

城市轨道交通电力监控自动化系统的功能

丁鹏程

南京国电南自轨道交通工程有限公司 江苏南京 210000

DOI:10.12238/ems.v7i7.14291

[摘要]城市轨道交通电力监控自动化系统把保障供电安全和提升运营效率当作目标,依靠计算机、通信以及自动化这些技术,构建起包含站级层、传输层、主站层的分层架构,集成智能终端和通信协议来实现数据交互。它的核心功能包含实时数据采集、远程控制以及故障预警这些方面,通过 SCADA 系统动态监控供电状态,能够支持故障定位、谐波监测与无功补偿优化,以此保障电能质量,内置保护逻辑和安全联锁机制,强化系统运行的可靠性,提供能效分析和报表管理内容,为运维决策提供指导。高级功能拓展有包括多系统联动、AI 智能运维以及网络安全冗余设计,实现全息感知与自主决策。这个系统正朝着智慧供电网的方向演进,为城市轨道交通提供安全、经济且智能的供电保障。

[关键词] 城市轨道交通; 交通; 电力监控; 自动化系统

城市轨道交通是现代城市公共交通的骨干力量,其供电系统的安全性、可靠性和经济性直接影响运营效能,随着线路规模不断扩张和智能化需求持续升级,传统人工监控模式难以应对复杂供电网络与海量实时数据管理挑战,城市轨道交通电力监控自动化系统(PSCADA)是供电系统的“神经中枢”,它依托计算机、通信与自动化技术构建全线变电所实时监控网络,该系统实现从数据采集、故障诊断到智能调控的一体化闭环管理,其核心价值是通过数字化、智能化手段提升供电系统应急响应速度,该系统能降低人为误操作风险并优化能源利用效率,为城市轨道交通安全高效绿色运营提供技术支持。

1 系统概述与定位

1.1 系统定义与目标

城市轨道交通电力监控自动化系统(PSCADA)是依靠计算机技术、高速通信网络以及自动化控制理论搭建起来的智能化供电管理平台,该系统本质上是通过多源异构数据融合与智能算法决策达成对城市轨道交通全线供电网络的实时感知和动态调控,系统把高精度传感器当作数据触角,凭借 IEC61850 标准通信协议和 5G/光纤双冗余传输链路来完成从 35kV 主变电所到 1500V 直流牵引网的电压/电流/温度等模拟量以及开关状态/保护动作等数字量的毫秒级采集,并且借助 SCADA 人机界面和智能分析引擎实现故障秒级定位、拓扑自动成图、设备健康度评估以及负荷预测优化,其核心目标是通过主动防御机制像五防闭锁、备自投冗余以及能效精益管理如峰谷电价策略、无功补偿优化将供电系统可用率提升到

99.99%以上,同时降低 10%-15%的线损和运维人力投入为轨道交通安全高效运营提供技术护城河^[1]。

1.2 系统架构与组成

城市轨道交通电力监控自动化系统运用分层解耦的模块化架构来设计,自下而上由站级层、传输层和主站层构成三层协同体系,站级层作为数据感知与执行终端,依靠智能终端设备(RTU/PLC)实现变电所内 35kV 开关柜、整流机组、直流 1500V 馈线柜等供电设备全息数据采集(含模拟量/状态量/事件量)与本地化控制逻辑处理,其边缘计算能力能支撑毫秒级保护动作与联锁闭锁校验,传输层以双冗余通信网络作为载体,通过光纤环网与 5G 无线专网构建“有线+无线”混合传输架构,采用 IEC60870-5-104 与 ModbusTCP/IP 协议栈实现跨层级数据加密传输,确保控制指令与遥测数据时延 $\leq 50\text{ms}$ 且丢包率 $< 0.01\%$,主站层作为系统决策中枢,基于双机热备的冗余服务器集群,集成 SCADA 平台、历史数据库与智能分析引擎,完成全线供电拓扑实时推演、故障跨区段智能研判及能效策略动态下发,形成“感知-传输-决策”闭环管控链^[2]。

2 核心功能模块

2.1 数据采集与监控

城市轨道交通电力监控自动化系统里的数据采集与监控也就是 SCADA 功能,它是供电系统实时管控方面的核心枢纽,通过多维度数据融合以及交互式控制达成全线供电网络的透明化运行,实时数据采集模块依靠高精度传感器与智能终端也就是 RTU/PLC,以 100ms 级的采样周期来获取 35kV/1500V

母线电压、馈线电流、功率因数等模拟量,同时同步采集断路器分合状态、保护装置动作信号等数字量,并且基于 IEC61850 标准完成数据的清洗与归一化处理,远程控制功能借助双通道冗余指令下发机制,支持对主变电所断路器、牵引整流机组开关、SVG 无功补偿装置进行毫秒级精准操控,同时具备变压器档位级联调节、保护装置软压板投退等高级控制能力,人机界面也就是 HMI 采用三维动态拓扑图实时映射供电系统运行状态,结合智能弹窗告警也就是优先级分级和声光联动以及历史趋势曲线多维度分析即同比、环比和负荷预测,为调度员提供一图知全局、一键控全域的决策支持环境^[3]。

