医疗场所双电源与 UPS 智能监控系统设计及故障预警研究

时梦瑶[1]　褚龙吉[2]

1.中国中元国际工程有限公司 北京 100089

2.机械工业规划研究院有限公司 北京 100055

【摘　要】：医院是特殊的公共建筑，其供电可靠性直接关系到患者安全，因此急诊、重症监护室、手术部等重要医疗场所普遍采用双电源+UPS 不间断电源的冗余供电架构，但传统运维模式大多依靠人工巡检，仅能实现基础电压、电流数据就地显示，缺少集中监测、故障提前预警、联动告警功能。一旦出现电源切换失败、蓄电池劣化、UPS 逆变器隐性故障、双电源 ATS 切换机构卡滞等问题，运维人员无法及时发现，极易在市电停电的关键时刻出现供电保障失效。本文结合医院供配电工程实际需求，设计一套面向医疗场所的双电源与 UPS 一体化智能监控系统，搭建系统总体架构，完成硬件选型、软件功能模块设计，研究基于多参数融合的故障预警算法。依托医院配电现场实测数据，对系统预警功能进行测试验证。结果表明，该监控系统能够实时采集双电源、UPS、蓄电池组运行参数，对电池老化、开关接触不良、温升异常等潜在故障实现提前预警，提升医疗建筑后备供电系统运维数字化水平，保障医疗重要负荷连续可靠供电。

【关键词】：医疗建筑；双电源；UPS；智能监控；故障预警；供配电

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.013

引言

随着现代医疗技术快速发展，医院大量精密诊疗设备、生命维持装置对供电连续性、电能质量提出极高要求。按照《供配电系统设计规范》《医院建筑电气设计规范》，医院手术室、ICU、抢救室、医用气体控制系统、急诊等场所用电负荷划分为特级负荷，必须配置两路独立电源作为主备电源，同时增设 UPS 作为不间断供电保障。现阶段国内很多医院虽然硬件上配置了双电源自动转换开关与 UPS 电源装置，但配套监测体系存在短板。多数 UPS 设备仅自带本地显示屏，双电源 ATS 缺少运行状态远传功能，各类设备相互独立，数据孤岛现象突出。运维人员只能定期现场抄表、目视巡检，对于蓄电池内阻缓慢增大、电池容量衰减、切换机构机械磨损、散热风扇性能下降等渐进式隐性故障很难识别。等到市电停电测试或者事故发生时，才暴露后备供电失效问题，带来重大医疗安全风险。目前电气领域对于 UPS 监控的研究多聚焦数据中心场景，针对医疗场景双电源与 UPS 一体化协同监测、故障预警的研究相对偏少。医疗场所供电系统有其特殊性：不仅需要监测电气参数，还需要满足医院环境电磁兼容、消防联动、断电告警分级推送等需求。本文从医院运维实际痛点出发，设计一体化智能监控系统，整合双电源 ATS、UPS 主机、蓄电池组监测节点，建立多维度故障预警模型，实现后备供电系统状态可视化、故障预警自动化，为医疗建筑供配电安全运维提供技术方案。

1 医疗场所重要负荷供电架构及常见故障分析

（1）医疗建筑后备供电系统构成。医疗建筑中特别重要负荷供电链路：两路独立市政 10kV 电源，经降压变压器输出两路低压市电，接入双电源自动转换开关 ATS。正常工况下 ATS 选择主电源供电；当主电源失压、断相、电压超限，ATS 将自动切换至备用电源。双电源输出后端接入 UPS 系统，UPS 包含整流模块、蓄电池组、逆变模块等。市电正常时，整流器给蓄电池浮充；双电源输出中断时，蓄电池通过逆变器不间断向医疗重要负载供电，保障生命支持设备持续运行。整套系统存在两级冗余切换：第一级为双电源 ATS 电源切换，第二级 UPS 不间断逆变供电。两级系统相互串联，任一环节失效均可能导致后端重要医疗负荷断电。（2）系统典型故障类型及故障特征。①双电源 ATS 故障：主备电源电压采样异常、控制回路断线、切换机构机械卡滞、触头接触电阻增大、触头温升超标、储能机构故障。这类故障平时带电运行无明显现象，通常在电源切换试验时才会暴露，属于高风险隐性故障。②UPS 主机故障：整流模块损坏、逆变器 IGBT 老化、冷却风扇故障、旁路开关接触不良、模块通信中断。故障会导致 UPS 无法正常逆变输出，市电中断时失去后备供电能力。③蓄电池组故障：单体电池内阻增大、单体电压不均衡、电池鼓包漏液、容量衰减、浮充电压异常。蓄电池是 UPS 储能核心，电池性能随使用年限逐步退化，是 UPS 系统最高发故障点。④辅助类故障：线路接线松动、环境温湿度超标、通信线路中断、散热风道堵塞，会加速电气部件

老化，诱发次生故障。（3）传统运维方式存在短板。传统人工巡检周期长，数据记录离散，无法连续跟踪参数变化趋势；仅能记录瞬时参数，难以识别缓慢劣化趋势；告警方式单一，故障发生后被动报警，不具备提前预警能力；ATS 与 UPS 分属不同厂家设备，通信协议不统一，无法在同一个平台协同监测，故障发生时难以快速定位是前端双电源还是后端 UPS 故障。

