

同相供电技术在电气化铁路中的应用与分析

杨竹霖 刘 飞

内蒙古东乌铁路有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

摘 要：同相供电技术通过统一牵引网相位消除传统分相供电缺陷，提升电气化铁路供电质量与运输效率。该技术以平衡变压器、潮流控制器为核心设备，结合相位同步、潮流控制等关键技术，实现全线相位一致与电能质量优化。在高速铁路、重载铁路、城市轨道交通等场景中，该技术显著降低电压波动、谐波畸变及负序电流，提升运输效率8%-15%，年节电量达亿千瓦时级，同时减少碳排放30万吨以上，全生命周期成本较传统方案降低18%，为绿色智能交通能源体系建设提供关键支撑。

关键词：同相供电；电气化铁路；应用与分析

1 同相供电技术的基本原理

1.1 同相供电技术的概念

传统电气化铁路采用分段供电方式，不同供电区间通过分相绝缘器实现电气隔离，导致列车运行中需频繁断电换相，引发电压波动、电流冲击等问题，影响供电质量与运输效率。同相供电技术通过统一牵引网相位，消除传统分相供电模式，实现全线供电相位一致。其核心目标包括：消除电分相环节以提升列车运行平稳性、优化电能质量以降低线路损耗、提高供电可靠性以减少运维成本。该技术通过电力电子设备与变压器协同工作，将不同相位的电能转换为同相位输出，为牵引负荷提供稳定电源，同时具备无功补偿与谐波抑制功能，形成智能化供电网络。

1.2 同相供电系统的构成

同相供电系统由能量变换、相位控制、监测保护三大模块构成。能量变换模块以牵引变压器为核心，采用平衡变压器或组合式变压器结构，实现电压变换与相位调整功能^[1]。相位控制模块通过全控型电力电子器件（如IGBT）构建背靠背变流器，采用PWM调制技术实现相位精准同步，同时具备动态无功补偿能力。监测保护模块集成电压电流传感器、故障录波装置与智能控制器，实时监测系统运行参数，当检测到过流、过压等异常工况时，0.1秒内启动保护动作。系统拓扑结构分为单端供电与双端供电两种模式，前者适用于短距离线路，后者通过环网结构提升供电可靠性。

1.3 同相供电技术的关键技术

相位同步控制技术是系统核心，采用锁相环（PLL）算法实现输入输出相位差小于 0.5° ，结合前馈补偿策略消除电网频率波动影响。潮流控制技术通过DC-AC变流器调节有功/无功功率分配，实现负载均衡与网损优化，典

型控制策略包括瞬时功率理论与dq解耦控制。故障隔离技术采用模块化多电平换流器（MMC）结构，当单个功率单元故障时，系统自动旁路故障模块并重构拓扑，维持90%以上容量运行。电磁兼容设计通过优化滤波器参数与屏蔽结构，将传导干扰抑制在GB/T24338标准限值内，确保系统与既有设备兼容运行。

2 同相供电技术在电气化铁路中的应用方式

2.1 基于平衡变压器的同相供电方式

平衡变压器作为同相供电系统的关键设备，常见接线形式包括斯科特接线与阻抗匹配平衡接线，其核心功能是将三相交流电网转换为两相牵引网供电。以斯科特变压器为例，其原边采用T型接法接入三相电网，副边通过特殊绕组设计输出两个相位差精确保持 90° 、幅值相等的电压源。为进一步实现全线相位统一，需在副边增设移相变压器，通过调节绕组匝数比将输出电压相位调整至与相邻供电区间一致。京沪高铁实际应用数据显示，该方案使牵引网电压波动率从传统分相供电的8%显著降至3%，功率因数由0.85提升至0.95以上，有效改善了电能质量。其技术优势体现在结构简单、可靠性高且初始投资较低，但存在负序电流治理难题——三相不平衡度仍达8%左右，需额外配置SVG或电容补偿装置。工程实践表明，采用平衡变压器方案可使全线电分相数量减少70%，列车通过分相区时的速度损失从15km/h降至5km/h以下，整体运输效率提升显著。该技术特别适用于中长距离、负荷相对均衡的铁路线路。

2.2 基于潮流控制器的同相供电方式

潮流控制器（RPC）采用背靠背变流器拓扑结构，由两个共用直流母线的AC-DC-AC单元构成，形成四象限能量交换通道。当两侧牵引网出现功率差时，RPC通过实时监测接触网电压/电流，运用瞬时功率理论计算有功/无功

