快速提升，电力系统运行环境趋于复杂，电力系统风

险类型更加多元。电力系统安全作为国家能源安全的核心支撑，可靠稳定运行事关能源转型的成败。深入剖析新形势下电力系统面临的各类安全风险，具有重要且紧迫的现实意义。

（一）电力供应安全风险

电源及负荷结构变化加剧电力供应保障难度。电力供应资源从稳定的煤炭、核电以及相对稳定的水电转为不稳定的风光电力，预计2060年的风光装机超过 9×10^9 kW，总发电量中的占比将提升至70%以上，电力供应也将从一次能源不足转向可靠容量不足。2021年，东北三省的风电装机为 3.5×10^7 kW，但在冷空气过境后风电出力骤降至不足装机的10%，因可靠容量不足而致全网出现严重的电力缺口。温变负荷占最大负荷的比例逐渐增大，“极热无风、晚峰无光”等情况更为突出，负荷不确定性持续增强。2025年，我国最高用电负荷为 1.508×10^9 kW，较2024年极值提高了 5.7×10^7 kW。预计2030年最大负荷为 2.14×10^9 kW，若有极端条件则最大负荷可再增加 1×10^8 kW^[20]。针对可再生能源主导的电力系统，有研究提出了一种构建供应安全风险评估指标模型的新方法（将层次分析法与熵权法结合的评估方法），模拟了11个省份的供应安全风险并检验了新方法的有效性^[21]。对于包含核电的电力系统，有研究建立了一种量化核电脆弱性的方法（考虑核能运行突然停止的规模和时间点变化，提出相应的电力供应安全指标），适用于不同电源容量组合下核能运行突然停止引起的电力供应中断风险预测，支持更加安全的电力系统方案设计^[22]。

新能源占比持续提升，导致电力电量平衡难度增大。在电量平衡方面，若“十五五”时期已纳规电源和跨区输电通道均按期投产，新能源装机将发展至 3×10^9 kW，则基本满足全国电量平衡。在电力平衡方面，“十五五”时期末 3×10^9 kW新能源在晚峰时段仅能提供不足 1×10^8 kW的可信出力，若已纳规的煤电全部投产，则全国电力供需总体平衡；华东、西南地区的部分省份存在局部缺口，若遭遇极端天气，部分地区将面临超过 1×10^7 kW的电力缺口，电力系统将由盈余转为不足^[20]。新型储能可以部分解决电力供需不平衡问题，但参与电力平衡能力与电力电量缺口程度高度相关；电力电量缺口越大，可供储能充电的富裕电量时刻越少，则新型

储能参与电力平衡能力越低^[23]。

电力系统对灵活性资源特别是爬坡型资源需求激增。预计2030年，风光电力装机配比约为1:2，即风电装机 1×10^9 kW、光伏装机 2×10^9 kW。光伏发电大幅增加，将使净负荷“鸭型”曲线特征更为明显，午间调峰问题突出将增大系统爬坡压力；2025—2027年，在节假日等极端小开机情况下，最大向上爬坡缺口为 $3 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$ kW，最大向下爬坡缺口为 $5 \times 10^6 \sim 7.5 \times 10^6$ kW^[20]。未来，核电、水电、气电、新型储能在提升电力系统灵活性和调节能力方面的战略价值更为明显。预计2030年，核电装机为 1.1×10^8 kW，水电装机为 4.5×10^8 kW（含抽水蓄能装机 1.2×10^8 kW），气电装机为 2.2×10^8 kW，新型储能装机为 1.3×10^8 kW。2060年，电力系统需配置当前4倍以上的灵活性资源。再叠加制氢、储冷/热等因素，多能耦合更为紧密，电力电量平衡模式及方式更加复杂，如2024年建成投运的青海省海南州“光-氢-储”示范项目，通过电解制氢、电化学储能实现多能形态的密切耦合。有研究将电力供应安全拆分为能源可用性、电力容量、供应可靠性、电力质量等评估因素，梳理了配电网系统中灵活资源在电力供应安全方面的评估方法及指标情况，对电力系统供应的安全管理具有借鉴价值^[24]。

（二）电力运行安全风险

跨省区输电规模化发展，导致电网结构更为复杂。“十四五”时期末，我国建成投运的特高压交流线路有22条、特高压直流线路有20条，跨省跨区输电能力为 3.7×10^8 kW；2030年，特高压直流线路将超过40条，其中16条为“沙戈荒”大基地送出。预计2045年“西电东送”输电规模趋于饱和，2060年的跨区输电规模将为 7×10^8 kW^[20,25]。电网送受格局将由单向的“西电东送”转向动态的双向互济，其中直流送端集中在西北、蒙西地区，2030年同送同受规模最大可超过 5.6×10^7 kW^[20]。配电网将从传统的“无源”单向辐射网络转向“有源”双向交互系统。未来，电力流、电网主网架、区域电网、分布式电源之间的互联互通关系更为复杂，电网结构也将发生深刻变革，导致相关的故障特征与运行控制进一步复杂化。引发电网复杂性增加的关键因素包括更多的可再生能源、数据库、

