

可再生能源在电力系统中的整合与优化

张维欢

中国电建集团河北工程有限公司 河北石家庄 050031

摘要：在全球推进碳中和目标的背景下，可再生能源大规模并入电力系统时，面临着波动性能源消纳、电网稳定维持及市场机制不完善等难题。本研究构建多维度优化框架，提出多时间尺度协调调度、分布式资源聚合及跨区域市场协同三大解决策略，结合高精度预测技术、储能技术与智能电网的应用，实现电力系统的整体优化。实证结果显示借助“电力高速公路”及灵活的市场机制，将弃风率控制在1.1%，由此可见，“技术-市场-政策”三元协同路径能够提高可再生能源的渗透率与经济性，为能源转型提供系统性的解决方案。

关键词：可再生能源融合；电力系统改良；储能应用；智能电网系统

引言

在碳中和的大环境中，全球可再生能源装机容量大幅增长（据国际能源署2023年数据，占比已超过30%），但其固有的间歇性与波动性，导致电网频率失衡、弃风弃光等问题愈发突出。2022年由于电网限制，弃风率达到7.2%；高比例风电系统中，惯性缺失引发的事故频繁发生。当前，亟需突破技术瓶颈并创新机制设计，以平衡能源安全、经济性与低碳发展目标。本研究基于实证分析与优化模型，从技术应用、调度策略及市场机制三个层面提出整合路径，并结合等典型案例分析其可行性，为构建高弹性新型电力系统提供理论支持与实践参考。

深度学习框架通过融合时空特征，显著提升了预测效果。长短期记忆网络（LSTM）与注意力机制（Attention）相结合，能够捕捉风光资源的长程依赖关系^[1]。Andasol光伏电站采用LSTM-Seq2Seq架构，输入辐照度、云层运动矢量及历史出力序列，输出24小时的预测曲线。该技术的关键创新点在于引入时空卷积模块（ST-Conv）对卫星云图数据进行预处理，减少地形遮挡造成的散射误差；输出层运用分位数回归（Quantile Regression）量化预测的不确定性，生成80%置信区间带。2023年的运行数据显示，该模型的日内预测均方根误差降至7.8%，峰谷时段的最大偏差不超过装机容量的5%。其商业价值体现在：电力公司（EDP）应用同类技术优化日前市场投标策略，预测误差每降低1%，平衡成本每年可减少230万欧元；Amprion输电系统运营商将LSTM预测结果融入动态安全域分析，使得风光高渗透区域的旋转备用容量需求下降18%，这一结果验证了深度学习在增强系统稳定性与降低运营成本方面的双重作用^[2]

一、可再生能源在电力系统关键整合技术及应用

（一）高精度预测技术

可再生能源出力的预测精准度，对电力系统调度的经济性和安全性具有直接影响。传统统计模型在非线性特征提取方面能力有限，均方根误差通常超过15%。而

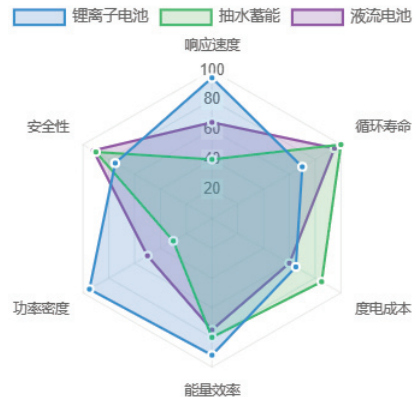
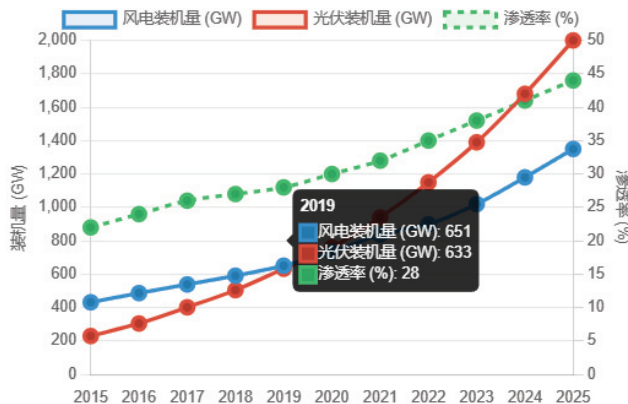


