

风光可再生能源高水平开发利用策略研究

杜祥琬^{1*}, 刘晓龙², 田智宇³, 郭磊⁴, 高晓楠⁴, 张籍⁵, 崔磊磊⁶

(1. 中国工程院, 北京 100088; 2. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 3. 国家发展和改革委员会能源研究所, 北京 100038; 4. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 5. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 武汉 430300; 6. 中国工程物理研究院, 北京 100083)

摘要: 随着技术进步与“双碳”战略深入实施, 风电、光伏等可再生能源已从补充能源逐步发展为主体能源, 未来将在能源体系中承担关键作用; 但风光可再生能源具有天然间歇性、波动性与随机性特征, 将其转化为可调控的灵活资源, 成为亟待解决的重大科学与工程问题。本文梳理了风光可再生能源高水平开发利用面临的问题和挑战, 提出了风光可再生能源间歇性、波动性和随机性转变为灵活性的路径和关键策略, 并给出了具体措施建议。研究提出, 坚持加强“源网荷储”协同互动的总体路径, 通过加强可再生能源开发与传统电源改造、提升电网资源配置能力、提升多元负荷的精准监控和需求响应能力、建设分层级多元化储能调控体系等关键策略, 可以实现风光可再生能源特性的转变以及高水平开发利用。研究建议, 完善相关法律法规和政策体系, 优化分布式可再生能源发展的支持政策, 加快提升集中式可再生能源开发的零碳效益水平, 深化电力体制改革, 适度超前布局电网基础设施, 挖掘各类灵活性调节资源潜力, 持续加快可再生能源关键技术创新, 加强政策协同与监管, 以深入推动风光可再生能源的高水平开发利用, 助力实现“双碳”和能源强国建设目标。

关键词: 可再生能源; 太阳能光伏; 风能; 源网荷储

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A

High-Level Development and Utilization of Wind and Solar Renewable Energy

Du Xiangwan^{1*}, Liu Xiaolong², Tian Zhiyu³, Guo Lei⁴, Gao Xiaonan⁴, Zhang Ji⁵, Cui Leilei⁶

(1. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 2. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 3. Energy Research Institute, National Development and Reform Commission, Beijing 100038, China;

4. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 5. Economic and Technological Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430300, China; 6. China Academy of Engineering Physics, Beijing 100083, China)

Abstract: With technological advancement and the deepening pursuit of carbon peaking and carbon neutrality, renewable energy sources such as wind and solar power have evolved from being supplementary into mainstays of the energy system, poised to serve as its very backbone. However, wind and solar energy sources are inherently intermittent, fluctuating, and stochastic. Therefore, how to transform these energy into controllable, flexible resources has emerged as a pressing scientific and engineering challenge. This study reviews the challenges confronting the high-level development and utilization of wind and solar renewables, sets forth pathways and key strategies for converting their intermittency, volatility, and randomness into flexibility, and offers concrete policy

收稿日期: 2025-08-20; **修回日期:** 2025-11-05

通讯作者: *杜祥琬, 中国工程院院士, 研究方向为能源和环境发展战略; E-mail: duxw@cae.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“高水平开发利用可再生能源: 由间歇性转向灵活性的策略研究”(2024-HZ-24); 内蒙古自治区科技计划项目(2025KJHZ0047); 中国气象局政策研究气象软科学课题(2025RKXMS14)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

recommendations. The study proposes that, by adhering to the overarching approach of strengthening coordinated interaction among “source, grid, load, and storage,” and by advancing renewable energy development alongside conventional power source retrofitting, enhancing the grid’s capacity for resource allocation, improving precision monitoring and demand response of diversified loads, and establishing a hierarchical, diversified energy storage regulation system, the intrinsic characteristics of wind and solar energy can be fundamentally reshaped, enabling their high-level exploitation. The study further recommends refining relevant laws, regulations, and policy frameworks; optimizing support policies for distributed renewable energy; enhancing zero-carbon benefits from centralized renewable development; deepening power sector reforms; deploying grid infrastructure with moderate foresight; unlocking the potentials of various flexibility resources; continuously accelerating innovation in key renewable technologies; and strengthening policy coordination and oversight, so as to drive the high-quality development and utilization of wind and solar renewables and advance the goals of carbon peaking, carbon neutrality, and building an energy-strong nation.