2.2 故障诊断与预警

城市轨道交通电力监控自动化系统的故障诊断与预警功能是保障供电安全防线的核心屏障,该功能借助多维度数据融合以及智能推理的方式来实现对故障的精准捕捉和主动防御。故障定位模块是基于供电系统动态拓扑模型来运行的,会实时解析断路器变位序列和保护装置动作时序,同时结合 SCADA 系统毫秒级 SOE (时序事件记录) 数据 (时间分辨率 $\leq 1\text{ms}$),采用广域故障定位算法 (像行波测距与矩阵分析法) 来锁定故障区段,定位精度能够达到开关柜级,并且会自动生成故障隔离策略和恢复供电方案。预警机制是通过预设阈值库 (其中包含电流过载 120% 持续 5 秒、母线电压波动 $\pm 10\%$ 、电缆接头温度超 85°C 等 40 余项指标) 以及动态阈值调整策略来开展的,结合设备健康度评估模型,实现从参数越限到趋势恶化的分级预警,还支持多级联动告警 (短信/声光/HMI 弹窗)。事件记录采用双存储冗余架构,会完整保存故障前中后全周期数据 (包含录波文件),为故障回溯、责任追溯以及策略优化提供数据基石^[4]。

2.3 电能质量分析与优化

电能质量分析与优化系统是保障轨道交通供电网络稳定运行关键技术体系,系统通过实时监测 THD (总谐波畸变率) 且采用快速傅里叶变换算法实现谐波源精确定位,以此确保谐波含量控制在 IEEE519 标准限值内 ($\text{THD} \leq 5\%$),采用

SVG/SVC 动态无功补偿装置实现毫秒级响应 ($\leq 20\text{ms}$) 来动态调节无功功率输出,进而维持系统功率因数稳定在 0.95 以上并有效降低线路损耗,基于 LSTM 神经网络的 AI 负荷预测模型通过分析历史负荷数据、运行工况及环境因素实现 96 点日负荷曲线预测 (误差率 $\leq 3\%$),从而为调度决策提供精准数据支持,该系统可降低 15% 以上的电能损耗并显著提升供电系统经济性和可靠性,且完全符合 GB/T14549-93 和 IEC61000 等电能质量标准要求^[5]。

2.4 保护与自动化逻辑

保护与自动化逻辑系统形成轨道交通供电安全核心防护体系,靠分层分布式架构实现全方位保护,继电保护模块集成差动保护 (动作时间不超 30ms)、三段式过流保护 (精度正负 1.5%) 以及四边形特性距离保护 (阻抗测量误差不超 2.5%),经 IEC61850 规约达成保护装置间快速通信,自动化逻辑单元具备自投 (BZT) 快速切换 (不超 150ms)、进线失压自切以及智能环网联络控制功能,支持孤岛检测与无缝切换,五防闭锁系统融合机械联锁与电气闭锁技术,严格遵循“防误分合断路器、防带负荷拉隔离开关、防带电挂地线、防带地线合闸、防误入带电间隔”原则,通过逻辑验证和硬件闭锁双重保障操作安全,该体系满足 GB/T14285-2006 标准要求,故障切除成功率达 99.9%,显著提升供电系统可靠性^[6]。

2.5 报表与统计管理

报表与统计管理作为轨道交通能源管理核心功能模块,借助数据采集分析及应用实现运营优化与成本控制,系统能够自动生成日/月/年用电量、最大负荷 (kW)、跳闸次数等关键指标报表,可支持趋势分析与异常预警功能,在能效管理工作中,基于单位里程能耗 (kWh/km) 开展能效对标,结合分时电价制定峰谷用电策略以降低电费支出,运维管理模块包含设备全生命周期台账、智能检修计划排程及缺陷工单闭环处理内容,以此确保设备可靠稳定运行,系统符合 IEC60300 等国际标准要求,有助于实现智能化的能源管理目标。

表 1 报表与统计管理功能模块分析

功能模块	核心功能	管理价值
报表生成	用电量统计、负荷分析、故障记录	数据驱动决策,提升运营透明度
能效分析	能耗对标、电价优化策略	降低能耗成本,提高能源利用率
运维管理	设备台账、计划检修、工单跟踪	优化维护资源,保障系统可靠性