2 智能监控系统总体方案设计

（1）系统设计原则。①可靠性原则：系统本身具备高抗干扰能力，能适应医院配电室的复杂电磁环境，不影响原有供电主回路安全，采集装置不改变原有一次主接线。②一体化集成原则：统一采集双电源 ATS 状态、UPS 主机参数、蓄电池单体参数，实现设备状态的集中展示。③分级预警原则：设置一般预警、重要预警、紧急告警，不同级别推送至运维人员手机、监控后台。④扩展性原则：预留接口，可接入配电室其他电力仪表、火灾报警系统等，便于后期系统扩容。⑤合规性原则：满足医院电气规范，硬件选型符合医疗建筑电磁兼容要求。（2）系统总体架构。系统分为三层架构：现场感知采集层、数据传输层、监控平台应用层。①现场感知采集层：包含 ATS 状态采集模块、UPS 通信采集单元、蓄电池在线监测模块、温湿度传感器、触头温度采集传感器。采集信号包含两路进线电压、电流、频率，ATS 开关位置、触头温度、切换动作记录；UPS 整流、逆变、旁路状态，输出电压、负载率；蓄电池单体电压、内阻、电池组温度。②数据传输层：采用工业 RS485 总线+以太网相结合方式。现场采集终端将数据通过 Modbus-RTU 协议汇总至边缘网关，网关完成协议转换，将数据上传至服务器；医院内网隔离设计，不接入互联网，保障电力数据网络安全。③监控平台应用层：部署在医院本地服务器，包含实时监控界面、历史数据库、故障预警模块、告警推送模块、报表统计模块。运维人员可通过电脑客户端、本地大屏查看系统状态。（3）硬件选型设计。ATS 采集终端：采集两路进线三相电压、电流、开关分合位、触头红外测温，实时捕捉切换动作事件，记录切换时间。蓄电池监测模块：每个电池配置采集节点，在线采集单体电压、内阻、表面温度，实时识别电池不均衡现象。边缘网关：支持多协议转换，支持 Modbus、IEC61850，具备数据本地缓存功能，网络中断时保存历史数据，网络恢复后自动补传。传感器选型全部选用工业级器件，具备 1 供电系统安全。

3 多参数融合故障预警模型研究

传统监控系统大多采用固定阈值告警机制，该方式仅能对参数瞬时越限进行告警，适合捕捉短路、失电等突发性故障。但医疗建筑双电源与 UPS 供电系统大量故障属于缓慢渐进劣化型故障，例如蓄电池内阻逐年缓慢增加、ATS 开关触头长期运行接触电阻逐步上升、UPS 模块散热性能缓慢衰减等。这类隐患在发展初期，各项监测参数并未突破设备出厂规范与国标阈值，依靠单一静态阈值很难发现，等到参数达到告警限值时，设备性能已经严重衰减，甚至在市电中断等关键时刻发生供电失效。针对这一短板，本文构建静态阈值判定、趋势增量分析、多参数关联融合三层结构的故障预警模型，将瞬时超限告警与参数长期变化趋势评估相结合，实现对后备供电系统隐性故障的提前识别与分级预警。（1）特征参数选取。结合医疗场所双电源 ATS、UPS 主机、蓄电池组的故障机理，兼顾数据采集可行性、参数敏感度，筛选 7 项核心特征参数作为模型输入变量，覆盖一次回路、UPS 功率模块、储能电池、冷却系统四个方面：①ATS 触头温度：反映双电源转换开关触头接触状态，触头氧化、接线松动会造成触头温度持续升高。②两路进线电压差：两路市电电压差值，用于判断两路电源供电均衡性，识别进线电源偏载、缺相等异常。③蓄电池单体电压极差：同一组蓄电池内最高单体电压与最低单体电压之差，表征电池组一致性劣化程度。④电池内阻增长率：单位时间内蓄电池单体内阻变化率，是评估电池老化最核心指标之一。⑤UPS 负载率：UPS 实际输出负载与额定容量比值，反映机组带载状态，长期过载或轻载均不利于 UPS 稳定运行。⑥UPS 模块温度：UPS 整流、逆变功率模块表面温度，体现功率器件运行发热情况。⑦风扇转速：UPS 冷却风扇实时转速，用于判断散热系统是否存在卡滞、老化、转速下降等故障。所选参数均可通过现场传感器、智能采集终端实时采集，数据接入监控平台数据库，按固定时间步长保存历史时序数据，为趋势分析提供基础数据集。（2）预警判定逻辑。预警模型设置三级判定逻辑，依次执行静态阈值判定、趋势增量预警、多参数融合判别，输出健康、关注、预警、紧急告警四种设备健康等级。①静态阈值判定：将采集得到的实时特征参数与国家标准、设备厂家技术规范等设定的阈值比对。当任意监测参数直接超出限值，系统直接判定为紧急告警，无需等待趋势分析。紧急告警代表设备已经出现功能性故障，存在供电中断风险，运维人员需要立即赴现场处置。典型判定示例：蓄电池单体电压低于规定下限；ATS 触头温度超过 120℃；UPS 模块温度超过设备最高允许工作温度。静态阈值主要捕捉突发

