

城市轨道交通供电系统的无功补偿要点分析

王元贵

重庆市铁路（集团）有限公司，重庆 401120

[摘要]随着城市轨道交通体系的不断完善，供电系统运行稳定性对整体轨道交通运行质量的影响日益凸显。鉴于城市轨道交通供电系统在电力负荷及线路电感等因素作用下会产生无功电流，影响系统运行质量与设备寿命，深入分析无功补偿技术至关重要。通过提升供电系统运行安全性，可有效保障城市轨道交通系统的能源利用效率。本篇文章据此对城市轨道交通供电系统的无功补偿要点进行了系统论述。

[关键词]城市轨道交通；供电系统；无功补偿

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17183

中图分类号: U223

文献标识码: A

Analysis of Reactive Power Compensation Points for Urban Rail Transit Power Supply System

WANG Yuangui

Chongqing Railway Group Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

Abstract: With the continuous improvement of urban rail transit system, the impact of power supply system stability on the overall quality of rail transit operation is becoming increasingly prominent. Given that the power supply system of urban rail transit generates reactive current under the influence of factors such as power load and line inductance, which affects the quality of system operation and equipment life, it is crucial to conduct in-depth analysis of reactive power compensation technology. By improving the operational safety of the power supply system, the energy utilization efficiency of the urban rail transit system can be effectively guaranteed. This article systematically discusses the key points of reactive power compensation for urban rail transit power supply systems based on this.

Keywords: urban rail transit; power supply system; reactive power compensation

引言

城市轨道交通系统承载着巨大的客运量（2024 年数据显示年客运量已超 300 亿人次），其牵引负荷能耗占系统总能耗的 60%以上，且该负荷的功率因数存在较大范围波动（0.3~0.8）。然而，国家强制标准《GB/T 40493—2021》明确要求轨道交通系统在电网侧的月均功率因数必须达到 0.9 以上。

对我国城市轨道交通系统建设情况进行分析可知，城市轨道交通系统常因线路长、部分区域负荷低等因素导致供电系统功率因数偏低。当前城市化建设对轨道交通运行效率提出更高要求，技术人员需依据系统运行需求，深入分析无功补偿措施。通过对功率因数的高效控制，为城市轨道交通的安全稳定运行奠定坚实基础。

1 城市轨道交通供电系统中无功电流的影响

受到城市轨道交通系统运行特点的影响，供电系统在运行过程中会在整体运行负荷以及自身线路电感等因素的影响下，形成一定量无法产生功率，且不会被消耗的无功电流^[1]。在供电系统的运行过程中，无功电流在产生后只能在系统线路中不断流动，并在影响供电系统中相关设备寿命的同时，通过虚功率的形成降低供电系统的运行质量。具体而言，无功电流对城市轨道交通供电系统的影响通常可分为以下几方面：

1.1 影响电网的正常运行

当产生无功电流后，供电系统的电压也会产生较大波动，并直接导致系统中某些设备的运行稳定性较差。如当无功电流过大时，供电系统的电压会不断降低，并直接导致系统中某些设备无法正常启动与运行。

1.2 降低供电系统的输电性能

随着无功电流的增加，城市轨道交通供电系统线路的电感与电阻均会明显提高，最终导致供电系统运行过程中电能的损耗问题越发严重，并直接影响到城市轨道交通系统的输电能力与供电效率。

1.3 缩短设备寿命

在产生无功电流后，城市轨道交通供电系统的总电流与能耗均会明显增加。在过高电流的影响下，设备的运行温度也会不断提升^[2]。最终因设备老化速度的加快导致其寿命不断缩短。同时，由于无功电流具有不稳定性特征，因此，供电系统电压的频繁变化会影响设备运行的稳定性，并导致设备故障率的明显提升。