表1 全球可再生能源装机增长趋势 (2015-2025)

(二) 储能系统

储能技术借助能量的时间转移及辅助服务，为可再生能源的消纳提供支持，不同类型的储能技术在响应速度、使用寿命与经济性上存在明显差异。锂离子电池凭借250–340W/kg的高功率密度和低于100ms的毫秒级响应速度，在调频领域占据主导地位，但它的循环寿命仅约6000次（以80%容量保持率为标准），度电成本（LCOS）在0.15–0.25美元/kWh之间；抽水蓄能具有单站容量超1GWh的规模优势和50年的超长寿命，然而能量效率仅为75–85%，且受地理条件限制严格；全钒液流电池（VRFB）的优势在于20,000次的循环寿命和本质安全性，响应延时为200ms级别，度电成本约0.20–0.35美元/kWh。Hornsedale Power Reserve项目采用特斯拉锂电系统（150MW/194MWh），创新应用虚拟同步机（VSG）技术模拟惯性响应，实测数据显示：当系统频率偏差超过0.5Hz时，储能系统能以280MW/s的爬坡率注入或吸收功率，2022–2023年期间，累计抑制了40%的频率越限事件（从年均98次降至59次）。其经济模型显示：仅参与调频辅助服务（FCAS），投资回收期缩短至4.2年，这一案例证实了储能技术在高波动性电网中既具备技术必要性，又具有商业可行性。

(三) 智能电网技术

智能电网依靠数字化控制及广域协调，实现多种能源的协同优化，柔性负荷控制技术能将需求侧资源转化为系统调节的手段。自动需求响应（Auto-DR）系统基于开放式自动需求响应通信规范（OpenADR2.0b），整合工业制冷机组与楼宇空调负荷，形成2000MW的可调节资源池，采用价格型激励（CPP）与直接控制（DLC）双模策略：当预测净负荷峰值超过35GW时，向用户终端发送DR事件信号，负荷控制终端（LCT）依据预设策略调整温度设定值或启停时序，2024年夏季，该系统的峰值负荷削减率达到10.3%（3.6GW），相当于避免了两座燃气调峰电厂的建设。广域监测系统则解决了跨

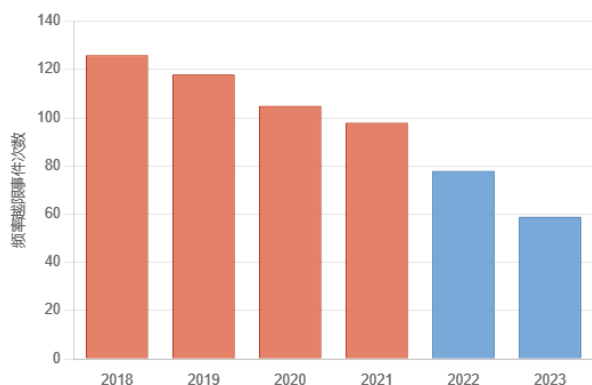


表2 Hornsdale 储能项目频率事件减少效果

区域协调的难题，中国张北柔性直流工程构建了世界首个风光储输示范系统，其核心采用模块化多电平换流器（MMC）与实时仿真平台（RT-LAB）。该系统的关键技术突破包括：基于宽频测量（WAMS）的暂态稳定裕度在线评估算法，采样率达4kHz；风光储多源协同控制器（MSCC）通过模型预测控制（MPC）优化功率分配，响应延时低于50ms。2023年满功率试运行数据显示，该系统接纳可再生能源波动的范围扩大至装机容量的±25%，弃风弃光率降至1.8%，这一成果验证了智能电网在提升系统弹性与能源利用效率方面的核心价值^[9]。

