

# 高速铁路牵引供电系统负序电流分析及补偿策略研究

谢 飞

青藏集团有限公司西宁供电段 青海西宁 810006

**摘 要:** 本论文主要聚焦于高速铁路牵引供电系统领域,对负序电流产生的内在机理及影响其产生的各种因素予以深入探讨,通过对一系列实际案例进行详尽数据收集与深入分析,揭示了负序电流给电力系统中的关键设备、电能质量以及高速铁路运行效率带来的负面影响,针对所发现问题,系统性探讨多种包括但不限于三相平衡补偿装置应用、牵引变压器优化配置等的负序电流补偿策略,同时细致比较分析不同补偿策略的优劣及各自适用场景,研究结果明确指出,合理选择运用这些补偿策略可有效减少负序电流产生,进而显著提升高速铁路牵引供电系统的稳定性与可靠性,为本确保高速铁路安全、高效运行提供坚实的理论基础与实践指导。

**关键词:** 高速铁路;牵引供电系统;负序电流;补偿策略;电能质量

## 引言

随着我国高速铁路凭借高速度、大运量、低能耗等优势得以快速发展而成为现代交通运输体系重要组成部分的情况,牵引供电系统作为其运行动力来源,运行稳定性及电能质量与列车安全、可靠运行直接相关。然而,鉴于高速铁路牵引负荷具波动性大、非线性等特点,运行中会产生大量无功功率和谐波,致使系统功率因数降低、设备损耗增加、电网电压畸变等问题出现,严重影响牵引供电系统电能质量及运行效率,所以深入研究其无功功率和谐波问题并提出有效解决措施,对保障高速铁路安全稳定运行、提高电能利用效率有着重要现实意义<sup>[1]</sup>。在高速铁路牵引供电系统里,无功功率产生主要源于牵引负荷非线性特性以及牵引变压器、接触网等设备电感性负载,这些无功功率存在不仅会使整个系统功率因数降低,还会让额外电流通过输电线路,进而增加线路损耗与设备发热,进一步影响系统稳定性及效率。此外,谐波问题在高速铁路牵引供电系统中也不容忽视,谐波由非线性负载产生,在电网传播会导致电压和电流波形畸变,影响其他设备正常运行,甚至可能引发共振和过电压现象,对电力系统安全构成威胁。为解决上述问题,本论文提出一系列针对性解决方案,首先通过优化牵引变压器接线方式,合理配置其绕组连接,可有效减少无功功率产生;其次安装无功补偿装置如静止无功发生器(SVG)或并联电容器组,能动态补偿系统中的无功功率,提高功率因数;最后采用有源滤波器可有效抑制谐波,借产生与谐波电流大小相等、相位

相反电流抵消谐波以改善电能质量。通过这些措施实施,能显著提升高速铁路牵引供电系统电能质量,减少无功功率损耗,降低谐波含量,为高速铁路安全、稳定、高效运行提供坚实理论基础与技术支持。

## 1 高速铁路牵引供电系统负序电流产生机理

在现代高速铁路牵引供电系统普遍采用单相交流供电方式的情况下,以电力机车作为主要电力负荷,其运行过程会从电网吸取单相电能,而传统三相电力系统中单相负荷接入会破坏原有三相平衡状态,理想状态下三相电力系统电压和电流相位彼此相差 120 度且幅值相等呈平衡状态,一旦有单相负荷接入则三相电流幅值和相位关系改变致系统不对称产生负序电流,从物理学角度看负序电流产生是因三相不对称电流经对称分量法分解得到的一个分量,对称分量法作为分析三相电力系统中不对称电流的有效工具将三相不对称电流分解为正序、负序和零序三个分量且其中负序分量因直接反映三相电流不对称程度而特别重要,在高速铁路牵引供电系统中因电力机车负荷特性及运行状态不断变化使三相电流不对称情况更复杂,进而致使负序电流大小和方向随之动态变化给供电系统稳定运行带来挑战。

