重载铁路供电现状及未来发展方向

申承乾
国能朔黄铁路发展责任有限公司原平分公司 034100

【摘 要】重载铁路在我国能源运输里是关键通道，它的供电系统有着可靠性以及效率的特点，会直接对铁路运输效能产生影响。本文将重载铁路供电系统当作研究对象，对当下供电设备设施的状况、运行管理体系以及存在的主要问题展开分析，着重探讨了牵引供电、设备智能化、能量回馈以及安全保护等关键技术，说明了数字化转型、智能化升级等未来发展的趋势。针对技术落后、管理效率低这类问题，提出了设备标准化建设、运维体系完善等优化举措，提升重载铁路供电系统的可靠性与运行效率，为重载铁路持续健康发展给予技术支持。

【关键词】重载铁路；供电系统；智能化；节能技术；运维管理

Current situation and future development direction of heavy railway power supply

Shen Chengqian
Guoneng Shuohuang Railway Development Co., LTD. Yuanping Branch 034100

【Abstract】Heavy-haul railways are a critical link in China's energy transportation system. Their power supply systems are characterized by reliability and efficiency, which directly impact the performance of railway operations. This paper focuses on the power supply system of heavy-haul railways, analyzing the current status of power equipment and facilities, operational management systems, and major issues. It particularly explores key technologies such as traction power supply, equipment intelligence, energy feedback, and safety protection, highlighting trends in digital transformation and intelligent upgrades for future development. To address issues like outdated technology and low management efficiency, it proposes optimization measures such as standardizing equipment and improving maintenance systems, aiming to enhance the reliability and operational efficiency of the heavy-haul railway power supply system, providing technical support for its sustained and healthy development.

【Key words】heavy railway; power supply system; intelligent; energy saving technology; operation and maintenance management

重载铁路作为国家能源运输的关键线路，肩负着煤炭、矿石等大宗物资的运输重任。近些年来，我国重载铁路的运量持续呈现上升趋势，列车的牵引功率以及运行密度也在不断提升，这无疑给供电系统给予了更为严峻的挑战。在重载铁路较为集中的区域，机车的单机功率已然超过了 9600kW，列车的总重达到 2 万吨以上，这对牵引供电系统的供电能力、设备可靠性以及运行安全性提出了更高的标准。重载列车在启动、爬坡等工况下所呈现出的大功率牵引特性，使得供电系统面临着如谐波污染、电能质量波动等一系列技术难题，为了顺应重载运输的发展需求，迫切需要构建起一套安全可靠、智能高效的供电保障体系。

一、重载铁路供电系统现状分析

（一）供电设备设施现状

重载铁路供电系统的设备设施配置呈现出大容量、高可靠性的特点。当前国内重载铁路牵引变电所大多采用 AT 供电方式，主变压器容量可达 2×50MVA，其中牵引变压器采用三相 V/v 接线方式，辅助变压器容量为 630kVA，接触网系统由高强度承力索与接触线组合而成，接触线采用 170mm^2 铜合金线，承力索采用 120mm^2 铜绞线，拥有较高的机械强度与导电性能[1]。供电设施的防雷和接地装置运用深埋式接地极，接地电阻不超过 0.5Ω，切实保障了重载运输环境下的供电安全，重载铁路供电臂所配备的真空断路器有 70kA 的分断能力，可契合大功率牵引工况下的开断需求，为重载列车运行提供可靠的供电保障。

（二）供电运行管理体系

重载铁路供电运行管理体系构建起了以供电调度为核心的三级管理模式。供电调度中心依靠远动系统对牵引变电所、AT 及接触网的运行状态进行实时监测，利用计算机监控系统对供电设备运行参数展开实时采集与分析工作，供电段设置了专门的运行管理部门，制定了设备检修周期表以及检修标准，实行计划性检修与状态检修相结合的维护策略。在日常维护过程中，供电工区依照《重载铁路供电设备检修规程》开展设备巡检与维护工作，并且建立了完备的运行记录以及故障处理档案，该管理体系借助制度化、标准化的运维流程，达成了供电设备全生命周期的精细化管理，为重载运输给予了稳定的电力保障。

（三）供电系统主要问题

重载铁路供电系统在实际运行期间，显现出诸多技术方

面的难题。大功率机车频繁启动与制动时所产生的谐波污染，使得电能质量出现下降情况，供电系统当中的谐波含量超出了国家标准限值的 15%，列车交会的时间段里，负荷波动引发了电压波动以及闪变现象，对接触网供电稳定性造成了影响[2]。牵引网阻抗偏大导致功率因数降低，运行能耗一直处于较高水平，能量利用效率大概只有 75%，而且设备状态监测手段并不够完善，很难达成故障的精准预警，被动检修模式使设备维护成本有所增加。在极端天气状况下，接触网覆冰、强风振动等自然因素让供电设备的损耗加剧，对供电可靠性产生影响，这些问题迫切需要借助技术创新以及管理优化来给予解决。

