

浅析地铁直流牵引供电系统

赵翔

杭州市地铁集团有限责任公司 浙江 杭州 310017

【摘要】：城市轨道交通牵引供电系统是城市轨道交通系统的重要组成部分，它为电力机车提供主要动力来源，是电力机车稳定运行的重要保障。高铁通常采用交流牵引供电系统，而地铁作为城市轨道交通的主要形式则采用直流供电系统。地铁一般受列车设计、载客量、车型等因素限制，其负荷功率并不是很大，由于地铁线路的长度通常为几十公里，沿线变电站供电半径较小，无需高压即可满足供电需求。此外，使用直流供电与供电相当，电压损失小。此外，地铁线路多数处于人口稠密地区，其供电电压不宜太高。由于以上原因，目前世界各国的轨道交通均采用直流供电系统，电压并不高，通常为 DC 550-1500V。在不同的交通方式中不同的历史发展时期有多个档级，本文对地铁直流牵引供电系统进行了分析。

【关键词】：地铁；直流牵引；供电系统

A Brief Analysis on Metro DC Traction Power Supply System

Xiang Zhao

Hangzhou Metro Group Co., Ltd. Zhejiang Hangzhou 310017

Abstract: Urban rail transit traction power supply system is an important part of the urban rail transit system, it provides the main power source for electric locomotives, and is an important guarantee for the stable operation of electric locomotives. High-speed rail usually uses AC traction power supply system, while subway as the main form of urban rail transit uses DC power supply system. Subway is generally limited by train design, passenger capacity, model and other factors, and its load power is not very large. Because the length of subway lines is usually dozens of kilometers, the power supply radius of substations along the line is small, so the power supply demand can be met without high pressure. In addition, the use of DC power supply is equivalent to the power supply, and the voltage loss is small. In addition, most subway lines are located in densely populated areas, and their power supply voltage should not be too high. Due to the above reasons, the current rail transit in the world adopts DC power supply system, the voltage is not high, usually DC 550-1500V. This paper analyzes the DC traction power supply system of subway.

Keywords: Subway; DC traction; Power supply system

人们的出行或工作都离不开地铁，而地铁直流牵引供电系统能够保证地铁稳定的工作和行驶，为广大市民创造了相对安全的乘坐环境。通常情况下，直流牵引供电系统型地铁牵引整流机组、直流母线、牵引网、回线网4个部分组成，4个部分中的每一个都可以独立组成一个保护系统，因此能够对牵引系统的前后形成多重保护。由于地铁在运行过程中，牵引网长期承受较大的摩擦力和冲击力，金属材料容易达到性能极限，并可能引起疲劳。因此，只有加强对牵引网系统的保护，才能提高地铁直流牵引供电系统的安全。在本文中，将对地铁直流牵引供电系统进行简要的理论分析和研究。

1 地铁直流牵引供电系统的特点与基本构成

1.1 特点

地铁直流牵引供电系统包括架空接触网和牵引变电所等结构。由于它与地铁相连，又是独立的，很难受到外界的影响，对地铁的运行起着重要的作用。而针对供电系统馈线实施有效保护，可以相应地减少故障次数，并防止故障范围的扩大，同时，馈线保护具有变化率高的特性。即地铁在其行进过程中，最高电流变化率将呈现稳定趋势，而在馈线延长阶段，故障电

流变化率与电流变化率限值比较略低。因此，馈线保护有利于维持供电系统平稳。

1.2 地铁牵引供电系统的基本构成

1.2.1 地铁供电系统构成

城市轨道交通供电方式一般有集中式供电、分布式供电、混合供电等。其中杭州地铁采用110/35kV两级电压集中供电方式，牵引供电系统和动力照明供电系统共用中压供电网络，而地铁内部供电主要包括牵引供电系统和照明供电系统，牵引供电系统会将三项高压交流电变成适合地铁车辆应用的低压直流电。馈电线会将牵引变电所的直流电送到接触网上，地铁会通过受流器直接在接触网上获得电能。动力照明供电系统主要提供照明系统、风机、水泵等。

1.2.2 地铁车辆牵引供电系统构成

地铁牵引供电系统主要由牵引变电所和牵引网组成。目前地铁牵引供电系统普遍采用直流供电方式，牵引变电所是地铁牵引供电的核心。牵引变电所的位置和容量是根据地铁行车对数和使用高峰负荷牵引功率的地铁车厢类型来计算的，牵引变

电所必须满足供电充足、运行快速、满足最高运行要求的要求。在超出牵引变电所最大负荷要求的情况下，相邻变电站需要一定的过载能力，特别是任一牵引变电所出故障时，相邻牵引变电所能通过接触网越区供电保证地铁的正常运行。牵引网是设置在轨道周围为地铁列车供电的设备，杭州地铁采用DC1500V架空接触网供电、走行轨回流方式，架空接触网地下区段采用刚性悬挂、地面段（车辆段/停车场）采用架空柔性悬挂接触网，各地可根据不同线路特点选择不同的供电方式。