2 城市轨道交通供电系统无功补偿的本质与价值

2.1 城市轨道交通供电系统无功补偿的本质

城市轨道交通供电系统具有“昼高夜低、冲击频繁、谐波叠加、容感性交错”的负荷特征，无功功率的时空分布极不均衡。无功补偿从本质上看即运用科学的措施抵消

无功电流对供电系统产生的影响^[3]。在此过程中,常见的无功补偿措施通常需要运用各类电容或电感元件加强对供电系统电压、电流与功率的控制,以此确保电力系统运行过程中的无功功率与有功功率始终处于平衡的发展状态。城市轨道交通无功补偿的本质,是利用全四象限、全时段、全网域的电力电子柔性资源,把“动态无功”从系统累赘转化为“支撑电压、回收再生、降低网损、抑制谐波”的多功能能量资产,最终实现“容感性双向、毫秒级、零惩罚”的低熵供电。若不能实现精准、快速、可逆的无功补偿,不仅导致功率因数低于 0.9 而被电网罚款,而且会引起电压波动、电缆发热及再生制动能量浪费。

2.2 城市轨道交通供电系统无功补偿的价值

2.2.1 提升供电系统的功率因数

城市轨道交通供电系统中形成的无功电流无法转化为支撑设备运行的电能,因此,供电系统电路的功率因数通常较低。在运用了无功补偿设备后,供电系统中的无功电流可转化为电能,减少电压波动和谐波污染,显著提升功率因数及系统运行效率。

2.2.2 提升供电系统的运行稳定性

随着供电系统中无功电流的增加,线路的电压通常会较大波动,严重时甚至会导致供电系统中某些设备的损坏。而在投运了无功补偿装置后,供电系统的电压通常能够保持较为稳定的状态。以此在保障供电系统运行稳定性的同时,避免系统中的设备产生运行故障。

2.2.3 降低供电系统的能源损失

由于无功电流只能在电路中不断流动,无法用作设备运行的能源,因此,当供电系统中存在大量无功电流时,系统整体的能源浪费情况通常较为严重。而在运用了无功补偿器后,系统中的无功电流可被控制在一定范围内,最终实现供电系统运行中能源浪费问题的有效解决。

2.2.4 降低电费支出

在城市轨道交通供电系统的运行中,电费支出始终是衡量系统运行质量的重要因素^[4]。且随着城市化建设规模的扩大,电力公司在收取电费时,通常会通过对客户用电系统功率因数的分析,选择不同的收费梯度。而在运用了无功补偿装置后,城市轨道交通供电系统的功率因数可明显提升,整体的电费支出也会明显降低。最终实现对城市轨道交通供电系统运行成本的有效控制。

3 城市轨道交通供电系统的无功补偿要点

3.1 无功补偿装置的安装

3.1.1 无功补偿装置的选择

随着城市轨道交通供电系统的不断发展,安装无功补偿装置作为提高供电系统功率因数的重要手段,现阶段行业内能够运用的无功补偿装置通常可分为静态补偿装置与动态补偿装置两类。其中,静态补偿装置通常包括电容器、电抗器、静态同步补偿器等。该类补偿器的优点在于

设备的操作频率较低。但由于响应速度较慢,因此,设备运行过程中容易出现过补偿或欠补偿等问题。常见的动态补偿装置则包含静止无功补偿器、可控串联补偿装置等。由于运用了微处理器,因此,此类装置的响应速度极快,且支持双向补偿。但与静态补偿装置相比,其运用成本通常更高。为确保设备优势的充分发挥,在运用无功补偿装置时应充分分析供电系统的运行需求,并根据情况灵活运用多种补偿装置。以此实现对供电系统无功功率的灵活调整。