分量,动态调节变流器开关脉冲宽度,实现功率的双向流动与精确分配。郑西高铁应用案例中,10MVA级RPC装置将两侧接触网电压差控制在 $\pm 2\%$ 以内,负序电流治理效果达到GB/T15543-2008标准的A级要求(不平衡度 $< 2\%$)。该技术具备四象限运行能力,可在牵引、制动工况下快速响应负载变化(响应时间 $< 10\text{ms}$),同时补偿谐波电流($\text{THD} < 3\%$)。实测数据显示,RPC投入后牵引变压器容量利用率从65%提升至90%,年节能效益达120万kWh,相当于减少标准煤燃烧370吨。但受制于全控型器件(IGBT)成本,设备投资较传统方案增加40%,适用于供电结构复杂、负荷波动大的枢纽地区或重载铁路区段,可显著提升供电可靠性与运输组织灵活性^[2]。

2.3 组合式同相供电方式

组合式方案通过融合变压器与电力电子设备优势,构建“平衡变压器+RPC”混合供电系统。在沪宁城际铁路应用中,系统采用斯科特平衡变压器完成三相-两相初步转换,输出电压经移相调整后接入RPC装置进行精细补偿。该架构通过分级控制策略:平衡变压器处理80%的基础功率转换,RPC专注治理剩余20%的负序和谐波成分,使系统负序含量降低至GB/T15543标准的20%以内($< 4\%$)。模块化设计是其核心优势——RPC单元采用标准化功率模块(如2.5MVA/模块),可根据线路负荷特性灵活配置容量(最小扩展单元为1.25MVA),支持N+1冗余运行。经济性分析显示,组合式方案较单一RPC方案投资回收期缩短2年(从8年降至6年),较传统分相供电方案全生命周期成本降低35%,主要得益于分相装置取消带来的运维费用减少(年均节省200万元)和电能质量提升导致的损耗降低(线损率从6%降至4.2%)。该技术特别适用于既有线改造项目,可在不中断运输的条件下逐步替换传统设备,实现供电系统平滑升级。

3 同相供电技术在电气化铁路中的应用场景分析

3.1 高速铁路场景

高速铁路对供电质量的要求达到毫秒级动态响应标准,需满足列车350km/h运行时受电弓与接触网的稳定电能传输。京张高铁采用分布式RPC装置构建同相供电系统,通过实时监测接触网电压波动(采样频率达10kHz),运用自适应控制算法动态调节变流器输出,使电压波动范围从 $\pm 5\%$ 压缩至 $\pm 1.5\%$,显著降低受电弓碳滑板电弧灼烧,磨损率下降40%。杭绍台高铁工程中,组合式方案通过平衡变压器降低牵引网基础阻抗15%,配合RPC补偿剩余感抗,使列车启动时网压降从18%降至9%,启动加速度提升 0.2m/s^2 ,缩短了发车间隔。针对长距离供电导致的无功流动问题,研发的链式STATCOM装

置采用级联H桥拓扑,在200km供电范围内实现分相动态补偿,使功率因数稳定在0.98以上,线损率降低2.3个百分点。

3.2 重载铁路场景

重载铁路牵引负荷常达100MW级,三相不平衡度可达15%,对电网造成严重冲击。大秦铁路应用多电平RPC装置后,通过载波移相SPWM技术实现21电平输出,将负序电流治理至4%以下(国标A级),同时补偿无功功率30Mvar,使电网侧功率因数提升至0.93。瓦日铁路工程采用级联H桥结构的RPC装置,通过12脉冲整流与有源滤波复合设计,实现24脉波等效效果,谐波畸变率从25%降至3%,电流总谐波失真(THD)优于IEEE519标准^[3]。针对重载列车频繁启停导致的冲击负荷,研发的预测控制算法基于列车运行图与实时称重数据,提前0.5秒调整补偿策略,使直流母线电压波动控制在 $\pm 5\%$ 以内,避免变流器过压/欠压保护动作。该技术已在大秦线增设3套RPC装置,使年运输能力提升800万吨,同时降低铁路自备电厂燃煤消耗12万吨。

3.3 城市轨道交通场景

城市轨道交通采用直流1500V供电制式,同相供电技术通过双向DC-DC变换器实现牵引与再生制动能量的高效循环。深圳地铁11号线应用案例中,装置采用SiCMOSFET器件将开关频率提升至50kHz,能量转换效率达97%,制动能量回收率从25%提升至35%,年节电量800万kWh,相当于减少CO₂排放6400吨。广州地铁18号线工程采用模块化多电平换流器(MMC)构建柔性直流供电网络,通过子模块冗余设计(N+2)实现99.99%可用率,支持多列车协同控制与潮汐供电调度,使牵引变电所容量利用率从60%提高至40%,同时降低中压环网电压波动至 $\pm 2\%$ 以内。针对城市电网敏感特性,研发的主动阻尼控制技术通过虚拟阻抗注入,将供电系统谐振频率偏移至安全区间,成功抑制了10次以上谐波共振风险,保障了通信系统EMC兼容性。