2 直流牵引供电系统短路故障类型

直流牵引供电系统结构复杂，在运行过程中，因外部环境（如雷击、水淹）、设备磨损与老化严重、设备制造工艺缺陷、违规操作等因素都可能导致系统无法正常供电。其中，短路故障是最常见的故障类型，一旦地铁供电系统短路，后果非常严重。常见故障现象包括：电流值在很短时间内会迅速增大、设备烧毁等，正确地分析并掌握短路中的暂态过程及各电气量的变化情况对配置一套性能良好、配合协调的保护方案有重要的参考意义价值。虽然可以通过物理实验来模拟短路，但由于在实验中模拟短路的成本高且存在一定的风险，尤其是安全方面的风险，模拟实验方法并未被广泛采用。另外也可以通过分析和理论计算得到理论上的短路参数，但理论分析与实际运行仍存在差异，计算结果与实际值也存在误差，仿真软件可以仿真各种故障条件下的短路电流特性和故障参数，牵引供电系统可根据参数设计仿真规划和设备选型过程。当不同的地方出现不同类型的短路时，电流段的特性也会发生变化，因此，作为可靠的安全装置，可以准确判断其故障位置，并准确判断故障类型，从而快速修复故障，有效保护地铁供电系统，常见的错误类型包括：

2.1 金属性短路故障

金属性短路是永久性接地故障。当接触网或馈电线通过金属物体与钢轨之间发生了短路故障而造成电流持续升高的故障现象。

2.2 非金属性短路故障

非金属性短路故障是一种间歇性接地故障，它是指由于绝缘性能降低或老化而在回路中出现了泄漏电流或电弧短路，如接触网上搭接了金属含量较低的物体，钢轨的绝缘底座老化致使回路中出现泄漏电流等。

2.3 非正常运行状态

随着频繁地发车、刹车、地铁超载，牵引网的运行电流急剧增加。在这种情况下，电流特性很容易与短路电流混淆，容易造成安全违规，可能会影响地铁列车的正常运行。

3 地铁直流牵引供电系统保护设计分析

地铁直流牵引供电保护系统的设计应提供全面的功能，以

电流保护为主，电压保护为次，有效防止故障发生，并根据地铁电网的稳定性要求提供合适的断路器，为确保设备满足设计负载的情况下，具备良好的灵敏度。在此期间，电力牵引供电系统保护设计工作必须能够评估对电气系统的潜在危害，使用供电对策来定位常见故障和潜在的功能缺陷，确保正确安装断路器并检测过载电流，避免因过载而发生或损坏电气设备。同时，在整流回路和直流断路器的安装过程中，为避免和影响安装误差，需要根据两种设备不同原理和功能进行详细研究。

首先，如果在地铁系统运行时电气系统出现故障，若出现供电系统跳闸的状况，则地铁测量在经过接触网分段时便极易受冲击电流作用产生额外电流，将电气干扰降至最低的联网系统。因此，在地铁直流牵引供电系统保护设计工作中，必须尽量提供系统保护措施，并加强电网系统监控水准，以此避免系统跳闸问题的出现。

其次，在保护电力系统时，设计人员必须根据电力系统的运行状况分析潜在风险，并借助有机联系消除直流系统中可能出现短路的风险，避免供电过载等隐患，提供供电功能。

最后，在常见的故障点，设计人员必须根据故障问题选择合适的保护措施，防止直流供电系统受到外部环境等因素的影响，以确保可靠运行。

4 地铁直流牵引供电系统保护技术分析

4.1 大电流脱扣保护技术

根据地铁直流牵引供电系统故障资料可知，短路电流问题在系统中发生频率最高。只有在馈线受到保护的情况下才能避免短路，大电流脱扣保护装置是一种在暴露于电路时隔离保护设备的方法，根据关断保护技术的原理，当电力系统发生短路或其他故障时，当有大电流流过时，开关会自动摆动以断开馈电线，防止中断线路供电。另外，从以往直流牵引供电系统故障来看，当直流断路器检测到线路瞬时电流大于额定要求时，会在短时间内断开断路器，并及时将线路转移到备用状态，确保地铁系统正常运行，还提高了电力系统的稳定性。

4.2 双边联跳保护

直流供电系统中常见的短路故障极易导致范围扩大，例如，当靠近某个牵引变电所A的地方发生了短路故障，牵引变电所A直流保护装置检测到故障，所内直流柜跳闸，此时相邻的牵引变电所B直流保护装置未能检测到短路故障，无法及时切断同一供电臂的短路电流，这时需要引进双边联跳保护，牵引变电所A直流保护装置将故障联跳信号发给牵引变电所B，使短路供电臂也能瞬时切除供电，最大限度地限制短路电流。双边联跳保护同时也具备某个牵引变电所解列的情况下，大双边供电运行模式下的大双边联跳。