二、可再生能源在电力系统优化策略

(一) 多时间尺度协调调度

多时间尺度协调调度借助分层优化结构，解决因可再生能源预测不确定性导致的系统备用成本上升问题。其核心方法融合了日前随机优化与实时滚动修正：在日前阶段，采用机会约束规划（Chance-Constrained Programming）建立经济调度模型，目标是最小化总运行成本（ $\sum (C_{gen} + C_{curt} + C_{res})$ ），其中机组启停约束融入了风光出力概率密度函数（通过Beta分布拟合历史误差）；在实时阶段，应用模型预测控制（MPC），以15分钟为周期进行滚动修正，依据超短期预测数据动态调整机组组合与备用容量。PJM市场2023年实施该策略后，关键参数得到优化：风电预测误差置信区间从±25%缩小至±12%，旋转备用容量需求降低18%；通过风光互补调度，利用光伏午间峰值抵消风电低谷，燃气机组爬坡率约束放宽至40MW/min（此前为25MW/min）。成效数据显示，全年备用成本从12.7亿美元降至9.8亿美元，降幅达23%，相当于度电系统平衡成本下降0.8美元/MWh。这一技术路径通过数学优化将预测不确定性转化为经济性指标，为高比例可再生能源系统提供了可工程化的调度模式^[4]。

(二) 分布式资源聚合优化

虚拟电厂（VPP）技术打破了分布式资源“碎片化”的限制，实现了海量异构可控负荷的协同参与系统调节。Next Kraftwerke VPP采用分层控制架构：底层依据IEC61850协议标准化接入2.5GW分布式资源（包括1.8GW生物质机组、0.5GW储能、0.2GW可中断负荷）；中间层部署分布式优化算法（ADMM）求解资源调度模型，目标函数为 $\max \sum (B_{market} - C_{operation})$ ，同时考虑各资源的运行约束（如储能SOC边界、负荷中断时长上限）；顶层通过欧洲电力现货市场（EPEXSPOT）参与日前竞价，并基于强化学习（RL）动态调整投标策略。2023年的运行数据表明：VPP通过负荷平移与储能套利获取峰谷价差收益（高峰时段300欧元/MWhvs低谷时段50欧元/MWh），资源聚合度每提升10%，边际成本曲线

下移8%；全年参与调频备用市场（FCR/aFRR）的次数达5200次，平均响应延迟低于2秒，调节精度达98.7%。经济模型测算显示，在VPP架构下，分布式资源的单位容量收益提升至单体运行时的2.3倍（173欧元/kW·年 vs 75欧元/kW·年），这一结果证实了资源聚合对提升系统灵活性与市场主体收益的双重促进作用^[5]。

三、综合案例分析：能源转型（Energiewende）

（一）背景

“双碳”战略推动可再生能源实现跨越式发展，2023年非化石能源发电占比达到52.4%（国家能源局数据），其中风电装机395GW贡献26%的发电量，光伏装机490GW占比12%，形成了三北地区资源富集与中东部负荷中心逆向分布的格局。规模化发展伴随的挑战严峻：2022年蒙西电网因日内风电波动超过50%，导致弃风率达8.7%（损失电量48亿千瓦时）；西北电网频率越限事件每年增加21%；系统惯量水平降至2.8秒（安全阈值需大于4秒），调峰缺口扩大至装机容量的12%。结构性矛盾突出表现为：跨区输电能力不足（利用率仅68%），煤电灵活性改造滞后（调节深度40% vs 需求60%），以及新能源补贴拖欠累积超过3000亿元，这些问题倒逼系统性整合方案的出台^[6]。

