

铁路电力供电系统关键技术

刘佳鑫

国能甘泉铁路有限责任公司 内蒙古 巴彦淖尔 015300

摘要：铁路电力供电系统关键技术涵盖多个方面，以确保高效、稳定的电力供应。关键技术包括配电自动化控制，实现智能化监控与故障处理；电力远动控制技术，通过远程监控与调节提升系统效率；雷电防护技术，利用避雷针、避雷线及智能化系统降低雷电危害；以及耦合受流技术，优化接触网与受电弓间的动态性能，确保电力传输稳定。这些技术的综合应用，为铁路电力供电系统的安全、可靠运行提供了坚实保障。

关键词：铁路电力；供电系统；关键技术

引言：铁路电力供电系统作为铁路运输的动脉，其关键技术对于保障列车高效、安全运行至关重要。随着高速铁路的快速发展，对供电系统的稳定性、可靠性和智能化水平提出了更高要求。本文旨在探讨铁路电力供电系统中的几项关键技术，包括配电自动化控制、电力远动控制技术、雷电防护技术及耦合受流技术等，以此为提升铁路电力供电系统的整体性能提供理论参考和实践指导。

1 铁路电力供电系统的重要性

铁路电力供电系统作为现代铁路运输的命脉，其重要性不言而喻。它不仅直接关系到列车运行的安全、高效与稳定，还深刻影响着社会经济的持续发展与社会生活的便捷性。第一，从安全角度来看，电力供电系统是确保列车正常行驶的基础。在电气化铁路中，电力驱动替代了传统的蒸汽或内燃机驱动方式，大大提高了列车的运行速度和承载能力。而这一切的背后，离不开稳定、可靠的电力供应。一旦供电系统出现故障，轻则导致列车减速甚至停车，影响乘客出行时间；重则可能引发列车脱轨、追尾等重大安全事故，造成不可估量的生命财产损失。第二，电力供电系统对提升铁路运营效率至关重要^[1]。电力驱动使得列车能够更快速地加速、减速和启停，缩短了站停时间，提高了列车周转率和运输能力。同时，电力作为清洁能源，相比燃油驱动更为环保和经济，降低了铁路运营成本，也为实现绿色低碳的交通运输体系奠定了基础。第三，铁路电力供电系统的稳定性和可靠性还直接影响到铁路沿线的各类配套设施和服务质量。比如，车站照明、信号系统、通信设施等都需要稳定的电力支持。一个完善的电力供电系统能够确保这些设施的正常运行，为乘客提供更加舒适、便捷的乘车体验。

2 铁路电力供电系统的特点与要求

2.1 高可靠性

高可靠性的铁路电力供电系统要求在设计之初就充分考虑到各种可能的风险因素。这包括自然灾害（如雷电、洪水、地震等）、设备老化、人为误操作等多种潜在威胁。因此，系统在设计时会采用冗余配置、多重保护等策略，确保在单一故障发生时，系统能够迅速切换至备用状态，保障电力供应的连续性。另外，高可靠性的实现离不开先进的监控和管理技术。现代铁路电力供电系统普遍配备了智能化的监控设备，能够实时监测系统的运行状态，包括电压、电流、温度等关键参数。一旦发现异常，系统会立即发出警报，并启动相应的应急处理机制。除此之外，高可靠性的铁路电力供电系统还要求具备强大的应急响应能力。在发生严重故障或事故时，系统能够迅速切断故障区域的电源，防止故障扩散；同时，还能够快速启动备用电源或紧急供电方案，确保列车和其他重要设备的电力供应不受影响。这种应急响应能力不仅依赖于先进的技术手段，还需要完善的应急预案和高效的团队协作。

2.2 高稳定性

铁路电力供电系统需要能够稳定提供符合要求的电压，这是高稳定性的基础。在设计阶段，系统就需充分考虑电压调节装置的安装，以确保在不同负载条件下，电压波动都能被有效控制合理范围内。此外，系统还需具备快速响应电压变化的能力，以应对突发情况，确保供电质量不受影响。这种电压稳定性不仅保证了列车运行的安全性和舒适性，也延长了铁路设备的使用寿命。另外，高稳定性的铁路电力供电系统依赖于高质量、高可靠性的设备。从变压器、开关柜到保护装置，每一个组件都需要经过严格筛选和测试，以确保其在长期运行中能够保持稳定的性能。同时，系统还需具备自我诊断和预警功能，能够在设备出现故障前及时发现并