性故障，作为安全底线。②趋势增量预警：针对渐进式劣化故障，引入参数变化速率指标，对时序监测数据做滑动窗口计算，分析参数随时间的变化趋势。即使当前参数数值没有突破静态阈值，若参数变化速率超过预设增长率阈值，则触发预警。典型场景：连续 30 天监测到蓄电池单体内阻持续稳定上涨，虽然当前内阻尚未达到报废阈值，但内阻增长速率超标，模型判定电池存在加速老化风险，生成预警工单，提醒运维人员提前开展现场检测评估，择机更换电池，避免停电工况下电池输出能力不足。该机制可弥补固定阈值的短板，实现隐患在萌芽阶段识别。③多参数融合判别：单一参数小幅波动可能由环境干扰、瞬时工况波动引起，不代表设备故障，模型设置融合判别规则，避免误报警。当仅有单个特征参数轻微偏离基准值，其余参数保持正常，系统不提升预警等级，仅标记为关注状态，持续跟踪。若两个及以上具备关联性的参数同时出现劣化趋势，则提升预警等级。示例：蓄电池单体内阻持续上升的同时，配套电池表面监测温度同步缓慢升高，两个关联参数同步劣化，模型综合评估电池劣化风险显著增大，预警等级由“关注”升级为预报警。多参数关联规则可以有效过滤单点噪声带来的虚假告警，提升预警模型准确率，减少运维人员无效现场排查工作量。

4 系统工程实例与测试验证

（1）项目概况。某综合医院新建住院楼，其中手术室、ICU 区域设置双路电源供电，以及 ATS 双电源转换装置，后端配置 200kVA UPS 不间断电源，配套 12V 铅酸蓄电池组。原有系统仅能本地查看 UPS 参数，ATS 无远程监测功能，电池依靠每年停电放电试验检测，运维工作量大，隐患难以及时发现。本次设计部署一体化智能监控系统，接入 ATS、UPS、蓄电池在线监测节点。（2）系统功能测试。系统上线后开展连续 2 个月试运行测试：①实时采集测试：两路进线电压、电流、ATS 位置、UPS 运行参数、电池单体电压、内阻数据采集稳定，数据刷新周期 1s，无丢包现象，监控界面实时展示供电回路状态。②模拟故障预警测试：人为设置单节蓄电池内阻升高，系统捕捉内阻持续上升趋势，提前发出预警，提示该单体电池性能衰减，运维人员现场复核确认电池老化，提前更换，避免在市电断电时电池失效。模拟 ATS 触头温度缓慢上升，系统触发预警，提示接线接触不良。③电源切换联动测试：断开主电源，ATS 自动切换至备用电源，系统完整记录切换时刻、切换时长，同步记录 UPS 由市电供电状态切换至蓄电池逆变供电状态，事件记录完整，便于事后分析切换性能。（3）应用效果。系统投入使用后，实现双电源与 UPS 一体化在线监测，电池老化、开关触头发热这类隐性故障由“事后抢修”转变为“事前预警”。在满足相关规范要求的前提下，可适当优化蓄电池离线放电试验周期，降低停电试验带来的医疗供电风险，减轻后勤电气运维人员巡检压力，有效提升重要负荷供电安全水平。

5 结论

医疗建筑手术室、ICU 等重要医疗负荷依靠双电源+UPS 构成冗余供电体系，该系统存在大量渐进式隐性故障，传统人工巡检模式难以提前识别隐患。本文设计一套一体化智能监控系统，采用感知采集层、传输层、平台应用层三层架构，集成双电源 ATS、UPS 主机、蓄电池组在线监测。研究基于静态阈值判定与参数变化趋势融合的故障预警算法，不仅可以实时展示供电运行状态，还能对电池老化、开关触头过热等潜在故障进行提前预警。工程实例测试表明，该系统数据采集稳定，预警机制有效，实现医疗场所后备供电系统数字化运维，将故障处置由被动抢修转为主动预判，降低重要医疗负荷断电风险。该设计方案符合医疗建筑电气相关规范，适合在医院新建、改扩建配电工程推广应用。后续可以引入机器学习算法，进一步优化故障预警模型，提升故障类型自动识别准确率。

参考文献：

[1] 中国建筑设计研究院.GB51039-2014(2024 年版)综合医院建筑设计标准[S].北京:中国计划出版社,2024.

[2] 王兆安.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2020.

[3] 刘辉.医院 UPS 蓄电池在线监测与故障预警系统设计[J].电气技术,2022,23(07):89-93.

[4] 陈健.医疗建筑双电源自动转换开关运维与状态监测研究[J].现代建筑电气,2023,14(04):45-49.

[5] 赵伟.不间断电源系统健康评估与故障预警技术研究[J].电力工程技术,2021,40(06):162-167.