

轨道交通低压配电系统谐波干扰问题及治理措施

黎霏霏

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 611700

【摘要】：轨道交通低压配电系统中谐波干扰问题日益严重，尤其在大功率设备广泛应用的背景下，谐波对电力系统的稳定性、设备的正常运行和能源利用效率产生了不小影响。本文分析了低压配电系统中谐波干扰的来源，阐述了谐波对设备性能的影响，并详细探讨了多种治理措施，包括滤波器的应用、谐波补偿设备的优化及电力质量监测技术的提升等。研究表明，针对不同类型谐波的源头采取针对性措施，可以显著提高系统的稳定性和电能质量，为轨道交通系统的平稳运行提供保障。

【关键词】：轨道交通；低压配电系统；谐波干扰；治理措施；电力质量

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.037

引言

低压配电系统中的谐波干扰问题是当前轨道交通领域的一项重要课题。随着轨道交通设备不断升级与电力需求不断增加，低压配电系统中谐波的影响日益显著。谐波不仅会导致设备发热、故障率上升，还会降低系统的能源利用效率，影响整体运营安全。因此，探索低压配电系统中的谐波源、分析其影响，并通过有效的治理手段进行控制，成为确保轨道交通系统长期稳定运行的关键。如何应对这一问题，提升电力系统的抗干扰能力，成为亟需解决的技术难题。

1 低压配电系统中谐波干扰的来源分析

低压配电系统中的谐波干扰主要源于轨道交通系统中各类非线性负载的运行，特别是变频器、大功率电机、整流装置及照明设备等。这些负载在工作时，会因其内部电气特性，将电流波形失真，产生频率与电力系统基波频率不同的谐波，进而影响电力系统的稳定性。变频器作为轨道交通中常见的设备，在调节电机转速时，通常需要通过整流与逆变过程，这一过程中所产生的高次谐波，对低压配电系统构成了显著的干扰。轨道交通系统中的大功率电机也是谐波源之一。特别是在电动车辆的牵引电机工作时，电机的启动、停机以及负载变化过程中，电流波形会发生剧烈变化，产生强烈的谐波。这些谐波不仅影响电力设备的长期运行，还可能对系统其他设备产生恶劣影响。变压器和其他配电设备在受到谐波的影响时，也会出现额外的热损耗，降低其工作效率。

轨道交通系统中广泛应用的整流装置也是谐波的重要来源^[1]。整流装置在将交流电转化为直流电的过程中，由于整流过程的非线性特性，会产生频率较高的谐波，尤其是二次谐波、三次谐波等。与电力系统基波频率相比，这些谐波频率通常较高，但在系统中依然能够产生不容忽视的影响。随着系统负荷的增加，谐波干扰问题愈加突出，影响范围也愈加广泛，导致低压配电系统中的电流、电压波形发生严重失真，进一步影响轨道交通系统的稳定运行。由于供电系统的设计、施工等因素的不完善，也可能导致谐波的增加。配电线路中接地不良或电缆质量不高，都有可能为谐波的传播提供便利条件，进一步加

剧干扰的程度。因此，谐波的产生不仅与负载设备的运行特性密切相关，还与系统本身的设计及运行维护状况息息相关。

2 谐波对轨道交通低压配电系统的影响

谐波会导致电气设备的过热，影响其正常运行。变频器、大功率电机和整流设备等在受到高次谐波干扰时，会产生额外的热量，这种过多的热量积聚会加剧设备老化，缩短设备的使用寿命。尤其是变压器，在谐波作用下，磁芯和绕组产生的损耗会大大增加，严重时可能导致设备的故障或烧毁，影响供电系统的稳定性。谐波会引发电力系统中电压和电流的波形失真。由于谐波的存在，电流和电压波形将不再是正弦波，而是带有多个频率成分的波形。这种失真可能引发设备的运行不稳定，尤其是对精密的设备和测量仪器产生干扰。轨道交通的控制系统往往依赖于稳定的电源质量，当电压波形受到谐波干扰时，控制系统的工作精度和响应速度将大大降低，甚至可能出现控制失误，影响列车的运行安全。

谐波对电能质量的影响也不容忽视。电力系统中的谐波会导致电能的有效利用率降低，增加电能的传输损耗^[2]。对于轨道交通系统来说，能源消耗的增加将直接导致运行成本的上升，同时也增加了电网的负荷。随着轨道交通的运行频率和负荷的增加，谐波的累积效应更为明显，进一步加重了系统的能源消耗和运行压力。更为严重的是，谐波可能引发配电系统中的共振现象。当系统中的谐波频率与电力设备的固有频率相吻合时，可能发生谐波共振。这种共振现象会导致电气设备的振动增强，产生更大的机械负荷，甚至引起设备损坏。电力系统中各个设备的电气和机械特性相互作用，在谐波干扰的影响下，可能出现更加复杂的故障模式，影响整个配电系统的安全性和可靠性。

