

双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用

粟毅

重庆市轨道交通（集团）有限公司 重庆

【摘要】双向变流器采用了先进的技术和设备，以确保城市轨道交通的正常运行。通过高效的电力传输和变流装置的协调控制，系统能够为列车提供持续、稳定的动力输出，保证了列车的运行速度和出行效率。同时，系统还配备了多重安全保护机制，以应对潜在的故障和意外情况，确保列车运行过程中的安全性和可靠性，双向变流器还考虑了环保和能源效率的因素。运用先进的节能技术和智能控制系统，系统能够最大程度地减少能源消耗，降低对环境的影响，实现城市轨道交通系统的可持续发展。通过改进设备和优化管理，系统不断提升能源利用效率，为城市居民带来更加便捷、环保的出行体验。双向变流器作为城市轨道交通的核心技术之一，为现代城市的交通运输体系注入了活力和动力。它的稳定性、可靠性和节能性将继续推动城市轨道交通的发展，为城市居民提供更加高效、舒适的出行选择。随着科技的不断进步和创新，相信双向变流器将在未来的城市轨道交通中扮演着更为重要的角色，为城市的可持续发展贡献力量。文章对双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用进行了研究分析，以供参考。

【关键词】双向变流器；城市轨道交通；交通供电系统

【收稿日期】2024 年 5 月 12 日

【出刊日期】2024 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.jer.20240017

Application of bidirectional converter in urban rail transit power supply system

Yi Su

Chongqing Rail Transit (Group) Co., LTD., Chongqing

【Abstract】The bidirectional converter uses advanced technology and equipment to ensure the normal operation of urban rail transit. Through the efficient power transmission and the coordinated control of the converter device, the system can provide continuous and stable power output for the train, and ensure the running speed and travel efficiency of the train. At the same time, the system is also equipped with multiple safety protection mechanisms to deal with potential failures and accidents to ensure safety and reliability during train operation, and the bidirectional converter also considers environmental protection and energy efficiency factors. Using advanced energy-saving technology and intelligent control system, the system can minimize energy consumption, reduce the impact on the environment, and realize the sustainable development of urban rail transit system. By improving equipment and optimizing management, the system continuously improves energy utilization efficiency, bringing a more convenient and environmentally friendly travel experience to urban residents. As one of the core technologies of urban rail transit, bidirectional converter has injected vitality and power into the modern urban transportation system. Its stability, reliability and energy saving will continue to promote the development of urban rail transit, providing more efficient and comfortable travel options for city residents. With the continuous progress and innovation of science and technology, it is believed that two-way converters will play a more important role in the future urban rail transit and contribute to the sustainable development of the city. In this paper, the application of bidirectional converter in urban rail transit power supply system is studied and analyzed for reference.

【Keywords】Bidirectional converter; Urban rail; Traffic power supply system

1 前言

轨道交通供电系统是将电力系统 110kV 电源经电压变换把电力输送到地铁车辆及动力、照明负荷的输变电系统。交流系统的保护主要设置阶段式电流保护、零序电流保护、线路纵联差动保护、变压器瓦斯保护等。直流系统通常设置大电流脱扣保护、逆流保护、电流速断和定时限过流、框架保护等。随着城市化发展进程的持续加快,城市轨道交通作为便捷、高效的公共交通方式,对于缓解城市交通压力、提高出行效率起到了至关重要的作用。然而,随着客流量和运营里程的增加,传统牵引方式已无法满足安全、高效、节能的运营需求,在此背景下城市轨道交通智能化牵引应运而生。智能化牵引供电系统结合了先进的传感器、通信和控制技术,旨在提高供电的可靠性和效率,该系统能够实现精准的能源管理,降低能耗和运营成本,提高轨道交通安全性能。传统的轨道交通牵引供电系统更多关注的是电力的供应与分配,而智能化牵引供电系统则在此基础上,利用先进技术对供电过程进行实时监控、分析和控制,提高了供电效率和可靠性,降低了能源消耗和运营成本。通信技术的引入使得设备间的信息传递更为迅速和准确,有助于实现远程监控和故障诊断,云计算则为大数据分析提供了强大的计算能力,使得海量数据的处理和分析成为可能,不仅有助于提升运营效率,还能为决策者提供有力的数据支持。

