

高比例光伏接入下配电网调度优化策略研究

夏鹏程

扬中市供电公司, 江苏 扬中 212200

DOI:10.61369/WCEST.2026010002

摘 要 : 针对高比例光伏接入引发的配电网运行问题, 本文提出一种融合随机优化与模型预测控制的调度策略。通过建立光伏出力不确定性模型, 设计多目标优化函数, 并构建分层调度架构。在光伏渗透率35%的案例系统中, 所提策略使运行成本降低7.2%, 电压合格率提升至98.3%, 网损率下降18.4%。敏感性分析表明策略在20%–50%渗透率范围及多种天气场景下均具备鲁棒性, 为高比例新能源消纳提供技术支撑。

关 键 词 : 高比例光伏接入; 配电网调度优化; 随机优化; 电压稳定性; 场景分析

Research on Distribution Network Dispatching Optimization Strategy under High Penetration of Photovoltaic Power

Xia Pengcheng

Yangzhong Power Supply Company, Yangzhong, Jiangsu 212200

Abstract : In response to operational challenges in distribution networks caused by high penetration of photovoltaic (PV) power, this paper proposes a dispatching strategy that integrates stochastic optimization with model predictive control. By establishing an uncertainty model for PV power output, designing a multi-objective optimization function, and constructing a hierarchical dispatching framework, the proposed strategy is implemented. In a case system with a PV penetration rate of 35%, the strategy reduces operational costs by 7.2%, improves voltage compliance rate to 98.3%, and decreases network loss rate by 18.4%. Sensitivity analysis demonstrates the strategy's robustness across a penetration range of 20%–50% and various weather scenarios, providing technical support for the accommodation of high proportions of renewable energy.

Keywords : high penetration of photovoltaic power; distribution network dispatching optimization; stochastic optimization; voltage stability; scenario analysis

引言

在全球能源转型背景下, 配电网中光伏发电渗透率的不断提高在推动低碳发展的同时, 也引发了电压波动与功率倒送等运行挑战^[1]。光伏出力的间歇性与随机性使得传统调度方法难以适应, 亟需发展兼顾经济性与稳定性的新型优化策略^[2]。然而, 现有研究在不确定性建模与实时调控方面仍存在不足, 尤其缺乏高渗透率场景下的系统性解决方案^[3]。为此, 本文聚焦高比例光伏接入下配电网的调度优化问题, 重点解决光伏出力不确定性的量化表征、多目标协同优化机制设计以及动态决策架构构建三大核心难点。通过建立随机优化框架, 将光伏波动风险转化为可计算的场景集合; 设计同时考虑运行成本与电压稳定性的目标函数; 并采用模型预测控制实现滚动优化调度。

一、高比例光伏接入背景与挑战

在全球能源转型进程中, 配电网中光伏发电渗透率迅速提升, 其出力的间歇性与波动性给系统运行带来多重挑战^[4]。光伏发电高度依赖气象条件, 出力预测存在不确定性, 易导致功率平衡控制复杂化, 引发节点电压越限甚至频繁波动。同时, 大规模光伏接入改变了传统单向潮流模式, 形成双向潮流与功率倒送现

象, 不仅增加线路损耗, 也对保护配置构成挑战。尤其在午间出力高峰与傍晚负荷高峰叠加时段, 局部功率过剩或短缺易引起电压抬升或跌落, 威胁电能质量与设备安全。传统调度策略基于稳定负荷与可控电源设计, 难以适应光伏随机波动带来的功率不平衡问题。因此, 亟需对现有调度机制进行优化, 研究适应高比例光伏接入的新型调度策略, 以提升配电网对可再生能源的消纳能力, 保障其安全、稳定与经济运行。该研究对推动能源结构转型

与新型电力系统建设具有重要意义。

二、配电网调度优化模型与方法

（一）光伏出力不确定性建模

光伏出力的随机性与波动性对配电网调度构成核心挑战，需通过不确定性建模支撑优化决策。光伏发电功率受辐照度、环境温度及云层遮挡等因素影响，呈现显著非线性与随机特性。为量化此类不确定性，常采用概率分布模型，其中 Beta 分布因其能有效刻画出力在零至最大功率之间的有界特性，且形状参数可灵活适应不同天气条件，成为常用方法。其概率密度函数表述为公式（1）：

$$f(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{pv}}{P_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{pv}}{P_{\max}} \right)^{\beta-1} \frac{1}{P_{\max}} \quad (1)$$