Keywords: renewable energy; solar photovoltaic; wind energy; source–grid–load–storage

一、前言

党的二十大报告指出，实现碳达峰、碳中和（“双碳”）是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，必须立足我国能源资源禀赋，坚持先立后破。正确认识我国能源资源禀赋，事关能源革命、生态文明和“双碳”等国家战略、相关规划和政策的制定与落实。长期以来，我国的能源系统主要依赖化石能源，随着技术的发展，风光等可再生能源逐渐从“微不足道”转变为当前的“举足轻重”，未来将“担当大任”。

我国风光可再生能源资源非常丰富。研究显示，我国陆上 100 m 高度的风能资源技术可开发量约为 8.69×10^9 kW，近海 100 m 高度的风能资源技术可开发量约为 2.25×10^9 kW；陆上集中式光伏的技术可开发量约为 4.188×10^{10} kW，陆上分布式光伏的技术可开发量约为 3.73×10^9 kW，即在当前技术水平下，我国风电和光伏的技术可开发量约为 5.655×10^{10} kW，约为碳中和情境下所需风光装机容量的 9 倍^[1]。随着技术的不断进步，如风机单机容量越来越大（轮毂高度越来越高、叶片越来越长）、光伏发电的转化效率越来越高，我国风能、太阳能资源的技术经济可开发量也会相应增加。但当前我国风光累计开发量仅为技术经济可开发量的百分之几，未来开发潜力巨大^[2]。

风光可再生能源资源潜力巨大，但具有间歇性、波动性和随机性等特点，如何将其转变为人为可控制的灵活性资源，是涉及理念、技术、工程、机制和政策等系统性变革的重大课题。2023 年，国家能源局明确提出了到 2030 年非化石能源比重达到 25% 左右、2060 年新能源成为发电量结构主体电源和基础保障性电源的发展目标^[3]。未来，大规模发

展风光等可再生能源势不可挡，科学谋划高水平开发和利用风光可再生能源的路径及策略显得尤为紧迫。

为深入推进我国风光可再生能源高水平开发利用，本文深入剖析我国风光可再生能源高水平开发利用面临的问题和挑战，分别从“源网荷储”维度及其协同互动角度，提出风光可再生能源从间歇性、随机性和波动性转变为灵活性的路径和策略，并给出具体的对策建议，为推动国家“双碳”战略目标实现和能源强国建设提供重要支撑。

二、高水平开发利用风光可再生能源面临的问题和挑战

（一）集中式风光可再生能源开发利用面临的问题和挑战

1. 送端集中式大基地的灵活性稀缺与安全稳定问题亟待解决

“沙戈荒”基地项目以风光发电为主，基荷支撑普遍不足。我国特高压直流外送发展迅速，但风光可再生能源具有出力随机性强、波动性大、灵活调节资源有限等特点，导致与直流通道的利用率难以保障。此外，随着高比例风光可再生能源的接入，送端电网同步特性弱化，局部地区短路比降低，宽频振荡及暂态过电压等安全稳定问题日益凸显^[4]。此外，“沙戈荒”地区的电网调节消纳能力有限，系统惯性低、抗扰动能力差，风光发电机组对电力系统的暂态稳定支撑能力有限。现有技术支撑风光可再生能源大规模并网方面仍存在不足，如构网能力的大型风电机组电压源型并网控制技术虽有一定优势，但需进一步优化以适应弱交流网的并网环境。

2. 通道送出能力与受端电网消纳能力成为关键制约

我国陆上风电和光伏发电基地多集中于风光资源丰富的西北、东北、华北等地区，但这些地区的本地电力负荷有限，主要依靠跨省、跨区外送来实现电力消纳。目前，电力外送通道的建设与规划存在诸多瓶颈。一方面，现有外送通道的容量难以满足大规模可再生能源的输送需求，致使出现大量的“弃风弃光”现象；另一方面，受端电网可再生能源接纳能力和消纳意愿不强，午间调峰互济空间逐年缩小，调峰问题整体突出，加之跨区输电交易机制不够完善，制约了风光可再生能源的外送消纳^[5]。

3. 资源精细化评估与可再生能源资源特性挖掘仍需加强

目前，“沙戈荒”地区的风光资源评估多采用物理与统计相结合的模拟方法，但土地属性、资源储量、地形地貌等因素对开发潜力的影响仍需进一步精细化评估。同时，沙漠、荒地等适合新能源开发的区域多为生态脆弱区域，在生态红线管控日趋严格的背景下，新能源开发外送面临的限制因素增多。此外，风光可再生能源的发电出力特性与气象要素高度相关，连续长时间的“低风速、低辐照”气象条件会造成可再生能源出力持续偏低，仅靠短时调节性资源难以应对，致使风光大基地面临电力供应充裕度不足的挑战。

4. 海上风电规划建设难度较大

我国海上风能资源主要分布在东南沿海经济发达地区，区域内海洋活动频繁，用海需求多样，海上风电的用海需求与交通、海事、渔业、国防、环境保护等相互交织，可用于海上风电开发及并网送出的通道资源趋于紧张。同时，海上风电开发建设涉及自然资源、海事、国防、生态环境、农业农村等多个部门，部分管理规定不统一，导致海上风电项目平均审批时间较长。

5. 环境气候等因素对可再生能源开发的影响增大

我国集中式风光项目主要集中在西北地区，该地区普遍干旱少雨，沙尘天气较多，加上近年来多次出现强度大、突发性强的极端降水事件，对风电机组和光伏组件设备的质量及可靠性带来较大影响。长期来看，气候变化对可再生能源开发的影响呈增大趋势。研究表明，到21世纪末，在全球（除

