

铁路牵引供电功率因数的影响

亓瑞瑞

中国铁建电气化局集团第二工程有限公司 山西 太原 030020

摘要: 本文深入探讨了铁路牵引供电功率因数的影响因素及提升措施。分析了电力机车类型、牵引负荷特性、供电系统参数及运行调度方式对功率因数的影响,阐述了低功率因数对电能损耗、设备利用率、电压质量及电力系统稳定性的不利影响。提出了采用新型电力机车技术、优化供电系统设计、安装无功补偿装置及实施智能运行调度等提升措施,为铁路牵引供电系统的优化提供了理论依据和实践指导。

关键词: 铁路牵引供电; 功率因数; 影响因素; 提升措施

引言

铁路牵引供电系统作为铁路运输的核心组成部分,其功率因数的高低直接影响着系统的运行效率和经济性。本文旨在全面分析影响铁路牵引供电功率因数的多种因素,探讨功率因数变化对供电系统的影响,并提出有效的提升措施。通过深入研究,为提升铁路供电质量、降低运营成本、促进铁路可持续发展提供理论支持和实践路径。

1 铁路牵引供电系统概述

铁路牵引供电系统主要由牵引变电所、接触网、电力机车等部分构成。牵引变电所将电力系统送来的三相高压交流电,通过变压器降压、换相后,以单相交流电的形式经馈电线送至接触网。电力机车通过受电弓从接触网获取电能,将其转化为机械能驱动列车运行。在这一过程中,功率因数的变化会对各个环节产生不同程度的影响。例如,牵引变电所内的变压器、断路器等设备的运行效率与功率因数密切相关;接触网的电能传输损耗也会因功率因数的高低而有所不同。

2 影响铁路牵引供电功率因数的因素

2.1 电力机车类型差异

不同类型的电力机车由于其电气特性和控制方式的不同,对牵引供电系统功率因数影响各异。早期的直流电力机车采用相控整流技术,在运行过程中会产生大量谐波电流,导致功率因数较低。例如,韶山系列早期机车,其功率因数通常在0.7-0.8之间。而随着技术发展,交流传动电力机车逐渐普及,如和谐号系列机车,采用脉冲宽度调制(PWM)技术,能有效降低谐波含量,提高功率因数,一般可达到0.9以上。

2.2 牵引负荷特性复杂

铁路牵引负荷具有随机性、波动性和冲击性的特点。列车在启动、加速、爬坡时,牵引电流急剧增大,

功率因数会显著下降;而在匀速行驶或下坡时,负荷相对稳定,功率因数有所提高。例如,在山区铁路,由于坡道多、坡度大,列车频繁启动、爬坡,牵引负荷波动剧烈,功率因数较低且不稳定。此外,不同列车的编组、载重以及运行速度等因素也会导致牵引负荷特性的差异,进而影响功率因数^[1]。

2.3 供电系统参数影响

牵引供电系统的参数,如牵引变压器的容量、短路阻抗,接触网的电阻、电抗等,对功率因数有重要影响。牵引变压器容量过大或短路阻抗不合适,会导致变压器自身损耗增加,功率因数降低。接触网的电阻和电抗会引起电压降和电能损耗,当接触网参数不合理时,会使电力机车受电端电压波动,影响机车的运行性能,进而降低功率因数。例如,在一些老旧铁路线路,接触网导线截面积较小,电阻较大,导致功率因数偏低。

2.4 运行调度方式制约

铁路的运行调度方式决定了列车的运行密度、间隔以及运行速度等,从而对牵引供电功率因数产生影响。当列车运行密度大、间隔小时,会出现多台机车同时取流的情况,使牵引负荷波动加剧,功率因数下降。例如,在繁忙的干线铁路,高峰时段列车密集运行,功率因数明显低于低谷时段。不合理的运行调度还可能导致机车在低效率工况下运行,进一步降低功率因数。

3 功率因数对铁路牵引供电系统的影响

3.1 电能损耗增加

功率因数较低时,电力系统中的无功功率增大,导致电流有效值增加。根据焦耳定律,输电线路和供电设备的电能损耗与电流的平方成正比。因此,功率因数降低会使牵引变电所到接触网的输电线路以及变压器等设备的电能损耗显著增加。例如,某铁路区段功率因数从0.9降低到0.8时,电能损耗增加了约25%,这不仅浪费了

大量电能,还增加了铁路运营成本。

3.2 供电设备容量利用率降低

供电设备的容量是按照视在功率来设计的,当功率因数较低时,为满足电力机车的有功功率需求,需要更大的视在功率。这意味着供电设备需要输出更多的无功功率,导致设备容量利用率降低。例如,一台额定容量为10MVA的牵引变压器,当功率因数为0.9时,可提供的有功功率为9MW;而当功率因数降至0.7时,相同容量下可提供的有功功率仅为7MW,设备容量未得到充分利用。