消费者、微电网、输电网，也带来电网集成、电网保护、电网脆弱性、故障排除、能源储存系统方面的挑战^[26]。例如，2022年粤港澳大湾区直流电网工程投运后形成了珠江三角洲地区电网异步分区的新结构，引发电力流复杂等一系列安全风险。

电力系统的稳定特性趋于复杂。在送端电网方面，新能源占比提升，系统呈现低惯量、低阻尼、弱电压支撑等特征，导致功角、电压、频率等系统稳定问题突出；在受端电网方面，常规电源被清洁能源、特高压直流馈入替代，导致受端出现“空心化”趋势。为此，有研究提出了一种量子启发式分布式策略-价值优化学习方法（也结合了先进的环境预测能力），应用于新型电力系统中的实时发电控制，提高了系统对高比例风电集成导致频率变化的应对能力^[27]；发展了统一的转子功角稳定性（RAS）框架，可替代传统的三时间尺度RAS框架，能够更好地协调大量分布式储能电力系统的稳定性控制^[28]。西南、华中等地区逐步形成了“送受一体”电网络局，导致稳定特性复杂度的进一步增加。甘肃省酒泉市曾因频率跌落、电压失稳等问题发生多起大规模风电脱网事故，影响了新能源电力的可靠外送。此外，静稳天气也是威胁电力系统安全的重要因素，近40年内持续7天的静稳天气时间发生11次（约为4年一遇），严重威胁电网稳定^[29]。

负荷侧安全形势更为严峻。分布式电源持续增加，更多用户成为“产消者”，导致负荷侧的运维和监管难度激增。例如，2025年7月，湖北省内并网的低压分布式光伏用户为 4.18×10^5 户，总容量为 1.476×10^7 kVA，带来设备过载风险加剧、电压越限概率上升、电能质量恶化等挑战。随着电力系统数字化程度的不断加深，海量分布式用户接入导致电力系统网络攻击面急剧扩大，相关安全风险更易穿透至系统核心，致使网络安全形势更为严峻。例如，虚假数据注入（FDI）攻击是智能电网面临的严重网络安全威胁之一。利用最大最小优化方法进行的FDI攻击，可以利用状态估计器的脆弱性来伪造测量数据，进而欺骗控制中心、引发错误的调度决策甚至造成电网故障^[30]。

（三）电力基础设施安全风险

特高压和新兴能源基础设施安全风险加剧。随

着跨区输电量增大，特高压基础设施规模大幅增加，而雷电、暴雨、高温等极端天气频发，各类安全风险隐患明显增多并交织叠加。例如，2025年7月高温天气引发苏州±800 kV换流站内换流变压器油的气体骤增，存在过热或放电故障风险，潜在的跳闸直接威胁电网稳定和苏州市供电安全。有研究应用先导发展法（涉及雷击输电线路物理过程、先导发展模型参数选择、数值方法实现、模型验证），分析了500 kV及以上的超/特高压线路、同塔多回输电线路的雷电绕击问题，为输电线路防雷设计、运行事故分析提供了技术支持^[31]。新兴能源基础设施爆发性增长，算力基础设施、新能源汽车、电解水制氢等电力驱动型新兴产业，在未来10年对社会用电量增长的贡献率可达40%^[20]；由此伴生的安全问题涌现，如储能电站着火、加氢站爆炸、新能源汽车充电过程自燃等。2025年，美国加利福尼亚州300 MW·h/1200 MW·h储能项目因三元锂电池热失控而发生火灾，约70%设施损毁，超过2000人紧急疏散。有研究梳理了储能站、充电站等新兴能源基础设施的安全风险，剖析了基础设施在风险认知、防控与监管环节面临的挑战，从技术创新、协同监管、公共安全体系建设等方面提出了防控框架及对策^[32]。新型攻击对电力基础设施的威胁也越发显著，如强电磁脉冲攻击覆盖范围广、频谱宽，可大量破坏电力电子设备，导致极大范围内电力供应中断且难以恢复。

“信息-物理-社会”系统深度耦合，电力系统基础设施及数据安全易受跨系统连锁风险的影响。能源管理系统的软硬件漏洞持续暴露，叠加非技术因素引起的安全威胁，加剧了电力系统的整体运行风险。2024年，全球电力行业记录的高级持续性威胁（APT）攻击事件有127起，同比增长24%，平均每次攻击导致电力企业直接损失2200万美元，约41%的APT攻击成功渗透至电力企业核心网络^[33]。这表明，通过信息系统向电力物理系统发起攻击已是高效且危害极大的风险传导路径。有研究提出一套电力信息物理系统（CPS）安全评估与主动防御框架，在物理层选取电气介数和电压来评价结构脆弱性；在信息层结合网络特征，构建攻击因子、预测攻击路径、识别关键脆弱节点；进而提出融合信息、物理维度的资源配置策略，有效增强电力CPS应对信息攻击的能力^[34]。