2 城市轨道交通供电设备智能供电技术的特点

2.1 传输电压水平较高

该技术采用较高电压级别进行电能传输,有效减少线路损耗,提升传输效率。高电压传输能够在降低单位电能传输成本的同时,增强供电系统的稳定性和可靠性,且这类技术在长距离输电过程中显示出更优的性能,能够满足城市轨道交通沿线供电设备对电能的持续和稳定需求。

2.2 传送电流是单相直流

单相直流供电由于其不变的传输方向和稳定的电流强度,能够有效降低能量损耗,且控制起来较为便捷简单,系统维护方面相对简化,在应对城市轨道交通供电设备的动态负载变化时,单相直流供电能够更快响应调整,保障设备稳定运行。

2.3 采用模块化一体化设计

各个供电系统组件以模块的形式进行集成,实现供电功能的高度集成与空间的最优利用状态,由此简化了供电系统的安装和维护过程,并让系统能够根据实际需求和现场条件灵活配置和扩展。

3 双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用

3.1 双向变流器控制特性

3.1.1 变电所主接线

某市地铁 2 号线全长 24.15 km, 全线共设车站 20 座, 其中牵混所 10 座。每个牵混所设置 2 套整流机组和 1 套双向变流装置。双向变流装置的交流侧通过 35 kV 中压开关柜连接到整流机组同段 35 kV 母线, 直流侧通过 1500 V 开关柜连接到 1500 V 母线。整流机组的额定容量为 2×2200 kW, 具备 150% 过载运行 2 h, 300% 过载运行 1 min 的能力; 双向变流装置的额定容量为 2000 kW, 具备 150% 过载运行 2 h, 250% 过载运行 1 min 的能力。双向变流装置既可以仅作为逆变器运行在回馈模式, 也可以作为双向变流器运行在牵引回馈双向模式。根据整流机组的投入和退出情况, 双向变流装置可分为独立供电和混合供电两种控制特性。

3.1.2 独立供电模式下的外特性

当所有牵混所的整流机组退出, 双向变流装置独立供电时, 根据双向变流器的外特性曲线, 可知整流段采用下垂控制, 以实现相邻牵混所之间功率的均衡分配; 逆变段采用恒压控制, 以实现网压的稳定控制。

3.1.3 混合供电模式下的外特性

当部分牵混所的整流机组退出, 双向变流装置与未退出的整流机组构成混合供电时, 整流段采用分段下垂控制, 其下垂斜率与整流机组相同, 以使双向变流器承担与原整流机组相同的牵引功率。逆变段采用恒压控制, 以实现网压的稳定控制。外特性曲线 ABC 段: ABC 段特性与独立供电模式下的外特性完全相同。外特性曲线 CED 段: CED 段特性的下垂斜率与整流机组相同, CE 段下垂斜率为 15%, ED 段下垂斜率为 3%。在独立供电和混合供电两种模式下, 双向变流器 U_{do} 的整定范围为 1500~1650 V, 逆变启动电压 U_{inv} 的整定范围为 1650~1800 V, 逆变电压启动值的整定需要结合列车再生能量被相邻车的吸收比例、列车闸瓦

制动情况来综合考虑。当双向变流器独立供电运行时,其下垂斜率整定范围为 $0\sim 3\%$,可根据运行需要进行调整。

3.2 混合供电模式

车辆段的2套整流机组投入运行,双向变流器运行在牵引回馈双向模式,空载电压设为 1650 V ,逆变启动电压设为 1720 V ,对运行速度为 80 km/h 的单列车进行 100% 牵引及制动工况试验。混合供电模式下的列车牵引及制动测试参数。列车最低网压为 1505 V ,最高网压为 1767 V ,双向变流器的最大整流功率为 2400 kW ,整流机组的最大整流功率为 2050 kW 。在试验过程中,双向变流器的整流/逆变模式能够与列车的牵引/制动工况自动适应,模式切换平滑稳定,列车运行平稳。当列车处于牵引模式时,双向变流器与整流机组共同向列车供电;当列车处于制动模式时,双向变流器自动切换到逆变模式,切换过程平滑。

