

城市轨道交通牵引供电系统及关键技术的探讨

王红伟

南京国电南自轨道交通工程有限公司 江苏南京 210000

DOI: 10.12238/ems.v7i5.13243

[摘要] 本文围绕城市轨道交通牵引供电系统及其关键技术展开深入探讨,旨在提升对该系统的认知并推动技术应用,剖析牵引供电系统的组成,阐述其工作原理为将国家电网的高压交流电经牵引变电所转换处理后,根据馈电线输送至接触网再由列车受电弓获取电能驱动列车运行,制动时产生的再生制动能量可经回流线返回系统。同时分析供电方式选择技术,综合运用这些关键技术能保障城市轨道交通牵引供电系统稳定可靠运行且提高能源利用效率。

[关键词] 城市轨道交通;牵引供电系统;关键技术

城市轨道交通作为城市公共交通的重要组成部分,在缓解城市交通拥堵,促进城市发展方面发挥着关键作用,深入探讨城市轨道交通牵引供电系统及其关键技术,对于提高轨道交通的服务质量以及实现可持续发展具有重要的现实意义。

一、城市轨道交通牵引供电系统概述

(一) 牵引供电系统的组成

牵引供电系统由多个关键部分构成,其中牵引变电所作为整个系统的能量转换枢纽,借助变压器等设备将来自国家电网的高压交流电转化为适合轨道交通车辆使用的电压等级,以常见的直流牵引供电系统为例,会把高压交流电整流成直流 1500V 或 750V,其稳定运行直接关系到后续供电的可靠,所以需要对其内部的变压器和整流器等设备进行定期维护与监测,以此确保电能转换的高效和安全。

接触网作为向轨道交通车辆输送电能的直接通道,通常架设在轨道上方并通过受电弓与列车连接,其结构设计需综合考虑列车的运行速度以及线路的地形条件等多种因素,在高速运行的线路上接触网需具备良好的弹性和稳定,保证受电弓与接触网之间可靠接触,减少离线现象发生进而确保列车能够持续获得稳定的电能供应^[1]。

馈电线负责将牵引变电所输出的电能输送到接触网,其选型和铺设要依据线路的负载需求和距离来确定,合理的馈电线设计能够降低电能传输过程中的损耗并提高供电效率。回流线的作用是为列车运行时产生的电流提供返回牵引变电所的路径,它与轨道和大地共同构成电流回路,保障整个供电系统的电气完整。

(二) 牵引供电系统的分类

直流牵引供电系统具有结构简单以及控制方便的优点,广泛应用于城市轨道交通,特别是地铁和轻轨系统,其较低的电压等级使列车的电气设备相对简单,降低了车辆的制造成本和维护难度,但直流牵引供电系统的供电距离相对较短,需要设置较多的牵引变电所来保证沿线列车的正常供电。

交流牵引供电系统适用于一些高速大运量的轨道交通线路,它采用较高的电压等级供电,能够实现较长距离的电能传输并减少牵引变电所的数量,该系统技术相对复杂需要先进的变流技术和控制设备来确保列车稳定获取电能,而且在减少谐波干扰和提升电能质量上有一定优势,有助于提高整个轨道交通系统的运行效率和可靠。

(三) 牵引供电系统的工作原理

电能从国家电网进入作为牵引供电系统起点的牵引变电所,国家电网提供电压等级通常较高的高压交流电,牵引变

电所的主要任务是对这些高压交流电进行处理,借助变压器将电压降低到适合轨道交通车辆用电需求的水平,以常见的直流牵引供电系统为例,变压器先将高压交流电转换为较低电压的交流电,再经由整流器利用半导体器件的单向导电性把正负交替变化的交流电转变为一般为直流 1500V 或 750V 的直流电,在这个过程中牵引变电所如同能量转换和调节的中枢,精确控制输出电能的参数以确保符合列车运行要求。

经过牵引变电所处理后的电能,依靠馈电线输送到接触网,馈电线如同电能传输的桥梁,其需依据线路的实际情况包括负载需求和距离等因素进行合理选型和铺设,保证在电能传输时尽量减少损耗。接触网作为特殊的输电线路通常架设在轨道上方,要考虑列车的运行速度以及线路的地形条件等,在高速运行的线路上,接触网需具备良好的弹性和稳定性来保证与列车的受电弓可靠接触。

