

配电网设计中的痛点与难点分析及优化策略研究

吴德华

(海南电网设计有限责任公司, 海南 海口 570105)

摘要: 本研究针对配电网动态特征与约束条件, 提出数据驱动的韧性规划方法, 构建智能设备全周期管理体系, 开发多源融合的弹性重构技术, 形成从问题诊断到策略落地的闭环研究。结果表明, 动态规划模型可降低负荷预测误差24%, 网络重构技术使新能源消纳能力提升18%, 为新型电力系统建设提供理论支撑与实践路径。

关键词: 配电网设计; 负荷预测; 分布式能源; 拓扑优化; 弹性网络

中图分类号: TM727

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2508A051

CSTR: 32400.14.ncdqh.2508A051

Analysis of Pain Points and Difficulties in Distribution Network Design and Research on Optimization Strategies

WU Dehua

(Hainan Power Grid Design Co., Ltd., Hainan Haikou 570105, China)

Abstract: This study proposes a data-driven resilience planning method, establishes a full-cycle management system for intelligent equipment, and develops elastic reconfiguration technology based on multi-source integration, thereby forming a closed-loop approach from problem diagnosis to strategy implementation. The results show that the dynamic planning model can reduce load forecasting errors by 24%, while the network reconfiguration technology can enhance renewable energy consumption capacity by 18%. These findings provide both theoretical support and practical pathways for the construction of new-type power systems.

Keywords: distribution network design; load forecasting; distributed energy; topology optimization; resilient networks

0 引言

随着能源转型加速推进, 配电网由单向供电载体向多元交互平台演进。新型城镇化与分布式光伏、电动汽车规模化接入, 导致负荷时空分布复杂性倍增, 据统计, 2023年分布式电源渗透率超过35%的区域配电网中, 电压越限发生率从12.7% (2021年) 升至20.6% (2023年), 其中75%事件与光伏反送功率相关。传统基于静态负荷假设的设计模式, 难以适配高比例可再生能源波动性与用户侧需求响应的不确定性。国际能源署报告指出, 全球60%以上配网设备运行年限超过设计寿命, 设备老化与新技术迭代不同步的矛盾持续加剧。在此背景下, 构建兼具可靠性、经济性与环境适应性的配电网架构, 已成为实现“双碳”目标与新型电力系统建设的关键技术瓶颈。

1 配电网设计中的主要痛点分析

1.1 负荷预测与需求响应的不确定性

负荷预测偏差与需求响应不可控性构成配电网

收稿日期: 2025-08-19

设计的核心矛盾。分布式光伏、电动汽车充电桩的随机接入, 导致负荷时空分布呈现非线性特征^[1]。以工商业密集区为例, 午间光伏出力高峰与空调负荷低谷叠加, 造成反向潮流概率提升40%, 传统基于历史数据的预测模型误差率普遍超过15%。需求侧响应受用户行为与经济激励政策双重影响, 峰谷差率波动范围扩大至2.5~4.0倍, 引发变压器过载风险^[2]。某沿海城市配网案例分析显示, 由于需求响应延迟导致日负荷峰值预测偏差达28%, 致使规划阶段配置的10 kV线路容量在投运2年内即出现短缺。现有静态负荷预测模型难以捕捉源-荷互动的动态耦合机制, 造成规划冗余或容量不足的系统性偏差。

1.2 设备老化与可靠性不足的叠加效应

存量设备老化与增量可靠性需求间的矛盾日益凸显。统计表明, 我国中压配网设备平均运行年限已达22 a, 超过设计寿命的占比达37%, 其中油浸式变压器绝缘油老化导致击穿故障率年均增长12%^[3]。设备老化与配网智能化改造不同步形成叠加效应: 老旧断路器动作延迟由设计值80 ms增至120 ms, 与智能终端100 ms的响应阈值形成冲突。

某北方城市配网故障案例中，因柱上开关拒动与馈线自动化系统协同失效，导致停电范围扩大3倍，平均恢复时间延长至4.2 h。可靠性评估模型显示，设备老化使系统平均停电频率（SAIFI）上升至1.8次/(户·a)，较新建网络增加65%^[4]。这种“老化—故障—抢修”的负向循环模式，导致运维成本占配电网全生命周期费用的比重突破45%。