二、重载铁路供电系统关键技术

（一）牵引供电技术

重载铁路牵引供电技术历经不断创新发展，构建起了独有的技术体系，此体系运用双配置 AT 供电方式，借助设置自耦变压器来降低牵引网阻抗，让供电臂长度可达到 40km 以上，牵引变电所将三相 V/v 接线与移相技术相结合，有效抑制了负序电流，使得三相不平衡度被控制在 2%以内。在大功率牵引工况之时，采用动态无功补偿装置达成功率因数动态调节，协同能量管理系统优化列车运行方式，把供电系统运行效率提升到了 85%，应用高压并联电容补偿技术改善了电压质量，让重载区段电压降处于允许范围之内，为重载列车安全运行给予了可靠的电力保障。

（二）设备智能技术

重载铁路供电设备智能技术借助物联网与人工智能深度融合达成了全面升级。基于分布式光纤传感技术的接触网在线监测系统能实时收集温度、应力等参数，结合机器学习算法构建设备健康状态评估模型，达成故障预警准确率超 95%，智能型断路器采用数字化控制单元，内置故障诊断专家系统，可自动辨别故障类型并实施选择性保护。变电所智能巡检机器人配备红外测温、局部放电检测等功能模块，经 5G 网络把设备运行数据实时上传至云平台，形成设备全生命周期数字档案，这套智能化技术体系提升了供电设备的可靠性，年度设备故障率降低 35%，检修效率提高 40%，意味着重载铁路供电设备管理迈入智能化新阶段。

（三）能量回馈技术

重载铁路能量回馈技术借助创新运用双向变流装置达成了再生制动能量的高效运用，此项技术在重载下行区段配备储能装置，采用超级电容和锂电池混合而成的储能系统，其能量密度为 5.2kWh/kg，可吸收列车制动时所产生的再生电能，经由智能能量管理系统对储能装置的充放电过程给予精确控制，使得储能效率在 90%以上[3]。当重载列车上坡启动时，储能系统迅速释放电能以支援牵引供电，切实降低了牵引变电所的负荷波动，减少了线损率。实际运行数据说明，该技术在重载铁路应用之后，平均每列重载列车下行区段的能量回收率达 28%，年节电量超过 2000 万千瓦时，呈现出了十分突出的经济效益与环保价值。

（四）安全保护技术

重载铁路供电安全保护技术借助微机保护装置搭建起了一套完备的防护体系，此体系运用双重化冗余设计，配备了快速跳闸装置以及后备保护装置，保护动作时间小于 20 毫秒，可有效预防各类供电故障。凭借运用数字式距离保护算法，达成了故障测距精度为 ± 100 米的定位能力，并且拥有相间短路、单相接地等多种保护功能。在关键供电设备处设置了差动保护区域，借助光纤通信网络达成保护信息的快速传输，保护可靠性达到 99.9%，系统还配置了智能防雷模块与绝缘在线监测装置，可动态调整保护定值，保障了重载供电系统的安全稳定运行。

三、重载铁路供电系统发展趋势

（一）技术发展方向

重载铁路供电系统的技术发展正朝着数字化、智能化以及绿色化的方向不断推进。在未来，供电系统会广泛运用数字孪生技术，构建出虚实结合的设备运行模型，以此达成设备状态的实时监测以及预测性维护。基于人工智能的供电调度系统会引入深度学习算法，借助分析海量历史运行数据来优化供电方案，让系统运行效率显著提升。在能源利用层面，新型碳化硅功率器件的应用会使变电所整流装置效率提升到 98%，正在研发的高温超导接触线有望把线损降低 40%，智能电网技术与重载供电系统深度融合可实现双向互动，可再生能源并网比例将会突破 30%，这些技术创新会推动重载铁路供电系统朝着更高效、更可靠且更环保的方向发展，为未来智慧铁路建设奠定坚实的基础。

（二）智能管理升级

重载铁路供电系统的智能管理正经历着全面的数字化转型升级过程，基于工业互联网平台构建而成的智能管理系统，将设备监测、故障诊断、维修计划等多个功能模块进行了整合。借助大数据分析技术建立起设备健康评估模型，该系统运用边缘计算技术达成了供电设备运行数据的实时采集与处理，依靠区块链技术保证了数据传输的安全性和可靠性[4]。在运维管理方面，引入智能运维调度算法来优化检修计划，结合提高现实技术指导现场作业，检修效率大大提升，依靠建立数字化管理平台，达成了供电设备全寿命周期的精细化管理，设备可用率提高到了约 99.5%，这种智能化管理模式会推动重载铁路供电系统朝着智慧化运营转型，为铁路运输安全高效运行提供有力的支撑。

（三）节能技术应用

重载铁路供电系统在节能技术应用方面正迎来全新的突破进展，变电所运用新型非晶合金变压器替换传统油浸式变压器，空载损耗降低幅度达 75%，负载损耗减少比例为 25%。借助应用双向变流储能系统，制动能量回收利用率得

