

Research on the intelligent upgrading path and future technology development trend of primary and secondary integrated ring network cabinet

Yong Li Changlu Shen Yuejing Su Meng Li Ke Zheng

Jubang Group Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325600, China

Abstract

In the context of accelerated urbanization and large-scale integration of renewable energy, traditional ring main units are gradually revealing limitations in operational monitoring accuracy, fault response speed, and equipment maintenance efficiency, making it difficult to meet the real-time perception and rapid decision-making requirements of modern distribution networks. Against the backdrop of building a new power system, the intelligent transformation of distribution networks has become a crucial support for the energy revolution. It is necessary to overcome the functional fragmentation caused by the physical isolation of primary and secondary equipment, as well as address the operational control challenges brought about by the volatility of distributed power sources. The continuous iteration of industry standards and the ongoing penetration of digital technology are driving ring main units toward integration and digitalization. Deep equipment collaboration and data value extraction have become key to breaking through these challenges, urgently requiring intelligent upgrades to create distribution nodes with active defense capabilities and flexible regulation functions.

Keywords

primary and secondary integration; ring network cabinet; intelligent upgrading; technology development trend

一二次融合环网柜智能化升级路径及未来技术发展趋势研究

李勇 沈昌禄 苏岳景 李猛 郑克

巨邦集团有限公司, 中国·浙江 温州 325600

摘要

在城市化进程加速与可再生能源规模化接入的态势下, 传统环网柜在运行监测精度方面、故障响应速度层面以及设备维护效率角度逐渐显露出局限性, 难以契合现代配电网对实时感知与快速决策的需求。在新型电力系统建设的背景下, 配电网智能化转型已然化作能源革命的重要支撑点, 既要突破因一二次设备物理隔离而引发的功能割裂问题, 又得应对由分布式电源波动性带来的运行控制挑战。行业标准不断迭代的进程与数字技术持续渗透的状况正在推动环网柜朝着集成化、数字化的方向演进发展, 设备深度协同和数据价值挖掘变成了破局的关键所在, 亟待通过智能化升级构建具备主动防御能力和弹性调节功能的配电节点。

关键词

一二次融合; 环网柜; 智能化升级; 技术发展趋势

1 引言

当前配电网正经历从单向供电向多元互动的结构性转变, 环网柜作为电网末端的核心设备, 面临着功能需重构、价值待延伸的双重考验。传统机械式操作机构与分立式保护装置形成的物理屏障, 使得设备状态呈现出透明度不够以及运维决策出现滞后的问题, 在应对高比例新能源接入和柔性负荷调节时显现出力不从心的疲态。智能化升级不单单是设备自身要在技术层面实现突围, 更是构建新型电力系统所需的基础支撑条件, 这就要求必须打通设备级的信息孤岛, 建

立由数据驱动的闭环控制体系。本文聚焦于一二次融合环网柜的功能演进所遵循的逻辑上, 对硬件重构与软件迭代之间的技术耦合关系展开系统解析, 深入探讨智能化升级过程里设备形态的变革与运维范式的内在规律, 为配电设备智能化转型提供可落地的技术路线参考。

2 一二次融合环网柜的智能化需求分析

2.1 传统环网柜的功能局限与运维痛点

环网柜 (Ring Main Unit) 是一组输配电电气设备 (高压开关设备) 装在金属或非金属绝缘柜体内或做成拼装间隔式环网供电单元的电气设备, 其核心部分采用负荷开关和熔断器, 具有结构简单、体积小、价格低、可提高供电参数和性能以及供电安全等优点。它被广泛使用于城市住宅小区、

【作者简介】李勇 (1980-), 男, 中国湖北襄阳人, 本科, 高级工程师, 从事配电设备一二次融合技术研究。

高层建筑、大型公共建筑、工厂企业等负荷中心的配电站以及箱式变电站中。但是传统环网柜在长期运行中暴露出多维度功能缺陷与运维难题：人工巡检模式受限于人员技术水平与作业环境复杂度，地下配电室潮湿闷热或暴雨天气等场景下存在巡检盲区，设备隐性缺陷易演变为绝缘击穿或短路故障。机械式保护装置动作精度受弹簧疲劳特性影响显著，负荷波动频繁区域可能引发误动或拒动现象，故障隔离效率难以匹配现代配电网快速复电需求。触头系统磨损状态缺乏量化评估手段，接触电阻随机械老化持续增大易引发放电发热链式反应，运维人员往往被迫采取被动式检修策略。设备通信接口标准化程度不足导致多源数据融合困难，不同厂商环网柜形成的异构数据难以支撑配电自动化系统全景感知，故障研判环节高度依赖调度人员经验判断^[1,2]。