（四）产业链供应链安全风险

关键零部件及芯片产业链“卡脖子”风险加剧。国际竞争形势严峻，国内在高端器件、材料等“卡脖子”环节面临的断供风险加大，严重影响了新型电力系统的建设发展。例如，柔性直流换流阀均压电阻作为关键零部件，长期依赖国外供应，单支进口价格约为1000元，交付周期长达6个月。随着新能源、新兴能源产业快速发展，关键矿产资源的安全稳定供应问题凸显。我国是全球关键矿产的精炼大国，主导19种能源相关战略矿产的精炼环节，平均市场份额达到70%^[35]。随着电动汽车电池、充电桩、电网建设，2035年对锂、镍、钴的需求较2024年将增长3~5倍，2035年对铜的需求较2024年将增长2倍^[36]。然而，在石墨、稀土元素以外，我国并不是能源相关矿产资源的主要开采国，关键矿产对外依存度较高，面临潜在的供应风险。此外，不断加剧的地缘竞争对我国清洁能源出口形成了挤压态势。发达国家能源领域的供应链较多转向安全优先，相应订单更多转向本土及同盟企业，制约了我国清洁能源相关产品的出口规模。例如，2025年德国Luxcara公司在北海海上风电场风力机供应方面取消与中国企业的协议，转而选择德国企业的产品。

（五）极端情景安全风险

极端天气成为新常态，极端事件成为新变量，近5年世界范围内70%以上的停电事件与极端情景相关。极端天气、自然灾害等事件具有多发性、突发性、极端性，成为威胁基础设施安全、电力供应及运行安全的重要因素。有研究针对极端天气下城市新型电力系统多重安全风险评估需求，提出了一种结合知识图谱、PageRank算法的风险量化分析方法，结果表明一次设备物理损坏是风险扩散的关键枢纽，输电线路是最脆弱的故障部位^[37]。面向极端天气下配电网韧性评估，有研究提出了量化台风风速与元件故障率关系的数学模型，构建了以缺供负荷为基础的韧性评估方法，在比较传统加固、分布式电源接入两种措施提升效果的基础上，验证了分布式电源增强电力系统韧性的效果^[38]。2025年4月，极端热浪波及欧洲伊比利亚半岛，导致输电线路垂坠、光伏效率骤降、风电出力锐减，造成电力缺口6.4GW，老旧设备在极端负荷下发生变压器连锁

爆炸，最终引发系统崩溃并造成历史罕见的特大停电事故。这表明，高比例新能源系统在极端天气下因惯量支撑不足、调节能力匮乏而极易诱发连锁故障。2025年10月，超强台风“麦德姆”登陆广东省湛江市，极端风力（10~12级）超出电网设施的设计承载标准而致大量电杆受损、线路跳闸，累计投入近4万人次参与抢修。传统电力基础设施物理架构的承灾基础薄弱，在超越设计阈值的极端天气下成为供电安全的瓶颈环节。

三、新型电力系统发展面临的关键问题

在能源转型、新型电力系统建设过程中，电力消费更加多元且刚性增长，电力生产转向以新能源为主，电网形态更加复杂，电力技术基础与电力市场环境出现了深刻变化。结合新型电力系统面临的电力供应、电力运行、电力基础设施、产业链供应链、极端情景等安全风险，构建了以电力保供与恢复、灵活互济、综合防御为核心的三大安全发展体系。据此梳理各体系实施中亟待关注的关键问题，以精准识别电力系统潜在发展瓶颈，提前预警风险并明晰攻关方向，为构建安全、可靠、韧性的新型电力系统提供理论支撑与实践路径。

（一）电力保供与恢复体系相关的问题

针对新型电力系统中电力供应风险与极端情景挑战，构建电力保供与恢复体系，确保在新能源占比提升、电网复杂度增加的背景下，电力系统可持续满足多元化且刚性增长的消费需求，也能在故障或中断事件后快速恢复供电。结合新能源占比持续提高、极端事件多发的电力系统发展趋势，电力保供与恢复体系需聚焦两方面问题。

1. 极端事件下电力保供与恢复

影响电力系统安全的极端事件包括极端自然灾害、新型攻击手段：前者频发多发，如覆冰带从长江流域传统易覆冰地区向北扩大，台风以年为周期呈现“强-弱-次强-弱”变化规律，北方局部地区集中性、季节性极端降雨增多^[39]；后者呈多元化发展势头，如强电磁脉冲、高频率微波、导电石墨纤维攻击等。这些新特征加剧了对主网电力设备设施的不利影响，如超过50%的500kV及以上线路故障由风冰等自然灾害引发，高比例新能源电力系

