

# 高比例新能源并网下电力系统调度优化策略及其实证分析

陶 哲

内蒙古电力(集团)有限责任公司阿拉善供电分公司 内蒙古阿拉善 750300

**摘 要:** 本文聚焦高比例新能源并网背景下电力系统调度面临的技术瓶颈与运行挑战,提出基于多时间尺度协同、源网荷储联动及动态风险防控的优化调度策略。通过构建超短期-短期-中期滚动优化框架,整合气象预测与储能快速响应能力,实现功率平衡的动态修正;建立源网荷储协同控制模型,运用合作博弈理论协调异质资源;设计风险价值导向的韧性调度方案,强化极端场景下的应急调控。实证分析表明,该策略可有效平抑新能源出力波动,提升系统调节灵活性,降低弃风弃光率,同时增强电网抗扰动能力与经济运行效率,为高比例新能源系统安全高效运行提供技术支撑。

**关键词:** 高比例; 新能源并网; 电力系统; 调度优化策略; 实证分析

## 前言

随着新能源装机规模持续扩大,其出力的随机性与波动性对电力系统调度构成严峻挑战。传统调度模式依赖历史数据外推,难以应对新能源短时剧烈波动引发的供需失衡风险,且集中式架构无法有效协调分布式电源、储能及柔性负荷等新型主体。此外,市场机制与物理运行规律的矛盾日益凸显,制约资源优化配置。在此背景下,亟需突破传统调度范式,构建适应新能源特性的新型调度体系。本文围绕多时间尺度协同、源网荷储联动及动态风险防控展开研究,旨在为高比例新能源并网后的系统安全稳定运行提供理论依据与实践路径。

## 一、高比例新能源并网对电力系统调度的挑战

### 1. 新能源出力特性引发的系统失衡风险加剧

新能源发电依赖自然资源禀赋,其输出功率呈现明显的时空分布不均特征。日内层面,光照强度与风速的快速变化可导致光伏电站或风电场出力在短时间内大幅升降,造成电力供应与负荷需求的即时匹配困难。跨日尺度上,天气系统的周期性演变使得新能源长期预测精度有限,进一步放大了电力电量平衡的不确定性。这种双重不确定性叠加,极易引发系统备用容量不足或过剩,既可能导致弃风弃光现象频发,又可能造成局部时段电力短缺,严重威胁电网安全稳定运行。传统调度计划通常基于历史数据外推制定,难以有效应对新能源出力的突发扰动,亟需创新调度模式以增强系统灵活性与适应性。

### 2. 传统调度架构难以满足多元主体协同需求

高比例新能源并网推动了电力系统从单一电源主导

向多能互补、源网荷储协同的方向演进。分布式电源、储能装置、柔性负荷等新型要素广泛参与,形成了复杂的多代理系统。传统集中式调度架构侧重于发输电环节的单向控制,缺乏对用户侧资源的主动引导与协调能力,难以充分发挥各类调节资源的潜力。与此同时,不同类型资源的技术特性差异显著,如储能设备的充放电效率、柔性负荷的响应速度等,如何在统一调度框架下实现异质资源的优化配置,成为亟待解决的关键问题。现有的调度算法多采用静态参数设置,无法动态适配不同运行工况下的资源优势,制约了整体调度效能的提升。

### 3. 电力市场机制与物理运行规律的矛盾凸显

在高比例新能源环境下,电力市场的边界条件发生根本性改变。一方面,新能源边际成本低但固定投资成本高,其全生命周期成本核算方式与传统火电存在本质区别;另一方面,新能源出力的不确定性增加了市场主体的风险敞口,传统的日前市场交易模式难以准确反映实时供需关系。现行的市场定价机制未能充分体现新能源的环境价值与外部性成本,导致价格信号扭曲,不利于激励各方参与系统调节。此外,辅助服务市场的品种设计与补偿标准滞后于新型调峰资源的发展需求,影响了储能、虚拟电厂等新兴主体的市场活力。这些体制机制障碍限制了市场手段在资源优化配置中的作用发挥,需要重构市场规则以匹配高比例新能源系统的运行特点<sup>[1]</sup>。

## 二、高比例新能源并网下的调度优化策略设计

### 1. 多时间尺度协同的滚动优化机制

为应对新能源出力的多尺度波动特性,需构建覆盖超短期、短期与中期三个层级的协同滚动优化框架。超

短期优化侧重于分钟至小时级别的实时功率平衡，依托高精度气象预报实现对新能源出力预测的动态修正，并充分利用储能的快速响应能力以平抑功率波动，增强实时运行的稳定性。短期优化以未来24小时为时间窗口，在考虑机组组合、电网运行约束与备用需求的基础上，引入机会约束规划方法处理新能源随机性与波动性带来的不确定性，实现经济性与安全性的统筹。中期优化则聚焦周时间尺度的调度决策，重点协调机组检修计划与跨区电力交易，运用概率潮流方法评估不同运行方式下的系统安全裕度，提升鲁棒性。三者之间通过双向信息交互形成闭环反馈机制：上级优化为下级提供边界条件，下级则将实际偏差信息反馈至上级触发重新优化，从而实现多时间尺度决策的动态协调。该机制通过分层递进、闭环迭代的方式，有效提升了电力系统对新能源不确定性的适应能力与运行灵活性。