2.2 配电网智能化升级的行业驱动因素

电力系统在能源转型浪潮中承载着使命变迁，能源消费结构向低碳化倾斜促使电网必须从单向电能输送网络转向具备动态平衡能力的综合服务平台，高比例可再生能源并网带来的间歇性功率波动对配电网设备响应速度与协同控制能力提出更严苛的要求，传统机械式环网柜因缺乏实时感知与自适应调节机制，难以支撑光伏、风电等分布式电源频繁启停导致的电压越限与潮流倒送问题。用户侧需求多元化加速了配电网服务边界的延伸，电动汽车充电桩、储能系统及智能家居等新型负荷的随机接入打破了原有供电秩序的确定性，柔性负荷调节与双向能量交互迫使环网柜突破单向保护功能的局限，向支持拓扑灵活重构与信息物理融合的方向演进。数字技术向电力领域深度渗透重构了设备价值创造模式，边缘计算框架的成熟与物联网协议的标准化为环网柜嵌入智能终端提供了低成本集成路径，设备状态透明化与运维策略数字化正成为电网企业优化资产效率的核心抓手，驱动环网柜从孤立执行单元升级为配电网全域感知体系的神经节点。

2.3 一二次设备深度融合的技术必要性

传统环网柜一二次系统分立架构难以适应新型电力系统对设备交互实时性与决策自主性的要求，物理层与信息层的割裂导致数据溯源链条存在断层，互感器、断路器与保护单元间的信号传递需经历多级转换，原始电气特征在传输过程中易受电磁干扰产生畸变。深度融合技术将传感模块嵌入一次设备本体，消除传统外置互感器的空间隔离与接线复杂度，电压电流波形采集精度从毫秒级提升至微秒量级，为暂态过程分析与高频谐波监测提供底层数据保障。跨层级设备协同需要建立统一时序基准与数据语义标准，深度融合架构通过共享时钟源与数字化接口打通信息流传输瓶颈，使得故障电流分断动作与保护逻辑执行的同步误差控制在百纳秒范围内。设备内部多物理场耦合效应要求温度、机械应力、绝缘状态等参数实现原位感知与联合解耦，深度融合设计的微型化传感器网络可突破传统分立式监测装置的空间局限，构建多维参数融合分析的设备健康画像。

3 智能化升级路径设计

3.1 硬件升级路径

硬件升级路径聚焦于感知层与执行层的物理重构（如图1所示），嵌入式温度传感器与高频电流互感器融合安装可捕捉触头接触面微秒级温升曲线，局部放电监测模块采用特高频传感阵列实现放电相位分布图谱重构。通信管理单元需兼容 IEC61850 与 MQTT 双协议栈架构，光纤以太网与无线自组网混合传输模式适应复杂电磁环境下的数据保真需求。智能操作机构集成永磁驱动与双线圈冗余设计，动作时间离散性控制在毫秒级误差范围内，霍尔元件实时反馈分合闸位置状态形成闭环控制。触头系统镀层工艺引入梯度复合金属材料，银钨合金基体表面气相沉积纳米氧化层抑制电弧烧蚀速率，机械寿命周期内接触电阻波动幅度压缩至初始值15%以内。

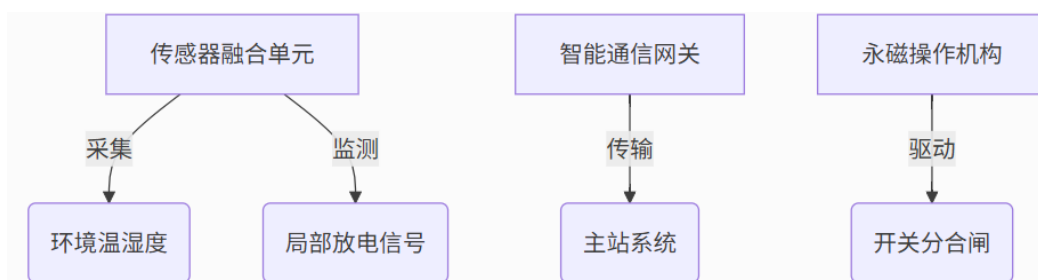


图1 环网柜硬件升级拓扑图

3.2 软件升级路径

软件升级着力于数据价值挖掘与决策闭环构建（详见图2），多源异构数据清洗引擎建立设备指纹标签体系，基于迁移学习的故障诊断算法在样本稀缺场景下仍能识别接地电阻异常等隐性缺陷。时序数据库采用滑动窗口压缩编码技术降低高频采样数据的存储冗余度，容器化部署的微服务

架构支撑边缘计算节点动态加载绝缘老化评估模型。人机交互界面集成三维可视化渲染引擎，运维人员拖拽式操作即可重构环网柜内部虚拟孪生体，操作票自动生成模块结合拓扑分析结果推荐最优复电序列。知识图谱引擎将历史检修记录与实时监测数据关联建模，自适应优化周期巡检策略的同时生成设备健康度热力图。