统在极端自然灾害下更显脆弱，停电损失呈周期性扩大趋势。

2. 高比例新能源电力系统的安全可靠运行

新能源装机占比逐步提升，引入高比例新能源电源的电力系统将是未来省域、区域级电网的重要特征。高比例新能源电力系统一般是基于新能源经柔直或交流汇集送出而构建的典型场景，面临平衡困难、运行复杂、稳定难防等挑战：新能源发电的随机性、波动性、不确定性显著增强，系统的电力电量平衡较为困难；新能源场站电力电子器件的非线性、切换性、离散性显著，系统的抗扰动能力下降且运行复杂性大幅增加；新能源并网造成系统暂态过程复杂、认知难度加大，极短的电力电子设备响应时间使故障连锁风险与防御难度激增。

（二）电力灵活互济体系相关的问题

针对新能源波动性、电网运行复杂性，构建电力灵活互济体系。通过多层级区域电网的互联互通、“源网荷储”多元资源的快速响应与协同互动、电力市场的有效调配，实现时间尺度上分钟至小时级的灵活功率调节；在空间尺度上依托多级电网架构，推动跨区域电力余缺互济。面对新能源波动性、电网复杂程度进一步加深的发展趋势，电力灵活互济体系需聚焦三方面问题。

1. 海-陆新能源发展下大电网形态

为了缓解能源资源与负荷中心逆向分布的矛盾、优化全国电力资源配置，我国将持续统筹推进海-陆新能源协同开发与大规模高效外送。预计2060年，我国新能源装机可达 9×10^9 kW，其中西北部地区占比超过60%；若50%以上的新能源需跨区外送，按每回容量为 1×10^7 kW估算，需新增特高压直流线路近100回。2035年，海上风电并网规模将突破 3×10^8 kW，按单回最大输送容量为 3×10^6 kW估算，需配套近100条海上送出通道。高密度输电通道建设对电力系统稳定控制、廊道资源统筹提出更高要求，电网安全运行面临挑战。

2. 新型电力系统灵活性资源

新能源占比提升，电力电量平衡难度增大。“十五五”时期我国电力系统整体紧平衡，而中长期电力系统面临更大的电力缺口，对灵活性资源需求激增。预计2060年，风光发电量占比将超过70%^[40]，系统运行面临严峻的电力电量平衡压力。

在全年富余时段，风光出力最高可达负荷峰值的2~5倍，而在短缺时段风光出力可能不足负荷峰值的10%。这种强烈的波动特性严重冲击电力系统的安全稳定与经济运行，亟需加快发展多元化灵活性资源，依托市场化手段来系统性提升调节能力。

3. 新能源入市与全国统一电力市场

新能源规模持续扩大，参与电力市场已是必然。新能源出力具有不确定性、间歇性、低边际成本的特性，对市场机制、电价形成与收益结构带来显著冲击，引发消纳成本上升、市场收益失衡等挑战。高比例新能源接入后加剧系统调节压力、拉大峰谷差，依赖煤电灵活性改造、抽水蓄能、新型储能、需求响应等多元化的灵活性资源，将推高辅助服务与容量成本，增加系统总消纳支出。低边际成本的新能源拉低出清电价，大发时段频繁出现零电价或负电价，不仅削减新能源收益，也严重冲击火电等调节电源的经营可持续性。

（三）综合防御体系相关的问题

针对电力基础设施、产业链供应链、网络攻击等系统性风险，构建主动防护的电力综合防御体系。运用数字化、智能化技术，实现电网物理系统、信息系统的一体化安全监控与韧性增强，覆盖规划、建设、运行环节。面对电力基础设施、产业链供应链风险更为突出、新型攻击手段趋于复杂的发展形势，电力综合防御体系需聚焦三方面问题。

1. 分布式资源聚合下数字化安全防护

海量分布式资源通过数字化平台实现聚合与协同调控，导致电力系统网络结构复杂、业务边界模糊。数字化安全成为新型电力系统稳定运行的关键基础。“大云物移智”等新技术加快融合，“互联网+”等业务模式持续推广，网络攻击向量增多，安全威胁扩大，信息安全风险加剧。电力生产、传输、消费实时同步，信息流与能量流深度耦合，智能终端广泛接入，进一步降低攻击入侵门槛、放大系统性运行风险。

2. 应对强不确定性的电力自适应安全防护

新能源规模化接入以及高比例的电力电子化，改变了电力系统运行形态与安全防御基础。系统呈现新能源功率波动性强、故障演变路径复杂等新型不确定性。多维度、高强度的不确定性，突破了传统防御技术的设防边界，导致电力系统“防而不