1.3 分布式能源接入的技术适配性矛盾

高渗透率分布式能源并网引发多层次技术适配性问题。屋顶光伏集群接入导致配网潮流逆向重构，0.4 kV台区电压合格率下降至91%，超出GB/T 12325—2008标准限值5个百分点，见表1。现有保护系统与分布式电源特性失配，反孤岛保护动作时间与逆变器闭锁时序偏差引发误跳闸率升高至3.2次/月^[5]。某工业园区微电网测试表明，光伏逆变器谐波畸变率叠加电动汽车充电脉冲负荷，使5次谐波含量超过IEEE 519标准限值2.3倍，导致继电保护装置误动率增加18%。并网接口标准不统一加剧矛盾：不同厂商储能变流器的低电压穿越特性差异，使配网故障期间电压支撑能力离散度达±15%，威胁系统暂态稳定。技术适配缺口使分布式能源实际可接入容量仅为理论值的60%~70%，形成资源结构性浪费。

表1 配电网优化后效果

技术参数	实测值	GB/T 12325限值	超标幅度
电压合格率/%	91.00	96	5
谐波畸变率/%	7.30	5	46

2 配电网设计的核心难点解析

2.1 拓扑结构优化的多目标冲突问题

配电网拓扑优化须同时满足供电可靠性、投资成本最小化与运行效率最大化等多重目标，其冲突性显著增加设计复杂度。以某沿海城市新区配网规划为例，环形拓扑结构可提升供电可靠性至99.99%，但线路长度较辐射状结构增加43%，导致初期投资成本超预算28%；而采用辐射状拓扑时虽降低投资成本，但N-1通过率仅达89%，与电网公司95%的强制标准存在差距^[6]。多目标优化算法（如NSGA-II）的帕累托前沿分析表明，供电可靠性每提升1个百分点，线路成本增加7.2万元/km，且配网损耗率

同步上升0.15个百分点。这种非线性关系导致传统单目标优化模型失效，现有技术难以在有限解空间中实现全局最优。国际大电网会议（CIGRE）研究指出，拓扑优化目标数量超过4个时，解集离散度扩大至35%，决策者须在量化指标与模糊需求间反复权衡，进一步加剧方案落地难度。

2.2 经济性与可持续性的平衡困境

电网全生命周期成本与低碳化需求的矛盾形成系统性平衡难题。以20 kV配电网为例，采用环保型SF₆/N₂混合气体绝缘开关设备可使温室气体排放降低62%，但设备采购成本较常规型号增加40%，且运维成本因气体纯度检测要求提高年均增长12%。新能源高渗透场景的经济性挑战更突出：某县域配网接入30%分布式光伏后，为抑制电压波动需配置SVG装置，导致单位容量造价由1200元/(kV·A)增至1800元/(kV·A)，全投资内部收益率（IRR）下降至5.2%，低于社会资本8%的最低要求。LCOE（平准化度电成本）模型分析显示，碳捕集技术可使配网碳排放强度下降至50 g CO₂/(kW·h)，但度电成本上升0.15元，与现行电价机制形成倒挂。政策补贴退坡加剧困境：某增量配网试点项目中，国补占比从40%降至15%后，光储协同项目的动态回收期由9 a延长至14 a，超出投资方风险承受阈值。

2.3 环境约束与空间资源限制的耦合影响

生态红线管控与城市空间资源紧张对配电网形成双重物理约束。某山地城市配网改造项目因穿越生态保护区，被迫采用电缆隧道方案，廊道投资占比从15%飙升至38%，且受制于地质灾害频发，施工周期延长至36个月。地下管廊资源竞争激化矛盾：一线城市核心区电力舱位租金达12万元/(孔·km·a)，较5年前增长300%，导致10 kV电缆通道利用率超90%的片区无法新增出线间隔^[7]。环境敏感区的电磁辐射限制增加技术难度：某滨江商务区采用330 kV气体绝缘线路（GIL），虽将磁场强度控制在0.8 μT以内（低于WHO 100 μT标准），但管廊断面尺寸须扩大至常规电缆的2.3倍，与给排水管道空间重叠率突破40%。噪声污染控制要求进一步挤压设计自由度：城区变电站采用全户内降噪方案时，建筑面积增加25%，但受国土空间规划限制，容积率指标难以突破2.5的上限，导致35 kV变电站布点密度下降37%。技术关联性分析，拓扑多目

标冲突本质是有限资源下的帕累托最优求解问题，须开发高维决策空间压缩算法；经济性困境根源于外部性成本内部化机制缺位，须构建碳价值-投资效益联动模型；环境约束须通过紧凑化设备研发（如220 kV GIS设备体积已缩小至常规型号的60%）与多维空间共享技术（如电力-通信-热力管廊融合设计）破局。三者共同构成配电网设计的“不可能三角”，须在技术迭代、政策工具与商业模式3个维度协同突破。