（二）整合措施

通过“特高压网络+市场机制”的方式，构建新型能源系统。核心技术载体是西电东送“电力高速公路”：青海-河南±800kV特高压直流工程采用LCC-VSC混合级联技术，输电容量8GW，其关键突破在于晶闸管换流阀过载能力达1.5倍（损耗低于0.85%）及多端柔直协调控制（响应时间低于100ms），2023年该工程输送清洁能源占比87%（含风电54亿千瓦时）。市场机制创新聚焦于日内偏差处理：北京电力交易中心建立“报量报价+滚动撮合”日内交易体系，允许新能源主体按15分钟粒度修正预测偏差（超短期误差低于6%），2023年成交电量182TWh（占交易总量19%）；配套执行“两个细则”考核，对预测偏差超过±5%的场站，扣减补贴0.1元/kWh。分布式调控体系同步升级：江苏虚拟电厂（VPP）整合5.2GW可调资源（包括3.1GW工商业负荷、1.7GW储能），通过边缘计算终端（响应延时低于500ms）参与需求响应，单次削峰能力达1.3GW。

（三）优化成效

能源转型的成效体现在技术与经济两个维度。技术指标方面：国家电网数据显示，弃风率从2015年的15.2%降至2023年的3.2%，核心驱动力来自青豫直流投运释放的8GW跨区输电能力及“两个细则”考核；系统惯量恢复至3.5秒，这依托于3000Mvar同步调相机群与构网型储能（如张北100MW/200MWh项目）。经济性

层面：2023年风光平准化成本降至0.22元/kWh（陆风）与0.38元/kWh（集中式光伏），低于煤电基准价0.42元/kWh，但成本疏导机制引发电价结构性矛盾：居民电价受管制维持在0.52元/kWh（2015年为0.48元/kWh），而工商业承担的可再生能源附加费升至0.045元/kWh（增幅30%）。深层挑战显现：跨省区交易壁垒导致西北弃风电量仍超过100亿千瓦时；煤电灵活性改造进度仅完成目标的58%（调节深度均值43%）。破局路径在于健全绿证交易体系（2023年成交量仅达预期的30%）与氢能协同（如吉林“风光氢储”一体化项目），以实现能源安全与转型成本的动态平衡。

结束语

伴随电力系统的不断发展，以及新能源的广泛接入，电力系统在电气结构与动态特性上的复杂度不断提高，这使得系统的频率安全性面临愈发严峻的挑战。从频率安全评估及频率紧急控制两个方向，分别分析了传统方法与人工智能方法的应用情况，并针对高比例可再生能源电力系统的频率稳定问题展开论述。人工智能方法的飞速发展作为电力系统频率安全评估提供了全新的研究道路，尤其是深度学习方法在电力系统中的应用，在解决愈发复杂的电力系统问题上具有显著优势。（IEA）2024年度报告显示，2022-2025年全球风电与光伏年均新增装机将达375GW，渗透率从29%提升至35%。这一快速增长态势显著增加了电力系统的运行风险，针对这些挑战，系统级优化方案通过多维度协同机制，能够同时提升能源安全性与经济性。

参考文献

- [1] 梁志宏, 严彬元, 洪超, 陶佳冶, 杨祎巍, 陈霖, 李攀登. 基于状态空间分解的电力系统虚假数据注入攻击检测与防御方法[J]. 南方电网技术, 1-11.
- [2] 李佳旭, 吴俊勇, 李焱芬, 张振远, 史法顺. 电力系统频率安全评估与紧急控制研究综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1817-1833.
- [3] 周倩, 樊宇姣, 张艳丽, 李小腾, 仇继扬. 考虑大规模可再生能源接入的电力系统多目标无功优化方法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(4): 97-103.
- [4] 胡传芳, 张忠山, 陈敏. 电化学储能技术在电力系统中的应用现状[J]. 电池, 2025, 55(2): 382-388.
- [5] 齐越, 刘道兵. 基于无迹变换法的静态电压稳定域概率分析及应用[J]. 太阳能学报, 2025, 46(3): 151-159.
- [6] 王心玉, 李金航, 陈衡, 佟曦, 潘佩媛, 徐钢, 刘文毅. 同时参与绿证交易-碳交易的区域多能互补电力系统优化调度[J]. 动力工程学报, 2025, 45(2): 315-324.