3.3 对比分析

分别对比了双向变流装置独立供电、双向变流装置与整流机组混合供电、整流机组供电3种模式下的列车网压情况。当整流机组供电时,列车最低网压为 1460 V ;当双向变流装置与整流机组混合供电时,列车最低网压为 1505 V ;当双向变流装置独立供电时,列车最低网压为 1581 V 。由此可知,采用双向变流器能够有效提高牵引网的最低电压。

4 城市轨道交通智能化牵引供电系统关键技术的发展方向

4.1 柔性直流输电技术

柔性直流输电技术通过使用晶闸管或IGBT(绝缘门双极晶体管)等功率电子器件,来控制直流电压和电流的流向和大小,与传统交流输电相比,柔性直流输电技术具有更高的传输效率和更低的能量损耗,特别适用于长距离输电。在城市轨道交通供电设备中,柔性直流输电技术主要用于连接太阳能光伏板、风力发电机等分散的能源点,以及城市轨道交通沿线的不同电力设备,从这些分散的来源中收集电能并有效输送到需要它的地方,柔性直流输电技术在处理电能的变化和分配方面表现出高度灵活性,能够根据电网负荷的实时变化动态调节输电功率,优化整个电网的能效。

4.2 虚拟同步机技术

虚拟同步机技术用于模拟传统同步发电机的动态行为,使可再生能源发电(如光伏、风能)或储能设备能够像传统的同步发电机一样与电网互动,虚拟同步机技术会全程监测电网的实时频率和电压。当检测到频率下降,意味着电网负载超过供电,就需要增加其向电网的功率输出,类似传统同步机增加转矩以稳定频率。相反,频率上升时,虚拟同步机技术减少功率输出,当电网电压降低时,虚拟同步机技术通过增加无功功率输出来支持电网电压,反之,则减少无功功率输出。在照明系统、信号灯、监控设备等城市轨道交通供电设备的实际应用中,该技术能够通过调节连接到这些设备的电力电子转换器,让其在电网供电不稳或可再生能源发电波动时,依旧能够稳定运行。

4.3 调相机技术

调相机技术又称为同步相量测量技术,是一种用于电力系统的高精度监测技术,通过使用同步相量单元来实时、精确地测量电网中的电压和电流相量、频率以及相位角等参数,根据全球定位系统的时间信号来同步测量电网状态,让不同地点的测量结果在时间上完全同步,由此来准确地比较和分析电网中不同位置的电压和电流波形。

4.4 统一潮流控制器

统一潮流控制器属于第三代FACTS(柔性交流输电系统)元件之一,同时也是功能最全面、控制最强大的晶闸管控制设备,该控制器由两个共享直流侧电容的电压源变换器构成。其中一个变换器通过变压器并行接入电力系统,不仅为另一个变换器提供有功功率,还能通过变压器向系统输送或吸收无功功率。在实际运行时,会使用先进的监控系统实时收集城市轨道交通沿线的供电设备的能耗数据。基于这些数据,利用其内置的算法模型对当前的电力需求进行分析,进而计算出最优的电力分配方案,做出调节电压水平、平衡负荷和优化传输线路的电流分布等动作。特别是在高峰时段或紧急情况下,该技术能够迅速调整电网的运行参数,增加对关键区域的供电或减少非紧急区域的能源消耗,保障城市轨道交通的安全和连续运行。

4.5 半波长技术

半波长输电技术属于一种独特的电力传输方式,其核心特征在于输电线路长度大致等同于工作频率

的半波长, 大约为 3000km (针对 50Hz) 或 2600km (针对 60Hz)。采用此技术的输电线路能够自动平衡无功功率, 无须额外安装无功补偿装置, 整条线路无须设置中间的开关站, 这与直流输电系统相似, 可实现从一个点到另一个点, 或从一个点到整个网络的高效输电。在城市轨道交通智能供电系统中, 要根据电网频率计算出半波长的理论长度, 然后按此长度设计和铺设输电线路, 当电力通过这些特定长度的线路传输时, 由于电磁波在线路中的自然共振, 可以极大地减少能量损耗, 实现远距离的高效输电。此外, 由于半波长输电技术的特性, 整个输电过程中, 无须额外的无功功率补偿和中间开关站, 大大降低了维护成本和系统复杂性。因此, 在城市轨道交通沿线的照明、信号系统、监控设备等供电设备供电时, 这种技术能保证稳定、高效的电力供应, 特别是在跨越广阔地区的城市轨道交通系统中, 半波长技术的优势尤为显著。