采取措施,防止故障扩大,保障供电系统的连续性和稳定性。为了保持供电系统的高稳定性,还需要建立完善的运行维护体系。这包括定期对设备进行巡检、维护和保养,及时发现并处理潜在问题;建立应急响应机制,确保在突发情况下能够迅速恢复供电;加强人员培训和管理,提高运维人员的专业技能和应急处理能力。通过这些措施的实施,可以确保供电系统在运行过程中始终保持稳定、可靠的状态。

2.3 大容量供电

随着高速铁路的快速发展,列车的运行速度、载重量和密度不断提高,对电力供电系统的容量提出了更高的要求。大容量供电能够确保在高峰时段或突发情况下,系统仍能提供足够的电力支持,满足列车的正常运行需求。此外,大容量供电还有助于提高供电系统的稳定性和可靠性,减少因电力不足导致的运行中断和安全隐患。为了实现大容量供电,铁路电力供电系统通常采用高压电源,如220kV等。这些高压电源具有较高的短路容量和电压稳定性,能够有效减少电力损失,提高供电效率^[2]。在铁路牵引供电系统中,牵引变压器是核心设备之一。为了满足大容量供电的需求,牵引变压器通常采用大容量、高效率的设计,以确保在负载变化时仍能保持稳定的电压输出。为了保障大容量供电的稳定性和可靠性,铁路电力供电系统还需要对电网结构进行优化。这包括合理布局变电站、优化输电线路路径、提高电网自动化水平等。通过这些措施的实施,可以确保电网在复杂多变的工况下仍能保持稳定的运行状态。

3 铁路电力供电系统关键技术分析

3.1 配电自动化控制形式

配电自动化控制形式通常包括监控中心、通信网络、现场设备和用户终端四个主要部分。监控中心是整个系统的核心,负责数据采集、故障处理、指挥调度等功能;通信网络则负责监控中心与各现场设备之间的数据传输和通信;现场设备包括配电开关、保护装置、测量仪表等,负责实现配电系统的自动控制和数据采集;用户终端则为用户提供实时电能信息、故障报警等功能。配电自动化终端(FTU)具有自动故障判断与隔离能力,通过相互之间的配合,也具备网络重构能力。整个过程不需要主站的参与,主要由电压时间型和电流计数型两种方式实现。响应速度快,能够在短时间内完成故障隔离和网络重构,减少停电时间和范围。由现场FTU将采集到的故障信息上送主站,主站的应用模块经计算后得出故障隔离与恢复方案,再下达给FTU执行。一般分为配电终端层、配电子站和主站三个层次。能够处理

复杂的网络结构和故障情况(如多重故障),通过强大的主站系统实现全局优化和管理。配电自动化控制形式的应用不仅提高了铁路电力供电系统的运行效率和管理水平,还显著增强了系统的安全性和可靠性。通过实时监控、故障检测与保护、自动控制等功能,系统能够及时发现并处理潜在问题,确保电力供应的稳定性和连续性。同时,配电自动化控制形式还支持远程操作和维护,降低了运维成本和人力投入。

3.2 电力贯通线电缆金属护层接地技术

配电自动化控制形式的核心在于其能够实时感知配电网的状态,包括电压、电流、功率因数等关键参数,并通过先进的数据处理与分析算法,快速识别潜在故障或异常情况。一旦检测到故障,系统能够立即启动自动隔离机制,将故障区域从网络中隔离出来,防止故障扩大影响其他正常供电区域。这一过程不仅速度快,而且精确度高,确保了电力供应的连续性和稳定性。在故障隔离后,系统能够自动调整网络结构,重新分配电力负荷,确保非故障区域的供电需求得到满足。这种灵活的网络重构能力,使得系统在面对复杂多变的运行环境时,能够迅速适应并恢复供电,有效提升了系统的鲁棒性和适应性。在集中控制模式下,配电自动化控制形式更是将主站系统的强大计算能力与现场FTU的实时感知能力相结合,实现了对配电网的全局优化与管理。主站系统通过接收并分析来自FTU的故障信息,能够制定出最优的故障隔离与恢复方案,并通过通信网络将指令下达给FTU执行。这一过程不仅提高了故障处理的效率和准确性,还使得系统的整体运行更加智能化和高效化。

3.3 电力远动控制技术

在铁路电力供电系统中,电力远动控制技术通过利用先进的通信技术和计算机技术,实现了对电力设备的远程监控、测量、控制及保护,极大地提升了铁路电力供电系统的自动化水平和运行效率。电力远动控制技术主要包括遥测(YC)、遥信(YX)、遥控(YK)和遥调(YT)四大功能。遥测功能能够实时采集电力设备的运行参数,如电压、电流、功率等,为系统提供准确的数据支持;遥信功能则负责传输电力设备的状态信息,如开关位置、保护动作等,使调度人员能够及时了解设备状态;遥控功能允许调度人员通过远程指令对电力设备进行操作,如开关的分合闸操作,提高了系统的灵活性和响应速度;遥调功能则支持对设备参数的远程调整,如变压器分接头的调节,以满足系统运行的优化需求。在铁路电力供电系统中,电力远动控制技术的应用不仅提高了系统的自动化水平,还显著增强了系统的安