## 2 高速铁路牵引供电系统负序电流影响因素分析

### 2.1 电力机车运行状态

电力机车运行状态对负序电流大小有着直接且显著影响,处于启动、加速阶段时负荷电流大且变化剧烈致牵引供电系统三相电流严重不对称产生较大负序电流,处于匀速运

行阶段时负荷相对稳定负序电流相应减小,不同类型电力机车因功率、牵引特性等参数差异运行中产生负序电流大小不同,像大功率电力机车启动时所需电流更大对三相平衡破坏程度更严重产生负序电流也就更大;在电力机车运行过程中可观察到其对负序电流影响是多方面的,启动和加速阶段因需较大动力克服静止或低速状态下惯性负荷电流显著增加,电流增加伴随电流波形剧烈变化致牵引供电系统中三相电流出现严重不对称现象,此不对称性是产生负序电流主要原因;随着电力机车进入匀速运行阶段负荷电流趋于稳定、电流波形变化变得平缓有助于减少三相电流不对称性使得负序电流大小相应减小<sup>[2]</sup>;不同类型电力机车因设计和性能参数差异在运行过程中对负序电流影响存在差异,大功率电力机车因强大牵引力和较高功率输出启动时需消耗更多电流加剧对三相平衡破坏从而产生更大负序电流,中低功率机车等其他类型电力机车启动和加速时对三相平衡影响相对较小产生负序电流也相对较少。

## 2.2 牵引变压器接线方式

在高速铁路牵引供电系统中扮演关键设备角色的牵引变压器,其接线方式对负序电流大小有着直接影响,常见有单相接线、V/v 接线、Scott 接线等方式。其中单相接线变压器结构简单,然三相不平衡度最大,产生负序电流也最大;V/v 接线变压器能在一定程度上改善三相不平衡状况,负序电流相对较小;Scott 接线变压器具较好三相平衡性能,可有效降低负序电流,不同接线方式在平衡三相负荷、抑制负序电流方面各有优劣,故选择合适接线方式对控制负序电流至关重要。牵引变压器在高速铁路牵引供电系统里的重要性不仅体现在将高压电网电能转换为适合电力机车使用的电压等级,更在于其接线方式对整个系统稳定性和效率的直接影响<sup>[3]</sup>。因单相接线变压器结构简单使得安装和维护相对容易,但三相不平衡度较大,会致负序电流增加,进而影响供电系统稳定运行;V/v 接线变压器则通过特定接线方式在一定程度上改善此问题,能平衡三相负荷、减少负序电流产生,因其在成本和性能间提供较好平衡点而在实际应用中被广泛采用;Scott 接线变压器作为更为先进的接线方式,通过特殊绕组设计实现更好三相平衡性能,在抑制负序电流方面表现出色,尤其适用于对供电质量要求较高场合。所以针对不同应用场景和需求,选择合适牵引变压器接线方式至关重要,这既关系到电力机车运行效率和稳定性,也直接影响整

个铁路系统能耗和维护成本。

## 2.3 供电臂负荷分布

牵引供电系统中各供电臂负荷分布情况这一重要因素对负序电流存在影响,各供电臂负荷分布均匀时三相电流不对称程度相对较小且负序电流也小,而实际运行中因列车运行时刻、运行方向、停靠站点等因素各供电臂负荷往往差异较大,某一供电臂负荷过重而其他供电臂负荷较轻会加剧三相电流不平衡致负序电流增大,像早晚高峰时段某些线路列车密集运行时该线路供电臂负荷大幅增加且负序电流也随之显著上升这种情况便是例证。

## 3 高速铁路牵引供电系统负序电流影响案例分析

为更直观地了解负序电流对高速铁路牵引供电系统及电力系统的影响,选取某段高速铁路线路进行实际数据收集与分析。该线路采用 V/v 接线牵引变压器,在不同运行时段对三相电流和负序电流进行监测,监测数据如下表所示:

运行时段	三相电流 A (A 相 / B 相 / C 相)	负序电流 A
早高峰 (7:00 - 9:00)	280/120/130	85
平峰时段 (10:00 - 16:00)	150/100/110	35
晚高峰 (17:00 - 19:00)	250/110/120	75

从表中数据可看出的情况是,在早高峰和晚高峰时段因列车运行密度大、负荷增加,使得三相电流不对称程度明显加剧且负序电流显著增大,较大负序电流会致使牵引变压器及电力系统中其他设备出现额外损耗和发热现象,比如就牵引变压器而言,负序电流会于变压器绕组中产生反向旋转磁场并与正序磁场相互作用,进而导致变压器铁芯损耗和绕组铜损增加以降低其效率及使用寿命,与此同时,负序电流还会引发电压不平衡,影响电力系统电能质量且对铁路沿线其他用电设备产生不利影响。

## 4 高速铁路牵引供电系统负序电流补偿策略

### 4.1 三相平衡补偿装置的应用

常用的三相平衡补偿装置静止无功补偿器能快速响应负荷变化,通过调节无功功率补偿系统中负序电流,由晶闸管控制电抗器 (TCR) 和晶闸管投切电容器 (TSC) 组成,当系统现负序电流时 TCR 与 TSC 协同工作,依负序电流大小方向动态调无功功率输出实现三相电流平衡,有响应速度快、调节范围广优点但存在谐波污染问题需配相应滤波装置<sup>[4]</sup>;基于电压源换流器 (VSC) 的新型无功补偿装置静止同步补偿器相比 SVC 有更快响应速度和更高补偿精度,通过

