

安全环保视角下电力行业绿色转型发展探析

纪鹏飞

中国石油集团电能有限公司 黑龙江 大庆 163000

摘 要：电力行业绿色转型是实现“双碳”目标的关键环节，而安全与环保构成转型进程中的双重约束与协同动力。本文从安全环保视角出发，系统剖析电力行业绿色转型的时代背景、关键领域、核心挑战及推进路径。新能源大规模并网在降低碳排放的同时加剧了系统安全稳定运行压力，农村转型短板与市场机制滞后进一步制约协同发展。本文提出以技术创新筑牢底线、以政策协同构建安全网、以全生命周期管理实现深度脱碳、以市场改革激发内生动力的四维路径，为电力行业安全环保协同转型提供理论参考。

关键词：电力行业；绿色转型；安全环保；双碳目标；新型电力系统

引言：全球气候治理进入关键窗口期，电力行业作为碳排放重点领域，其绿色转型已从战略前瞻转向行动攻坚。我国“双碳”目标的提出，进一步加速了电力系统清洁化、低碳化进程。近年来，极端天气频发、新能源出力波动、局部电力供需紧张等现象表明，安全与环保之间存在复杂的张力与耦合关系。如何在保障电力可靠供应的前提下实现深度脱碳，成为亟待破解的现实命题。本文立足安全环保协同视角，系统梳理转型逻辑与现实瓶颈，探索统筹安全与环保的可行路径，以期为新电力系统建设提供决策参考。

1 电力行业绿色转型的时代背景与安全环保逻辑

1.1 “双碳”目标下的转型紧迫性

全球气候变化加剧对能源体系低碳转型形成了刚性倒逼机制。电力行业碳排放占能源活动碳排放总量的40%以上，是减排责任最集中、技术路径最清晰、政策工具最成熟的领域之一。我国承诺力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和，这意味着电力行业须在十年左右时间内完成碳排放达峰并进入快速下降通道。与欧美发达国家数十年转型窗口期不同，我国同时面临压缩式减排与能源消费刚性增长的双重压力，转型节奏之快、规模之大、难度之高前所未有。从国际比较看，我国人均用电量仍低于发达国家水平，工业结构重型化特征明显，电力需求尚未达峰，这要求绿色转型必须在满足经济社会发展用电需求的前提下推进，不能以牺牲增长为代价。转型紧迫性体现为时间窗口收窄与技术成熟度的赛跑：一方面可再生能源成本持续下降，另一方面系统集成成本和安全成本逐步显性化，单纯关注发电侧平准化成本已不足以衡量转型全貌。因此，绿色转型的本质不仅是电源结构的清洁化替代，更是整个电力系统运行逻辑的重构^[1]。

1.2 安全与环保的内在统一性

安全与环保在电力绿色转型中具有深刻内在统一性。从宏观层面看，生态安全本身就是国家安全的有机组成部分，气候变化引发的极端天气事件已直接威胁电力系统安全运行。这表明，若环保目标未能实现，安全基础也将遭受侵蚀；反之，若忽视安全约束而激进转型，则可能因系统崩溃造成更大的环境代价。从技术层面看，提升系统安全性的措施往往兼具环保效益，如储能系统既提供频率支撑又促进新能源消纳，需求侧响应既缓解供需紧张又降低峰值碳排放。从经济层面看，安全与环保成本具有同源性，两者均可通过技术创新和规模化应用实现边际成本递减。认识到这种内在统一性，有助于跳出“先安全后环保”或“环保优先于安全”的线性思维，转向寻求安全裕度与环保绩效的系统最优解。关键在于构建协同机制，使安全投入产生环保效益、环保措施反哺系统安全。

2 电力行业绿色转型的关键领域与实践进展

2.1 能源供给侧：清洁化替代加速推进

据国家能源局统计，截至2024年，我国可再生能源装机规模历史性超过火电，风电、光伏新增装机连续多年位居全球首位。过去十年光伏组件价格下降超过80%，陆上风电度电成本已低于常规煤电。高比例可再生能源接入使得电力系统从“确定性电源跟随确定性负荷”的传统模式，转向“波动性电源与波动性负荷双向匹配”的新模式。火电角色从基荷电源向调节电源转变，煤电“三改联动”（节能、供热、灵活性改造）在全国范围内推进。总体而言，能源供给侧已形成“增量优选清洁、存量优化改造”的转型格局，但清洁替代速