列车上的受电弓通过机械结构和电气连接与接触网紧密接触,进而将接触网上的电能引入列车内部的电气系统,列车的电气系统利用这些电能驱动牵引电机使列车前进,牵引电机把电能转换为机械能并通过传动装置带动列车的车轮转动,同时列车在运行时会根据运行状态对电能进行合理分配和使用,以启动时为例,需要较大电能来克服惯性,而匀速行驶时则消耗相对稳定的电能。

当列车制动时牵引电机可转变为发电机工作模式将列车的动能转换为电能即再生制动能量,这些再生制动能量经由回流线返回牵引供电系统,回流线与轨道和大地共同构成电流回路保障整个供电系统的电气完整性,返回的再生制动能量能被其他列车利用或者通过能量吸收装置处理,实现能量的回收和再利用。

二、城市轨道交通牵引供电系统关键技术

(一) 供电方式选择技术

供电方式主要包含集中供电,分散供电和混合供电这几种类型,集中供电是借助专门设置的主变电所把城市电网的高压电源转化为适合轨道交通使用的电压等级,再向沿线的牵引变电所和降压变电所供电,这种供电方式便于管理和控制,主变电所可进行集中监测和维护,能有效保障供电可靠,还可充分利用规模效应降低建设和运营成本,但存在一定局限性,一旦主变电所出现故障可能影响较大范围供电,一些大型城市的轨道交通网络若主变电所因设备故障或外部因素停电,可能致使多条线路的列车运行受影响^[2]。

分散供电是沿线的各个牵引变电所和降压变电所直接从城市电网的不同区域取电,这种供电方式灵活性较高,每个变电所可依据自身需求以及周边电网的情况进行独立供电配

置, 在一些地形复杂或城市电网分布不均匀的地区, 分散供电能更好适应实际情况, 不过其管理难度相对较大, 各个变电所之间的协调和同步较为复杂, 由于分散取电可能增加与城市电网的接口数量, 提高供电的不确定性和管理成本。

混合供电结合了集中供电和分散供电的特点, 它在部分区域采用集中供电以确保主要线路和关键节点的供电可靠, 在其他区域采用分散供电以提高供电的灵活性和适应性能, 根据轨道交通线路的具体情况进行优化配置充分发挥两种供电方式的优势, 城市中心区域因客流量大线路密集可采用集中供电, 而在城市边缘或地形复杂的区域则可采用分散供电^[3]。

表1 变压器类型对比表

变压器类型	结构复杂度	成本	三相平衡情况	过载能力	适用供电系统
单相变压器	相对简单	较低	三相不平衡问题突出	一般	直流牵引供电系统部分场景
三相变压器	相对复杂	较高	能较好地平衡三相负荷	较强, 能应对大电流冲击	交流牵引供电系统及对三相平衡要求高的场景

整流器的工作原理是将交流电转换为直流电以满足轨道交通车辆直流供电的需求, 常见的整流器类型有二极管整流器和晶闸管整流器, 二极管整流器结构简单可靠性高, 但无法实现对输出电压的调节, 晶闸管整流器则可借助控制晶闸管的导通角来调节输出电压。在应用中需根据具体的供电要求选择合适的整流器类型, 同时为提高整流效率以及降低谐波含量可采用多脉波整流技术和有源滤波技术, 多脉波整流技术可减少整流过程中产生的谐波电流降低对电网的干扰, 有源滤波技术则可实时检测和补偿谐波电流, 提高电能质量。对于采用整流器将交流电转换为直流电的情况, 输出直流电压与交流输入电压以及整流电路的形式有关。以三相桥式整流电路为例, 其输出直流电压公式为:

$$U_d = 2.34U_{2\phi}$$

U_d 是整流器输出的直流电压, 单位为伏特 (V); $U_{2\phi}$ 为整流变压器二次侧相电压的有效值, 单位同样是伏特 (V)。

(三) 接触网技术

架空接触网作为较为常见的形式, 借助支柱以及悬挂装置等将接触网架设在轨道上方, 这种结构的优点是安装和维护相对方便适用于各种地形和线路条件, 城市地铁和轻轨线路中架空接触网能够灵活适应不同的弯道和坡度, 接触轨则是安装在轨道一侧或中间的导电轨, 列车依靠集电靴与接触轨接触来获取电能, 其优点是受气候影响较小外观较为整洁, 在一些对景观要求较高的区域如城市中心的轨道交通线路应用较为广泛。

