

# 电气化铁路对电网电能质量的影响及治理综述

于燕平 方 林

柳州铁道职业技术学院通信信号学院 广西 柳州 545616

**摘要：**电气化铁路接入电网，引起的谐波、电压波动和偏差、三相不平衡、负序等经接入点进入电力系统，引起电网电能质量问题。文中综述了电气化铁路对电网电能质量影响较大的关键指标，并总结、归纳了不合格指标对电网电能质量的影响，以及铁路部门在提高电能质量、改善电能质量指标（谐波、三相不平衡等）等采取的积极措施，为后续电气化铁路电能质量研究提供参考。

**关键词：**电气化铁路；电能质量；指标；影响；治理措施

近年来，电气化铁路发展迅猛：国家铁路局数据显示，截至 2022 年底，全国铁路营业里程达到 15.5 万公里，其中高速铁路营业里程达到 4.2 万公里；复线率 59.6%；电化率 73.8%。随着电化率的大幅增长，因电力机车是大功率、非线性、移动性、间歇性单相整流负荷，接入电网引起的谐波电流、谐波电压、无功功率、电压波动、三相不平衡、负序等一系列电能质量问题日益突出<sup>[1]</sup>，给电网的安全稳定运行带来风险。为寻求提升电气化铁路电能质量方法，涌现了大量的研究成果，文中归纳、总结了电气化铁路不合格指标及其对电网电能质量的影响、采取的治理措施，希望为铁路电能质量改善与提升提供参考。

## 1 电气化铁路对电网电能质量的影响

### 1.1 谐波电压对电网电能质量的影响

电力机车不同运行工况下，如加减速、频繁启动、升弓、降弓、过分相等，都会产生较大的冲击电流，导致电网电压波动、产生谐波。电气化铁路大量谐波（其中 3、5、7 等奇次谐波尤为显著）注入电网，对系统的安全运行，造成极大危害。文献<sup>[2]</sup>通过对成昆铁路西昌段十个牵引站的电能质量实测显示：各次电力谐波含量远超出了国家标准；冯宏恩<sup>[3]</sup>以某铁路新建 110kV 牵引变电所为例进行电能质量评估，发现注入 PCC 处 3 次谐波电流超标；周轩<sup>[4]</sup>等研究了电气化铁路负荷对电能计量用分割乘法器（TDM）的影响，发现电气化铁路负荷会使 TDM 误差增大；赵宏程<sup>[2]</sup>等人以某穿过薄弱电网的电气化铁路线路为例，统计了 50 次以内的所有奇次谐波含量，发现其 3、5、7、15、17 等奇次谐波含量超标，供电品质受到影响；文献<sup>[5]</sup>中对湖北省电气化铁路谐波进行了研究，发现大量的谐波电流（3 次、5 次、7 次为主）通过供电专线注入电力系统，对电网电能质量产生危害；马天娇<sup>[6]</sup>等人以 220kV 莫合泉变电站为例，开展电能质量测试发现：220kV 莫合泉变电站谐波电流对电网影响严重和 35kV 母线的 3 次谐波电压超标；文献<sup>[7]</sup>中对 11 个网省公司 21 个电气化铁路供电变电站的电能质量普查结果显示，所有的测试点 3 次谐波电流超标，超标率 100%。

### 1.2 电压波动和电压偏差对电网电能质量的影响

电力机车运行工况复杂、多变，受机车司机操作、轨道客观条件和气候条件的影响大，造成电压的波动和偏差，给电力系统造成了一定的影响但在限值范围内。《电压允许波动和闪变》国家标准主要针对电弧焊机、轧机和电弧炉等冲击负荷。电气化铁路对电网有一定的波动性，但诸多研究显示：电气化铁路电压波动这项电能指标符合国标要求，未超出限值。文献中<sup>[3]</sup>用某 110kV 牵引变电所为例计算的电压波动和电压偏差等指标，指标值都在国标限值内。文献<sup>[8]</sup>中根据某电气化业主提供的资料对电能质量参数进行评估，评估结果也表明：公共连接点的电压波动也在限值内；李涛<sup>[9]</sup>等人研究了不同类型、不同辆数列车等 4 种典型工况下对变电站母线电能质量的影响，发现 4 种情况下三相母线电压的毛刺增多，但电压波动影响区别不明显。

