

城市轨道交通弱电系统不间断电源整合方案

李天然

重庆交通建设管理有限公司, 重庆, 401120;

摘要:城市轨道交通弱电系统对供电可靠性提出较高的要求, 整合优化不间断电源系统为其稳定运行提供保障, 为此需要结合实际情况制定城市轨道交通弱电系统不间断电源整合方案。设计系统整合架构, 包括整合边界技术界定、冗余拓扑结构设计。选型配置设备过程中, 应当明确 UPS 设备技术参数、规范蓄电池组配置、配置智能配电组件。实际作业过程中应当规范工程实施技术, 包括施工流程控制、机房布局设计、线缆选型敷设。以实际情况为依据构建监控运维体系, 包括监控系统功能配置、执行运维管理规程与应急保障机制, 为城市轨道交通弱电系统不间断电源整合提供支持。

关键词:城市轨道交通; 弱电系统; 不间断电源整合

DOI: 10. 69979/3060-8767. 25. 08. 024

引言

城市轨道交通电源设备稳定对于保障通信、信号、综合监控等弱电系统正常运行具有重要作用, 当供电发生中断会增加运营安全风险。不间断电源系统为弱电系统提供稳定的电源保障, 而现阶段不间断电源系统存在设备兼容性不足、冗余设计不合理、运维响应滞后等问题, 导致供电可靠性受到限制。通过架构优化、设备选型、流程规范等方式, 高效整合不间断电源系统, 以此在增强其复杂工况的适应性的同时, 降低故障发生率, 为弱电系统全生命周期管理提供支持, 对于提升城市轨道交通运营安全性、经济性具有重要意义。

1 系统整合架构设计

1.1 整合边界技术界定

要求整合弱电系统应当符合交流 220V $\pm$ 10%、频率 50Hz $\pm$ 1Hz 供电接口标准, 主要包括通信系统的传输网设备 (SDH/MSTP 光端机)、无线通信基站 (LTE-R 系统, 单站功耗 350W)、广播控制器 (额定功率 80W); 信号系统列车自动防护设备 (ATP 主机, 双机冗余功耗 120W)、列车自动运行单元 (ATO, 单套功耗 60W)、自动监控系统 (ATS 服务器, 功率 200W); 综合监控系统 SCADA 远程终端单元 (RTU, 单模块功耗 45W)、环境与设备监控系统 (BAS 控制器, 功率 30W)。

确定排除整合系统、技术依据: 站台门控制电源使用 DC110V 独立回路, 其驱动电机启动电流为 15A, 脉冲式负载特性会对弱电系统稳压精度造成干扰; 变电所操

作电源应当符合 DL/T 5044-2014 要求, 采用 DC220V 蓄电池组, 与弱电系统电压等级不兼容; 消防应急电源应当符合 GB 17945-2010 强制标准, 且具备独立应急切换逻辑, 切换时间 $\leq$ 0.25s, 不能与常规 UPS 系统实现协同控制。对边界通过电气隔离装置 (隔离变压器容量 50kVA, 绝缘电阻 $\geq$ 100M Ω) 进行整合、物理分隔, 避免不同系统间发生电位干扰。

1.2 冗余拓扑结构设计

采用两条独立铜排 (TMY-120 $\times$ 10mm², 载流量 600A), 形成双总线环形冗余架构闭环, 设置 4 个联络开关 (额定电流 400A, 分断时间 $\leq$ 50ms), 当某段总线发生故障的情况下, 联络开关自动闭合且自愈时间 $<$ 300ms, 使供电中断时长明显缩短^[1]。

组成模块化 N+X 冗余架构的 20kVA 功率模块 (N=5, X=1) 数量为 6 个, 模块间通过 CAN 总线实现均流控制 (均流误差 $\leq$ 3%)。各模块配备独立的散热风扇 (转速 3000r/min), 支持在线热插拔 (拔插时间 $\leq$ 15s, 系统输出电压波动 $\leq$ 2%), 更换模块期间未发生负载断电。

分布式并联冗余架构支持 100kVA UPS 并联最大数量为 8 台, 采用光纤同步技术 (同步误差 $\leq$ 1 μ s), 将环流控制在额定电流的 2.5%以内。设置主从控制逻辑, 主 UPS 故障的情况下自动切换至从机时间 $<$ 30s, 使供电可靠性得到有效提升。

2 设备选型配置

2.1 UPS 设备技术参数

采用三相 $380V \pm 20\%$ 宽幅电压设计作为 UPS 设备输入侧, 支持 $45 \sim 65\text{Hz}$ 频率自适应, 输入功率因数 ≥ 0.9 。8、总谐波失真 $\leq 5\%$ (100%负载), 确保与城市电网高度兼容。输出侧为单相 $220V \pm 1\%$ 稳压输出、频率 $50\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$, 线性负载下总谐波失真 $\leq 3\%$, 非线性负载 (如服务器、交换机) 下 $\leq 5\%$, 以此确保弱电设备信号处理精度。