以实现达到 35%。在接触网系统当中，碳纤维复合接触线的应用致使导电损耗降低 30%，采用智能调压技术对供电电压进行动态优化，线路损耗得以减少。智能化能量管理系统借助分析列车运行工况，对列车运行曲线加以优化，协调多列车运行时序，系统能耗降低 18%，这些节能技术的综合运用使得重载铁路供电系统的综合能效提升至 90%以上，年节约电能消耗超过 3000 万千瓦时，达成了经济效益与环境效益的双重提升效果。

四、重载铁路供电系统优化措施

（一）设备标准化建设

重载铁路供电设备开展标准化建设时，要系统地推动技术规范实现升级。制定统一的设备技术标准后，变电所主要设备的性能指标要求得以规范，接触网部件的机械与电气参数也得以明确。在设备选型环节，构建起供电设备准入评估体系，对设备供应商施行资质认证管理，以此保证设备质量可契合重载运输的要求。针对新技术的应用，完善了设备检验检测标准，还建立起设备全生命周期质量追溯机制，借助建立设备标准化数据库，达成了设备台账、检修记录以及故障信息的统一管理，可为设备维护决策给予数据支持，此标准化体系的构建提升了设备管理效率，改善了设备运行状态，延长了设备使用寿命，为重载铁路安全运营提供了可靠保障。

（二）运维管理体系完善

重载铁路供电系统的运维管理体系有必要不断完善优化，构建起科学的运维管理制度，使日常巡检、定期检修以及状态检修的作业流程得以规范，还需建立设备故障分级处置机制，在运维质量管控方面，实行精细化管理模式，制订详细的作业标准和质量验收规范，并且要建立运维质量评估体系。针对关键供电设备，设立了专项维护保养制度，形成了一套完整的技术档案管理系统，对应急抢修预案进行了优化，明确了各级人员的职责分工，完善了应急处置流程以及物资储备管理，经由运维管理体系的优化完善，达成了供电设备维护工作的规范化与精细化，提高了设备运行可靠性，为重载铁路持续安全运营给予了制度保障。

（三）专业人才队伍建设

重载铁路供电系统的专业人才队伍建设需构建科学且完善的培养机制。要建立分层分类的人才培养体系，针对供电管理、技术研发、运行维护等不同岗位制订专项培训计划，开展理论知识以及实操技能的系统培训[5]。在人才培养方式方面，采用“师带徒”传帮带和现代化教学手段相结合的模式，借助虚拟仿真技术搭建培训平台，模拟各类故障处置场景。建立了专业技术等级评定制度，设置了清晰的职业发展通道，激励专业人才不断提升业务能力，同时加强与高校、科研院所的合作，选派骨干人才参与重点科研项目，培养有创新能力的专业技术人才，凭借建立健全专业人才评价与激励机制，营造良好的人才成长环境，为重载铁路供电系统的持续发展提供人才保障。

（四）技术创新体系构建

重载铁路供电系统的技术创新体系要构建起完整的研发创新平台，整合科研院所、高校、企业等多方面的创新资源，建立起产学研用协同创新的机制，组建重点实验室以及工程技术研究中心，以此开展供电系统关键技术的攻关工作。在创新管理机制方面，实施项目负责制，建立科技创新项目库，形成从基础研究直至工程应用的全链条创新体系。针对重载供电所面临的技术难题，设立专项研发基金，激励技术人员进行自主创新，建立创新成果转化以及知识产权保护机制，搭建技术创新交流平台，定期组织技术研讨以及成果展示活动，促使创新经验得到交流以及技术得以推广应用，这样一种多层次、全方位的技术创新体系切实提升了重载铁路供电技术水平，推动供电系统朝着智能化、绿色化方向发展。

结束语

经过多年的发展历程，重载铁路供电系统已然构建起了一套完整的技术体系。然而当下该系统正面临着如设备智能化以及管理精细化等一系列全新的要求，供电系统作为重载铁路安全运营的关键保障要素，其持续优化对于提升运输效率以及降低运营成本而言，有不容忽视的意义。在未来的发展进程中，应当着重强化智能化技术的应用力度，完善标准化建设工作，优化运维管理体系，同时加强人才队伍的建设工作。借助技术创新的力量，推动供电系统朝着更高效率、更具可靠性以及更为环保的方向不断发展，为重载铁路运输的现代化建设给予坚实有力的保障。

参考文献

[1]常文寰.重载铁路平衡供电系统改造的工程化设计研究[J].智能城市，2024，10（05）：66-68.
[2]张寿康，姜尚炎，陶凯，等.重载铁路供电智能运维移动应用的设计与实现[J].铁路计算机应用，2024，33（04）：59-64.
[3]于洋，白建龙，田鑫亮，等.重载铁路牵引网网格化供电结构及控制方法研究[J].电气化铁道，2024，35（02）：13-19+23.
[4]于国旺，张志刚，翟延涛，等.朔黄铁路牵引供电设备智能运维技术研究[J].铁道运输与经济，2023，45（11）：88-96.
[5]曹晓斌，王满想，朱传林，等.重载铁路直接供电方式下牵引回流分配及影响因素[J].中国铁道科学，2021，42（04）：137-144.
作者简介：申承乾（1996.9-）男，山西原平人，本科，助理工程师，研究方向：铁路接触网专业。