3.1.2 无功补偿装置的安装与调试

由于城市轨道交通系统的规模较大,因此,在安装无功补偿设备时,需要结合系统情况合理规划设备的安装位置。在确保补偿设备的安全性以及周遭环境的散热性的同时,尽量选择一些便于开展维护操作的位置。以此为设备后续运行管理效率的提升打下坚实基础。在完成补偿装置的安装后,为确保装置运行效率的提升,技术人员需要结合城市轨道交通供电系统的运行需求对装置的参数与控制逻辑进行针对性调整,并通过完善的测试工作明确不同设备的运行特点。以此为供电系统后续的调整与升级提供准确的参考依据。

3.2 借助明确电能计量点规划补偿区域

由于我国的城市轨道交通供电系统普遍会选择集中供电模式,运用自建主变电所从城市电网中接入 110kV 电源,因此,电能计量点的选择通常会直接影响到技术人员对电力系统无功状态的分析与管理效率^[5]。在此过程中,由于各地区城市轨道交通系统在归属方面存在一定差异,因此,在规划补偿区域时,要通过对城市轨道交通系统产权归属、运行模式以及电网结构的全面分析,提高电能计量点的精准性。具体而言,若由轨道交通系统建设单位负责电力系统电源线路的敷设,应当将电能计量点设置在城市变电所的供电源头,以此确保后续的供电系统功率因数计算工作能够充分考量电缆充电无功等所有无功损耗情况,并帮助运营方在准确计算结果的督促下,通过科学措施自主提升供电系统的功率因数,以此达到降低城市轨道交通供电系统无功损耗的目标。但若城市轨道交通供电系统的电源线路的管理在投入使用后由供电所管理,技术人员则应将电能计量点设置在轨道交通主变电所的进线侧。在此种计算模式中,供电系统功率因数的计算将不再考虑供电系统的电缆充电无功。并且,为实现对供电系统整体功率因数的准确把控,轨道交通管理部门与供电部门间要加强沟通,以此确保整体供电系统中无功管理的完善性。若城市轨道交通供电系统与城市变电所均使用单回电源,并通过 T 接形式连接,技术人员则应将电能计量点设置在城市变电所的出线端,以此通过对整体供电系统线路无功情况的全面分析,明确彼此的管理责任,并确保城市轨道交通运营单位与供电单位通过高效合作,共同促进城市轨道交通供电系统运行质量的提升。

3.3 结合城市轨道交通系统发展水平规划无功补充能量

由于城市轨道交通系统的运行负荷通常较大，因此，在不同类型阶段，供电系统的运行特点间也存在着一定的差异。针对这一情况，在应用无功补偿技术时，为确保供电系统功率因数的稳步提高，技术人员应结合城市轨道交通系统的发展水平，对无功补偿设备的容量进行分层设计。具体而言，在城市轨道交通供电系统的设计中，技术人员通常会通过对城市轨道交通系统远期负荷的分析，调成整流变压器、中压环网电缆等设备的安装容量。基于此种模式，在设计无功补偿装置的安装容量时，为灵活满足系统不同阶段的发展需求，技术人员应从城市轨道交通供电系统的初级设计阶段入手，通过对系统未来负荷增长情况的分析，精准计算各运行阶段城市轨道交通供电系统无功补偿装置的容量。以此通过供电系统功率因数的不断提高，保障城市轨道交通供电系统初期的稳定运行，并确保其轻松应对供电系统未来运行负荷增长带来的各项挑战。