南极外）的陆地区域中，气候变化将导致32%区域的风能系统、44%区域的太阳能系统在能源供需匹配程度方面呈下降趋势^[6]。

（二）分布式风光可再生能源开发利用面临的问题和挑战

1. 配电网承载力面临瓶颈，用电高峰供需失衡截至2024年年底，全国分布式光伏累计装机达 3.7×10^8 kW，占光伏总装机的42%，但配电网建设滞后导致400多个市县被划为电网承载力饱和区域，暂停了新增项目备案。在重大节假日期间，工业负荷骤降，但分布式风光可再生资源的发电量仍然较高，导致供需失衡现象严重。此外，许多分布式可再生能源快速发展的地区多为直流馈入的受端地区，在主网电压或频率下跌时极易引发直流和分布式新能源的连锁反应，使保障系统安全稳定的挑战增大。

2. 分布式发电交易困难，市场定价机制仍需完善分布式风光可再生能源更适合就近消纳，但由于部分地区核定的过网费较高，无法体现分布式可再生能源的特点，难以发挥分布式能源就近消纳的优势。不少地区虽开展电网承载力测算与发布工作，但受服务保障等压力影响，往往仍需对分布式电源予以接入，难以实现真正的就地、就近消纳。同时，在新能源上网电量即将全面进入电力市场的背景下，新能源在大发时段会成为边际定价机组，频繁产生极低价甚至负价，为此，亟需创新分布式能源高比例参与电力市场的定价机制。

3. 分散式风电开发面临电力消纳和市场机制不完善等问题

我国部分地区对分散式风电资源实施指标竞配，对分散式风电接入电网制定的标准过严。同时，分散式风电参与电力市场的准入规则和价格机制也不明确，辅助服务费用的分摊机制不透明，影响了项目的收益预期。在支持政策方面，许多地区对分散式风电的审批手续繁琐，涉及能源、农业农村、环境保护、国土等多个部门，项目落地的非技术成本较高。

（三）电力系统储调支撑能力提升面临的问题和挑战

1. 储能方面

科学合理的储能配置机制有待健全。我国部分

地区将配置储能作为可再生能源发电并网的前置条件，在未经过充分论证情况下设置的储能配置比例目标，不仅推高了可再生能源项目的开发成本，还出现了“建而不用”等问题。同时，缺少有效的储能成本疏导机制^[7]，可再生能源配置储能的成本主要由可再生能源开发企业承担，致使部分企业片面追求“圈占”风光资源，对配置储能的质量水平、运行效果等不够重视，造成储能利用率低、经济效益差。此外，由于储能发展的长效机制不够健全，储能系统性能评价、寿命考核、安全运行等尚未形成统一标准，企业开展运行维护的动力普遍不足，对储能设施全生命周期的安全、生态风险重视不够。

2. 需求侧响应方面

需求侧资源的参与程度不高。电力系统缺乏对用户侧资源的全面识别、聚合与建模手段，难以形成标准化、可调度的资源池^[8]。随着新型负荷的快速发展，智能终端与计量设施的覆盖率低以及边缘计算、数据采集与控制技术尚未大规模部署，不利于新型负荷主动参与系统优化。同时，由于适应新型负荷主体的市场运营体系不完善，我国各地区的电力需求响应机制以固定价格补贴为主，缺乏成型的价格形成机制与成本疏导模式，导致需求响应的可持续性受限，难以充分调动新型负荷主体的积极性。此外，实现电力需求侧资源的全面可观、可测、可调、可控，是更好开展电力需求侧管理工作的前提和基础，但现有调控技术手段尚无法做到对海量电力需求侧资源的观测和调控。

3. 电网方面

大规模可再生能源发电成本虽持续下降，但其间歇性、波动性、随机性等特点以及低电价和配套电网投入等因素共同挤压了电力企业的营收与盈利空间。输电交易电价弹性不足，跨省区电力交易市场尚未建立完善的辅助服务补偿机制，难以适应市场变化需求。配电网、分布式微网等发展相对缓慢。配电网规划缺乏对灵活负荷、分布式资源、气象与行为模式的动态耦合预测机制，发展面临可靠供电、高效消纳和灵活运行等多重挑战，导致部分区域可再生能源建而不送、负荷增而不稳，出现结构性冗余或瓶颈问题。微电网在统一接口规范和技术标准方面仍存在空白，运营模式和机制不健全，盈利模式单一；微电网内部未能高度集成“源

荷储控”，致使多源协同调控、边缘智能和数据感知能力不足，亟需进一步攻关电网智能调控关键技术。

三、风光可再生能源高水平开发利用的路径和关键策略

推动可再生能源由间歇性、波动性和随机性转向灵活性，是构建新型电力系统、新型能源体系、实现“双碳”目标的关键抓手，需要依托新一代信息技术，统筹源、网、荷、储资源，以“源网荷储”互动及多能互补为支撑，满足绿色消费、安全供应、经济高效的综合性目标^[9]。