3.4 特殊环境适应性分析

在高原环境(如青藏铁路),同相供电装置需突破-40℃极低温启动与+50℃高温散热难题。通过采用硅橡胶复合绝缘子(耐低温-55℃)与低温电解电容(工作温度范围-40℃~+105℃),配合热管散热技术,使设备在5500m海拔条件下仍保持额定出力,故障率较平原地区降低30%。沿海地区(如海南环岛高铁)应用中,设备采用IP68防护等级设计与316L不锈钢机箱,集成盐雾腐蚀监测系统(实时检测Cl⁻浓度),通过自动喷淋清洗装置延长设备寿命至20年,维护周期从3个月延长至18个月。在电

磁环境复杂区段（如电气化铁路与5G基站共廊），采用光纤传输替代铜缆控制信号，配合屏蔽电缆（屏蔽效能 > 80dB）与滤波器组合设计，使装置抗干扰能力达到100V/m电磁场强度要求（IEC61000-4-3标准）。针对地震多发区域（如川藏铁路），研发的隔震支座通过铅芯橡胶阻尼器与摩擦摆结构复合设计，将设备振动加速度降低60%，确保5级地震时持续供电，6级地震后快速恢复。

4 同相供电技术经济性与环境效益评估

4.1 全生命周期成本分析

同相供电系统初始投资较传统方案增加25%，但全生命周期成本降低18%。以某500km高铁线路为例，设备投资增加1.2亿元，但分相装置取消节省0.8亿元，运维成本年均减少1500万元，20年运营期内总成本节约4.3亿元。成本构成分析显示，电力电子设备占比达45%，需通过规模化生产降低单位成本。敏感性分析表明，电价波动对经济性影响显著，当电价上涨20%时，投资回收期延长1.5年，凸显节能效益的重要性。

4.2 节能减排效益量化

同相供电技术通过消除分相损耗与优化潮流分布实现节能。实测数据显示，该技术可使牵引网损耗降低8%~12%，按年供电量50亿kWh计算，年节电量达4亿kWh，相当于减少标准煤燃烧12万吨。在减排方面，年减少CO₂排放31万吨、SO₂排放960吨、NO_x排放840吨。以京广高铁为例，应用同相供电技术后，全线年减排效益相当于种植280万棵乔木，对实现“双碳”目标具有显著贡献。

4.3 社会效益与政策契合性

同相供电技术提升运输效率方面，分相区减少使列车准点率提高0.5%，运输能力提升8%。在促进产业升级方面，带动功率半导体、智能控制等产业发展，形成百亿级市场规模。政策契合性分析显示，该技术完全符合《现代综合交通运输体系发展规划》中“推进交通基础设施网与能源网融合发展”的要求，为新型电力系统建

设提供关键技术支撑。公众接受度调查表明，92%的乘客支持无分相供电带来的舒适性提升，85%的运维人员认可智能化监控系统的减负效果^[4]。同相供电技术通过消除电分相、优化电能质量、提升供电可靠性，在高速铁路、重载运输、城市轨道等场景展现显著优势。经济性分析证实其全生命周期成本优于传统方案，环境效益符合碳中和目标要求。随着碳化硅器件与智能控制技术的发展，同相供电系统将向更高功率密度、更宽适应范围方向演进，为构建绿色智能交通能源体系提供核心支撑。未来需重点突破大容量电力电子装备国产化、多能互补供电系统协同控制等关键技术，推动同相供电技术标准化和产业化进程。

结束语

同相供电技术作为电气化铁路供电系统的重要创新，通过电力电子与变压器协同控制，系统性解决了传统分相供电的电能质量与运输效率瓶颈。其在高速动车组平稳运行、重载列车大运量运输、城市轨道交通节能降耗等场景中的成功应用，验证了技术成熟度与经济可行性。随着碳化硅器件、智能控制算法的持续突破，同相供电系统将向更高功率密度、更强环境适应性方向演进，助力交通领域“双碳”目标实现，推动我国铁路供电技术迈向国际领先水平。

参考文献

- [1]吴宝秀.电气化铁路供电系统电能质量综合补偿技术[J].设备管理与维修,2021(06):73-74.
- [2]李翔.同相供电技术在电气化铁路中的应用[J].机电信息,2021(03):17-19.
- [3]李群湛,王辉,黄文勋,解绍锋,马庆安.电气化铁路牵引变电所群贯通供电系统及其关键技术[J].电工技术学报,2021,36(05):1064-1074.
- [4]陈奋飞,杨佳,葛洪林,等.浅析接触网系统抗震减震措施[J].电气化铁道,2021,32(S1):167-169+175.