

轨道交通不间断电源 (UPS) 配置与冗余方案研究

张 晗 王骥鹏 李 阳

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文围绕轨道交通不间断电源 (UPS) 配置与冗余方案展开研究, 结合轨交场景负载特性与供电需求, 阐述UPS系统核心构成、技术要求及行业标准, 设计车站、控制中心等不同场景的配置方案, 核算主机与蓄电池容量并分析其经济性, 优化模块级、设备级、系统级冗余架构, 通过切换技术优化提升供电可靠性, 经测试验证方案可规避单点故障, 为轨道交通UPS系统安全稳定运行提供理论支撑与实践参考。

关键词: 轨道交通; 不间断电源 (UPS); 配置; 冗余方案

引言: 轨道交通作为城市公共交通核心枢纽, 信号、通信等核心系统对供电连续性、稳定性要求极高, UPS作为应急供电关键设备, 其配置合理性与冗余可靠性直接关系到轨交运营安全。当前轨交UPS系统存在配置冗余不合理、场景适配性不足、故障切换效率偏低等问题, 难以满足智慧轨交发展需求。基于此, 本文聚焦UPS配置与冗余方案, 结合行业标准与实际场景, 开展系统性研究以解决现存痛点。

1 轨道交通UPS系统相关理论与技术基础

1.1 轨道交通UPS系统核心构成与工作原理

(1) 核心构成: 整流器作为市电与UPS内部的桥梁, 将交流电转为直流电, 过滤谐波并为蓄电池充电; 逆变器将直流电转为纯净交流电供负载使用, 决定供电质量; 蓄电池作为储能装置, 市电正常时储能, 故障时应急供电; 旁路开关用于UPS故障或检修时直接引入市电; 静态转换开关 (STS) 实现逆变器与旁路供电的快速切换, 保障供电连续。(2) 工作原理: 正常供电时, 市电经整流器、逆变器处理后供电, 同时为蓄电池浮充; 市电故障时, STS毫秒级切换, 蓄电池通过逆变器应急供电; 故障恢复后, 自动切换回市电模式并为蓄电池充电; 检修时, 手动切换至旁路开关, 市电直接供电, 确保负载不中断。

1.2 轨道交通UPS系统的核心技术要求

(1) 供电可靠性要求: 切换时间需控制在毫秒级, 确保负载无感知, 在线式UPS可实现零切换; 连续供电能力需满足不同负载后备需求, 核心负载后备时间不低于规定标准, 保障突发市电中断时系统正常运行。(2) 适配性要求: 适配轨交计算机与非计算机类负载差异, 满足精密负载的电压频率精度需求; 适应隧道潮湿、粉尘等特殊环境, 具备相应防护等级, 抵御电磁干扰, 适配三相不平衡负载场景。(3) 运维便利性要求: 采用模块化设计, 便于故障模块更换和容量扩展; 具备智能监控

功能, 可实时监测设备运行参数, 支持接入综合监控系统; 拥有故障预警机制, 提前发现电池劣化、部件异常等问题, 降低运维成本^[1]。

1.3 轨道交通UPS相关标准与规范

(1) 国内标准: GB7260系列规范UPS设备的安全、电磁兼容性及性能测试方法; TB/T1528针对铁路信号电源系统设备, 明确UPS的适配要求, 保障信号系统供电安全。(2) 行业规范: 涵盖城市轨道交通UPS整合设计要求, 明确多系统负载整合供电原则; 规范信号系统电源设计, 对UPS的架构、容量配置等提出具体要求, 确保系统协同稳定。

1.4 轨道交通UPS负载特性分析

(1) 负载分类: 计算机负荷以精密电子设备为主, 功率因数高、对供电质量要求严格, 无明显冲击电流; 非计算机负荷多为感性负载, 启动时存在冲击电流, 对电压稳定性要求相对较低。(2) 典型负载特性: 通信、综合监控系统属连续运行负载, 需长期稳定供电, 后备时间要求不低于1-2小时; 信号系统为核心负载, 对供电连续性要求极高, 后备时间不低于0.5小时, 需抵御电磁干扰, 保障指令传输稳定。

2 轨道交通UPS配置方案设计与分析

2.1 UPS配置的基本原则与前提

(1) 配置原则: 以可靠性优先为核心, 优先保障轨道交通核心负载 (信号、通信、综合监控) 不中断供电, 选用成熟稳定、容错性强的设备及架构; 经济性适配需平衡设备投资与长期运维成本, 避免过度配置造成资源浪费, 同时满足项目预算要求; 可扩展性要求UPS系统支持模块化扩容, 适配轨道交通线路延伸、负载增加的未来需求; 整合性原则强调UPS系统与轨交综合监控、供电系统协同衔接, 实现统一管理、数据互通, 提升整体供电系统效率。(2) 配置前提: 负载统计与计算需全面