全”。电力电子设备状态快速变化，相应故障形态多变，电力系统安全稳定裕度“估而不准”。多时间尺度不确定性导致控制策略协调困难、资源偏差明显，造成电力系统“控而不达”。

3. 能源系统耦合下跨能源、跨领域安全防御

能源系统加速转向清洁低碳能源形式，多种能源形态紧密耦合，导致风险维度持续扩张、安全挑战更加多元。电力系统受其他能源领域风险传导的影响更为显著。煤、气、电等能源行业长期遵循各自独立的应急标准与规范，极端灾害下的跨系统协同能力薄弱，制约了能源系统提升整体可靠性。电力系统与外部环境深度耦合，由传统相对独立的物理系统演进为“信息-物理-社会”融合的巨系统，相应的风险传导路径更加复杂、威胁来源更为多元^[41,42]。

四、新型电力系统发展的应对策略

为响应国家“十五五”规划关于着力构建新型电力系统、全面提升电力系统互补互济与安全韧性水平的要求，需针对电力系统发展中电力保供与恢复体系、灵活互济调节体系、综合防御防护体系面临的关键问题，提出系统性的应对策略，构建支撑新型电力系统发展的技术体系，有力推动新型电力系统建设，加速能源转型与“双碳”进程。

（一）增强电力保供与恢复能力

针对极端事件下电力保供与恢复的关键问题，可从电源结构优化、电网升级、气象协同三个方面予以应对。在电源结构优化方面，对于极端天气多发区域，合理控制风电、光伏的发展节奏与装机规模，保持分散化、差异化发展，避免单一电源类型过度集中。在电网升级方面，加强极端事件演化机理、故障仿真推演、应急恢复等方面的基础研究与关键技术攻关；分区域提升电网防灾标准，强化线路与变电站抵御风、雨、洪、冰能力；对极端事件高风险区域的设施进行改造升级，提高电力系统与能源、信息、交通等基础设施的信息共享与协同能力。在气象协同方面，加强气象监测与预警能力，发展电力气象耦合模型，建立气象-电力协同决策机制，提高极端天气下的调度灵活性。

针对高比例新能源电力系统的安全可靠运行关

键问题，需从长时储能、稳定理论与装备研制、智能控制三个方面予以应对。在长时储能方面，重点发展跨日、跨周乃至跨季节的储能技术，推进可逆式水电、储热/冷、氢储能等长时储能技术应用，提升系统支撑能力。在稳定理论与装备研制方面，掌握高占比电力电子系统运行规律，构建新能源电力系统稳定理论；研制具有强控制能力的构网型等重点装备，增强系统受扰动后的支撑调节能力。在智能控制方面，基于电力电子装备快速灵活的调节特性，发展分区自治与区间协同机制，提升系统的故障防控能力；提高数字孪生、人工智能（AI）技术在故障防御与在线控制中的应用水平，有效应对“涌现”等新型复杂系统特性。

（二）加强电力灵活互济

针对海-陆新能源发展条件下大电网形态复杂的关键问题，需从灵活组网技术、多能协同、跨区融合三个方面予以应对。在灵活组网技术方面，重点研发安全、高效、经济的高压大容量直流外送与组网技术，在西北部地区以灵活组网方式实现广域多能互补；在海上风电地区，通过交直流组网实现与陆上电网的互联互通。在多能协同方面，对于新能源聚集区积极推进电氢融合及其他形式的多能互补，统筹布局“风光水储”一体化系统，形成灵活高效、绿色低碳的综合能源枢纽。在跨区融合方面，统筹推进“西电东送”“西电西用”，协同布局“东数西算”工程、绿色电力基础设施，提升数据中心的绿电使用占比，构建绿电-算力融合的新型基础设施体系。

针对新型电力系统灵活性资源短缺的关键问题，需从扩充灵活性资源品种、加强电网互联、健全市场机制等方面开展协同布局，构建多元充裕的灵活性调节资源体系。在多元灵活性资源品种方面，近期将煤电作为系统安全稳定运行的调节基础类型，积极发展虚拟电厂、多元可调节负荷、不同时间尺度的储能技术，通过虚拟电厂聚合分布式电源、可控负荷、储能资源，提升系统的多时间尺度调节能力。在电网互联方面，加强区域、省间输电通道建设，提升跨区互济能力和运行灵活性，增强电网韧性。在电力市场机制方面，加快建立容量市场、现货市场，以价格信号激励灵活性资源；推广共享储能、需求响应，将分散资源聚合调控后支撑