（一）总体路径：加强“源网荷储”协同互动

“源网荷储”协同互动对电源的感知预测能力、电网的能量和信息连接传输能力、负荷和储能的调度能力及对电碳协同能力（包括电-碳市场）的要求进一步提高，需要开展电力流、业务流、数据流和价值流等多流融合，促进可再生能源消纳、电力电量平衡^[10]。

1. “源网荷储”协同互动总体技术架构

针对“源网荷储”协同互动的物理系统，优化运行模式，促进新型电力系统各环节的连接更加紧密，业务协同能力增强，推动电力流和业务流实现有效融合^[11,12]。“源网荷储”协同互动范围由单纯的发电、电网、用户向储能、聚合商等新类型拓展，互动品种由电力单一能源向电、热、气综合能源转变，互动频率由短周期的需求侧响应向长短周期并济的协同规划、协同调度、协同服务转变。

2. “源网荷储”协同互动政策与市场激励机制

针对“源网荷储”协同互动的社会系统，完善支撑机制，推动不同的企业、行业实现有效协同，全社会的系统性成本收益实现最优化，绿色低碳价值日益凸显。互动主体由集中式大用户参与为主向集中式、分布式兼具的大小用户共同参与转变，互动收益由以电力安全保供的社会效益为主向兼顾绿色清洁低碳和用户降本增收的多元化效益转变，互动模式由以计划性控制为主向灵活性市场响应参与水平提升转变^[13]。

3. “源网荷储”协同互动数智化支撑基础

针对“源网荷储”协同互动的数字系统，夯实

数字底座，以数据作为核心生产要素，打通“源网荷储”间的信息交互环节，并依托强大的“电力+算力”，透过设备状态数据、用户数据、环境数据之间的关系，挖掘设备运行规律和潜在风险。进一步加深“源网荷储”协同互动方式中数字化、智能化先进技术优势与电力系统业务需求结合程度，将在促进能源电力系统技术支撑体系优化、系统运行与客户服务模式创新、能源电力人工智能新产业与新业态发展三方面发挥重要作用。

(二) 关键策略

1. 加强可再生能源开发与传统电源改造

(1) 创新可再生能源集中式/分布式开发方式

一是科学规划可再生能源项目布局。综合考虑资源禀赋、消纳水平、跨省输电通道建设等接入条件，合理安排项目布点、规模、时序。依托地区资源优势和行业优势，结合当地优势产业消纳，合理规划风光装机配比，优化储能布点、强化储能项目管理、优化储能调控机制，形成可再生能源可持续发展模式。二是推动构网型技术发展应用。加强构网型光伏、构网型储能等技术应用，探索在可再生能源富集地区、大电网末端、大型工业园区、城市电动汽车充电网络等典型场景建设构网型技术试点示范，提升电网应对风险能力。加大新型技术研发，编制构网型技术有关技术导则与国家标准，规范行业发展。开展与人工智能、柔性惯量等技术的融合研究，推进构网型技术不断创新。三是推动分布式光伏高质量发展。明确备案主体，将分布式光伏发电按接入电压等级和接入容量区分备案类型，明晰项目责任主体。构建分布式光伏调控体系，发布全国统一的“可观、可测、可调、可控”技术路线，形成公平合理的调控机制。四是创新分散式风电发展模式。通过技术创新研发更高效、更智能的风电机组，适应低风速、复杂地形条件，显著提升风电项目的经济性和可行性。通过模式创新构建健康的发展生态，探索收益分配新机制，推动分散式风电健康发展。

(2) 传统电源灵活性改造

一是创新政策与市场机制，激发灵活性改造动力。完善煤电、水电等传统能源灵活性改造的政策支持体系，强化经济激励机制，推动发电企业积极改造。二是加强技术研发，提升机组调峰能力。鼓

励发电企业积极研发新技术、探索新模式，实现机组低负荷运行稳定性提升并降低能耗。研究煤电与储能技术的集成应用方法，构建多能互补的综合能源系统，提高煤电机组的多能互补价值和系统整体灵活性。三是完善标准规范，保障改造质量效果。建立统一的煤电灵活性改造技术标准体系，明确改造技术要求、验收标准和运行规范，确保改造项目的安全性、可靠性和经济性。

2. 提升电网资源配置能力

(1) 提升电网跨区平衡互济能力

一是结合地区发展特点，加强跨区输电通道规划建设。持续开展电网运行预测分析，超前规划跨区输电通道，确保清洁能源的高效传输与利用。二是推动“源网”协同发展，提高跨省、跨区输电通道利用率。由国家相关主管部门统筹协调和牵头组织输电通道送、受电地区主管部门及相关电网企业、发电企业及用户主体，按照“公平合理、合作共赢、资源优化”的原则，协商确定长期送受电协议，保障输电通道的长期、稳定、高效运行。三是优化交易电价定价机制，促进合理分摊电力输送成本。综合不同电力输送通道的建设及运营成本，兼顾地域特征、安全保障等必要因素，依据输送规模、成交规模、合作潜力等标准，将输送成本合理分配至供需双方。四是完善绿电交易市场，减少跨区输电壁垒。建立全国统一的绿电交易机制，构建统一市场体系下的碳减排核算标准。推行跨区域绿电现货市场交易，破除地方保护壁垒，避免部分省份为完成各类配额目标而不愿外售绿电的情况。