4.3 框架保护

为避免降低直流牵引供电内部绝缘失效时的人身风险，每个牵引变电站在直流系统的底盘上都配备了一套漏电保护装置。保护包括反映过电流的直流和过电流保护。触摸电压反应保护。机箱式电流保护器保护电流检测直流设备对地的泄漏电流并启动保护动作，当改变直流装置的绝缘且柜内直流装置的漏电流达到设定值时，电流型外壳保护动作，使站内所有直流断路器快速跳闸。电压保护检测直流设备外壳与直流设备阴极之间的电压，启动保护动作。由于设备外壳电流保护器的阻抗很低，可以认为直流设备的外壳直接接地。直流设备正极外壳中的短路会提高接地电位并确定总线和接地之间的电压。当电压超过整定值时，电压型框架保护动作，同电流型框架保护相同，跳开本站内所有的直流开关、交流侧进线开关及邻所向本区段供电的直流开关，故障排除后，需人工复归框架泄漏保护，断路器才能重新投入。

4.4 电流定时限保护

4.4.1 电流速断保护

电流速断保护是过流保护的一种，它在设置整定值时需躲过馈线的最大负荷电流。其中，负荷电流会受客运量、能量吸收装置状态、行车间隔等因素的影响。在出现过流情况后，保护装置起到保护作用，即使直流断路器跳闸。设置高压保护的目的是提供快速动作的短路保护，以在电流速断时系统发生短路时快速清除短路。

4.4.2 过流保护

城轨供电系统的保护方案除了配置大电流脱扣保护和电流速断保护外，还必须具有能够保护线路全长的固定浪涌保护。为防止列车过载时过流保护跳闸，过流保护通常会感应到电流的上升，所以过电流保护一般检测到电流增大延时几十秒后再出口跳闸信号。列车正常发车时，流量略有增加后逐渐减少，恢复保护复位。当发生短路时，短路电流不断增减，保护插座跳闸。列车的初始位置和故障状况与运行延误无法区分，但是以牺牲保护的速动性为代价的，因此不能用作主保护，只作为近端故障的后备保护。整定原则是防止常规列车移动，通过设置不同的仲裁流程和延迟时间可以选择溢出保护。

4.5 自动重合闸

使用自动重合闸的目的是在短时间击穿（雷击、避雷电路

过载等）后重新启动线路。但是，由于大多数短路都是短暂的，因此可以使用自锁系统来提高系统可靠性。定期再次关闭（持续时间可调）。合闸后，禁止重合闸称为一次循环，允许重合闸称为二次循环（通常很少使用）。在故障后复位功能中，保护继电器立即重合，与提前设定的保护时间无关，重合后再次断开。根据保护继电器的设置，重新启动后，运行过程中无法清除故障。发生事故后，继电保护会先按设定的保护时间进行保护，然后再关断。

4.6 电流上升率保护和电流增量保护

电流上升率保护和电流增量保护是地铁牵引供电系统直流馈线保护中的重点和核心，利用该技术能够同时实现对电路的近端保护和远端保护，并且该技术的抗干扰性较强能够有效减少因为单方面的干扰而产生的错误动作情况。一是瞬时跳闸二是延时跳闸，这两种方法确定何时发生特定情况。前者主要用于非接触电路的保护，后者用于电路的距离保护。该技术的原理是在地铁电网运行过程中改变流量。在此期间，保护装置有效地测量电流的不断增加。当电流达到一定值时，系统检测到直流供电并进入保护模式。当直流供电进入保护模式时，系统会持续监控电路的当前状态。增加电流后达到稳定状态，如果不超过默认值，系统会自动解决问题，但电流会继续增加，最大值会继续增加，但如果电流继续上升峰值仍不断提高且超过标准值系统就会立刻切断电路进行瞬时跳闸动作来保护电路。

4.7 热过负荷保护

由于地铁车辆具有车流量大、行驶速度快、行程时间短的特点，正常运行时有较大的负载电流流过电力电缆，设计电缆时需要检查热效应。但长期超载时，负载电流会长期超过额定值，会导致发热，极大地影响电缆的绝缘能力。如果不及时采取行动，将会导致电缆击穿等恶性事故，热过载保护取决于热流的影响，过载电流越大，启动时间越短。

5 结语

总的来说，安全、可靠、无故障运行的供电系统是地铁安全有序运行的基础。直流牵引供电系统应在确保向地铁车辆安全、可靠供电的前提下，尽量减小甚至消除不必要的停电时间，从而提高经济效益。同时，当发生故障时，也需要采用合理、准确的故障判断方法，迅速切除故障，以保证行车安全。

参考文献：

- [1] 李海翔.浅探地铁直流牵引供电系统馈线的保护技术[J].科学技术创新,2021(18):166-167.
- [2] 李晴.地铁直流牵引供电系统模型及保护研究[D].西安工业大学,2021.
- [3] 何松原.浅析地铁直流牵引供电系统[J].中外企业家,2020(14):233.
- [4] 陈自满.地铁直流牵引供电系统馈线的保护技术研究[J].科技创新与应用,2014(24):289.