

Development and application of panoramic state perception and collaborative optimization system in intelligent distribution station area

Cong Zhao Chaoqun Lin Jun Wu

Xuchang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Xuchang, Henan, 461000, China

Abstract

with the rapid access of distributed energy, high proportion of electric vehicles and multiple energy loads, the traditional distribution station area is facing significant pressure in operation monitoring, condition assessment, load forecasting and optimal scheduling. The operation status of the station area shows the characteristics of high dynamic, strong coupling and frequent disturbance, which makes the traditional management mode relying on manual inspection and off-line analysis difficult to identify potential risks and abnormal operation in time. Based on the development trend of the deep integration of digitization, electrification and intelligence, the construction of an intelligent distribution area system integrating “panoramic state perception - intelligent diagnosis and evaluation - Collaborative Optimization Control” has become an important technical direction to improve the reliability of distribution and support the construction of new power systems. The research results can provide systematic reference for the intelligent upgrading of the new distribution system.

Keywords

intelligent distribution station area; Panoramic state perception; Data fusion; Collaborative optimization

智能配电台区全景状态感知与协同优化系统开发及应用

赵聪 薛超群 吴俊

国网河南省电力公司许昌供电公司，中国·河南许昌 461000

摘要

随着分布式能源、高比例电动汽车以及多元用能负荷的快速接入，传统配电台区在运行监测、状态评估、负荷预测与优化调度等方面面临显著压力。台区运行状态呈现出高度动态化、耦合性强、扰动频繁等特点，使得依赖人工巡检与离线分析的传统管理模式难以及时识别潜在风险与运行异常。基于数字化、电气化及智能化深度融合的发展趋势，构建集“全景状态感知—智能诊断评估—协同优化控制”于一体的智能配电台区系统，已成为提升配电可靠性、支撑新型电力系统建设的重要技术方向。研究成果可为新型配电系统的智能化升级提供系统化参考。

关键词

智能配电台区；全景状态感知；数据融合；协同优化

1 引言

配电台区作为电力系统中最靠近用户侧的关键节点，承担着低压配电网的电能分配、计量与状态监测等基础任务，其运行状态直接影响电能质量、供电可靠性乃至分布式能源并网稳定性。但在传统配电网结构下，台区管理长期依靠低密度监测、单点量测数据以及人工经验判读等方式，缺乏对运行数据的连续追踪和系统化分析。本文面向台区运行痛点，从体系架构、感知技术、数据治理、状态诊断与协

同优化机制五个维度展开研究，形成可工程化、可复制的智能配电台区技术体系，并在典型台区进行了实证验证，展示了系统在能效提升、线损治理与分布式资源利用方面的显著成效。

2 感知架构设计与多维数据采集逻辑

智能配电台区的全景感知体系旨在实现从传统“单点量测—周期采集—人工判断”向“多源融合—连续感知—在线判识”的系统性跃迁，其核心在于形成对电压、电流、功率流、温升、谐波、拓扑状态以及分布式资源运行行为的多维感知，从而建立数字化底层运行画像，如图 1。该体系在空间维度上以“台区变压器—馈线分支—用户节点”三层结构布设智能终端，在时间维度上由基础计量周期采样扩展至

【作者简介】赵聪（1984-），男，中国河南禹州人，本科，高级工程师，从事配网运维、配变及低压分布式光伏管控等研究。

秒级事件捕获，并依托 NB-IoT、5G 与低功耗自组网形成混合链路通信结构。在典型场景中，台区变压器作为能量转换中心部署高精度电参量采集模块与油温传感单元，用于捕捉绕组热点、负载率峰值与磁通密度变化；馈线层部署多点电压互感器与电流互感器，结合智能断路器或开关柜监测分支功率流动与瞬态冲击，从而实现拓扑状态的动态可视化；用户侧通过智能电表、逆变器通信接口或柔性负荷控制终端实现电能质量事件记录与异常用能行为识别，能够捕捉热泵启动、电动汽车快速充电以及光伏逆变器主动脱网等事件数据^[1]。

上述数据通过边缘节点完成预处理，包括量测噪声削弱、时间戳统一、数据压缩与异常剔除，并以“原始量—统

计量—特征量”的多层结构向中心侧传输，保证数据在传输过程中具有抗干扰能力且可扩展。为增强系统对复杂扰动场景的敏感性，感知体系必须引入事件驱动采样机制，其触发条件不以固定采样频率为约束，而以功率梯度变化、节点电压偏移率、谐波含量上升速率和温升梯度为判据，使系统在瞬时冲击、短时反潮、突发性负荷接入等工况下保持高响应性。在工程实践中，通过对大量典型数据进行时间窗口化与多尺度特征构造，可以重构台区在不同季节、气候与用能结构下的运行模式，从而为后续状态诊断与协同调控提供稳定的知识基础。