简单悬挂作为较为基础的悬挂方式, 结构简单成本较低但弹性较差, 在列车高速运行时受电弓与接触线之间的接触压力变化较大, 容易产生离线现象进而影响供电质量。弹性悬挂通过增加弹性元件, 改善了接触网的弹性性能, 让受电弓与接触线之间的接触更加稳定, 在高速轨道交通线路中通常采用弹性悬挂方式, 以此确保列车在高速行驶时能够持续稳定地获取电能。

(四) 再生制动能量吸收技术

当城市轨道交通列车制动时牵引电机转变为发电机工作模式, 把列车的动能转换为电能, 这部分电能即再生制动能量, 在传统轨道交通运行里若不利用这部分能量, 它就会以热量形式被浪费, 而借助再生制动能量吸收技术能将这部分能量回收再利用提高能源利用效率^[4]。

再生制动能量吸收装置类型不同特点也各异, 电阻吸收装置作为较为简单的吸收方式是将再生制动能量消耗在电阻上并转化为热能散发出去, 这种装置优点是结构简单成本较

(二) 牵引变电所技术

牵引变压器类型多样, 常见的有单相变压器以及三相变压器等, 不同类型的变压器适用于不同的供电系统和运行条件, 单相变压器结构相对简单成本较低, 但三相不平衡问题较为突出, 三相变压器则能更好地平衡三相负荷但结构和控制相对复杂。性能要求上牵引变压器需要具备较高的过载能力以应对轨道交通列车启动和加速时的大电流冲击, 同时要具有良好的绝缘性能和散热性能保证其长期稳定运行, 为提高牵引变压器的效率, 可采用先进的制造工艺和材料如采用低损耗的铁芯材料减少能量损耗, 以及采用高效的散热装置降低变压器的温度。

低且易于安装和维护, 但缺点明显, 它把能量以热能形式消耗, 未实现真正意义上的能量回收, 还会产生大量热量需要良好的散热条件。电容吸收装置是利用电容储存再生制动能量, 电容因具有充放电速度快的特点能快速吸收和释放能量, 当列车制动产生再生制动能量时电容迅速充电储存能量, 需要能量时电容再将储存的能量释放出来, 不过这种装置虽可实现能量的短期储存和利用, 但电容容量有限储存的能量相对较少。

(五) 供电系统自动化技术

牵引供电系统的监控与保护能实时采集牵引供电系统各部分包括电压电流以及温度等参数的运行数据, 工作人员借助对这些数据的分析和处理可及时了解系统运行状态, 监控系统检测到某一牵引变电所的电压异常升高时能迅速发出警报提醒工作人员检查和处理, 同时监控系统还可实现远程监控和操作, 工作人员能在控制中心对各个牵引变电所和接触网设备进行远程控制, 提高故障处理的及时性和效率。

保护装置能在系统发生故障时迅速动作, 切断故障电路防止故障扩大, 保护设备和人员安全, 常见的保护装置有过流保护以及过压保护等, 过流保护可在电路中电流超过设定值时自动切断电路避免设备因过流损坏, 过压保护能在电压过高时采取措施保护设备免受高压冲击, 差动保护能精确检测出电路中的故障点并迅速将其隔离, 确保非故障部分正常运行。

结论:

伴随城市轨道交通的持续发展和技术的不断创新, 应进一步加强对这些关键技术的研究和改进, 不断提高牵引供电系统的性能, 进一步优化牵引供电系统方案提高系统供电质量和能源利用效率, 为城市轨道交通的安全高效运行提供更有力的保障, 推动轨道交通事业的持续健康发展。

[参考文献]

- [1] 李建. 基于 IGBT 技术的城市轨道交通直流牵引供电系统优化[J]. 电气时代, 2025, (02): 99-101.
- [2] 燕振刚, 田广辉, 陈显志. 城市轨道交通牵引供电系统专用轨回流技术综述[J]. 现代城市轨道交通, 2024, (01): 52-59.
- [3] 王忻, 吉祥雨, 韩博衍, 等. 城市轨道交通低碳节能技术下牵引供电系统仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (10): 79-84. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.10.014.
- [4] 罗建民, 黎琦, 董招, 等. 城市轨道交通供电系统施工关键技术研究与应用[J]. 安装, 2023, (S1): 122-123.