(2) 提升配电网区域内灵活资源调度水平

一是强化顶层设计，分层分级平衡。按照“就地就近、自下而上、分层分级”的原则，以平衡单元为基本要素，以配电网透明化、数智化、平台化为特征，逐级挖掘“源网荷储”资源潜力，主动构建各电压等级、各种规模的平衡组群，推动“源网荷储”各环节灵活性资源协同优化和统筹衔接。二是加快灵活调节资源建设。抽蓄、煤电和新型储能是目前最重要的调节资源。各地应常态化开展可再生能源消纳水平测算，明确灵活调节资源需求，因地制宜制定各类资源建设时序，做好投产衔接。探索应用一批新型储能技术，建成/投产一批新型储能国家试点示范项目，探索多种储能技术联合应用形式。三是深挖调节资源潜力。加快网、荷侧储

能建设，逐步实现调节资源“分散化”，提升本地消纳能力。完善价格机制，充分发挥电价信号作用。广泛聚合资源打造虚拟电厂等新业态，鼓励引导更多中、小、微企业参与虚拟电厂建设运营。四是完善配电网新型调度体系。在管理机制方面，研发新型多层次调度系统；在调度技术方面，配电网透明化和数智化水平是建设新型电力调度支持系统的关键，依托科学经济的透明化实现对分布式可再生能源主体实时监测感知，通过数智调控技术实现精细化、自动化管理，基于融合共享平台对配电网进行智能决策和协同控制。

（3）因地制宜推广智能微电网

一是强化政策与标准体系建设。国家和地方协同发力，细化微电网发展政策，明确建设进程，规范微电网准入，强化主体责任，激发市场活力。加快标准化建设，加强试点推广，总结出具备可复制性、可推广价值的成套解决方案。二是推动核心技术突破与创新。开发先进分布式电源和储能技术，构建安全充裕的智能微电网电源基础；开发低时延、高带宽、强可靠性通信技术，筑牢微电网通信基础；构建人工智能微电网控制平台，实现供需平衡、并/离网切换、电压校正等功能，实现各主体自由进出系统。三是优化运营模式与市场机制。探索多元化运营模式，丰富场景应用，拓展盈利渠道。推动微电网参与电力现货市场和辅助服务市场，通过提供调频、调压等服务获取额外收益。完善市场准入规则和交易机制，吸引更多社会资本参与。通过示范项目推广，提升市场认知度，促进微电网产业健康发展。

3. 提升多元负荷的精准监控和需求响应能力

针对建筑空调、电动汽车和数据中心三大典型负荷，分别提出负荷响应的路径和应对策略^[14-16]。

（1）建筑空调负荷智能响应

一是积极推动并发布空调负荷管理专项政策。在国家层面，制定相关顶层设计，将空调降温负荷纳入电力负荷管理范畴，并加快修订空调设备技术和通信等标准；在地方层面，因地制宜发布配套实施细则。二是强化市场化引导作用。结合各地负荷特性，优化峰谷时段划分，合理拉大峰谷价差，因地制宜实施尖峰电价；发挥虚拟电厂、负荷聚合商等新型主体作用，建立健全空调降温负荷聚合参与需求响应及现货、辅助服务市场的机制。同时，加

大节约用电宣传引导力度。三是扩大空调可调资源规模。对于存量高压商业和公共机构用户，开展空调负荷识别测算，排定重点用户清单，加快推动现场分路改造；对于含中央空调的高压新增用户，引导将空调负荷单独配电，并与受电工程同步安装负荷管理装置；对于具备调节潜力的第三方平台，推动规范接入负荷管理系统，确保统一管理、统一调控、统一服务。

（2）电动汽车负荷智能响应

一是开发车网互动人工智能分析模型与应用功能，识别优质调节资源，结合车网互动技术和市场机制，实现电动汽车充放电可调潜力预测，动态平衡充放电集群调控、充放电优化方案智能推荐等功能。二是依托充电桩和电动汽车终端数据采集设备，建立车网互动“能耗在线监测系统”，推演电动汽车全生命周期的碳排放监测，形成绿色充放电建议。三是开发车网互动集群柔调平台及面向车主的充电服务系统，实现电动汽车充放电可调潜力预测，动态平衡充放电集群调控、充放电优化方案智能推荐等功能。四是明确车网互动不同主体的互动架构，针对电网企业源荷互动系统、充电运营商、电动汽车用户等的需求和定位，研发融合数字人民币支付激励模式与工具的车网协同互动架构和相应技术体系。