梳理各场景负载类型、额定功率、运行时间及启动特性，区分核心负载与非核心负载，核算总负载功率及峰值负载，为容量选型提供依据；电网环境评估需分析市电电压波动、谐波含量、停电频率等参数，针对性设计抗干扰、稳压措施；安装环境分析需结合车站、控制中心、车辆段的空间大小、温湿度、防尘防水等级及电磁环境，确定UPS设备的安装布局与防护配置^[2]。

2.2 不同场景下UPS配置方案设计

(1) 车站UPS配置方案：整合范围明确为车站信号系统、通信系统、综合监控系统、票务系统等核心负载，避免非核心负载占用UPS资源；容量选型需在负载总功率基础上，预留15%-20%余量，应对负载增长及设备降容；接线方式采用双路市电输入+UPS主机+旁路开关的架构，核心负载采用双UPS冗余供电，确保单一设备故障不影响供电，接线需符合轨交供电安全规范，减少线路干扰。(2) 控制中心UPS配置方案：采用双电源供电模式，接入两路独立市电，保障电源头的可靠性；冗余备份设计采用N+1冗余架构，即主UPS主机故障时，备用主机可无缝切换投入运行，核心负载采用双机热备份，切换时间控制在毫秒级，同时配置冗余蓄电池组，延长应急供电时间，满足控制中心24小时不间断运行需求^[3]。(3) 车辆段/停车场UPS配置方案：结合负载特性适配，针对检修设备、监控设备、通信设备等不同负载的供电需求，分类配置UPS，对精密负载采用在线式UPS，对普通负载采用经济型UPS；容量优化需结合负载运行规律，区分高峰负载与低谷负载，合理配置主机容量，避免容量冗余过大，同时选用高效节能设备，降低长期能耗。

2.3 UPS主机与蓄电池容量计算

(1) UPS主机容量计算：核心影响因素包括负载总功率、功率因数、降容系数，此外需考虑环境温度、设备老化等附加因素；计算方法为，先核算所有负载的总有功功率，结合负载功率因数（轨交负载通常取0.8-0.9），换算为视在功率，再乘以1.15-1.2的降容系数（应对环境降容及负载增长），最终确定UPS主机的额定容量，确保主机容量满足实际运行需求。(2) 蓄电池容量计算：主要受后备时间要求、蓄电池放电特性、环境温度影响，同时需考虑电池老化系数；计算方法为，根据负载总功率、后备时间要求，确定蓄电池所需提供的总容量，结合蓄电池在不同放电时间下的放电倍率（放电时间越短，放电倍率越大，容量越低），以及环境温度修正系数（温度低于25℃时，容量会下降，需适当增大容量），最终核算出蓄电池的额定容量，确保应急供电时间达标。

2.4 配置方案的经济性与可行性分析

(1) 经济性分析：从设备投资来看，对比不同品牌、不同架构UPS设备的采购成本，模块化UPS虽初期投资略高，但后期扩容成本低，适合长期发展；运维成本主要包括设备巡检、部件更换、电池维护等费用，选用免维护蓄电池可降低维护成本；能耗成本对比不同效率等级的UPS设备，高效UPS（效率 $\geq 95\%$ ）可减少电能损耗，长期运行可节省大量能耗费用，综合评估各方案的全生命周期成本，选择性价比最优的配置^[4]。(2) 可行性分析：技术适配性需验证UPS配置方案是否符合轨道交通供电标准及负载特性，是否能抵御电网干扰、适应现场环境，确保与现有供电系统、监控系统兼容；安装空间适配需核查UPS设备（主机、蓄电池）的尺寸的与安装现场空间匹配，预留检修通道及散热空间；运维难度评估需考虑设备操作便捷性、故障排查难度、备件供应情况，选用结构简单、智能监控完善的设备，降低运维人员工作量，确保配置方案可落地、易运维。

3 轨道交通UPS冗余方案设计与优化

3.1 UPS冗余方案的核心目标与设计原则

(1) 核心目标：核心是规避单点故障，通过冗余配置消除UPS系统中任一设备、模块或线路故障导致的供电中断，保障轨道交通核心负载持续运行；提升供电连续性，确保市电波动、设备故障时，供电不中断、无明显波动，满足信号、通信等精密负载的供电要求；降低故障影响范围，当某一冗余单元出现故障时，仅影响该单元，不扩散至整个供电系统，减少故障对轨交运营的影响。(2) 设计原则：冗余度合理，避免冗余不足无法保障可靠性，也杜绝过度冗余造成成本浪费，结合负载重要性配置对应冗余等级；切换可靠，冗余单元间的切换需快速、平稳，无冲击电流，确保负载无感知，切换成功率达到100%；成本可控，平衡冗余配置与设备投资、运维成本，优先选用性价比高的冗余架构；运维便捷，冗余系统需具备清晰的运行状态指示、故障定位功能，便于运维人员快速排查问题、更换故障部件。