效率指标需要满足以下要求: 满载运行时效率 $\geq 94\%$ 、50%负载时 $\geq 95\%$ 、轻载 25% 时 $\geq 92\%$ 。125% 额定负载状态下可维持运行时间为 10min, 150% 负载状态下可持续 1min, 短路状态下第一时间触发限流保护 (响应时间 $\leq 10\mu\text{s}$)^[2]。环境温度 $\geq 40^\circ\text{C}$ 的情况下自动启动降容模式, 每升高 1°C 降容 2%, 最高降容可达到额定容量 70%, 确保设备在机房高温环境下可靠运行。设备配置智能风扇 (转速 $3000 \sim 6000\text{r/min}$ 可调), 根据负载率自动调节风速, 将运行噪音降低至 $\leq 65\text{dB}$ (1m 距离测量)。

2.2 规范蓄电池组配置

选用 OPzV 型阀控式铅酸蓄电池, 单体额定电压 2V, 10h 率容量 200Ah (25°C), -15°C 环境下容量保持率 $\geq 70\%$ 。循环寿命 ≥ 1200 次 (50%放电深度), 25°C 浮充状态下设计寿命 ≥ 10 年。每组 384V 电池组由 192 只单体串联组成, 采用 2 组并联冗余配置, 总容量 400Ah, 满足 15min 后备时间需求。

安装执行严格间距标准: 单体电池间净距 $\geq 100\text{mm}$ 、电池组列间距 $\geq 800\text{mm}$, 电池架底部预留 150mm 通风空间, 按 $0.03\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{只}$ 配置 (采用轴流风机, 风压 50Pa) 强制通风量。充电参数设置: 浮充电压 2.23V/单体 (25°C 基准)、温度补偿系数 $-5\text{mV}/^\circ\text{C} \cdot \text{单体}$ 、均充电压 2.35V/单体、均充周期 90 天 (或当单体电压低于 2.18V 时自动启动)。

2.3 配置智能配电组件

采用抽屉式模块化结构作为智能配电盘, 包括 16 路独立出线回路, 每路配置 63A 微型断路器 (分断能力 10kA), 内置霍尔电流传感器 (测量范围 0~100A, 精度 $\pm 0.5\%\text{FS}$) 和电压传感器 (精度 $\pm 0.2\%$), 实时采集各回路电参数。支持三级分时断电逻辑: 一级为信号系统 ATP/ATO 设备 (重要负载), 断电延迟 $\geq 15\text{min}$; 二级为通信广播系统 (次要重要负载), 延迟 5~10min; 三级为环境监控辅助设备 (一般负载), 延迟 $\leq 5\text{min}$, 通过组

态软件编程可调整断电逻辑^[3]。

通过采用 RS485 总线 (Modbus-RTU 协议) 作为通信接口, 该通信接口波特率 9600bps、数据刷新周期 $\leq 1\text{s}$, 与 UPS 监控系统实现联动控制。配电盘内置 ARM cortex-M4 处理器, 可支持本地存储历史数据周期为 30 天 (采样间隔 1min), 具有过载 (120% 额定电流)、过压 (250V)、欠压 (180V) 报警功能, 通过干接点 (DC24V) 将报警信号上传至综合监控系统。

3 规范工程实施技术

3.1 施工流程控制

前期准备阶段浇筑 C30 混凝土设备基础, 控制基础平整度误差 $\leq 3\text{mm}$ (用 2m 靠尺检测), 基础内预设 M12 膨胀螺栓 (埋深 100mm) 共计 8 处, 以此将 UPS 主机底座固定。采用联合接地网作为接地系统, 将 4 根 $50\text{mm} \times 5\text{mm}$ 镀锌角钢 (长 2.5m) 打入地下, 配合 $40\text{mm} \times 4\text{mm}$ 镀锌扁钢连接, 接地电阻经 ZC-8 型接地电阻测试仪测量 $\leq 1\Omega$, 与弱电系统接地网共用接地体, 选用 YJV-0.6/1kV-1 $\times$ 35mm² 电缆作为接地干线。