控制 VSC 输出电压和相位能精确补偿系统中负序电流和无功功率,可在不同工况下快速跟踪负荷变化实现三相电流精确平衡有效提升电能质量,产生谐波较少对电网污染较小,不过成本相对较高在应用推广方面受一定限制。

#### 4.2 牵引变压器优化配置

除了常见的牵引变压器接线方式外,近年来不断涌现出如阻抗匹配平衡变压器、YNvd 接线变压器等一些新型接线方式,这些新型接线方式在设计上充分考虑三相平衡问题进而能够更有效地降低负序电流,像阻抗匹配平衡变压器通过特殊的绕组设计和阻抗匹配可将三相电流的不对称度控制在较低水平以大大减小负序电流的产生;采用新型接线方式的牵引变压器虽初期投资可能相对较高但从长期运行来讲能够降低设备损耗、维护成本并提高供电系统的稳定性与可靠性;合理布局牵引变电所可通过优化供电臂的负荷分布来降低负序电流,在进行牵引变电所规划时需充分考虑线路的客流量、列车运行时刻等因素以科学确定牵引变电所的位置和容量,通过合理分配各供电臂的负荷让三相电流尽可能平衡,比如在客流量较大的区域适当增加牵引变电所的数量或者调整供电臂的划分避免某一供电臂负荷过重情况的出现,此外还可通过相邻牵引变电所之间的协同控制实现负荷的灵活调配进一步降低负序电流。

#### 4.3 智能控制策略

利用包含神经网络、机器学习等的人工智能技术对列车运行负荷进行预测,通过分析历史运行数据、列车时刻表、客流量等信息来建立准确负荷预测模型,提前预测列车负荷变化情况以使供电系统提前做好准备并采取相应补偿措施,比如预测到某一时刻某供电臂将出现较大负荷时提前调整三相平衡补偿装置参数或优化牵引变压器运行方式以降低负序电流产生,基于人工智能的负荷预测可提高补偿策略针对性与有效性并提升供电系统运行效率。将牵引变压器、三相平衡补偿装置、电力机车等设备纳入统一智能控制系统以实现多设备协同控制,通过实时监测各设备运行状态及系统中负序电流情况,让智能控制系统依据预设控制策略协调各设备工作实现对负序电流有效抑制,例如检测到负序电流超

标时智能控制系统可同时调整牵引变压器分接头位置、控制三相平衡补偿装置无功输出以及优化控制电力机车负荷,通过多设备协同工作快速降低负序电流保障供电系统稳定运行。

### 5 结论

高速铁路牵引供电体系中负序电流的出现,给电力系统以及铁路运行均造成了不少负面效应。经过对它产生的原理、影响要素展开深入剖析发现,诸如电力机车的运作状况、牵引变压器的接线样式,还有供电臂负荷的分布等要素,都对负序电流的数值起着关键作用。针对上述一系列状况,本文给出了多项补偿举措,像三相平衡补偿装置的运用、牵引变压器的优化配置,以及智能控制策略等,这些举措在不同层面上都能切实降低负序电流。各种补偿策略分别具备自身的优势、不足以及适用范围,于实际应用期间,需要依据高速铁路线路的特定情形,全方位考量成本投入、电能质量标准、系统复杂程度等多项要素,合理挑选并组合补偿策略,从而有效抑制负序电流,强化高速铁路牵引供电系统的稳定性与可靠性,确保高速铁路得以安全、高效运作。从长远来看,随着电力电子技术、人工智能技术的持续进步,高速铁路牵引供电系统负序电流的补偿策略也会不断革新与优化,为高速铁路的长远发展给予更为强大的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 颜湘武,李秉桢,吴炜林,等.基于单相双旋转移相变压器的高速铁路系统负序补偿方法[J].电工技术学报,2024,39(15):4643-4653.DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231863.
- [2] 肖非然.高速铁路牵引供电系统三相负荷不平衡补偿技术研究[D].武汉大学,2020.DOI:10.27379/d.cnki.gwhdu.2020.002233.
- [3] 张珊.高速铁路牵引供电系统负序与谐波问题治理方法研究[D].华东交通大学,2017.
- [4] 唐骥.高速铁路牵引供电系统电能质量分析[D].郑州大学,2016.

作者简介:谢飞(1981—),女,汉族,青海西宁人,本科,研究方向为铁路牵引变电专业。