3.2 常见UPS冗余架构设计与对比

(1) 模块级冗余：采用N+1热插拔模块化设计，N个功率模块承担正常负载供电，1个模块作为冗余备份，模块可在线插拔，更换故障模块时不中断供电；配备动态负载分配机制，实时均衡各模块的负载率，避免单模块过载，提升系统稳定性，适用于负载波动较大的车站场景。(2) 设备级冗余：核心为双机并联架构，分为1+1和2N两种模式，1+1模式为两台UPS主机并联，一台为主机，一台为备用，负载均分或备用机待命；2N模式为两组独立UPS系统，每组承担50%负载，互为冗余；配置智能切

换机制,当主设备故障时,备用设备毫秒级无缝切换,确保供电连续,适用于控制中心等核心场景。(3)系统级冗余:采用双独立供电总线设计,两条总线相互独立,分别接入不同市电电源和UPS系统;配置STS静态切换开关,实时监测两条总线的供电状态,当一条总线故障时,快速切换至另一条总线,实现系统级容错,进一步提升供电可靠性,适用于轨交核心关键负载。(4)不同冗余架构的可靠性与经济性对比:可靠性方面,系统级冗余>设备级冗余>模块级冗余,系统级冗余可抵御总线、市电等多重故障,设备级冗余可规避单台设备故障,模块级冗余主要应对模块故障;经济性方面,模块级冗余<设备级冗余<系统级冗余,模块级冗余扩容灵活、初期投资低,系统级冗余设备、线路成本高,需结合场景重要性选择^[5]。

3.3 冗余方案的关键技术优化

(1)切换技术优化:优化静态转换开关(STS)的响应速度,将切换时间缩短至10ms以内,实现零切换感知;采用无触点切换技术,避免切换过程中产生冲击电流,保护负载设备;增加切换冗余校验机制,确保切换指令准确,提升切换可靠性,杜绝切换失败导致的供电中断。(2)智能监控优化:搭建冗余系统专用监控平台,实时监测各冗余单元、模块的运行参数(负载率、电压、电流等),实现运行状态可视化;完善故障预警与定位功能,通过数据分析提前预判模块老化、线路异常等问题,精准定位故障单元,缩短故障排查时间;支持远程监控与操作,便于运维人员实时管控,提升运维效率。(3)负载分配优化:采用智能动态负载均衡算法,实时调整各冗余单元的负载分配比例,确保负载均分,避免单台设备、模块长期过载运行,延长设备使用寿命;设置负载过载保护机制,当某一单元负载超出阈值时,自动将部分负载转移至冗余单元,保障系统稳定运行。

3.4 冗余方案的容错性测试与验证

(1)测试指标:核心测试指标包括故障切换时间,需满足轨交负载要求,核心负载切换时间 $\leq 10\text{ms}$;冗余切换可靠性,切换成功率需达到100%,无切换失败、供电中断现象;负载供电稳定性,切换过程中电压、频率波动控制在允许范围内,不影响负载正常运行。(2)测试方法与流程:采用模拟故障场景测试法,模拟市电中断、UPS主机故障、模块故障、总线故障等各类常见故障;测试流程分为准备阶段(检查设备状态、连接测试仪器)、故障模拟阶段(逐一模拟各类故障,记录切换过程)、数据采集阶段(采集切换时间、电压频率波动等数据)、验证分析阶段(对比测试指标与标准,评估容错效果),确保冗余方案满足设计要求。

结束语

本文完成了轨道交通UPS配置与冗余方案的全面研究,明确了配置原则与冗余设计核心,针对不同场景设计适配方案并优化冗余架构,通过技术优化与容错测试,验证了方案的可靠性、经济性与可行性。研究虽解决当前核心痛点,但随着轨交智能化升级,UPS与新能源、智能运维的融合仍需探索,后续将结合运营数据持续优化,为轨道交通高质量发展筑牢供电保障。

参考文献

- [1]韩存.城市轨道交通信号UPS电源系统优化配置方案[J].工程地质学,2022,(11):133-136.
- [2]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,2021,18(6):62-66.
- [3]张乐.城市轨道交通通信UPS设备维保方案研究[J].中国高新科技,2022,(15):99-101.
- [4]何帆.城市轨道交通信号UPS电源系统优化配置方案[J].中国科技人才,2022,(12):71-74.
- [5]邓志翔.城市轨道交通信号电源系统配置方案研究[J].城市轨道交通研究,2022,15(6):66-69.