度与系统承载能力之间的匹配问题仍需持续关注。

2.2 电网侧：智能化升级构建安全防线

我国加速推进以智能电网为核心的新型电力系统建设，构建“坚强主网+智能配网+微电网”的立体架构。特高压骨干网架持续完善，跨区域资源配置能力显著增强。智能配电网自动化覆盖率、故障自愈能力显著提升，分布式光伏、电动汽车充电桩等新要素实现有序接入。新一代调度自动化系统引入人工智能技术，新能源功率预测精度提高。数字孪生技术在电网仿真、故障诊断等场景得到应用。这些智能化升级措施既直接服务于电网运行安全，也为新能源高效消纳创造了条件。但配电网建设相对滞后于电源侧发展速度，部分地区仍存在“重发轻供”倾向^[2]。

2.3 需求侧：能效提升与负荷优化

能效提升是降低全社会用能成本、减少碳排放的基础性手段。虚拟电厂、需求响应、负荷聚合商等新业态快速发展，将分散的空调、充电桩、储能设备等聚合为可调度资源，在电网供需紧张时提供削峰填谷服务。目前全国已有超过 20 个省份建立需求响应市场机制，截至 2023 年，最大响应能力超过 5000 万千瓦。电动汽车作为移动储能单元，其有序充电和车网互动（V2G）技术正在试点验证。需求侧资源开发以较低社会成本换取系统安全裕度和碳排放空间，具有显著的安全环保双重价值。当前主要障碍在于用户参与激励机制不够完善、商业模式可持续性有待验证。

2.4 碳排放管理：全生命周期视角

电力行业碳排放管理正从传统的“排放端核算”向全生命周期视角拓展。对于光伏、风电等新能源，虽然运行环节接近零排放，但制造环节仍产生显著碳排放。全国碳市场已纳入发电行业，覆盖约 45 亿吨二氧化碳排放，碳配额价格信号初步形成。碳捕集、利用与封存（CCUS）技术在煤电领域开展示范，但成本高企制约规模化应用。绿色电力证书、碳排放核证减排量等市场化工具推动环境权益显性化。全生命周期视角提醒我们，绿色转型需要超越“零排放就是绿色”的简单判断，对各类技术路线的环境影响进行全面评估。

3 安全环保视角下转型面临的核心挑战

3.1 系统安全稳定运行压力陡增

随着新能源占比快速提升，系统等效惯量持续下降，在同等功率扰动下频率变化率更高，易触发低频减载。新能源场站缺乏动态无功补偿能力，可能引发连锁脱网。高比例电力电子化电网的稳定机理更为复杂，现

有保护控制体系面临适应性挑战。极端天气对电力设施的物理冲击加剧，冰灾、雷击、山火等自然灾害频发。网络空间安全风险同步上升，针对工控系统的网络攻击可能造成物理破坏。这些安全风险存在级联放大效应，需要建立涵盖物理、信息、多灾害复合场景的综合安全防御体系^[3]。

3.2 关键技术经济性仍需突破

储能技术是提升系统灵活性的核心手段，但电化学储能在长时储能场景下仍缺乏经济竞争力。氢能全流程效率偏低且成本高昂。碳捕集成本每吨二氧化碳约 200-400 元，且封存地质条件存在区域不均衡。核电单千瓦造价是煤电的两倍以上。关键技术的关键性突破依赖于材料科学、制造工艺、规模效应的协同推进。当前需要警惕过度依赖某几项技术突破可能形成新的“技术锁定”，应在多元化技术路线中保持审慎布局。

3.3 农村绿色转型短板明显

农村电网建设标准偏低，网架结构薄弱、供电半径过长、变压器容量不足，难以承载大规模分布式电源接入。分布式光伏“整县推进”中，部分县域已因电网承载能力不足而暂停接入申请。农村电气化水平偏低，推进“以电代煤”需要配套电网增容改造，投资规模巨大而回报周期长。农村电力运维力量薄弱，设备投运后安全监管能力不足。农村电力市场发育滞后，绿色收益转化不足。需要统筹新型城镇化与乡村全面振兴战略，将农村电网升级纳入“新基建”重点投向。

3.4 市场机制与商业模式亟待完善

电力现货市场与中长期市场衔接不够顺畅，新能源边际运行成本接近于零，压低市场电价，挤压火电等可调节电源的生存空间。辅助服务市场尚未完全独立运行，安全服务的定价机制不够清晰。绿色电力市场与碳市场协同不足，存在双重计算或重复交易风险。分布式光伏、用户侧储能等分散资源的商业模型尚不成熟，收益来源单一。碳金融、绿色债券等工具渗透率偏低。市场机制完善需要兼顾效率与公平，既要通过价格信号引导资源优化配置，也要设计过渡性保障机制。