设备安装过程中使用水平仪校准 UPS 主机水平度, 控制误差 $\leq 0.5\text{mm/m}$, 为底座与基础间安装厚度为 10mm 的绝缘垫 (绝缘电阻 $\geq 100\text{M}\Omega$)。使用拉线法检测蓄电池组排列直线, 要求控制数值 $\leq 5\text{mm}$, 采用 $60\text{mm} \times 40\text{mm} \times 3\text{mm}$ 角钢焊接电池架, 承重 $\geq 500\text{kg/m}^2$, 为底部安装高度为 100mm 的绝缘支脚。布线过程中控制动力电缆 (载流部分) 与信号电缆 (控制回路) 平行敷设间距 $\geq 300\text{mm}$ 、交叉敷设 $\geq 100\text{mm}$ 间距, 且信号电缆应当穿越 $\Phi 50\text{mm}$ 镀锌钢管屏蔽。

分三级开展调试: 单机测试带假负载 10% (电阻箱, 总功率 16kVA) 持续运行 2h, 监测输出电压并控制波动 $\leq 1\%$; 并联测试接入 5 台模块, 测量环流值 $\leq 2.5\text{A}$ (额定电流的 2.5%); 满载切换测试模拟 10 次市电/电池切换, 使用示波器检测每次切换时间, 控制该数值 $\leq 8\text{ms}$, 输出电压骤降 $\leq 5\%$ 。

3.2 机房布局设计

UPS 主机区采用矩阵式排列, 单台设备占地面积 $1.2\text{m} \times 0.8\text{m}$ 、设备间距 $\geq 1200\text{mm}$ (满足维护人员侧身通行)、主维护通道宽度 $\geq 1000\text{mm}$ (可容纳工具车通行), 设备距墙面 $\geq 800\text{mm}$ (预留散热与检修空间)。墙面安装 $300\text{mm} \times 200\text{mm}$ 通风百叶 (风速 2m/s), 在顶部设置轴流

风机（风量 1500m³/h），形成水平气流组织。

为蓄电池区设置独立防火隔间，使用厚度为 200mm 的加气混凝土砌块墙（耐火极限 2h），配备甲级防火门（闭门器+顺位器），墙面涂刷防火涂料（耐火极限≥1h）。选用 IP65 防爆灯具（功率 36W，色温 6500K）照明，应急照明持续时间≥90min。地面先涂刷厚度为 2mm 的环氧树脂底漆，在此基础上做厚度为 3mm 的环氧树脂砂浆防腐层（抗压强度≥60MPa），在四周设置高度为 100mm 的挡水坎，以此防止电解液泄漏扩散。

采用下送风上回风模式进行散热设计，控制地板静压箱高度 300mm、通风地板开孔率≥25%，按设备总功率的 1.2 倍配置（如 160kVA 系统配 19.2kW 空调）空调制冷量，出风口风速 2.5m/s，控制机房环境温度 18~25℃，相对湿度 40%~60%。在重庆地铁 9 号线化龙桥站通过机房进行布局设计，使 UPS 运行温度稳定在 22±1℃，相比传统布局降低 3℃。

3.3 线缆选型敷设

选用 YJV-0.6/1kV-4×70+1×35mm² 铜芯电缆（导体纯度 99.95%）作为交流输入电缆，导体直流电阻在 20℃ 情况下≤0.268Ω/km，载流量≥140A（环境温度 40℃），距离<50m 的情况下电压下降≤3%（计算值 2.8%），符合 GB 50217~2018 对电压损失的要求。电缆外护套材质为阻燃聚氯乙烯（氧指数≥30），且通过 GB/T 18380.1-2001 单根垂直燃烧试验验证合格。

选用 ZRYJV-0.6/1kV-2×95mm²（阻燃 A 类）作为直流电缆，绝缘层厚度 1.2mm（耐温 90℃），20℃ 情况下绝缘电阻≥100MΩ·km，10kV 耐压试验结果显示 5min 未发生击穿。采用 100mm×50mm×1.5mm 铝合金桥架（表面喷塑防腐），确定水平段固定间距≤1500mm（用 Φ10mm 膨胀螺栓）、垂直段≤1000mm（加装防晃支架），桥架转弯处曲率半径≥300mm（12 倍电缆直径，电缆外径 28mm）。

对电缆终端进行处理：动力电缆使用冷缩式终端头（适用截面 50~120mm²），屏蔽层接地电阻≤1Ω；控制电缆（RVVP-2×1.5mm²）终端压接 OT 型铜鼻子（规格 6mm²），使用 Φ3mm 螺丝进行固定。杭州地铁 3 号线武林广场站在线缆选型敷设支持下，使电缆绝缘电阻测试值均≥500MΩ，远超规范要求 10MΩ 标准。