3.4 通过精准功率因数校核模式提高容量配置精准性

受到城市轨道交通系统运行特点的影响，加强对供电系统无功功率的准确运算，始终是提高无功补偿装置容量配置精准度的重要措施。在现阶段城市轨道交通供电系统管理中，常用的功率因数较和模式通常包括以下两种：一种是对城市轨道交通系统夜间停运后，供电系统的无功功率进行校核。在此种计算模式中，计算人员需假设夜间轨道交通系统停止运行后供电系统的运行负荷降至了最低。在假设成立的前提下，电缆式供电系统中无功电流的主要产生设备，计算人员可轻松计算出无功补偿设备的理想容量。但由于忽略了不同时间段内城市轨道交通系统运行负荷间存在的差异，因此，过度补偿等情况极为常见。另一种计算模式则是以月为周期，计算供电系统的平均功率因数。由于城市轨道交通系统运行负荷的高峰阶段与低谷阶段存在一定的规律，因此，与前一种计算模式相比，此模式计算出的无功补偿设备容量与城市轨道交通空间系统的运行需求更加贴近。下表1为某案例中两种计算方法得出的无功补偿设备容量。结合案例可知，第1种计算方法强调对供电系统特定状态下无功需求的分析，第2种计算方法则更加重视供电系统在不同阶段的负荷变化，因此，在实际应用中，第2种计算模式得出的无功补偿设备需求更加准确。

表1 两种计算方法的补偿容量

供电系统夜间停运无功功率计算		供电系统月平均功率因数计算	
项目	数值	项目	数值
系统有功功率	567.4kW	月平均有功电度	4290000kW·h
无功功率	804.7kvar	月平均无功电度	2184304kW·h
系统功率因数	0.56	系统功率因数	0.86
目标功率因数	0.84	目标功率因数	0.84
补偿容量	454.7kvar	补偿容量	无需补偿

3.5 通过设备性能的提升降低无功补偿需求

由于供电系统整体负荷与电路线杆是直接导致无功电流形成的主要因素，因此，优化供电系统的性能也是提高供电系统无功补偿效率的重要措施。在此背景下，随着城市轨道交通供电系统技术的不断创新，低压有源滤波技术与逆变型再生能源回馈装置等核心技术的应用，均能够实现轨道交通供电系统运行质量的明显提升。其中，低压有源滤波技术通常能够清除 0.4kV 侧线路中的谐波，并通过补偿电流的输出，实现对供电系统功率因数的动态调整。最终确保城市轨道交通供电系统在各种负荷状态下均能够对电能进行有效利用。而逆变型再生能源回馈装置在投入使用后则可有效吸收城市轨道交通系统在运行过程中释放的能量，并将列车制动时浪费的电能转化为能够被供电系统重复利用的电能。以此通过能源的循环运用，降低无功电流造成的能源损失。在此过程中，由于逆变型再生能源回馈装置输出的交流电压可被调整，因此，供电系统电源侧的有功功率与无功功率分配情况可得到有效控制，最终通过供电系统运行稳定性的提升，达到与无功补偿相同的管理效果。

4 结束语

综上所述，面对社会建设工作对城市轨道交通系统运行质量提出的更高要求，提高供电系统的运行质量已经成为轨道交通系统管理工作中的重点任务。而考虑到供电系统中无功电流的存在会影响到供电系统的运行稳定性与功率因数，技术人员则应结合城市轨道交通供电系统的运行特点，深入研究可行的无功补偿措施与技术。最终通过城市轨道交通供电系统的高效稳定运行，为城市化建设工作效率的提升注入更强的动力。

【参考文献】

- [1]李立颖,周丹,林珊,等.考虑主变电所资源共享的城市轨道交通供电系统无功补偿方案[J].城市轨道交通研究,2024,27(2):53-57.
 - [2]戴丽君,杨立新,张喜海,等.基于轨道交通供电系统双向变流装置分散补偿无功的技术与应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(4):39-45.
 - [3]马静.城市轨道交通供电系统加装无功补偿装置技术应用[J].价值工程,2023,42(22):75-77.
 - [4]赵佳微,汪理,邹大云,等.城市轨道交通供电系统能馈装置无功协调控制方案研究[J].城市轨道交通研究,2024,27(9):193-197.
 - [5]雷霆,刘现军,张智宝,等.城市轨道主变电所无功补偿策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(4):21-26.
- 作者简介：王元贵（1987.2—），女，毕业院校：西南交通大学，所学专业：电力系统及其自动化，当前就职单位：重庆市铁路（集团）有限公司，职务：系统设备管理岗，职称级别：高级工程师。