系统平衡与安全。

针对新能源全面入市的关键问题，需构建与新能源特性相适应的多层次市场机制与价格体系，稳步推进全国统一电力市场建设^[49]。近期，以落实《关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知》为重点，构建“市场交易+机制电价”体系，确立新能源参与市场的基本方式，建立新能源中长期交易机制。中期，着力健全调频、备用、爬坡等辅助服务市场，完善交易与定价规则，建立容量市场机制和新能源消纳长效机制，引导“源网荷储”协同，提升系统调节能力。远期，推动多类市场融合，构建涵盖能量、容量、环境的新能源全价值实现机制，推动电力市场与碳市场、绿证市场机制的协同；建立价格传导机制，将碳成本、绿色价值有效融入电价信号，全面体现新能源的社会效益和生态价值。

（三）筑牢电力系统综合防御体系

针对新型电力系统分布式资源聚合下数字化安全的关键问题，需从动态防御、工控协议防护、智能监测、多层级协同响应四个方面予以应对。在动态防御方面，应用隐私计算、可信计算等技术，构建应对新型网络攻击的主动免疫和动态防护能力，降低多元业务模式的安全风险。在工控协议防护方面，开展终端安全认证与私有协议加固，全面提升边缘侧抗入侵能力。在智能监测方面，构建信息流-能量流协同监控机制，形成跨业务威胁的实时感知与预警能力。在多层级协同响应方面，建立“云端-边缘-终端”联动安全策略库，精准阻断攻击、增强系统韧性，防范系统性运行风险。

针对强不确定性的电力自适应安全防御关键问题，需从电力安全基础、智能技术融合、跨域数据协同三个方面予以应对。在筑牢电力安全基础方面，持续开展电力安全基础设施建设、平台装备研发，提升电力本体安全基础能力。在智能技术融合方面，开发具有可解释性、可验证性的AI思维与因果推理思维结合技术，支撑新一代电力自适应防御系统的科学决策与精准响应。在跨域数据协同方面，建设基础性信息平台，支持数据和模型的跨行业流动、分享、集成、验证，维持全链条风险协同感知与防御策略优化能力。

针对能源系统耦合下跨能源、跨领域安全防

御的关键问题，需从体系构建、区域协同、机制标准等方面出发，构建贯穿多能互补、跨域协同的综合防御体系。在综合防御体系构建方面，建设“能源-环境-经济”融合的安全防御系统，增强极端情景下的多能协同与风险联防能力。在区域协同方面，“十五五”时期重点开展能源供应区、枢纽区、消费区的综合安全防御科技攻关与工程示范，2035年力争实现省级区域的全面覆盖，2050年基本建成现代综合安全防御体系。在机制标准方面，加快构建支撑跨域防御的碳市场机制、标准规范体系，提升多能源系统耦合下的安全防御水平。

五、结语

本文立足能源转型与能源安全的总体形势，聚焦电力系统安全发展课题，把握新型电力系统发展现状，全面识别电力供应、系统运行、基础设施建设、产业链供应链、极端情景等维度伴生的风险挑战；围绕电力保供与恢复、灵活互济、综合防御等核心点，凝练了新型电力系统安全发展的关键问题，给出了可实际操作的应对策略。后续，加速构建新型电力系统可在六方面进行部署：优化电源结构，结合资源禀赋、环境承载、供需实际条件，差异化布局传统电源与新能源；强化电网平台功能，发挥电网枢纽作用，推动省间与区域电网的互联互通，因地制宜部署组网技术；拓展灵活性资源，深挖系统调节潜力，扩大需求响应规模，切实保障电力供应稳定；推进技术协同创新，突破长周期储能技术，深化数字化、智能化技术应用，增强网络与数据的安全防御能力；健全电力市场体系，支持新能源有序参与市场交易，推进与其他能源形式、碳市场的协同运行；促进能源跨界融合，加强电力与煤炭、油气、核能、氢能、生物质能的协同发展，构建一体化的大能源系统。

展望未来，新型电力系统安全研究仍有诸多待深化之处。关注多源数据融合与智能技术赋能，深化数字孪生、AI在电力供需预测、故障自主防御与协同调度中的应用。注重安全制度设计与技术路线的协同，探索适应高比例可再生能源、多元市场主体参与的系统韧性治理机制。在实践层面，推动跨区域、多场景的仿真验证与应急演练，逐步建立安全、经济、可持续的电力系统韧性评估标准与政策

体系, 为能源安全与绿色低碳转型提供坚实支撑。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 1, 2025; **Revised date:** March 20, 2026

Corresponding author: Zhou Jing is a professor-level senior engineer from China Electric Power Research Institute. Her major research field is energy and power strategic planning. E-mail: zhoujingjing_1@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on China’s Energy Security Strategy” (2022-JB-05)