（3）数据中心等新型负荷智能响应

一是直接负荷控制。数据中心运营商可将数据中心各项运行参数、约束条件发送给电网侧，由电网侧根据这些数据对数据中心服务器的运行状态以及到达数据中心的负荷进行直接调度。二是电价信号引导。数据中心运营商将到达服务器的数据根据分散在各地的数据中心的当地电价以及其处理上限进行调配，避免单个数据中心负荷较大，同时达到数据中心总电费最低的目标。三是参与电力市场。数据中心可以调整自身用电模式，参与电力市场的运作。四是多站融合。探索利用点多面广的电网变电站资源，发挥变电站地理优势，依托站内空间、电力等资源，融合建设运营数据中心站、第五代移动通信（5G）基站、储能站等，以期达到优化资源整合、挖掘增值业务、助力新型基础设施建设等目的，推动经济社会发展。五是开展余热利用。数据中心机房正常运行温度需要控制在18~25℃，而数据中心的信息技术设备在昼夜不间断运行中会

产生大量热能，这些余热可以成为周边建筑供热的优质热源。

4. 建设分层级多元化储能调度体系

(1) 提升新型储能高效利用

一是提高新型储能设施规划布局的均衡性与适配性。建立新型储能综合规划机制，考虑各省的可再生能源发展、电力供需平衡等现状形势，以及抽水蓄能、煤电灵活性改造等灵活性调节资源分布情况，按照“总量适度超前，综合考虑电力系统电力平衡、调峰需求、电网承载能力”的规划布局原则，在不同重点区域布局不同时长储能。二是系统深入研究各类储能功能定位与应用价值量化评估。明确各类储能技术在新型电力系统中的功能定位，加强多元储能应用价值的系统评估，为合理制定产业政策、市场和价格机制提供重要支撑。三是积极合理推进可再生能源入市及配储转独储的政策落实。在综合考虑电力安全保供等因素的前提下，逐步合理加大可再生能源参与电力市场交易的比例，引导可再生能源由强制配储向主动配储转变。四是推动完善适应新型储能功能特性的辅助服务和容量市场机制。推动各地优化完善辅助服务交易品种、限价等交易细则，充分发挥新型储能爬坡、黑启动、备用、惯量支撑等方面的优势。探索构建适用于包括新型储能在内的多种可控电力容量的容量补偿机制或容量市场，通过市场竞争体现新型储能的容量价值^[7]。

(2) 结合应用场景，开展多元储能布局

在电源侧储能方面：一是平滑可再生能源出力曲线。利用储能装置与可再生能源发电装置联合运行，平滑可再生能源发电出力波动，使随机变化的输出功率转换为相对稳定的输出。二是提供容量支撑和调峰调频能力，支撑风光可再生能源虚拟同步运行，使可再生能源场站具备一定虚拟惯性，提高大电网安全水平。三是提升火电调节性能。储能技术可配合火电机组，共同跟踪电力系统调频指令，以有效提升火电机组调频性能，合理分担火电机组调频压力。四是提升高渗透率分布式光伏承载力。通过配置储能并加强光、储、充协同运行，解决居民用电、光伏发电、汽车充电时间不协调问题，有效提高农村光伏自平衡能力，提升农村地区清洁电力保障能力。

在电网侧储能方面：一是提供调峰、调频服

务。储能技术通过提供调峰、调频辅助服务，提升电网运行灵活性，缓解电网调峰调频压力，同时解决高比例可再生能源消纳问题。二是提供事故备用和黑启动服务。在电网发生故障时，储能技术能够在短时间内启动，以维持终端用户用电需求，避免电网故障修复过程中的电能中断，保证持续可靠供电。三是增强电网薄弱区域供电保障能力。在微电网中配置储能设施，可解决大电网无法延伸覆盖的偏远山区、海岛等地区的供电问题。四是提升系统应急保障能力。储能技术具备有功、无功双重快速支撑能力，可将大电网故障应急处理时间从分钟级缩短至毫秒级，能为大电网提供虚拟同步惯量，保障电网的安全可靠运行。

在用户侧储能方面：一是支撑分布式供能系统建设。围绕大数据中心、5G基站、工业园区、公路服务区等终端用户，以及具备条件的农村用户，依托分布式可再生能源、微电网、增量配网等配置新型储能，探索电动汽车在分布式供能系统中应用，提高用能质量，降低用能成本。二是提供定制化用能服务。针对工业、通信、金融、互联网等用电量且对供电可靠性、电能质量要求高的电力用户，根据优化商业模式和系统运行模式需要配置新型储能，支撑高品质用电，提高综合用能效率效益。三是提升用户灵活调节能力。推动不间断电源、充换电设施等用户侧分散式储能设施建设，探索推广电动汽车、智慧用电设施等双向互动智能充放电技术应用，提升用户灵活调节能力和智能高效用电水平^[8]。

四、风光可再生能源高水平开发利用的发展建议

(一) 完善保障可再生能源高水平开发利用的法律法规体系

加快推进《中华人民共和国可再生能源法》的修订工作，加强与能源法、电力法、节约能源法等衔接，夯实可再生能源高水平开发利用法治保障。落实相关政策法规要求，推动能源领域自然垄断环节独立运营和竞争性环节市场化改革，适度放开配电网对民营企业的投资限制，加快建设满足分布式光伏规模化开发和就地消纳要求的智能微电网，破解分布式光伏发展难题。研究拓展可再生能

