

# 高速铁路牵引供电系统无功功率和谐波问题的研究

祁智罡 张志付 姜涛

中国铁路兰州局集团有限公司兰州供电段 甘肃兰州 730020

**摘要:** 本论文主要围绕高速铁路牵引供电系统面临的无功功率以及谐波相关难题,实施了全面且深入的钻研。通过剖析高速铁路牵引供电系统的架构以及运行时呈现的特性,对无功功率和谐波的生成原理以及可能导致的不良后果展开探讨。以实际运转数据为依托,采用模拟仿真与实际试验相互融合的手段,探究在各类不同工作状况下,无功功率和谐波的分布态势。同时,提出一系列具备针对性的解决办法,如对牵引变压器的接线形式予以优化、安装无功补偿设施、应用有源滤波器。研究最终成果显示,上述所提出来的方案,能够切实有效地提升系统的电能品质,削减无功功率的消耗,降低谐波的含量。这为高速铁路牵引供电系统达成稳定且高效的运行状态,给予了理论层面的依据以及技术方面的支撑。

**关键词:** 高速铁路; 牵引供电系统; 无功功率; 谐波; 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的重要组成部分,牵引供电系统作为其运行的动力来源,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,高速铁路牵引负荷因具波动性大、非线性等特点,在运行中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,故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。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的非线性特性以及牵引变压器和接触网等设备的电感性负载,这些无功功率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,进而增加线路损耗和设备发热,进一步影响系统稳定性和效率<sup>[1]</sup>。

## 1 高速铁路牵引供电系统概述

### 1.1 系统结构

高速铁路牵引供电系统由牵引变电所、接触网、电力机车等关键部分构成,其中牵引变电所至关重要,负责接收电力系统的三相高压交流电并转换成电力机车适用的单相交流电,完成转换后经沿铁路线路架设的接触网将电能有效输送给电力机车,接触网是供电系统不可或缺一环确保电力机车电能连续供应,电力机车作为牵引负荷主体通过车顶受电弓从接触网获取电能进而驱动列车在轨道平稳高效运行。

### 1.2 运行特点

高速铁路牵引负荷具有的几个显著特点,一是负荷波动性较大,源于列车在启动、加速、制动等不同运行状态下功率需求会显著变化;二是负荷具非线性特性,主要因电力机车采用的电力电子变流装置工作时会产生大量谐波电流,对供电系统稳定性和电能质量有一定影响<sup>[2]</sup>;三是负荷不对称性特点,由牵引供电系统采用单相供电方式致三相电网负荷不平衡。这些特点综合起来使得牵引供电系统运行中不可避免遇到无功功率和谐波问题,需通过相应技术和管理措施解决以确保整个供电系统高效稳定运行。

## 2 高速铁路牵引供电系统无功功率和谐波产生的机理与危害

### 2.1 无功功率产生的机理

在电力机车运行过程中,其内部变压器、电抗器等感性设备消耗大量无功功率这一电力系统不可或缺部分(无功功率与有功功率共同构成电力系统传输总功率),列车启动和加速时因负荷电流增大致无功功率需求随之增加,列车减速和制动时无功功率需求相应减少,且牵引供电系统中变压器励磁电流、接触网分布电容以及供电线路电感等因素均会对系统无功功率产生影响,诸多因素共同作用决定着无功功率在电力系统中的动态平衡及稳定运行。

### 2.2 谐波产生的机理

在高速铁路电力机车所采用的交-直-交传动系统里大量被使用的电力电子器件(如整流器、逆变器等),其工

作时会把标准正弦波形的交流电转换为非标准非正弦波形的交流电这一转换过程不可避免产生的谐波电流，注入牵引供电系统后会在系统中产生谐波电压致使电网电压发生畸变进而影响整个系统电能质量的情况，以及谐波存在不仅降低电力设备效率还可能引发设备过热、振动、噪声等问题严重时甚至损坏设备的状况，使得谐波的管理和控制成为电力系统中极为重要的一个问题。