3高级功能拓展

3.1 多系统联动与集成

多系统联动与集成作为构建轨道交通智能化运营体系的关键技术,通过深度集成供电系统和BAS、FAS、信号系统等关键子系统,以此实现跨系统的协同控制和应急联动,系统采用 IEC 61850 和 MODBUS 双协议冗余通信架构,能够确保与 BAS 系统实现毫秒级数据交互,在供电异常时自动触发环境设备调控策略以维持隧道通风和温度稳定,与 FAS 系统建立硬线直连和软报文双通道联动机制,在火灾报警时可在 200ms 内完成故障区段隔离和应急电源切换,在接触网安全防护方面,通过安全逻辑控制器(SIL3 等级)与信号系统实时交换列车位置信息,采用预警区($L \geq$ 列车制动距离+50m)、断电区($L \geq$ 列车制动距离)和恢复区($L \leq$ 列车制动距离 - 20m)的三段式防护算法来确保断电区设置精确可靠,该联动系统响应延迟 $\leq 100\text{ms}$ 且误动作率 $< 0.1\text{ppm}$,完全符合 EN 50126/8/9 系列安全标准,显著提升轨道交通运营安全性和应急处理效率^[7]。

3.2 智能运维与 AI 应用

智能运维与 AI 应用系统把物联网感知技术和人工智能算法进行融合,以此构建轨道交通供电设备全生命周期健康管理体系统,系统运用在线监测技术实时采集变压器油里溶解气体(像 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 等)的含量,依据三比值法(RogersRatio)达成绝缘故障诊断,且诊断准确率能达到 95%以上,电缆局部放电监测采用特高频(UHF)传感器以及相位分辨模式识别技术(PPRD),让局放信号信噪比提升 20dB,基于机器学习的 PHM 系统借助 LSTM 神经网络建立设备退化模型来预测剩余使用寿命(RUL),其核心公式是 $RUL(t) = \int [t, t_f] \lambda(\tau) d\tau$,这里面 $\lambda(\tau)$ 为设备在时刻 τ 的故障率, t_f 为预测失效时间,系统集成振动、温度等多源数据,使故障预警准确率提升至 92%,让运维成本降低 30%,把设备可用率提高至 99.5%,符合 GB/T32584-2016 标准要求,实现从“定期检修”到“状态维修”的智能化转型。

3.3 网络安全与冗余设计

网络安全和冗余设计对轨道交通供电系统稳定运行很重要是重要保障,采用纵深防御体系来构建多层次的安全防护,在网络架构层面上部署工业级防火墙实现区域隔离,采用 AES - 256 加密算法保障数据传输的安全,基于深度包检测

(DPI)技术的入侵检测系统(IDS)实现实时威胁分析,能识别 99.9%的已知网络攻击,系统采用双网冗余设计也就是 A/B 网独立物理通道,通过 HSRP 协议实现毫秒级的自动切换确保通信连续性,服务器集群采用“双活 + 热备”架构,当主服务器出现故障时备用服务器可在 50ms 内完成无缝切换,把数据同步延迟控制在 100ms 以内,关键控制设备均配置双电源模块和双 CPU 冗余,平均无故障时间(MTBF)达 10 万小时以上,该设计符合 IEC 62351 电力系统信息安全标准和 EN 50159 铁路通信安全规范,系统可用性达到 99.999%为轨道交通供电系统提供高可靠网络安全保障。

4结束语

城市轨道交通电力监控自动化系统借助多层次功能集成,已然成为保障供电安全以及提升运营效能的关键基础设施,它把实时数据采集与智能分析当作基石,能够实现故障的秒级定位和精准隔离,以电能质量优化与保护逻辑作为支撑,以此确保供电系统的稳定性,凭借多系统联动与 AI 预测进行延伸,推动运维模式朝着主动预防方向转型,未来伴随 5G 通信、数字孪生和边缘计算技术深度融合,系统会进一步突破数据传输时延方面的瓶颈,构建起全息感知的智慧供电网络,达成供电设备自愈控制与能效动态优化,该领域持续不断地创新,将为城市轨道交通智能化升级注入核心动能,助力构建更安全、更低碳、更智慧的现代城市交通体系。

[参考文献]

- [1]李冬妮.轨道交通工程主控模式下变电所综合监控的应用研究[D].华南理工大学,2012.
- [2]林彦凯.城市轨道交通变电所综合自动化通信网络[J].都市轨道交通,2007,(01):38-41.
- [3]黄旭虹,孔璐.城市轨道交通直流牵引监控系统的研究[J].都市轨道交通,2007,(01):41-43.
- [4]张志军.城市轨道交通电力监控系统的技术发展趋势[J].郑州铁路职业技术学院学报,2005,(04):33-35.
- [5]孔玮,秦立军,黄旭虹,等.城市轨道交通综合自动化系统的研究[J].中国电力,2004,(07):37-40.
- [6]高鸣燕.城市轨道交通电力监控自动化系统.上海市,上海新华控制技术,2004-01-01.
- [7]张贵军,刘科峰.城市轨道交通电力监控自动化系统的功能[J].继电器,2001,(11):64-67.