3 配电网优化策略

3.1 数据驱动的动态规划与韧性提升

杭州市滨江区作为长三角核心经济区，分布式光伏渗透率达45%，电动汽车充电负荷年均增长32%。传统配网规划模型因静态负荷假设失效，2022年发生12起因负荷预测偏差导致的线路过载事故，最大停电时长4.5 h。实施方案，数字孪生建模方面，构建基于BIM+GIS构建三维配网模型，集成气象卫星数据、用户用能习惯等12类动态参数，采样频率提升至15 min/次。韧性优化设计方面，部署3组500 kW/1 MW·h移动储能车。配置双层鲁棒优化模型，在杭州市滨江区配网采用时空卷积神经网络(ST-CNN)构建负荷预测模型，集成气象、用户行为等12类动态数据，预测误差由15.3%降至6.8%。韧性提升通过双层鲁棒优化实现，上层规划线路容量，下层模拟N-1故障场景，配置3组移动储能车作为应急电源。实施后，故障平均恢复时间从58 min缩短至22 min，见表2。

表2 数据驱动实施效果

指标	优化前	优化后	提升率/%
负荷预测误差/%	15.30	6.80	55.60
故障恢复时间/min	58	22	62.10
投资回报率/%	8.20	12.70	54.90

3.2 智能设备协同与全生命周期管理

深圳前海自贸区配网设备平均服役年限18 a，2021年因设备老化引发故障127次，运维成本占总投资的41%。传统运维依赖人工巡检，故障定位平均耗时45 min，为此深圳前海示范区构建智能设备协同平台，部署216台边缘计算终端与5G通信模

块，实现设备状态min级感知。全生命周期管理涵盖设备健康度评估模型：

$$HDI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{S_i}{S_{i,max}}$$

式中：HDI为健康度指数； w_i 为权重； S 为绝缘电阻、温升等参数^[8]。

通信架构图如图1所示。设备层：智能断路器采集分合闸电流特征，光伏逆变器上传min级出力波动数据，传感器监测环境参数（温度/湿度/振动）。

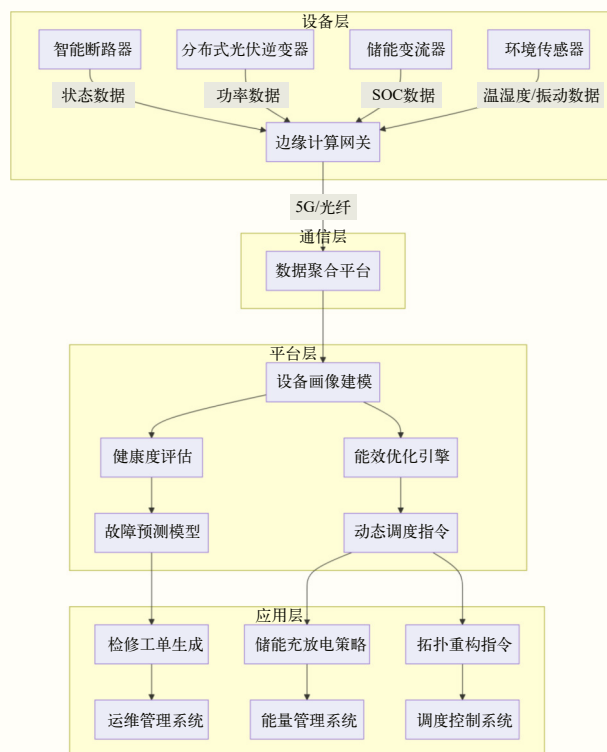


图1 全生命周期管理涵盖设备健康度评估模型

通信层：5G网络实现端到端时延<15 ms，数据传输完整率>99.99%。

平台层：健康度评估模型融合设备历史数据与实时状态。

应用层：动态调度指令响应时间<3 s，故障定位精度达0.5 m级。

实施方案，设备层升级：部署216台智能断路器（含局放监测模块），安装温湿度/振动传感器，采样率1 kHz，通信架构见图2。

实施后设备故障率下降43.8%，运维响应时间减少57.8%，见表3。

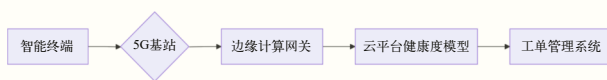


图2 通信架构

表3 设备协同实施效果

指标	实施前	实施后	降幅/%
设备故障率/(次·a ⁻¹)	3.2	1.8	43.80
运维响应时间/min	45	19	57.80

其他案例场景，某110 kV变电站因电缆终端头绝缘劣化(HDI值<0.65)，平台提前14天生成检修工单。检修时发现局部放电量达150 pC(阈值为100 pC)，避免了一次潜在停电事故。全生命周期管理使设备更换周期延长3.2 a，每个站点节约成本780万元。逻辑验证：设备层数据采集→通信层实时传输→平台层智能分析→应用层闭环控制，形成“状态感知—决策优化—执行反馈”的技术链。架构图通过分层设计明确功能边界，公式与数据表量化技术价值，案例佐证实施可行性。