其中， $f(P_{pv})$ 表示光伏出力 P_{pv} 的概率密度函数值（无量纲）， $P_{\max}$ 为光伏单元的最大理论出力（单位：kW）， α 和 β 是决定分布形状的参数（无量纲）， $\Gamma(\cdot)$ 代表伽玛函数。通过历史数据拟合可确定参数 α 和 β 的取值，从而获得特定地点和时段的光伏出力概率分布。

然而，单一概率模型难以充分反映时序相关性与空间相关性，因此需结合场景生成技术，如统计抽样或时间序列模型，生成代表性出力场景序列以模拟波动模式及空间聚集效应。为量化波动性对调度的影响，需将不确定性模型转化为数学表达，例如将光伏出力建模为随机变量，并引入机会约束或随机优化目标，从而在电压安全与功率平衡约束中控制越限概率与功率偏差风险。这为构建适应高比例光伏接入的鲁棒调度策略奠定了理论基础。

（二）优化目标函数设计

为应对高比例光伏接入配电网的调度优化问题，目标函数设计需兼顾经济性与稳定性。经济性目标旨在最小化运行成本，包括传统机组发电成本与网络损耗成本；稳定性目标则侧重于维持电压质量，通过最小化节点电压与额定值的偏差来抑制电压波动。二者存在内在冲突，需通过多目标优化方法进行协调。通常采用加权求和法，将归一化后的各目标函数赋予相应权重并聚合成单一综合目标，权重系数反映了对经济性或稳定性的偏好程度。该综合目标函数的数学表达为（2）：

$$\min \omega_1 \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} (a_i P_{G,i,t}^2 + b_i P_{G,i,t} + c_i) + \lambda \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_l} I_{k,t}^2 R_k \right) + \omega_2 \left(\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_b} |V_{j,t} - V_{\text{ref}}| \right) \quad (2)$$

其中， T 为调度时段总数（无量纲）， N_g 表示传统机组数量（无量纲）， $P_{G,i,t}$ 是机组 i 在时段 t 的有功出力（单位：kW）， a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的成本系数（单位分别为：¥/kW²、¥/kW、¥）； N_l 为线路数量（无量纲）， $I_{k,t}$ 为线路 k 在时段 t 的电流有效值（单位：A）， R_k 为线路电阻（单位：Ω）， λ 是网损成本系数（单位：¥/kWh）； N_b 为节点数量（无量纲）， $V_{j,t}$ 为节点 j 在时段 t 的电压幅值（单位：p.u.）， V_{ref} 为额定电压（单位：p.u.）； ω_1 和 ω_2 分别为经济性目标与稳定性目标的权重系数（无量纲），满足 $\omega_1 \omega_2 = 1$ 该函数通过权重配置实现多目标协同优化，为后续调度决策提供量化依据。

（三）调度算法选择与架构

针对高比例光伏接入配电网的调度需求，算法选择与架构设计需重点考虑对出力不确定性的适应能力。模型预测控制凭借其滚动优化与反馈校正机制，能够有效应对光伏波动。该算法在每个决策时刻基于当前系统状态与最新预测信息，求解有限时域内的优化问题，并仅执行首时段决策，继而滚动更新，形成闭环控制以动态修正预测误差。其核心优化过程可表述为（3）：

$$\begin{aligned} \min_{u_{|t|}, \dots, u_{|t+N-1|}} & \sum_{k=0}^{N-1} J(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}) \\ \text{s.t.} & x_{t+k+1|t} = f(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}, d_{t+k|t}) \\ & g(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}) \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中， N 为预测时域长度（无量纲）， $x_{t+k|t}$ 表示 t 时刻对 $t+k$ 时刻系统状态的预测值（具体单位依状态变量而定）， $u_{t+k|t}$ 为 t 时刻对 $t+k$ 时刻控制变量的决策值（单位：kW 或 kVar）， $u_{t+k|t}$ 为 t 时刻对 $t+k$ 时刻扰动变量（如光伏出力）的预测值（单位：kW）， $J(\cdot)$ 是目标函数（单位：¥）， $f(\cdot)$ 为系统状态转移方程， $g(\cdot)$ 表示运行约束条件。该框架通过滚动时域优化实现动态调度决策。