### 2. 源网荷储一体化的协调控制策略

在新型电力系统建设中，源、网、荷、储各环节的协同互动已成为提升系统调节能力的关键。电源侧需推动传统火电与新能源联合运行，通过火电深度调峰等技术手段为新能源消纳腾出空间，增强系统功率平衡能力。电网侧应依托智能调度平台实现关键断面功率的实时监测与动态调控，优化潮流分布，防范越限风险。负荷侧则需积极开发可中断负荷、电动汽车V2G等柔性资源，建立市场化需求响应机制，引导用户参与系统调节。储能侧须统筹抽水蓄能、电化学储能等多类型储能的配置与运行，充分发挥其在调峰、调频及应急备用等方面的多功能效益。为实现各方利益协调，可构建基于合作博弈的多主体优化模型，以拉格朗日乘子法进行帕累托最优解的求取，确保责任共担、利益共享。该策略通过打破源网荷储之间的壁垒，实现系统资源的广泛聚合与高效利用，全面提升高比例新能源接入下的系统运行效率<sup>[2]</sup>。

### 3. 动态风险防控的韧性调度方案

为增强电力系统应对高比例新能源不确定性和极端事件的能力，需建立以风险为导向的韧性调度体系。该体系核心是构建基于风险价值(VaR)和条件风险价值(CVaR)的运行风险量化模型，从概率角度评估系统在不同新能源渗透率下面临的潜在损失。根据风险等级划分调度区间：低风险状态下以经济性最优为原则最大限度消纳新能源；中风险阶段启动预防性调控，提前调整发电计划与储能状态；高风险情形下则执行紧急控制策略，包括切负荷、孤岛运行等极端措施，以保障关键负

荷供电。同时，应引入人工智能技术构建风险预测与脆弱性识别引擎，实现运行风险的实时评估与阈值动态调整。配套建立完备的极端场景应急决策库，涵盖黑启动、负荷快速恢复等多类预案，并定期开展仿真演练以提升系统的抗扰能力和恢复能力。该方案将风险预判、防控与应急处置有机结合，系统性提升电力系统在新能源环境下的韧性和可靠性。

## 三、调度优化策略的实证分析框架构建

### 1. 仿真平台搭建与参数设定

为系统验证高比例新能源接入环境下调度策略的有效性，必须构建一个高度仿真的分析平台，该平台需整合风电、光伏等波动性电源与传统火电、水电、储能及柔性负荷单元，并实现其在多时间尺度下的耦合响应。平台应兼容电磁暂态与机电暂态仿真模块，以同时捕捉设备级动态特性与系统级调度运行行为，从而实现电力系统从秒级到小时级的全过程模拟。在情景设计方面，应构建包括基准情景、过渡情景及远期目标情景在内的多组对比仿真环境，其核心差异体现在新能源装机占比、电网结构及负荷特性的阶段性演变。评价体系需兼顾经济性、可靠性与环保性，设立如新能源利用率、弃功率、备用充足率、频率偏差及电压合格率等多维度指标，以全面量化调度策略的综合性能，确保分析结论具备充分的科学性与说服力。

### 2. 对照实验设计与实施步骤

为客观评估所提出的调度优化策略的先进性，需设计系统化的对照实验。实验组将采用所构建的多时间尺度协同优化模型与源网荷储互动策略，而对照组则采用传统以固定备用要求和优先级排序为基础的调度方式，忽略新能源的随机性与波动性特征。测试内容应涵盖两类典型场景：一类为稳态运行场景，重点考察系统在日前与日内时间尺度下的经济调度与新能源消纳能力；另一类为暂态场景，模拟新能源发电骤升骤降、线路故障等突发事件，以检验系统动态调节与安全稳定控制能力。通过连续多日甚至不同季节的仿真运行，并结合极端天气与故障条件的设置，采集大量运行样本，并借助统计推断方法分析不同策略下指标差异的显著性，从而确保实验结果的有效性与可比性<sup>[3]</sup>。

### 3. 结果分析与有效性验证

基于仿真输出的系统运行数据，可从多角度验证优化调度策略的实际效能。在稳态性能方面，预期该策略将显著提升新能源消纳水平、降低弃风弃光现象，这主要得益于其通过多时间尺度滚动优化有效平抑预测误差，