3.3 电压质量下降

功率因数低会导致输电线路上的电压降增大,使得电力机车受电端电压偏低且波动较大。电压质量下降会影响电力机车的正常运行,导致机车牵引力下降、运行速度不稳定,甚至可能引发机车故障。例如,在某铁路支线,由于功率因数较低,机车受电端电压经常低于额定值,列车启动困难,运行速度明显降低。

3.4 对电力系统稳定性影响

铁路牵引供电系统作为电力系统的特殊用户,其功率因数的变化会对电力系统的稳定性产生影响。低功率因数会增加电力系统的无功负荷,导致系统电压波动和相位偏移,影响电力系统的正常运行。在极端情况下,可能引发电力系统振荡,威胁电力系统的安全稳定运行。例如,当多条铁路线路集中在同一区域,且功率因数普遍较低时,可能会对区域电力系统的稳定性造成严重挑战^[2]。

4 提升铁路牵引供电功率因数的措施

4.1 采用新型电力机车技术

(1) 随着电力电子技术与控制理论的迅猛发展,新型电力机车在优化电气性能、降低谐波干扰以及提高功率因数方面展现出显著优势。新型变流器技术的应用尤为关键,例如采用基于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的变流器,相较于传统变流器,其开关速度更快、损耗更低,能够精准控制电力机车的电流与电压,有效减少谐波电流的产生。谐波电流的降低不仅有助于提升功率因数,还能减少对供电系统的干扰,保障系统的稳定运行。在实际运行中,通过优化变流器的拓扑结构和控制算法,可进一步提升其性能。例如,采用多电平变流器技术,能够增加输出电压的电平数,使输出波形更接近正弦波,大幅降低谐波含量,从而显著提高电力机车的功率因数。(2) 改进电力机车的控制策略也是提升功率因数的重要手段。传统电力机车在不同运行工况下,功率因数波动较大。而现代智能控制算法的引入,使电力机车能够根据实时牵引负荷的变化,动态调整自身的运

行参数,始终保持较高的功率因数。以自适应控制算法为例,电力机车通过传感器实时监测牵引电流、电压以及机车的运行速度等参数,控制系统根据这些参数的变化,自动调整变流器的触发角和调制比,使电力机车在启动、加速、匀速行驶以及制动等各种工况下,都能实现最优的功率因数。一些新型电力机车采用模糊控制算法,将操作人员的经验和知识转化为模糊规则,通过模糊推理和决策,实现对电力机车的智能化控制。在复杂的运行环境中,模糊控制算法能够快速、准确地调整电力机车的运行状态,确保功率因数稳定在较高水平。据实际测试,采用智能控制算法的新型电力机车,功率因数可稳定在0.95以上,相较于传统电力机车有了大幅提升。

4.2 优化供电系统设计

在牵引供电系统的初期设计阶段,全面且精细地优化系统参数对于提升功率因数具有举足轻重的作用。

(1) 牵引变压器的容量需根据铁路线路的实际运输能力、列车的编组情况以及运行密度来综合考虑。容量过大,变压器在轻载运行时自身损耗会增加,导致功率因数下降;容量过小,则难以满足电力机车的正常运行需求。而短路阻抗的选择也直接影响到变压器的性能。不恰当的短路阻抗设置会影响变压器的电压调整率和负载分配,从而对功率因数产生不利影响。(2) 在设计过程中,必须充分考虑各种因素,通过精确的计算来确定牵引变压器的容量和短路阻抗。为了更科学地做出选择,可以建立数学模型,对不同容量和短路阻抗的变压器进行仿真分析。通过模拟实际运行工况,可以评估不同参数下的变压器性能,从而选择出最适合实际需求的变压器参数,确保变压器在各种工况下都能高效运行,提高功率因数。(3) 接触网作为向电力机车输送电能的关键环节,其参数配置同样对功率因数有着显著影响。根据铁路线路的实际情况,合理选择接触网导线的截面积是降低电阻和电抗的有效手段。在重载铁路线路中,由于牵引电流较大,选用较大截面积的导线可以有效降低电阻,减少电能损耗,从而提高功率因数。(4) 接触网的悬挂方式和张力控制也是优化的重点。通过优化悬挂方式和张力控制,可以降低接触网的电抗,减少电压降,提高电力机车受电端的电压稳定性,进而提升功率因数。例如,采用弹性链形悬挂方式相比简单悬挂方式,能更好地适应电力机车高速运行时的受流需求。(5) 合理规划牵引变电所的布局也是提升功率因数的重要措施。在铁路线路规划时,应充分考虑线路走向、地形地貌以及负荷分布等因素,科学确定牵引变电所的位置。利用地理信息系统(GIS)技术对不同变电所布局方案进