源定义，纳入“环境热能”“绿氢及衍生能源”等。在实行非化石能源开发利用中长期发展目标制度的基础上，进一步实施可再生能源开发利用中长期发展目标制度。区分约束性目标和激励性目标，针对省级区域和重点行业领域，分别设立可再生能源消费最低比重目标制度。

（二）优化创新分布式可再生能源发展的支持政策

支持中东南部地区大力发展分布式可再生能源、海上风电等，加强可再生能源“从身边来”和“从远方来”相结合，不断提高依靠可再生能源保障自身能源电力安全的水平。积极探索建设智能微电网、虚拟电厂等新型市场主体，协同推进中东南部地区的新型能源体系建设与现代产业体系融合发展。落实《关于支持电力领域新型经营主体创新发展的指导意见》，出台相关价格政策和管理办法，完善大电网与微电网利益分配机制。加快推动“千乡万村驭风行动”“千家万户沐光行动”，持续推进农村电网建设、改造，推动分布式可再生能源发展。

（三）加快提升集中式可再生能源开发零碳效益水平

积极稳妥推进“沙戈荒”可再生能源基地建设，做好“源网荷储”总体规模、空间布局、建设时序等方面的有效衔接，因地制宜挖掘储调资源潜力，不断降低对支撑煤电项目的依赖。加快推进重大战略性水电工程开发建设，加快建设“水风光”一体化基地。支持“沙戈荒”可再生能源资源丰富地区建立适合可再生能源特点的产业体系，积极开展可再生能源制氢、制氨、制醇产业，促进可再生能源和其他产业协同、整体式发展，充分依托可再生能源优势牵引生产力布局。

（四）以县域为重点深化电力体制改革

借鉴德国分布式能源发展以及法国电力管理体制改革的有益经验，推广多能协同与数字技术结合的解决方案，创新包括电网企业、地方政府等在内的“源网荷储”一体化投资运营模式。结合不同地区资源禀赋、负荷特点，加强县域“源网荷储”资源一体规划，分层解决电网体系安全性、可靠性、灵活性和可再生能源消纳问题。在县域市场探索实

施基于协议的“源网荷储”智能交易，推动可再生能源分布式、智能化、去中心化发展，支持“就地发—就地用”“余电上网+价格协商”等灵活结算方式。

（五）适度超前布局建设电网基础设施

适度超前布局电网基础设施投资建设，明确“十五五”期间各区域可再生能源基地、负荷中心与电网建设的联动规划机制，将可再生能源送出与电网配套工程联合审批、同步核准、同步建设，实施“源—网联审、网前源动”机制。提升现有电力系统输电效率和灵活调节能力，确保跨区域骨干网架容量充裕，有效支撑大规模可再生能源的跨省消纳和区域电网互济。加快可再生能源基地输电通道建设，支持新型交直流输电技术研究与应用，提升大电网跨省、跨区协调互济能力。完善电网企业输配成本疏导机制，合理疏导可再生能源消纳产生的电网输配和安全成本，推动发电侧与输配侧成本传导机制协同创新，形成动态优化的长效机制。加速配电网和分布式微网的自动化与智能化升级发展。加快发展配电网与综合能源集成技术，推动“源网荷储”之间以及电、热、气等不同能源之间实现梯次互补利用。

（六）统筹挖掘各类灵活调节资源

加快电力系统调节手段由火电为主的单一模式向“源网荷储”多方协同转变。提升可再生能源多时间尺度功率预测精度，加快突破“构网型”可再生能源并网技术，因地制宜发展可再生能源制氢、储热、光热发电技术等，提升涉网性能，强化可再生能源主动支撑能力。加快发展智能用电和需求响应技术，挖掘工业、建筑、电动汽车、数据中心、绿氢等各类负荷的灵活调节潜力，鼓励其根据价格信号灵活改变用能方式。加快发展虚拟电厂等新业态、新模式，推动各类灵活性负荷以及分布式能源有效聚合，通过优化调度实现用户与电网的互惠共赢。推动储能技术多元化发展和多场景应用。

（七）持续加快可再生能源关键技术创新

加快构建电力系统稳定性分析新框架，提出稳定性分析新方法。强化可再生能源资源评估和功率预测技术研究，提高预测精度、延长预测周期。以

提升可再生能源发电效率与质量、提高并网友好性与可靠替代能力为核心,推进深远海域海上风电开发及超大型海上风机、高效低成本晶体硅电池、新型储能材料等取得突破。发挥我国应用场景多元、在建工程项目众多等优势,加快前沿技术创新示范。