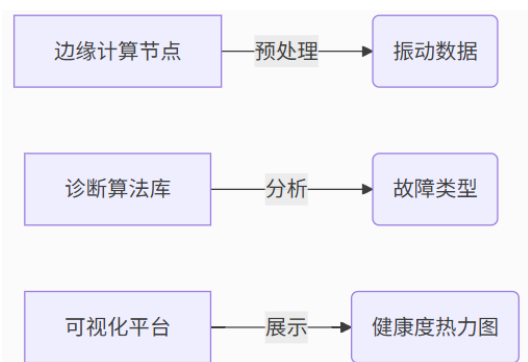


图2 环网柜软件架构数据流程图

3.3 运维模式转型

运维团队需依托环网柜本体加装的振动传感器与局放监测模块实时捕获机械部件磨损程度和绝缘劣化趋势，利用加密通信通道将多维状态量上传至区域运维管理平台形成动态健康档案，历史数据与实时波形的交叉比对帮助技术人员提前识别触头卡涩或电缆头过热等隐性缺陷。设备制造商应当在出厂环节预置标准化数据接口与自诊断算法库，使得不同型号环网柜采集的温度、湿度及操作次数等参数能够自动匹配预设的劣化模型，在异常工况触发阈值告警时自动生成检修工单并关联备品备件库存信息，大幅压缩传统人工巡检与故障复盘的时间窗口。电网企业需要重构运维资源配置逻辑，将原本分散在定期巡检与应急抢修的人力物力转向数据分析与策略优化，基于设备健康指数动态调整检修周期，在负荷低谷时段优先处理高风险节点，形成预防性维护与状态检修协同推进的作业范式^[3,4]。

4 未来技术发展趋势

4.1 人工智能驱动的自主决策能力

人工智能算法在电力设备层级的深度嵌入将重塑环网柜的决策响应机制，复杂工况下多源异构数据的即时处理要求算法具备特征提取与模式识别的双重穿透力，海量运行日志与实时波形叠加形成的时空关联矩阵为负荷预测与故障预判提供动态学习样本，深度学习框架在设备端侧的轻量化部署使环网柜能够自主识别电缆绝缘劣化与机构卡涩之间的隐性关联。边缘计算架构的进化推动决策权限向设备本体下沉，基于数字孪生构建的虚拟镜像系统可同步映射母线温度场分布与机械操作机构的应力变化，当局部放电信号与负荷波动形成复合扰动时，自主决策系统能在百毫秒内完成拓扑重构策略的生成与校验，避免传统保护定值固化导致的误动或拒动风险。

4.2 新型材料与模块化设计创新

新型绝缘材料研发逐步向纳米复合化方向演进，碳化硅增强型环氧树脂体系在湿热交变环境中展现出更优的介电强度保留率，气隙填充特性可抑制沿面放电引发的绝缘劣

化过程。模块化结构设计推动功能单元向可插拔式重构转型，灭弧室与传感器模组采用标准接口卡槽装配模式，现场更换作业时间压缩至传统结构的四分之一以内。相变储能材料与热管散热技术耦合应用缓解了高密度柜体内部温升梯度，微孔金属泡沫载体在有限空间内实现热量定向疏导。磁流体密封技术在可动部件防护领域显现潜力，旋转隔离开关传动轴处形成的自适应液膜屏障有效阻隔粉尘侵入。

4.3 碳中和目标下的绿色智能化技术

绿色智能化技术演进正推动环网柜产品全生命周期的碳足迹管理进入新阶段，环保型固体绝缘介质的研发突破逐步替代传统六氟化硫气体方案，基于纳米改性材料构建的真空灭弧室在降低温室气体逸散风险的同时提升开断性能，设备全密封结构设计可与降解环氧树脂的应用使退役回收环节的资源循环率显著优化。设备运行能效提升聚焦于功率模块的动态损耗控制，拓扑自适应调节算法可根据负荷波动实时调整磁保持继电器的工作频段，结合母线排温度场仿真优化导体截面积分布，使得空载工况下的铁损与涡流损耗较传统设计下降三至四成。分布式能源消纳需求催生设备与环境的能量交互能力重构，环网柜本体集成光伏逆变器余热回收装置与超级电容储能单元，内置碳流追踪模型可实时关联设备运行模式与区域电网的清洁能源渗透率，在电压越限前触发无功补偿与储能充放策略，形成支撑配电台区碳强度下降的微观调节单元。

5 结语

一二次融合环网柜智能化转型的本质是设备功能从被动执行朝着主动感知发生范式上的跃迁，这需要构建以多维度数据融合为基础的决策中枢。硬件层要突破的是传感器功耗集成与设备状态精准感知方面的技术瓶颈，软件层应建立具备开放兼容特性的数据中台来实现边缘智能计算，运维体系则要对“数据驱动、主动预警”、的服务模式加以重构。建议设备制造商强化模块化设计的理念，目的在于适应快速迭代的需求，电网企业应主导建立标准化通信协议促进生态协同，研发机构要以前瞻性的眼光布局量子传感与数字孪生等赋能技术。

参考文献

- [1] 周楠. 智能配电网一二次融合传感器校验技术分析框架构建[J]. 中国设备工程, 2025, (02): 175-177.
- [2] 闫强强. 基于一二次融合开关的小电流接地故障保护应用[J]. 电力安全技术, 2025, 27 (01): 30-34.
- [3] 陆振东,张永起,姚昀辰,等. 一二次融合的高压智能断路器技术分析[J]. 电子技术, 2024, 53 (04): 363-365.
- [4] 朱剑鹏. 配电开关一二次设备一体化融合及检测技术研究与应用[D]. 郑州大学, 2020.