4.6 集中智能管理

使用专线将主电网的稳定电源直接引入供电系统中, 为智能轨道交通设备提供电力支持, 考虑到成本效益, 将城市轨道交通沿线的车站、轨行区、停车场、隧道和大型桥梁等关键节点, 参照外部电源分布状态进行划分, 形成几个集中供电区域。这些区域通过建立自有变电站和开关站, 直接与主电网相连, 为智能交通设施提供了一个安全、可靠的电力保障网络。全线采用智能交通通信平台, 传输电力监控的实时数据和指令, 以及 35kV 电网的综合自动化监控信息, 实现了远程自动化的运行管理。这种管理模式有效实施了全线的无人值守, 所有监控与管理操作均在监控分中心远程执行, 大幅提升了运维效率及系统安全性。

4.7 基于 5G 的智能化车载终端。

利用 5G 通信技术将列车上的智能终端与供电系统连接起来, 实现数据传输和控制命令的快速交互, 实现实时监测、故障诊断和远程控制等功能, 提高牵引供电系统的响应速度和可靠性。基于智能运维的牵引供电系统集成架构。通过集成各个子系统和设备, 建立智能化的运维平台, 实现对牵引供电系统的全面管理和控制, 该集成架构提供实时监测、故障诊断、维护优化等功能, 为供电系统的运行和维护提供支持。基于数字孪生的安全管控平台。利用数字孪生技术, 将物理供电系统与虚拟模型相结

合, 实现对供电系统的仿真和分析, 通过建立数字孪生模型, 预测设备的运行状态、优化维护策略, 提高系统的安全性和可靠性。基于多源异构数据融合与分析的故障诊断方法。将来自不同源头的数据进行融合和分析, 如传感器数据、历史故障数据等, 利用数据挖掘和分析算法, 实现故障的快速诊断和定位, 提高故障处理的效率和准确度。这些关键技术的应用将提升城市轨道交通智能化牵引供电系统的智能性、可靠性和节能性, 通过高效的数据传输和分析, 准确的故障诊断和预测, 以及优化的能源管理和维护策略, 可以提高供电系统的运行效率和可持续性。

5 结语

本文基于双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用, 介绍了双向变流器的主电路拓扑, 分析了其运行逻辑和控制特性, 提出了双向变流器独立供电和混合供电两种模式下的控制特性, 并通过单列车试验、正线全线试验, 验证了双向变流器用于城市轨道交通列车牵引供电和再生电能吸收利用的可行性。试验结果表明: ①双向变流器可根据线路上的列车运行情况, 自动、平滑地切换整流、逆变运行模式, 与列车的牵引/制动工况自动适应, 列车运行平稳; ②采用双向变流供电显著改善了列车网压的波动, 避免了列车网压低于 1500V 的情况, 能够显著改善列车的牵引特性。基于双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用, 探索城市轨道交通智能化牵引供电系统关键技术方向。

参考文献

- [1] 薛永端, 汪洋, 徐丙垠. 小电阻接地系统高灵敏度阶段式零序过电流保护[J]. 中国电机工程学报, 2020(19):6217-6227.
- [2] 罗澍忻, 董新洲. 基于 LCC 的高压直流输电线路保护分析及展望[J]. 广东电力, 2019(12):121-129.
- [3] 范广. 地铁供电系统变压器保护及故障分析[J]. 中国设备工程, 2023(8):157-159.
- [4] 陈智敏. 地铁牵引整流器中逆流保护必要性的探讨与分析[J]. 机电信息, 2018(6):6-7.
- [5] 刘宇. 地铁钢轨电位限制装置电压保护异常动作分析及解决方案[J]. 中小企业管理与科技, 2021(7):166-167.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