4 安全环保协同下的绿色转型路径

4.1 技术创新驱动：筑牢安全环保底线

电源侧应重点突破高效低成本储能技术，发展压缩空气储能、液流电池、钠离子电池等多元技术路线，缓解新能源间歇性带来的调峰压力。煤电低碳化应加快推进生物质掺烧、氨混烧、碳捕集利用与封存（CCUS）等技术示范，降低存量煤电碳排放强度。电网侧应发展

基于宽频测量、数字孪生、人工智能的新一代调度控制系统,提升对高比例电力电子化系统的实时感知与精准控制能力。负荷侧加快虚拟电厂、车网互动(V2G)等技术的规模化应用,引导用户参与系统调节。安全技术体系需涵盖电网韧性增强、工控系统网络安全防护、极端天气应急响应等内容。政府可通过首台(套)保险补偿、绿色技术目录认定等政策工具,有效降低企业创新风险,加速技术从实验室走向规模化应用。

4.2 政策协同保障:构建制度安全网

规划层面,应将电力发展规划与国土空间规划、生态环境保护规划有效衔接,在省级层面试点编制“安全环保协同电力发展规划”,从源头避免资源错配与环境冲突。标准层面,加快制修订新能源场站涉网性能、储能系统安全、碳排放核算等关键技术标准,填补制度空白^[4]。监管层面,建立电力安全与环保协同监管机制,推动能源监管机构与生态环境执法机构开展联合检查,避免多头管理与监管真空。财政政策应优化可再生能源电价附加资金使用方向,向兼顾安全与环保效益的领域倾斜,同时建立煤电有序退出补偿与职工再就业安置机制。政策协同的关键在于打破部门壁垒,建立跨部门常态化协调机制,形成财税、金融、产业、环保多维联动的制度合力。

4.3 全生命周期管理:实现深度脱碳

将绿色转型视野从运营环节拓展到“规划设计—设备制造—建设施工—运营维护—退役回收”全过程。规划设计阶段开展项目级碳足迹评估和安全风险预评价,从源头控制环境与安全隐。设备制造阶段推行绿色供应链管理,建立生产者责任延伸制度,倒逼上游企业降低碳排放。建设施工阶段加强现场安全环保管理,推广绿色建造技术。运营维护阶段建立设备状态监测与预测性维护体系,延长设备寿命、减少资源浪费。退役回收阶段建设区域性电力设备循环利用中心,重点解决光伏玻璃、风机叶片复合材料、锂电池电解液等废弃物资源化难题。同时构建电力行业安全环保大数据平台,实现全链条数据贯通与可追溯管理。

4.4 市场机制改革:激发内生动力

加快电力现货市场建设全覆盖,形成分时、分区域、分位置的精细化价格信号,真实反映电力的环境与安全成本。引入稀缺电价机制,激励各类资源在关键时段提供可用容量。建立独立于电能量市场的容量市场或战略备用机制,容量定价综合考虑机组可靠性、区位价值与碳排放强度。完善辅助服务市场交易品种,增设转动惯量、快速爬坡、黑启动等安全服务交易品种,允许第三方主体平等参与。推动绿电交易、绿证交易与碳市场协同运行,明确环境权益唯一性确认规则,避免重复计算。在配电环节有序放开增量配电网业务,鼓励社会资本投资运营综合能源服务项目,以市场机制激发各主体参与绿色转型的内生动力。

结束语

电力行业绿色转型是安全与环保目标交织的系统工程。研究表明,新能源发展与煤电退出困境本质上反映了转型节奏与系统承载力的匹配问题。安全与环保的统一性在于:只有安全可靠的系统才能支撑低碳发展,只有清洁环保的结构才能消除气候风险。未来十年是转型攻坚期,需在多维度形成合力,以协同评价体系为指引,以智能电网和储能技术为支撑,以全生命周期管理为手段,在动态优化中逼近安全与环保的最佳平衡点,为全面绿色转型筑牢电力根基。

参考文献

- [1] 查俊伟,张文业,万宝全,等.新型电力系统下智能环保电工绝缘材料研究进展[J].高电压技术,2025,51(8):4417-4433.
- [2] 白振鹏.新能源电力建设中安全环保技术创新与实践探索[J].建筑与施工,2026,5(6):128-130.
- [3] 景世银.电力建设安全环保绩效评价及持续改进方法研究[J].建筑工程与设计,2026,5(4):116-118.
- [4] 王晖,王海,杨迎,等.安全环保行业数字化转型的“安源方案”[J].创新世界周刊,2025(3):108-111.