### 2.3 无功功率和谐波的危害

降低系统功率因数方面：因无功功率存在致系统视在功率增加、有功功率相对减少，由此致使系统功率因数降低，而功率因数降低会让电网传输效率下降、线路损耗增加，且对电力系统稳定性产生不利影响<sup>[9]</sup>。增加设备损耗方面：谐波电流于变压器、电缆等设备中产生额外损耗，使得设备发热加剧、使用寿命缩短，同时谐波还引起设备振动和噪声，影响设备正常运行。影响电网电压质量方面：谐波电流注入电网后使电网电压发生畸变产生电压谐波，电压谐波会对电网中其他用电设备产生干扰影响其正常工作，甚至可能致使设备损坏。引发继电保护装置误动作方面：谐波存在可能使继电保护装置测量元件产生误差，进而导致保护装置误动作，影响电力系统安全稳定运行。

## 3 高速铁路牵引供电系统无功功率和谐波问题的研究方法

### 3.1 数据采集与分析

在高速铁路牵引供电体系里，为了更全面深入地知晓电能质量，实现对其有效把控与治理，我们采取的办法是于诸如牵引变电所、接触网等一些重要关键点位，安装电能质量监测的相关设备。这些设备可以及时、实时地收集获取系统的电压、电流、功率等各类关键的运行信息数据。收集得到的数据，后续会传送到后端配备的服务器，借助专业针对性的数据分析软件实施处理与解析。经过这样的分析处理，我们能够得到在不一样运行状况下，系统的无功功率以及谐波含量的具体情形，并且进一步分析探究它们的变化规则特点以及相关影响要素，为电能质量达到优化提升提供具备科学性的依据支撑。

### 3.2 仿真建模

为更深入研究理解高速铁路牵引供电系统中无功功率和谐波产生与传播规律，采用 MATLAB/Simulink 等先进仿真软件建立系统仿真模型，构建模型时详细考虑牵引变压器、接触网、电力机车等关键元件电气特性以确保能真实反

映其实际工作表现，通过模拟不同工况下系统运行状态观察无功功率和谐波动态变化并研究传播路径，此外经仿真分析验证所提解决方案在实际应用中的有效性确保实际部署前达预期效果。

### 3.3 实验研究

为有效检验仿真模型是否精准以及解决方案在实际中能发挥何种效用，我们搭建起一套小规模的高速铁路牵引供电系统实验平台。此平台可以模拟真实系统所处的运行环境，涵盖多种工况状况。于该实验平台之上，我们展开了一连串的实验活动，对系统在不同工况之下的无功功率和谐波参数加以测量。通过把实验所获数据与仿真得出的结果进行对照分析，我们可以进一步改善仿真模型，使之愈发契合实际运行情形。与此同时，这些实验成果也助力我们对所提出的解决方案作出调整与完善，目的是实现最佳的电能质量管理成效。

## 4 高速铁路牵引供电系统无功功率和谐波问题的研究成果

### 4.1 无功功率分布规律

通过对某高速铁路牵引供电系统的实际运行数据进行分析，得到不同列车运行工况下的无功功率分布情况，如表 1 所示。

列车运行工况	有功功率 (MW)	无功功率 (Mvar)	功率因数
启动加速	3.2	1.8	0.78
匀速运行	2.5	1.2	0.85
减速制动	1.5	0.8	0.90

从表 1 可以看出，列车在启动加速阶段，无功功率需求最大，功率因数最低；随着列车进入匀速运行和减速制动阶段，无功功率需求逐渐减少，功率因数逐渐提高。

### 4.2 谐波含量分析

对同一高速铁路牵引供电系统的谐波含量进行测量，得到各次谐波电流含有率，如表 2 所示。

谐波次数	谐波电流含有率 (%)
3	12.5
5	8.3
7	6.2
9	4.5
11	3.2

从表 2 可以看出，牵引供电系统中主要含有 3 次、5 次、7 次等奇次谐波，其中 3 次谐波含量最高。这些谐波的存在严重影响了系统的电能质量。

## 5 高速铁路牵引供电系统无功功率和谐波问题的解决方案

### 5.1 优化牵引变压器接线方式

为能进一步增强牵引供电系统的运作表现,我们可思索选用多样的平衡变压器接线形式。像 Scott 接线、V/v 接线之类的,便是可供选择的方式。这些接线形式能够起到有效降低牵引供电系统三相不平衡程度的作用,从而达成减少无功功率损失的目标。就拿 Scott 接线变压器来说,它可把三相体系转变为两个彼此独立的单相体系,这样一来,三相电网的负载分布就变得更加均衡。如此,系统的功率因数得以提高,整体的电能质量也能实现优化。