### 1.3 三相不平衡和负序电流对电网电能质量的影响

电气化铁路负荷引起的三相电压不平衡波动性和随机性较大，持续时间短，为测量的合理性，测量时按 1min 均方根最大负荷取值。文献<sup>[10]</sup>中电气化铁路负荷造成若羌片区三相电压严重不平衡，造成了某水泥生产单位被迫停产、中交集团某隧道无法施工、矿业电弧炉无法运行，甚至是光伏电站无法正常发电；文献<sup>[11]</sup>中统计了某牵引变电所全天电压不平衡度情况，最大值达 4.5%，95% 概率值达到 2.5%，两个统计值均超出国标规定的标准 2.6% 和 1.3% 限值。

电气化铁路因其单相负荷引起的三相不对称，接入电力系统产生大量负序分量。负序电流给电力系统的安全、稳定运行带来了极大影响。周胜军文中的测试结果显示超过 50% 的省三相电压不平衡度超标、华北、山西、北京等省负序电流大，含量占到正序电流的 50% 左右；机端负序电流超标等<sup>[7]</sup>。

## 2 电气化铁路电能质量分析和治理情况

《电网电能质量技术监督管理规定》中第五条规定：因电网或用户用电原因引起的电能质量不符合国家标准时，按“谁干扰，谁污染，谁治理”的原则及时处理。

### 2.1 电气化铁路谐波的分析和治理

近年来，许多研究者就电气化铁路的谐波问题进行了分析

基金项目：广西高校中青年教师（科研）基础能力提升项目《基于 HHT 算法的电气化铁路电能质量特征提取和自动诊断系统研究》（2022KY1407）项目资助

作者简介：于燕平（1982—），女，汉族，广西资源人，副教授，硕士研究生，主要从事电能质量分析及数据挖掘、病态嗓音识别、铁道供电等相关研究。

方林（1981—），男，壮族，广西柳州人，副教授，本科，主要从事电力线路、变电所综合自动化等课程教学及电能质量分析、变压器分析设计等相关研究工作。

研究,涌现了大量的研究成果。李群湛<sup>[12]</sup>对电气化铁路谐波影响进行了分析并论述了相应对策,其中着重研究了热影响及其计算方法,认为电气化铁路谐波考核、限值应以热影响为基础,实例论证了滤波的有效性和时限性;李群湛,贺建闽<sup>[13]</sup>通过系统等效变换,提出 Scott、Y/d11、V/v 等常见结线牵引变电所的三相通用模型,从而揭示牵引变电所基波和谐波下三相系统的行为过程;郭蕾等<sup>[14]</sup>以 CRH2 动车组为原型建立交-直-交机车的谐波数学模型,仿真计算了牵引和再生制动两种工况下谐波电流和谐波电压的变化情况,研究显示谐波电流主要集中在 3-9 次低频段和 PWM 开关频率的倍数次频带,随着机车功率的变化谐波电流幅频特性显著变化,尤其是谐波含量高的频段;罗中游等<sup>[15]</sup>对某牵引供电系统从测试数据、理论分析和建模仿真等 3 方面对高次谐波异常机理进行了分析研究,发现系统阻抗、线路的等效电容、电抗等因素均会对高次谐波传递产生影响。

## 2.2 电气化铁路三相不平衡和负序电流的分析和治理

电气化铁路是典型的冲击性单相负荷,其接入电网势必会带来三相不平衡和负序的问题,给电力系统的安全运行带来极大危害。文献<sup>[11]</sup>中以我国西部某典型弱电网为例,采用 PSD 软件建立仿真模型,对比分析计算了牵引变电所群 3 种方案(全线所间轮流换相、所群间换相、所内和所间换相)的三相不平衡度,发现采用 V/v 接线牵引变压器增加一次所内换相方案引起的三相不平衡最轻;万卫等<sup>[16]</sup>提出了一种磁控 SVC 综合补偿装置,通过动态调节磁控电抗器可有效减小负序电流和三相不平衡度;袁佳歆等<sup>[17]</sup>提出采用 Steinmetz 优化算法下三站协同补偿方法进行负序不平衡优化控制,仿真表明该方法具有较好的补偿效果;文献<sup>[18]</sup>中基于电气化铁路接入风电汇集地区电网提出了协同控制 SVG 与双馈风电场的负序优化补偿策略;文献<sup>[19]</sup>中提出了一种基于新型牵引补偿变压器与静止无功发生器的负序补偿方案、控制策略和补偿方案的确定方法。