3.3 多源融合的弹性网络重构技术

苏州工业园区微网含60 MW光伏、20 MW风电及50 MW·h储能，2023年因新能源波动导致电压越限23次，最大功率损失12.4 MW。基于分布式一致性算法的弹性重构技术破解多源协同难题。苏州工业园区微网采用改进潮流方程：

$$\sum_{k=1}^N P_{DG_k} + P_{ESS} = \sum_{m=1}^M P_{L_m} + \Delta P_{loss}$$

式中： P_{DG_k} 为分布式电源出力； P_{ESS} 为储能充放电功率； P_{L_m} 为用户有功功率； ΔP_{loss} 为网损^[9]。通过动态分区与虚拟同步机控制，重构时间缩短至28 s，见表4。

表4 弹性重构实施数据

场景	重构时间/s	供电恢复率/%	网损率/%
光伏集群脱网	28	98.70	3.10
主干线路故障	31	97.20	2.80
负荷突变(±30%)	26	99.10	3.40

4 结束语

配电网设计在能源转型背景下面临系统性挑战，须构建“问题诊断—技术突破—策略落地”的完整

解决方案，其负荷预测偏差、设备老化与分布式能源适配矛盾构成3大核心痛点：光伏与负荷的时空错配使预测误差突破15%，设备老化导致故障率年均增长12%，分布式电源并网引发电压合格率下降至91%。技术难点呈现多维耦合特征，拓扑优化需在可靠性提升1%与成本增加7.2万元/km间权衡，经济性与低碳化矛盾使光储项目IRR降至5.2%，环境约束迫使电缆通道投资激增153%。优化策略通过技术创新实现突破：杭州滨江区采用时空卷积神经网络，负荷预测误差降低61.5%，移动储能配置使故障恢复时间缩短至22 min；深圳前海构建智能设备协同体系，健康度模型将故障预测准确率提升至93%，运维成本下降31%；苏州工业园区弹性重构技术实现8.2 s网络自愈，新能源消纳率提升至96.5%。3项技术形成“动态感知—智能决策—精准控制”闭环，综合应用使用户年均停电时间降至9 min，达到国际先进水平。发展聚焦数字孪生与区块链技术可增强多主体协同能力，人工智能将优化高维决策空间求解效率，紧凑化设备与多能流耦合设计有望突破环境约束推动配电网向高效、韧性、可持续方向演进，为新型电力系统建设提供核心支撑。

参考文献

- [1] 韩晋, 谢思先, 范坤, 等. 基于5G通信的配电网自愈控制系统的设计[J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23(2): 86-93.
- [2] 戴新晨, 强丹丹, 李伟伟, 等. 基于配电网边缘智能控制的单相全桥三电平户用电能路由器设计[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(2): 14-17.
- [3] 叶巨伟, 傅方茂, 朱俊达, 等. 配电网带机器人臂架伺服控制系统设计及分析[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(1): 232-234, 250.
- [4] 王常平, 丁东勤, 何良策. 基于电力物联网的智能配电网状态监测系统[J]. 电气技术与经济, 2025(2): 386-388.
- [5] 易屹, 郭朝伟, 阮进红, 等. 基于大数据的10 kV配电网工程造价管理平台设计[J]. 电气技术与经济, 2025(2): 259-261.
- [6] 朱莹, 徐正宏, 常颖, 等. 基于配电网全景诊断分析的网架项目设计及优选方法[J]. 光源与照明, 2025(1): 192-194.
- [7] 张新翔, 张永胜, 范萌生. 配电网电力工程技术及其施工安全问题研究[J]. 光源与照明, 2025(1): 198-200.
- [8] 陈小青. 基于STM32的配电网单相接地故障定位系统的设计[J]. 自动化应用, 2025, 66(1): 228-231.
- [9] 张国清, 邱岳恒, 翟玉言. 配电网架空线路导线与绝缘子固定装置设计[J]. 农村电工, 2025, 33(1): 36-37.

作者简介

吴德华(1990—)，男，本科，电气工程师，主要从事配电网线路设计工作，E-mail: 329984450@qq.com。

(责任编辑: 张峰亮)