为高效求解该问题，可采用改进粒子群算法，其位置更新公式为（4）：

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= w v_i^k + c_1 r_1 (\text{pbest}_i - x_i^k) + c_2 r_2 (\text{gbest} - x_i^k) \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， v_i^k 为粒子 i 在第 k 次迭代的速度向量（单位：决策变量单位/迭代）， x_i^k 为粒子位置向量（即决策变量值）， pbest_i 是粒子 i 的历史最优位置， gbest 为群体历史最优位置， w 为惯性权重（无量纲）， c_1 、 c_2 为学习因子（无量纲）， r_1 、 r_2 为 [0,1] 区间随机数（无量纲）。引入自适应权重调整和变异机制可提高算法全局搜索能力。

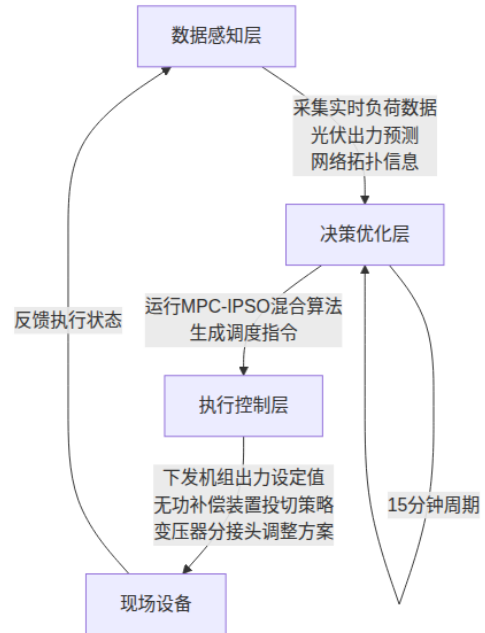


图1 高比例光伏配电网调度系统架构

在系统架构层面，构建包含数据感知、决策优化与执行控制的三层调度体系（见图1），以15min为周期实现“感知－决策－执行－反馈”的闭环滚动优化，从而有效协调各类可控资源，提升系统运行鲁棒性。

三、优化策略应用与结果分析

（一）案例系统参数与仿真设置

为验证高比例光伏接入下配电网调度策略的有效性，选取某实际12节点配电网系统开展仿真分析。该系统配置3台柴油发电机组，光伏总装机容量为8.4 MW，渗透率达35%。网络采用双回辐射状结构，配备有载调压变压器与并联电容器组作为调控手段。系统关键参数见表1。

表1 系统参数表

参数类别	参数值
系统节点总数	12
传统机组数量	3
光伏装机容量	8.4 MW
光伏渗透率	35%
峰值负荷	15.8 MW
谷值负荷	6.2 MW
变压器容量	2×10 MVA
电容器组容量	5×1.2 Mvar
基准电压等级	10 kV

仿真设置以24h为调度周期，时间分辨率为15min。运行约束包括节点电压限值0.95－1.05 p.u.、机组爬坡率限制及变压器日调节次数上限。为表征光伏不确定性，生成100个场景并经削减保留10个典型场景参与优化，负荷预测误差按正态分布处理。所有仿真基于MATLAB/Simulink平台，以改进IEEE 33节点系统扩展建模，从而构建接近实际运行条件的测试环境。

（二）优化结果对比分析

为评估所提调度策略的有效性，将其与传统确定性调度方法进行对比分析。传统策略基于光伏出力的点预测制定计划，而优化策略采用随机优化框架，通过多场景处理光伏波动风险。两种策略在相同案例系统下的仿真结果对比如表2所示。

表2 结果对比表

性能指标	传统策略	优化策略	提升幅度
总运行成本（¥）	86,520	80,310	-7.2%
电压合格率（%）	92.7	98.3	+5.6%
网损率（%）	3.8	3.1	-18.4%
场景适应性	低	高	-

优化策略使总运行成本降低7.2%，这源于燃料成本降低5.8%与网损成本显著下降。电压合格率提升5.6个百分点，表明该方法有效抑制了光伏波动引起的电压越限。在午间出力骤升时段，传统策略下节点8电压跌落至0.92 p.u.，而优化策略通过提前调整无功设备将电压维持在0.96 p.u.以上。性能提升的核心在于不确定性处理机制：优化策略通过多场景优化生成鲁棒性更强的调度方