## 2.3 电气化铁路电能质量综合评估和治理

电力牵引对电网电能质量的影响是诸多方面的,如负序、谐波和三相不平衡等,科学的电能质量综合评估和治理方法受到众多研究者的关注。文献<sup>[20]</sup>中提出加装静止型动态无功发生装置(SVG)和高压滤波补偿装置(FC)的方法改善电气化铁路运行过程中负序、谐波、无功和波动等引起的电网电能质量问题;文献<sup>[10]</sup>中根据国网巴州供电公司若羌片区谐波、三相电压不平衡调查数据,用 PSASP 软件对电力机车过境引起的三相电压不平衡进行仿真,提出电网分列运行方式减少电气化铁路冲击对常规用户的影响;周方圆等对 Scott 变压器牵引供电系统提出一种有源装置和无源装置相结合的新型电能治理治理系统,仿真验证其非常适用于 Scott 变压器供电系统负序、谐波等的综合治理<sup>[21]</sup>。

## 3 结论

随着我国电气化铁路的飞速发展,牵引负荷对电网质量的影响和治理措施吸引了众多研究者的关注。铁路电能质量的分析和治理成效既关系到电网的安全稳定运行,也对铁路牵引供电系统的安全运行具有深远的意义。

## 参考文献

- [1] 周胜军,冯满盈.京沪电气化铁路供电电能质量现状:第五届电能质量研讨会,中国陕西西安,2010[C].
- [2] 赵宏程,李再华,曾毅,等.电铁牵引站接入薄弱

- 电网供电质量评估分析[J].电工技术,2023(05):10-12.
- [3] 冯宏恩.电气化铁路接入电网电能质量评估分析[J].机电信息,2023(20):17-19.
- [4] 周轩,钱敏慧,赵剑锋.电气化铁路造成的电能质量问题对电能计量用 TDM 的影响研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(01):28-32.
- [5] 胡斌,邓春年,徐明清.电铁谐波的产生及湖北省电铁谐波情况[J].湖北电力,2000(04):10-12.
- [6] 马天娇,李青,张明江,等.基于莫合泉变电站实测数据分析电气化铁路对电网电能质量的影响[J].黑龙江电力,2021,43(05):412-415.
- [7] 周胜军,于坤山,冯满盈,等.电气化铁路供电电能质量测试主要结果分析[J].电网技术,2009,33(13):54-57.
- [8] 丁秀香,邵文妍.电气化铁路电能质量评估分析[J].电工技术,2022(01):59-61.
- [9] 李涛,崔荣,何小平,等.铁路运行的电能质量影响(二):影响分析[J].电气传动,2020,50(03):107-112.
- [10] 克帕依吐·吐尔逊,焦春雷,李明,等.格库电气化铁路接入对新疆电网电压不平衡影响分析及治理措施[J].电气工程学报,2022,17(04):318-326.
- [11] 赵宏程,李再华,梁海东,等.弱电网牵引变电所群电压不平衡预评估与治理研究[J].供用电,2021,38(12):81-87.
- [12] 李群湛.谐波影响分析与算法研究[J].铁道学报,1991(S1):59-69.
- [13] 李群湛,贺建闽.牵引变电所基波和谐波通用模型[J].铁道学报,1992(03):22-30.
- [14] 郭蕾,李群湛,解绍锋,等.交-直-交高速动车组机车的谐波模型及仿真分析[J].系统仿真学报,2012,24(05):943-946.
- [15] 罗忠游,侯冰,蔡永军,等.电气化铁路牵引线路高次谐波异常机理分析[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(02):136-141.
- [16] 万卫,苏小芳,白尧,等.MSVC 抑制电铁牵引负荷不平衡研究[J].电气化铁道,2009(01):1-4.
- [17] 袁佳歆,李士杰,张晨萌,等.电气化铁路三相不平衡协同补偿[J].电工技术学报,2011,26(S1):218-223.
- [18] 罗忠游,赵普志,段玉,等.电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(19):124-134.
- [19] 王辉,李群湛,解绍锋,等.基于一种新型牵引补偿变压器的牵引变电群贯通供电系统负序补偿[J].电工技术学报,2021,36(10):2140-2152.
- [20] 云明轩.铁路牵引负荷对电网电能质量的影响及治理[J].宁夏电力,2016(06):38-41.
- [21] 周方圆,吕顺凯,胡前.基于 Scott 变压器供电的新型电能质量治理系统研究[J].电气化铁道,2018(01):9-13.