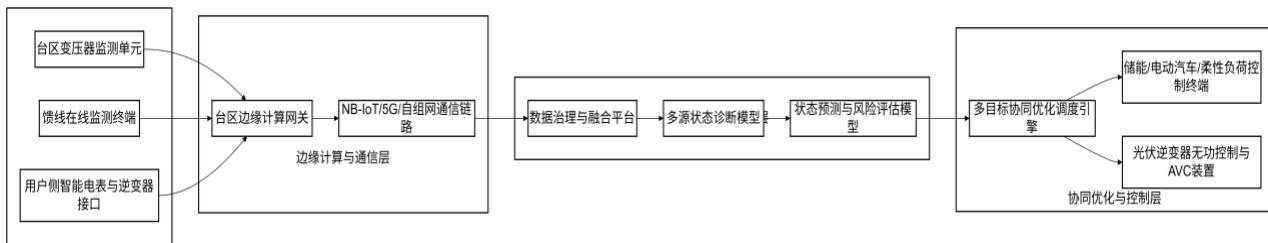


图 1 智能配电台区全景状态感知与协同优化系统逻辑结构示意图

3 智能配电台区状态诊断与预测模型

3.1 多源数据驱动的状态诊断方法体系

智能配电台区的状态诊断本质是对电压、电流、功率、谐波、温升与拓扑状态在时间与空间维度的变化规律进行解析，从而识别关键运行事件、隐性故障与潜在系统风险。状态诊断需突破传统单变量阈值判断模式，通过对多源数据的高维特征构建与动态关联分析揭示运行机理。其技术核心在于构建一套融合统计特征、时序特征与拓扑特征的诊断体系，在状态空间中形成可判别的异常模式。系统首先基于拓扑映射与电气一致性原则建立功率平衡模型，通过变压器计量数据、分支节点采样数据与用户端智能表数据间的功率闭合关系，实现对线损来源、计量偏差及潜在窃电行为的初判，再结合电能质量参数如总谐波失真率、电压偏差率与短时电流冲击幅值构造特征组，使数据具备反映异常事件强度与持续性的能力。在状态诊断算法层面，系统以二维时序卷积网络或长短期记忆网络构建电参量时序演化模型，用于捕捉日内峰谷迁移、季节性负荷变化与高频扰动对台区运行的综合影响；再结合基于图神经网络的拓扑约束模型，将台区馈线结构作为空间图，将节点电压与功率流值映射至图节点属性，通过图卷积传播捕捉不同节点间的潜在关联，使诊断结果不再依赖单节点特征而表现为拓扑一致性。

对于复杂异常，如用户端电器启动导致的瞬态冲击、光伏逆变器保护脱网、储能设备脉冲充电等事件，系统引入时间序列回归残差与电流不平衡因子构建异动序列，并通过 One-Class SVM 或变分自编码器进行异常模式检测，实现对无标注异常数据的自动识别。实验表明，与传统基于单点阈值的诊断方式相比，该体系在多样场景下对电压越限识别率

提升 27%–39%，对瞬态冲击事件误判率下降超过 40%，对三相不平衡的定位精确度提升至馈线分支级，仅依赖边缘节点即可完成预警，从而实现从经验判断到模型认知的系统跃迁。

3.2 面向运行风险的状态预测模型

状态预测旨在在未来不同时间尺度上推断台区运行趋势，为主动调控与协同优化提供先验依据。预测模型构建需要同时刻画短时随机扰动与长周期负荷演变，使预测结果能够对设备热态、电能质量与可再生能源出力形成稳定解释。为此，系统采用“机理约束的深度时序预测”结构，以多物理场模型为边界条件，以神经网络为拟合核心^[2]。

对于变压器热态预测，系统首先以 IEC 标准模型建立油温与绕组热点温升的热平衡方程，并引入热容量与散热因子构造瞬态温度响应，使模型具备对不同负载水平下的物理解释能力；随后利用 GRU 或 Transformer 架构对历史负荷序列进行建模，将电流幅值、负荷率、环境温度、风冷强度等变量嵌入时序特征空间，通过注意力机制区分季节性趋势与突发负荷，得到未来 30–120 分钟的温升预测区间。在电压预测中，系统以潮流计算结果作为先验，通过节点导纳矩阵和拓扑约束构建稳态模型，随后引入分布式光伏出力预测与储能策略，将电压序列转化为具有物理一致性的状态轨迹，再由时间卷积网络建模节点电压在不同出力组合下的动态分布。对于线损与负荷预测，系统以混合模型实现短期与中长期预测的协同，其中短期模型依托高频负荷波动特征捕捉集中充电与用能事件对线路损耗的影响，中长期模型通过用户画像、历史功率分布与季节性温度指数构建趋势项，使预测结果不受单日扰动影响。在系统部署过程中，预测结果