全性和可靠性。通过实时监控和故障预警,系统能够及时发现并处理潜在问题,防止故障扩大,减少停电时间和范围。同时,电力运动控制技术还能够优化电力资源的分配,提高系统的运行效率和经济性。

3.4 耦合受流技术

在铁路电力供电系统中,耦合受流技术是一项极具挑战性的关键技术,它直接关系到列车高速行驶时电力供应的稳定性和效率。这一技术主要聚焦于接触网(catenary)与受电弓(pantograph)之间的相互作用,通过优化两者之间的接触质量、动态响应以及能量传输效率,确保列车能够持续、平稳地获取电力。(1)耦合受流技术要求接触网与受电弓之间的接触力必须保持在合理范围内。接触力过大会导致受电弓和接触网的磨损加剧,缩短使用寿命;而接触力过小则可能引发离线现象,即受电弓与接触网之间的接触不稳定或完全断开,这将严重影响列车的电力供应。因此,设计合理的接触力控制策略,是实现高效耦合受流的关键之一。(2)接触网的几何形态和刚度分布对耦合受流性能也有显著影响。接触网的垂向刚度不一致性和接触线不平顺会导致弓网间的接触力波动,进而影响受流质量。为了减小这些不利影响,需要对接触网的结构和参数进行精细设计,并通过仿真分析和实验验证来优化其性能。(3)受电弓的动态响应特性也是耦合受流技术研究的重点。受电弓在高速运动过程中会受到各种外部激励的作用,如气动载荷、振动等,这些都会影响其与接触网的接触状态。因此,需要建立精确的受电弓动态模型,研究其在各种工况下的响应特性,并据此进行参数优化和控制策略设计。

3.5 雷电防护技术

雷电防护技术旨在通过一系列综合措施,减少雷电对铁路电力供电系统的影响,确保供电设备的安全和稳定运行。这些措施包括避雷针、避雷线、避雷器的安装与应用,以及智能化雷电防护系统的建设等。避雷针与避雷线设置于变电所、接触网支柱等关键位置,通过其尖端的接闪器吸引雷电并将其导入地下,有效防止直击雷对供电设备的损害。避雷针的设置需遵循科学规范,

确保其保护范围覆盖所有重要设备。悬挂在供电线路的最顶端,将可能劈向高压线的闪电吸引到自己身上,并通过接地装置将雷电流引入地下,保护下方的供电线路。避雷线的设置需考虑线路走向、地形地貌等因素,以确保其防雷效果。避雷器并联在供电设备上方,处于“休眠状态”。一旦雷击产生过电压,避雷器立即激活并进入“工作状态”,将大电流引入大地,避免设备受损^[1]。避雷器的选择和安装需根据设备的耐压等级、雷电活动频率等因素进行综合考虑。在高铁线路桥梁、隧道段,采用综合接地技术将接地线每隔一段距离与桥梁、隧道段的钢筋连接,降低接地电阻;路基段则通过埋入接地体,增加接地体土壤接触面积来降低接地电阻。这些措施有助于迅速、有效地泄导雷电流,减少对供电设备的影响。随着科技的进步,智能化雷电防护系统逐渐应用于铁路电力供电系统中。该系统通过雷电监测预警系统、智能化雷电防护装备以及大数据分析等手段,实现对雷电活动的实时监测和预警。当雷电活动接近时,系统能够自动启动防护措施,如调整避雷器的工作状态、增加接地电阻的监测频率等,以最大程度地减少雷电对供电系统的影响。

结语

总之,铁路电力供电系统的关键技术,作为支撑铁路高效、安全运行的基石,展现了现代科技在交通领域的深度应用。随着技术的不断进步,这些关键技术将持续优化升级,为铁路电力供电系统带来更高的效率、更强的稳定性和更智能的运维能力。展望未来,期待更多创新技术的涌现,共同推动铁路电力供电系统向更加绿色、智能、可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1]左杨帆.智能电力运维系统在铁路变配电所的应用研究[J].电子元器件与信息技术,2022,6(03):138-140.
- [2]杨翰超.高速铁路电力智能运维管理系统设计与应用[J].自动化应用,2021,(08):56-59.
- [3]周明.人工智能技术的铁路电力自动化系统可靠性评估[J].电气应用,2020,39(06):35-39.