参考文献

- [1] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117–3125.
Xin B A, Shan B G, Li Q H, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117–3125.
- [2] 王建良, 唐旭. 大变局下的中国能源安全: 挑战与破局 [J]. 国家治理, 2022 (20): 52–55.
Wang J L, Tang X. China’s energy security under the changes unseen in a century: Challenges and breakthroughs [J]. Governance, 2022 (20): 52–55.
- [3] 朱彤. 气候变化、能源转型与新型能源安全 [J]. 中国电力企业管理, 2024 (16): 50–55.
Zhu T. Climate change, energy transformation and new energy security [J]. China Power Enterprise Management, 2024 (16): 50–55.
- [4] 周孝信, 赵强, 张玉琼. “双碳”目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术 [J]. 中国电力企业管理, 2021 (31): 14–17.
Zhou X X, Zhao Q, Zhang Y Q. Development prospect and key technologies of China’s energy and power system under the goal of “double carbon” [J]. China Power Enterprise Management, 2021 (31): 14–17.
- [5] 郭剑波, 王铁柱, 罗魁, 等. 新型电力系统面临的挑战及应对思考 [J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 32–43.
Guo J B, Wang T Z, Luo K, et al. Development of new power systems: Challenges and solutions [J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 32–43.
- [6] 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): 2806–2818.
Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806–2818.
- [7] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149–159.
Liu J Z, Ma L F, Wang Q H, et al. Offshore wind power supports China’s energy transition [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149–159.
- [8] 王庆华, 刘吉臻, 樊欢豹, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 锅炉系统及汽轮发电机系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7136–7166.
Wang Q H, Liu J Z, Fan H B, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: Boiler system and turbine generator system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7136–7166.
- [9] 刘吉臻, 王庆华, 张效宁, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 燃煤耦合储能系统及智能控制系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6855–6882.
Liu J Z, Wang Q H, Zhang X N, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: Coal-fired coupled energy storage system and smart control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6855–6882.
- [10] Ye N N, Zhang Q C, Xu J Y, et al. Thermodynamic analysis of combined energy storage systems for enhancing load ramp flexibility in a coal-fired power plant [J]. Energy, 2025, 335: 137883.
- [11] 贺之渊, 杨杰, 吴亚楠, 等. 能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 99–113.
He Z Y, Yang J, Wu Y N, et al. Investigation on the future AC and DC combined operation form and development trend under energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 99–113.
- [12] Wang C Y, Zhang Q Y, Li C. Multi-architecture power distribution strategy for flexible DC interconnection system considering the capacity limitation [J]. Energy Reports, 2023, 9: 175–184.
- [13] 王成山, 王守相. 智能微网在分布式能源接入中的作用与挑战 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 232–240.
Wang C S, Wang S X. The role and challenge of smart microgrid in the integration of distributed energy resources [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 232–240.
- [14] Wu D P, Li Z X, Zhen Y, et al. Distributed optimal resource control strategy under correlated uncertainties in isolated microgrid [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2025, 44: 101934.
- [15] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369–378.
Chen G P, Liang Z F, Dong Y. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369–378.
- [16] 周静涵, 何永秀, 李润菡, 等. 适应能源转型发展的输配电价动态激励机制研究 [J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2511–2519.
Zhou J H, He Y X, Li R K, et al. Dynamic incentive mechanism for transmission and distribution tariff considering energy transition development [J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2511–2519.
- [17] 吴元瑶, 肖仕武. 构网型储能支撑的新能源孤岛微电网静态电压稳定性分析 [J]. 电网技术, 2026, 50(4): 1444–1456.
Wu Y Y, Xiao S W. Static voltage stability analysis of new energy islanded microgrids supported by grid-forming energy storage [J]. Power System Technology, 2026, 50(4): 1444–1456.
- [18] 张利东, 宋书新, 孙凯祺, 等. 面向新型电力系统构建的构网型储能换流器并网测试技术标准对比与分析 [J]. 中国电机工程学报, 1–14 [2026-04-15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250910.0913.002>.
Zhang L D, Song S X, Sun K Q, et al. Comparison and analysis of grid-connection test technical standards for grid-forming energy storage converters in the context of new power system construction [J]. Proceedings of the CSEE, 1–14 [2026-04-15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250910.0913.002>.
- [19] 汤广福, 周静, 庞辉, 等. 能源安全格局下新型电力系统发展战略