3 谐波治理的常见技术及其应用

在轨道交通低压配电系统中，谐波治理的技术方法主要集中在两大类：滤波技术和谐波补偿技术。滤波技术是通过安装各种滤波器设备来抑制或消除谐波成分。常见的滤波器包括有源滤波器和无源滤波器。有源滤波器利用功率电子技术实时监

测谐波并通过逆变器生成与之相反的电流，消除谐波的影响。此种方法具有较高的实时性和灵活性，能够处理动态变化的负荷，适用于负载波动较大的环境。无源滤波器通过并联连接在负载端，可以滤除一定频率的谐波，适用于固定负荷的系统。无源滤波器的成本较低，但处理效果较为有限，通常需要针对特定频率的谐波进行设计和优化。

谐波补偿技术则是通过提供与谐波相反的电流或电压来减少系统中谐波的影响。静态同步补偿器（STATCOM）是一种典型的谐波补偿设备，能够在电力系统中提供无功功率支持，同时实现对谐波的有效抑制^[3]。STATCOM通过调节其输出电压，能够迅速响应负荷波动和电网谐波，确保电力系统的稳定性。另一种常用的补偿技术是并联电容补偿，其原理是在电力系统中加入电容器，利用电容器的无功功率补偿作用，减少谐波对系统的干扰。该方法简单且成本较低，适用于于低压配电系统中。主动滤波与被动滤波相结合的混合滤波器技术在谐波治理中也得到了广泛应用。混合滤波器结合了有源和无源滤波器的优点，能够同时处理不同频率段的谐波。通过合理配置，可以在保障成本效益的同时，实现较为全面的谐波治理。这种技术适用于复杂的负荷环境，特别是在轨道交通系统中，负荷变化频繁且功率需求较大，混合滤波器的应用能够提供更加稳定的谐波治理效果。

除了这些常规的谐波治理技术外，基于电力质量监测的谐波抑制方案逐渐得到重视。通过实时监测电力系统中的电压、电流波形以及谐波含量，可以动态调整补偿设备的工作状态，从而实现更加精确的谐波治理。在实际应用中，通过搭建电力质量监测平台，结合人工智能技术进行数据分析，能够有效识别谐波源并及时采取相应的治理措施，从根本上提高谐波治理的精度和效率。这些谐波治理技术的实施不仅能够有效提高轨道交通低压配电系统的电能质量，还能减少设备故障、延长设备使用寿命、提高能源利用效率，为系统的长期稳定运行提供有力保障。

4 低压配电系统谐波干扰的优化方案

低压配电系统中的谐波干扰问题，需要通过一系列优化方案来解决，以保障轨道交通系统的稳定运行与电能质量。针对谐波源的特点和系统的实际需求，优化方案通常涵盖了谐波源的控制、系统的优化配置以及智能化管理三大方面。在这方面的的工作中，采取主动与被动相结合的手段，能够更有效地降低谐波的影响，提高系统的运行效率。针对谐波源的控制是优化方案中的关键。轨道交通系统中，变频器和大功率电机是主要的谐波源。针对变频器，可以通过优化其工作方式，如采用多级变频器技术，减少电流波形的失真程度，进而减小谐波的产生。通过对变频器的输出端进行适当的滤波，减少谐波向配电系统的传播。对于大功率电机，可考虑使用谐波滤波器或进行电机驱动系统的优化配置，以抑制电流波形中的高次谐波成

分，从源头减少谐波对系统的影响。

优化低压配电系统的配置同样是减少谐波干扰的重要举措。在系统设计阶段，应根据负荷的特性和配电系统的运行情况，合理选择电缆、电容器、变压器等设备，并配置合适的滤波器设备^[4]。针对系统负荷的变化特性，合理选择和配置有源滤波器与无源滤波器，以实现不同频率范围谐波的有效抑制。无源滤波器适用于固定负荷的环境，而有源滤波器则能够更好地适应负荷波动较大的情况。通过合理配置这些滤波器，系统中的谐波干扰可以得到有效控制，确保电能的质量。智能化管理和实时监控技术的引入，为谐波治理提供了更为精准的方案。通过在配电系统中安装电力质量监测装置，实时采集电压、电流波形及谐波含量，结合先进的控制算法进行分析和处理，可以精确识别系统中谐波的来源和类型。这种实时监控系統不仅能够对谐波干扰进行及时诊断，还能根据监测数据动态调整谐波治理设备的运行状态，以保证最佳治理效果。结合智能调度系统，可以对负荷波动进行预测和调整，从而降低由于负荷剧烈波动带来的谐波问题。