### 5.2 安装无功补偿装置

为推动牵引变电所电能质量迈向新台阶,可在变电所装配并联电容器、静止无功补偿器(SVC)以及静止同步补偿器(STATCOM)等一系列无功补偿设备。此类设备能够对系统的无功功率需求予以实时观测,并自动对无功补偿的数量作出调整,进而提升系统的功率因数<sup>[4]</sup>。其中尤为值得一提的是静止同步补偿器(STATCOM),其具备响应速率快、补偿精准度高以及调节区间广等诸多长处,能够更为妥善地契合高速铁路牵引负荷快速变动的特性,切实保障电能质量始终处于稳定状态。

### 5.3 采用有源滤波器

于牵引供电体系之中,装设有源滤波器(APF)这一举措,能够对电能质量起到极为明显的优化与提升作用。有源滤波器具体的运行原理是,其会对系统里的谐波电流展开探测,接着生成一股与该谐波电流数值相同、方向相反的补偿电流,借助这样的方式,就能把系统内的谐波电流给冲抵掉,进而使谐波含量得以降低。有源滤波器具备着动态响应速率快、补偿成效佳等长处,它能够切实有效地改进系统的电能质量,有力地保障了供电的稳定性以及可靠性。

### 5.4 优化列车运行控制策略

经由对列车启动、加速以及制动等运行管控策略予以优化,能够对列车的功率需求作出合理调整,让负荷波动得以减少,如此一来,即可降低无功功率与谐波的出现。举例而言,运用智能控制算法,达成列车的平稳启动与加速,防止因电流突变而致使无功功率大幅增加。此优化策略不但能够让列车运行效率得到提高,而且可以减轻对供电系统造成的冲击,提升整个牵引供电系统在性能与可靠性方面的表现。

## 6 结论

该篇论文针对高速铁路牵引供电体系内无功功率与谐

波这一系列问题开展了深度研究。最初,论文仔细剖析了无功功率和谐波出现的根源,以及其对整个系统可能引发的不良影响。紧接着,借助数据采集和分析技术,还有仿真建模方法以及实验探究手段,论文揭示了在不一样的运行状况下,无功功率与谐波呈现出的分布规律和特征<sup>[5]</sup>。基于以上研究成果,论文提出了若干实际可操作的解决办法,目的在于化解高速铁路牵引供电系统里的无功功率和谐波难题。研究结果清晰表明,通过改善牵引变压器的接线模式,配备高效的无功补偿设施与先进的有源滤波器,并且优化列车运行控制策略等举措,能够大幅度降低高速铁路牵引供电系统的无功功率消耗,切实减少谐波含量。如此一来,系统的功率因数和电能质量便得以提升。这些优化措施对于确保高速铁路稳定、安全地运行,具备十分关键的现实意义。就未来而言,随着高速铁路技术持续进步,对电能质量的标准也在逐渐提升,对于无功功率与谐波问题的研究还得进一步深入,解决方案同样需要不断优化,以契合高速铁路发展衍生出的新需求。

### 参考文献:

[1] 古晓东,罗健,王建东,等.高速铁路牵引供电智能建造架构研究[J].电气化铁道,2024,35(06):41-45. DOI:10.19587/j.cnki.1007-936x.2024.06.009.

[2] 顾立新,金同凌,黎宁昊.超长跨海高速铁路桥上牵引供电设备适应性及布置方案研究[J].电气技术与经济,2024,(11):17-20.

[3] 陈冲,贾利民,赵天宇,等.光伏和储能植入铁路牵引供电系统的拓扑架构与控制策略研究综述[J].电工技术学报,2024,39(24):7874-7901. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232167.

[4] 王传启.高速铁路牵引供电品质提升关键技术及工程应用.天津市,天津凯发电气股份有限公司,2024-08-20.

[5] 王科,胡海涛,魏文婧,等.基于列车运行图的高速铁路动态牵引负荷建模方法[J].中国铁道科学,2017,38(01):102-110.

作者简介:祁智罡(1993—),男,汉族,甘肃庆阳人,本科,研究方向为铁路牵引供配电。

张志付(1972—),男,汉族,甘肃兰州人,本科,研究方向为铁路牵引供配电。

姜涛(1983—),男,汉族,甘肃兰州人,本科,研究方向为铁路牵引供配电。