行模拟分析,选择供电距离最短、电压降最小的方案^[3]。

4.3 安装无功补偿装置

(1) 在牵引变电所和接触网中安装无功补偿装置,是快速且有效地提升功率因数的重要手段。静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(STATCOM)是目前应用较为广泛的无功补偿装置。SVC通过调节电容和电抗的组合,实现对无功功率的动态补偿。其工作原理是根据供电系统中无功功率的变化,实时调整晶闸管控制的电抗器(TCR)和晶闸管投切电容器(TSC)的导通状态,从而改变装置输出的无功功率。在电力机车启动或加速时,牵引负荷无功功率需求增大,SVC迅速投入晶闸管控制的电抗器,增加感性无功输出,补偿系统无功缺额;而在电力机车匀速运行时,无功功率需求减少,SVC通过晶闸管投切电容器,输出容性无功功率,维持系统功率因数稳定。SVC具有响应速度快、调节范围广等优点,能够有效改善供电系统的功率因数。(2) STATCOM则利用先进的电力电子技术,以电压源型逆变器为核心,通过控制逆变器输出电压的幅值和相位,实现对无功功率的精确控制。与SVC相比,STATCOM具有更高的调节精度和更快的响应速度。在实际应用中,STATCOM能够根据供电系统的实时无功功率需求,快速调整输出无功功率,使功率因数得到显著提升。例如,在某繁忙铁路干线的牵引变电所安装STATCOM后,通过实时监测供电系统的无功功率变化,STATCOM能够在毫秒级时间内做出响应,精确输出所需的无功功率。该干线的功率因数从0.8迅速提升至0.92以上,有效降低了电能损耗,提高了供电设备的容量利用率。随着电力电子技术的不断发展,STATCOM的性能还在不断提升,其应用范围也在逐渐扩大,为铁路牵引供电系统功率因数的提升提供了更强大的技术支持。

4.4 实施智能运行调度

(1) 利用先进的信息技术和智能算法,实施智能运行调度,是提升铁路牵引供电功率因数的创新举措。铁路运输具有列车运行密度大、运行状态复杂等特点,传统的运行调度方式难以根据实时情况优化列车的运行参数,导致功率因数较低。智能运行调度系统通过实时采

集列车的运行状态、线路条件以及供电系统的参数等信息,运用智能算法对这些数据进行分析和处理,制定科学合理的运行调度方案。(2) 在列车运行间隔和速度优化方面,智能调度系统根据供电系统的实时功率因数情况,合理安排列车的启动、加速、匀速行驶和制动过程。例如,在高峰时段,当多台列车同时处于启动或加速状态时,牵引负荷波动剧烈,功率因数较低。智能调度系统通过调整列车的启动顺序和加速速率,使列车有序取流,减少牵引负荷的瞬间冲击,提高整体功率因数。在某城市轨道交通线路中,采用智能运行调度系统后,通过优化列车的运行间隔和速度,使线路的功率因数提高了约0.08。同时,智能调度系统还能根据线路的坡度、弯道等条件,动态调整列车的运行速度,使电力机车在不同工况下都能保持较高的功率因数。例如,在山区铁路线路,列车在爬坡时,智能调度系统根据坡度和列车载重情况,合理控制列车的加速速率,避免因过度加速导致功率因数下降。通过实施智能运行调度,不仅能够提升铁路牵引供电系统的功率因数,还能提高铁路运输的安全性和效率,实现铁路运输的智能化和绿色发展。

结语

本文通过对铁路牵引供电功率因数的深入研究,揭示了其受多种因素影响的复杂机制,以及低功率因数对供电系统带来的诸多不利影响。针对这些问题,提出了切实可行的提升措施,包括采用新型电力机车技术、优化供电系统设计、安装无功补偿装置和实施智能运行调度等。这些措施的实施将有助于提升铁路牵引供电系统的运行效率,为铁路运输的可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 张晓鹏,孟志强,夏小舫,等.高速铁路牵引变电所功率因数异常分析[J].电气化铁道,2021,32(1):21-25.
- [2] 张皓.铁路牵引供电无功补偿的发展研究[J].户外装备,2021(6):157-158.
- [3] 李俊波.铁路基础设施综合维修生产管理信息系统构建重点及关键技术[J].中国铁路,2019(3):27-33.