为了更好地提升系统的抗谐波能力，近年来，基于电能质量提升的系统优化方案逐渐被引入轨道交通领域。集成化的电能质量管理体系，通过对整个配电网的电能质量进行监测、分析、调控，不仅能够改善谐波污染，还能实现电力资源的优化配置和调度。通过这种综合管理平台，配电系统的电能质量得到实时调整，确保了轨道交通系统的安全、稳定、高效运行。这些优化方案的实施，能够有效降低低压配电系统中的谐波干扰，改善电力质量，减少设备故障，延长设备的使用寿命，并提高系统的能源利用效率，为轨道交通的可持续发展提供有力保障。这些方案的逐步应用，推动了轨道交通电力系统向智能化、精细化管理方向的发展。

5 治理效果评估与后续改进措施

治理效果的评估是衡量谐波治理方案是否有效的重要环节。对于轨道交通低压配电系统，评估治理效果不仅需要考察谐波的衰减情况，还要关注系统整体电能质量的改善。评估过程通常包括对谐波含量、总谐波畸变率（THD）、设备运行稳定性和能效等多方面指标的综合分析。通过实时监测电压、电流波形和谐波的频谱，可以对治理后系统的谐波抑制效果进行精准评估。对比治理前后谐波含量的变化，能够直观地反映治理措施的实际效果。如果谐波含量显著降低，且系统总谐波畸变率符合标准，说明治理方案在一定程度上达到了预期效果。

评估过程中的关键指标之一是设备的运行状态。谐波的抑制应有效减少因过热、电压波形失真等问题导致的设备故障。通过定期检查变频器、电动机和变压器等关键设备的温度、电流波形及运行效率，可以判断治理措施是否有效地保护了设备的正常运行和延长了设备使用寿命。与此同时，监测系统中的能效表现也是一个重要的评估指标。治理后的系统应能够提高

电能利用效率,减少能源浪费,并实现节能降耗目标。优化电力系统的运行,不仅是消除谐波的结果,还应表现为能源消耗的合理化。治理效果的评估需要考虑长期效果。短期内,治理措施可能表现出显著的效果,但若没有持续优化与维护,谐波问题可能会反弹。长期效果的评估应关注治理设备的稳定性与耐用性,是否存在因设备老化或负载变化导致的再度出现谐波问题^[5]。为了确保治理方案的长期有效性,需要建立定期检查和维修机制,对滤波器、补偿设备和监测系统维护进行校准,以保证设备处于最佳运行状态,避免因设备故障或性能下降而影响治理效果。

后续改进措施的实施可以从多方面进行优化。随着轨道交通负荷的不断增加,谐波源也在逐渐发生变化,新的非线性负载和新型电力设备的引入可能带来新的谐波问题。因此,后续的改进措施应包括对新设备的适配与优化,确保新设备投入使用后能够与现有的谐波治理设备协同工作,避免新的谐波源引

发系统问题。随着电力电子技术的进步,治理设备的性能也在不断提升。针对当前技术的不足,持续引入新型滤波技术,如宽频带有源滤波器和智能电力质量监测技术,将进一步提升治理效果。随着智能化控制技术的发展,未来的治理方案可能会更具灵活性与实时性。基于大数据和人工智能的智能电力质量管理平台,能够对系统运行状态进行实时监控与分析,根据负荷波动和电网状况,自动调整治理设备的运行参数,确保治理效果的持续性与稳定性。

6 结语

谐波干扰在轨道交通低压配电系统中对设备运行和电力质量带来了严峻的挑战。通过有效的治理措施,如优化电力设备配置、应用滤波器和补偿技术,并结合智能监控系统进行实时管理,谐波问题能够得到有效控制。后续的改进措施应着重于提升治理设备的性能和适应性,以应对日益复杂的负载特性与电力环境变化,确保轨道交通系统的高效稳定运行。

参考文献:

- [1] 陈建明.轨道交通动力照明与低压配电系统节能优化设计[J].光源与照明,2025,(04):11-13.
- [2] 姚雪松.轨道交通中的低压配电系统智能化控制技术[J].集成电路应用,2022,39(04):292-293.
- [3] 殷爽.城市轨道交通数字化低压配电系统的研究与应用[J].隧道与轨道交通,2020,(03):49-52+62.
- [4] 赵凯.低压配电系统谐波处理技术应用[J].电动工具,2025(5):39-42.
- [5] 宁鹏志.通信机房低压配电系统谐波抑制技术研究[J].通信电源技术,2025,42(22):19-21.