通过概率区间而非单值输出，以对冲模型不确定性并向调度器提供鲁棒输入，预测风险水平通过贝叶斯后验估计得到更新，使模型长期运行不依赖人工调参^[3]。

4 台区协同优化与智能控制策略

4.1 多目标优化模型与运行调度逻辑

台区协同优化的核心任务在于综合处理电能传输效率、分布式发电并网稳定性、设备负载安全边界与用户侧行为灵活性之间的多维矛盾，使配电网络在不确定性与耦合性高度增强的环境下仍保持稳定、高效与经济的运行状态。在优化目标构建上，系统不再局限于单一指标，而是形成以线损最小化、电压偏差约束、变压器寿命延长、分布式光伏消纳率提升与储能经济效用最大化为核心的多目标集合，通过动态权重映射反映运行阶段与场景差异。在模型层面，优化问题通过建立状态空间 S 、决策变量 x 与约束集合 Ω 构成分层求解框架，其中状态空间由负荷曲线、节点电压、潮流分布、设备温升与分布式发电功率共同表征，决策变量包含储能充放策略、逆变器无功调节、柔性负荷移峰幅度及台区调压设备动作逻辑，

约束集合则由热稳态极限、电压允许区间、节点功率平衡和用户舒适性需求组成。模型采用加权和与 Pareto 前沿联合表达方式，其求解采用多目标遗传算法与模型预测控制耦合结构，遗传算法用于对较长时间尺度进行策略寻优，避免陷入局部极值，而 MPC 在滚动窗口内依据短时预测结果进行策略修正，使系统在光伏输出骤升、用户突发负荷或电动汽车集中充电等场景下具备即时修复能力。为提高调度指令可实施性，系统引入调控成本与设备动作惩罚因子，通过将挡位切换次数、储能循环次数与逆变器无功注入幅度映射为代价函数的一部分，避免短时间高频控制导致设备疲劳与寿命降低，并保障调度策略在工程层面具有可持续性。在调度执行路径上，端一边一云协同结构形成自适应控制链路，边缘节点通过本地特征分析完成快速动作判断，云端系统通过策略回溯与趋势分析校正或冻结边缘指令，避免在通信延迟或异常情况下形成分布式震荡，从而实现台区层面的多尺度协同调控。

4.2 分布式资源协同控制策略与运行自适应机制

在源网荷储复杂耦合的台区场景中，单一资源的独立调节无法有效缓解运行压力，必须以分布式资源协同控制为核心，使光伏、储能、电动汽车与柔性负荷形成动态互补。

在光伏侧，逆变器不再仅承担直流—交流能量转换，而被纳入节点电压调节环节，通过设定功率因数下限与动态无功注入策略，使其在高出力时段以吸收无功方式抵消电压抬升；当负荷大幅增加导致节点电压下降时，逆变器在限定范围内提供无功支撑，从而形成与低压补偿设备协同的电压稳定机制。

储能系统则按照“削峰—吸光—应急”的运行序列工作，在日间光伏尖峰时段通过吸纳分布式发电减少反向潮流，在夜间负荷高峰通过放电降低变压器链路热应力，并在节点电压突降或故障隔离时提供短时支撑。在电动汽车负荷调节中，通过充电行为模型将用户充电需求映射为可变形负荷，不采用强制直控，而以价格信号、时间窗口与电网状态约束共同形成柔性引导，使充电行为在台区尺度内展现群体协同性并避免集中冲击。柔性负荷调控则针对空调、热泵与热水器等热容量负荷，通过滞后响应机制与温度容忍区控制实现不影响用户体验前提下的移峰与错峰。协同控制策略必须与系统状态诊断与预测模型形成闭环，预测模型输出的温升风险、节点电压偏移趋势与线损增幅信息被转化为调控触发条件，并在边缘节点执行之前通过集中校核将调度结果限制在设备安全区间，避免“虚假调节”造成局部震荡。在实际运行中，该体系形成自适应能力，能够在新能源波动剧烈或用户行为突变情况下保持稳定，通过短时控制策略与长期调度策略的耦合，实现配电台区在能源结构高度分散的背景下持续处于电压合格、设备可承受与供能高效的运行区域。

5 结语

智能配电台区建设是新型电力系统的重要基础工程，其核心在于通过全景感知、智能诊断与协同优化构建台区级智能自治能力。本文提出的系统围绕数据采集、多源融合、状态诊断与资源协同调控构建了完整技术链条，并通过工程试点验证了系统在供电可靠性、能效提升与线损治理方面的显著成效。

参考文献

- [1] 金鹏,李垚,张雨琳.配电台区全景信息采集及智能组网技术[J].电子技术与软件工程,2020,(2):234-235.
- [2] 阮祥勇,荣建,邵军.面向新型电力系统的低压智能配电台区快速复电研究[J].电力设备管理,2023,(8):11-13.
- [3] 王成亮,李澄,葛永高,等.基于多智能体的配电台区智能决策系统研究[J].信息技术,2020,44(10):49-55.