- 略框架 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 79–88.
- Tang G F, Zhou J, Pang H, et al. Strategic framework for new electric power system development under the energy security pattern [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 79–88.
- [20] 国网能源研究院有限公司. “十五五”及未来电力供需重大问题研究 [R]. 北京: 国网能源研究院有限公司, 2024.
- State Grid Energy Research Institute. Research on major issues concerning power supply and demand during the 15th Five-Year Plan period and beyond [R]. Beijing: State Grid Energy Research Institute, 2024.
- [21] Hu J Z, Wang Y F, Li X J, et al. Assessing supply security risk of renewable-dominated power system via entropy-based analytic hierarchy method [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2024, 18(15): 3204–3217.
- [22] Kosai S, Unesaki H. Quantitative analysis on the impact of nuclear energy supply disruption on electricity supply security [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1198–1207.
- [23] 冯君淑, 史一茹, 段金辉, 等. “十五五”电力供需关键形势研判及建议 [J]. 中国工程咨询, 2025 (4): 53–54.
- Feng J S, Shi Y R, Duan J H, et al. Research and suggestions on the key situation of power supply and demand in the 15th Five-Year Plan [J]. *China Engineering Consultants*, 2025 (4): 53–54.
- [24] Sperstad I B, Degefa M Z, Kjølle G. The impact of flexible resources in distribution systems on the security of electricity supply: A literature review [J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 188: 106532.
- [25] 电力规划设计总院. 新型能源体系发展研究蓝皮书 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2025.
- China Electric Power Planning and Engineering Institute. Blue book on the development of the new energy system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2025.
- [26] Sifat M M H, Choudhury S M, Das S K, et al. Towards electric digital twin grid: Technology and framework review [J]. *Energy and AI*, 2023, 11: 100213.
- [27] Yin L F, Cao X H. Quantum-inspired distributed policy-value optimization learning with advanced environmental forecasting for real-time generation control in novel power systems [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 129: 107640.
- [28] Yin L F, Mo N, Lu Y J. Lazy deep Q networks for unified rotor angle stability framework with unified time-scale of power systems with mass distributed energy storage [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 126: 107129.
- [29] 姜海洋, 蒋明华, 丁坤, 等. 极端静稳天气事件下电力系统风险评估与管控 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49(4): 42–52.
- Jiang H Y, Jiang M H, Ding K, et al. Risk assessment and control of power system under extreme steady weather events [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(4): 42–52.
- [30] Wang S L, Wang J, Luan S Y, et al. Deep sparse autoencoders-based community detection and resilience analysis of interdependent infrastructure networks [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2024, 189: 115720.
- [31] 何金良, 庄池杰. 超 / 特高压输电线路雷电绕击分析方法及其适应性 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7426–7439.
- He J L, Zhuang C J. Analysis methods for lightning shielding failure of transmission lines and associated applicability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(18): 7426–7439.
- [32] 罗魁, 郭剑波, 高飞, 等. 新兴能源基础设施安全风险分析与防控体系 [J]. 电网技术, 2024, 48(2): 457–469.
- Luo K, Guo J B, Gao F, et al. Safety risk analysis and prevention control system for emerging energy utilization infrastructure [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 457–469.
- [33] 奇安信威胁情报中心. 网络安全威胁2024年度报告 [R]. 北京: 奇安信威胁情报中心, 2025.
- Qianxin Threat Intelligence Center. Cybersecurity threat 2024 annual report [R]. Beijing: Qianxin Threat Intelligence Center, 2025.
- [34] 王鹏越. 基于攻击路径预测的电力信息物理系统防御资源分配研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学(硕士学位论文), 2013.
- Wang P Y. Research on power cyber-physical system defense resource allocation based on attack path prediction [D]. Qinhuangdao: Yanshan University (Master's thesis), 2013.
- [35] International Energy Agency. Global critical minerals outlook 2025 [R]. Paris: International Energy Agency, 2025.
- [36] International Energy Agency. World energy outlook 2025 [R]. Paris: International Energy Agency, 2025.
- [37] 刘畅, 孙秋洁, 张新伟, 等. 极端天气下城市新型电力系统风险评估方法研究 [J]. 安全与环境学报, 2026, 26(4): 1255–1265.
- Liu C, Sun Q J, Zhang X W, et al. Research on risk assessment method for urban new power system under extreme weather conditions [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2026, 26(4): 1255–1265.
- [38] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505–513.
- Zhou X M, Ge S Y, Li T, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(2): 505–513.
- [39] 孙为民, 孙华东, 何剑, 等. 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述 [J]. 电网技术, 2024, 48(1): 129–139.
- Sun W M, Sun H D, He J, et al. Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1): 129–139.
- [40] 清华大学碳中和研究院. 新型电力系统技术路线展望 [R]. 北京: 清华大学碳中和研究院, 2024.
- Carbon Neutrality Research Institute, Tsinghua University. Outlook on the technological route of new power system [R]. Beijing: Carbon Neutrality Research Institute, Tsinghua University, 2024.
- [41] Xue Y S, Yu X H. Beyond smart grid—cyber—physical—social system in energy future point of view [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(12): 2290–2292.
- [42] 薛禹胜, 谢东亮, 薛峰, 等. 支持信息—物理—社会系统研究的跨领域交互仿真平台 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 138–148.
- Xue Y S, Xie D L, Xue F, et al. A cross-field interactive simulation platform for supporting research on cyber—physical—social systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 138–148.
- [43] 饶宏, 韩丰, 陈政, 等. 我国电力安全供应保障策略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 100–110.
- Rao H, Han F, Chen Z, et al. Strategy for guaranteeing power supply security of China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 100–110.