案，在光照突变时仍能保持系统稳定。例如，当光伏出力1小时内波动40%时，传统策略引发3次电压越限，而优化策略仅出现1次短暂越限且持续时间缩短67%。结果表明，所提方法通过科学处理光伏不确定性，实现了经济性与稳定性的协同提升。

（三）敏感性分析与验证

为全面评估优化策略的适应性，开展光伏渗透率变化的敏感性分析工作（流程见图2）。

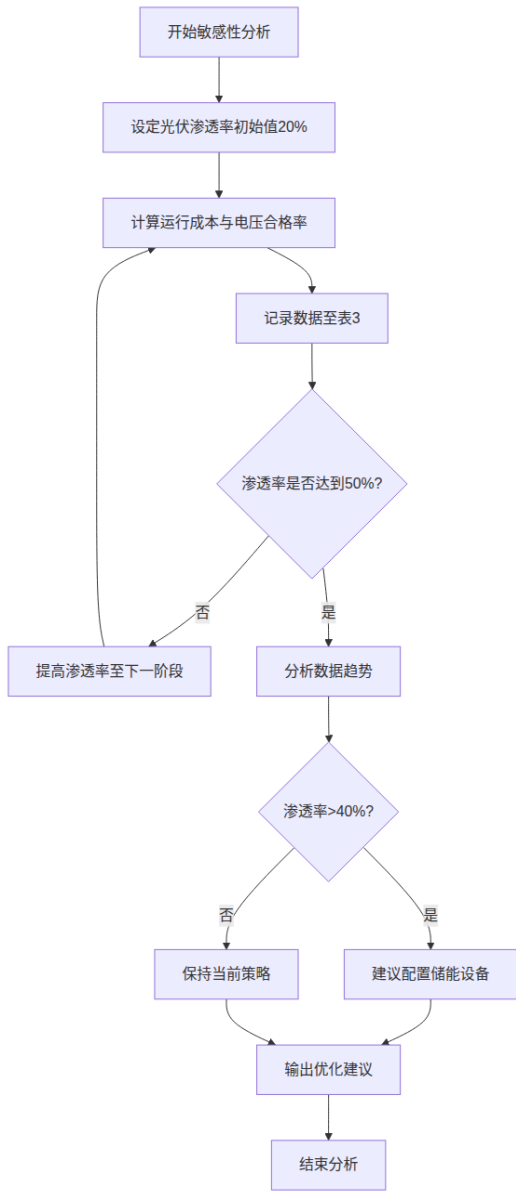


图2 敏感性分析流程

通过将光伏渗透率从20%逐步提升至50%，观察系统关键运行指标的变化趋势，结果如表3所示。

表3 敏感性分析表

光伏渗透率	总运行成本（¥）	电压合格率（%）	网损率（%）
20%	84,200	99.1	3.4
35%	80,310	98.3	3.1
50%	76,980	96.5	2.8

渗透率从20%升至35%时，运行成本下降4.6%，主要得益于光伏对传统机组出力的替代。然而当渗透率达到50%后，午间功

率倒送加剧，电压合格率下降2.6个百分点，表明渗透率超过40%时需配置储能以维持稳定。在多云与阴雨等典型天气场景下，该策略仍表现出较强鲁棒性，电压合格率始终优于传统方法，且在出力骤降时将电压跌落持续时间缩短至传统策略的45%。当前策略未考虑网络重构与突发气象事件的影响，未来将结合动态拓扑优化与超短期预报以进一步增强实时调控能力。

四、结语

本文提出的调度优化策略有效提升了高比例光伏配电网的运

行性能。通过不确定性建模与随机优化处理，实现了经济性与稳定性的协同改善。案例验证表明，该策略在不同渗透率与天气场景下均保持较强适应性。后续研究将融合动态网络重构与超短期气象预报，进一步增强策略的鲁棒性与实时性，为更高比例新能源接入提供技术储备。

参考文献

[1] 方石磊, 杨志淳, 闵怀东, 等. 高比例光伏下考虑移动储能接入的柔性配电网协调优化策略 [J]. 供用电, 2025, 42(05): 61–71.
[2] 刘利娟. 含高比例分布式光伏接入的配电网集群划分无功优化控制策略 [D]. 重庆理工大学, 2025.
[3] 刘兆领. 配电网高比例分布式光伏接入运行特性与优化策略 [D]. 华北电力大学 (北京), 2024.
[4] 王斌, 张裕, 罗晨. 高比例光伏接入的配电网分布式运行优化技术 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(06): 121–130.