并借助源网荷储协同机制拓宽调节资源边界。在暂态安全方面，优化策略通过调动储能快速功率支撑与优化备用配置，可有效遏制频率与电压波动，加速系统恢复进程，从而增强电网抵御扰动的能力。此外，还需从系统整体经济性出发评估策略的实施效益，包括节约化石能源消耗、提高设备利用率、减少运行成本及延缓电网升级投资等方面。最后，需开展敏感性分析，探讨策略在不同预测精度和故障规模下的适应能力，为其工程适用性提供理论支撑。

#### 四、实证分析结果讨论

##### 1. 新能源消纳能力的提升机理

新能源消纳水平的提升源于调度策略在多时间尺度协同决策、调节资源多样化及运行风险动态防控三方面的深度融合。多尺度滚动优化通过高频次更新调度计划，显著缩小了预测与实际的偏差，增强了系统对波动性的适应能力。源网荷储协同运行机制将分散的储能、可调负荷与传统机组统一调度，形成多类型资源互补格局，极大提升了系统调节灵活性与运行弹性。动态风险防控策略则通过实时评估系统运行状态与安全裕度，避免因过度保守而限制新能源出力。尤其值得强调的是，储能的选址与容量配置对消纳效果影响深远，在新能源富集区合理布局储能可有效缓解汇集线路阻塞，提升断面利用效率，从而在结构上增强系统的消纳能力<sup>[4]</sup>。

##### 2. 系统运行可靠性的改善途径

电力系统在高比例新能源接入背景下的可靠性提升，不仅依赖基础设施强化，更需通过智能化调度策略充分发挥现有资源的潜力。多时间尺度协同优化通过动态分配备用容量、优化机组启停与出力安排，增强了系统功率平衡的实时性与灵活性。源网荷储协同通过优化潮流分布、减轻关键设备压力，有效抑制连锁故障风险。动态风险防控则构建了“预警-调控-恢复”三位一体的防御体系，从事前预想、事中响应到事后恢复全面提升系统韧性。结果表明，即便在相同网架结构与电源配置下，通过调度策略的精细化和协同化，也可显著改善系统的频率与电压稳定性，降低运行风险，为高比例新能源系统的安全稳定提供关键保障。

##### 3. 经济性与环保效益的综合考量

从系统全生命周期视角进行综合评价，优化调度策略虽需投入相应通信、感知与控制资源，但其带来的综合效益显著超越附加成本。经济效益方面，通过提升新

能源消纳量直接减少弃电损失，通过优化传统机组运行方式降低燃煤和燃气消耗，同时激发需求侧响应资源以降低高峰负荷压力，从而削减系统综合运行成本。在电网投资延缓方面，通过提升现有设备利用率与优化潮流分布，可推迟输配电扩容升级，节约大量固定资产投资。环保效益层面，新能源大规模替代化石能源发电，显著降低了二氧化碳及污染物排放强度，有助于构建清洁低碳能源体系。随着新能源渗透率持续提高，所提策略在经济效益与环保贡献方面的叠加效应将愈加突出，符合能源转型与“双碳”目标下电力系统可持续发展的根本要求<sup>[5]</sup>。

#### 结语

本文研究表明，高比例新能源并网下的调度优化需从多维度协同入手。通过多时间尺度滚动优化机制，可有效缓解预测误差带来的供需偏差；源网荷储一体化控制策略打破了环节壁垒，提升了系统整体调节能力；动态风险防控体系则增强了电网应对极端事件的韧性。实证结果验证了所提策略在提升新能源消纳率、改善系统可靠性及降低综合运行成本方面的显著成效。未来研究可进一步探索人工智能技术在实时决策中的应用，并完善市场机制以激励多元主体参与系统调节，推动电力系统向清洁低碳、灵活高效的方向发展。

#### 参考文献

- [1] 杨洋, 李灵菊. 新能源并网对电力系统稳定性的综合影响及优化应对策略[J]. 电气技术与经济, 2025, (04): 139-142.
- [2] 度明暎, 张木兰, 高涛, 等. 考虑新能源逆向分布的多区域电力系统频率安全约束优化调度策略[J]. 电气时代, 2025, (02): 60-64.
- [3] 杨志学, 任洲洋, 孙志媛, 等. 基于近端策略优化算法的新能源电力系统安全约束经济调度方法[J]. 电网技术, 2023, 47 (03): 988-998.
- [4] 王伟胜, 李光辉, 何国庆, 等. 面向新型电力系统的新能源并网控制挑战与展望[J]. 新型电力系统, 2023, 1 (2): 145-160.
- [5] 张冶, 蔡颖凯, 康乃荻, 等. 新能源并网 LCL 滤波参数优化设计及实证[J]. 电力电子技术, 2023, 57 (5): 64-68.