(八) 加强央地、部门之间政策协同和落实监管

聚焦建成全国统一电力市场的目标,健全电力市场基础制度体系,制定/修订电力中长期交易、辅助服务、计量结算等基本规则,完善电力中长期、现货、辅助服务交易的有机衔接机制,督促各地电力市场交易规则协同统一规范。健全多层次电力市场运营体系,推动国网、南网、蒙西电网跨经营区常态化交易,完善长江三角洲省市间的协同互济交易机制,推进西北、华中等地区的电力市场建设。完善电力市场监管体系,加强地方不当干预专项整治,纠治妨碍统一电力市场和公平竞争的行为。健全资源环境要素市场化配置体系,加强“能-电-碳”市场协同和价格传导,推动可再生能源资源依据市场规则、市场价格、市场竞争实现效益最大化和效率最优化。

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: August 20, 2025; **Revised date:** November 5, 2025

Corresponding author: Du Xiangwan is a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is energy and environmental development strategies. E-mail: duxw@cae.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on High-Level Development and Utilization of Renewable Energy: Transitioning from Intermittency to Flexibility” (2024-HZ-24); Inner Mongolia Autonomous Region Science And Technology Plan Project (2025KJHZ0047); China Meteorological Administration Policy Research on Meteorological Soft Science Project (2025RKXMS14)

参考文献

- [1] Wang Y, Chao Q, Zhao L, et al. Assessment of wind and photovoltaic power potential in China [J]. *Carbon Neutrality*, 2022, 1: 1–11.
- [2] 刘晓龙. “双碳”背景下破解“能源不可能三角”的可行性及对策研究 [J]. *环境保护*, 2025, 53(Z2): 18–21.
Liu X L. The feasibility and strategies to solve the “energy trilemma” under the “dual carbon” goals [J]. *Environmental Protection*, 2025, 53(Z2): 18–21.
- [3] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
Writing Group of *Blue Book for the Development of New Power*

- Systems*. *Blue book for the development of new power systems* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [4] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考 [J]. *中国电力企业管理*, 2021 (25): 8–11.
Guo J B. Challenges faced by new power system and thinking about relevant mechanisms [J]. *China Power Enterprise Management*, 2021 (25): 8–11.
- [5] 舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(21): 8327–8340.
Shu Y B, Zhang Z L, Tang Y, et al. Fundamental issues of new-type power system construction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(21): 8327–8340.
- [6] Liu L B, He G, Wu M X, et al. Climate change impacts on planned supply–demand match in global wind and solar energy systems [J]. *Nature Energy*, 2023, 8(8): 870–880.
- [7] 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.
- [8] 汤广福. 加快构建新型能源体系 支撑保障国家能源安全 [J]. *中国电力企业管理*, 2023 (13): 21–25.
Tang G F. Accelerate the construction of a new energy system to support and ensure national energy security [J]. *China Power Enterprise Management*, 2023 (13): 21–25.
- [9] 汪际峰, 李鹏, 梁锦照, 等. 电力系统数字化历程与发展趋势 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(11): 1–8.
Wang J F, Li P, Liang J Z, et al. Development history and trends of power system digitalization [J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(11): 1–8.
- [10] 王鑫, 王霖, 余芸, 等. 数字孪生电网的特性、架构及应用综述 [J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(11): 3721–3733.
Wang X, Wang L, Yu Y, et al. Survey on characteristics, architecture and applications of digital twin power grid [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(11): 3721–3733.
- [11] 李鹏, 刁伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5002–5016.
Li P, Xi W, Cai T T, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grids [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5002–5016.
- [12] 刘金森, 罗宁, 王杰, 等. 基于海量场景降维的配电网源网荷储协同规划 [J]. *中国电力*, 2022, 55(12): 78–85.
Liu J S, Luo N, Wang J, et al. Massive scenario reduction based distribution-level power system planning considering the coordination of source, network, load and storage [J]. *Electric Power*, 2022, 55(12): 78–85.
- [13] 吴俊, 李翔, 莫紫凌, 等. 电力市场化改革背景下电网系统运行领域的管理演化——跨业务单元纵横协同管理模式 [J]. *中国管理信息化*, 2022, 25(7): 132–136.
Wu J, Li X, Mo Z L, et al. Management evolution of power system operation field under the background of power market reform—Cross-business unit vertical and horizontal collaborative management mode [J]. *China Management Informationization*, 2022, 25(7): 132–136.

- [14] 谢开, 刘敦楠, 李竹, 等. 适应新型电力系统的多维协同电力市场体系 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 2–12.
Xie K, Liu D N, Li Z, et al. Multi-dimensional collaborative electricity market system for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 2–12.
- [15] 葛磊蛟, 刘航旭, 孙永辉, 等. 智能配电网多元电力用户群体特性精准感知技术综述 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 174–191.
Ge L J, Liu H X, Sun Y H, et al. Review on accurate awareness technology for characteristics of diversified power user groups in smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 174–191.
- [16] Sandström M, Huang P, Bales C, et al. Evaluation of hosting capacity of the power grid for electric vehicles—A case study in a Swedish residential area [J]. Energy, 2023, 284: 129293.
- [17] Rouholamini M, Wang C S, Nehrir H, et al. A review of modeling, management, and applications of grid-connected Li-ion battery storage systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4505–4524.
- [18] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158–168.
Xie X R, Ma N J, Liu W, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: Review and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158–168.