4 构建监控运维体系

4.1 监控系统功能配置

监控主机采用 Intel Xeon E3-1230 v5 处理器（主频 3.4GHz），配置 16GB DDR4 内存、512GB SSD 固态硬盘，支持 Windows Server 2016 操作系统，软件采用 B/S 架构设计，使用 IE11 及以上浏览器可远程访问，支持同时接入 32 台 UPS 设备与 128 个配电回路监控点。实时监测参数包括：输入电压（测量范围 0~450V，精度±0.5%）、输出电流（0~500A，精度±0.3%）、频率（40~70Hz，分辨率 0.01Hz）、电池组总电压（300~420V，采样周期 1min）、单体电池电压（1.8~2.5V，精度±2mV）、电池温度（-10~60℃，精度±0.5℃）。

表 1 所示为监控系统对关键参数的监测精度及响应指标，包括输入电压、输出电流、电池单体电压、频率、电池温度等核心参数的测量范围、精度等级、报警响应时间。通过对表 1 分析发现，监控系统对电池单体电压的最高监测精度为±2mV，能够及时捕捉单体电池微小的电压变化，为及时判断电池失效现象提供数据支持；频率监测分辨率 0.01Hz，可精准识别电网频率波动，有效保障弱电设备同步运行稳定性。控制报警响应时间<30s，其中紧急报警（如输出短路）响应时间为 5s，配合声光报警装置快速定位与处置故障，使系统运维的及时性、精准性得到有效提升。各项参数监测精度符合城市轨道交通对不间断电源系统的要求，为弱电系统的稳定运行提供保障。

表 1 监控系统对关键参数的监测精度及响应指标

监测参数	测量范围	精度等级	采样周期	报警响应时间
输入电压	0-450V	±0.5%	1s	≤30s
输出电流	0-500A	±0.3%	1s	≤20s
电池单体电压	1.8~2.5V	±2mV	1min	≤10s
频率	40~70Hz	±0.01Hz	1s	≤20s
电池温度	-10-60℃	±0.5℃	1min	≤30s
输出短路	-	开关量	实时	≤5s

4.2 运维管理规程

执行日常巡检“三查四测”制度：每日对 UPS 运行指示灯（绿色常亮为正常，黄色闪烁为预警）、风扇运行声响（无异常噪声）、电缆接头温度（红外测温≤60℃）进行检查；每周对电池组端电压（总电压偏差≤50mV）、单体电池内阻（新电池≤2mΩ，老化电池≤8mΩ）进行测量；每月对接地电阻（≤1Ω）、绝缘电阻（≥100MΩ）。巡检记录采用电子表单（支持二维码签到）进行

检测,将检测期间的设备运行参数(如输出电压 $220V \pm 1V$)、环境数据(温度 $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$)详细记录。

明确定期维护周期:每季度对电池组开展均衡充电(充电电压 $2.35V$ /单体,持续 $12h$),同时清洁UPS滤网(除尘效率 $\geq 90\%$);每半年对输出波形畸变率($\leq 3\%$)、切换时间(市电/电池切换 $\leq 8ms$)进行检测;每年开展蓄电池容量放电测试(放出 50% 额定容量),并校准电流传感器(误差超 $\pm 0.5\%$ 时重新标定)。南京地铁S3号线严格执行运维管理规程,使蓄电池使用寿命延长至8年,相比同行业平均水平提升 30% ^[5]。

4.3 应急保障机制

市电中断应急流程分三级响应:一级响应($0-15min$)由监控系统自动执行,执行期间记录切换时间(精度 $1ms$)、电池放电起始电压($\geq 384V$),同时向调度中心发送告警信息;二级响应($15-30min$)运维人员抵达现场,使用万用表对电池组电压(允许偏差 $\pm 2V$)进行测量,对负载运行状态(信号系统无告警)进行检查;三级响应($>30min$)启动备用发电机(柴油发电机组,启动时间 $\leq 15s$),通过ATS切换给UPS供电(切换时间 $\leq 50ms$)。

5 结束语

通过架构优化、设备精准选型、工程规范实施、构建智能运维体系形成城市轨道交通弱电系统不间断电源整合方案,使供电系统可靠性、经济性得到提升,同时降低故障风险、延长设备使用寿命。未来在开展相关研究的过程中,应当进一步探索系统与物联网、大数据技术的深度融合,实现电源系统智能化预测维护,为城市轨道交通弱电系统的安全高效运行提供技术支持。

参考文献

- [1]黄俊. 地铁车站UPS电源整合方式和容量确定[J]. 智能城市, 2022, 8(11): 49-51.
- [2]叶仁欢. 轨道交通不间断电源(UPS)整合容量配置的探讨[J]. 电气时代, 2022, (01): 115-118.
- [3]孙博. 轨道交通车辆弱电系统不间断电源控制方法[J]. 装备制造技术, 2021, (09): 190-192.
- [4]王小峰. 城市轨道交通车站不间断电源整合的可行性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(06): 62-66.
- [5]张军, 吕馨. 不间断电源整合系统双电源转换过程接地方案[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(01): 68-71.