

摘要 上海轨道交通1号线发生了牵引变电站直流开关与地铁列车高速开关的频繁跳闸故障。通过对跳闸故障的统计信息与特征的归纳,提出了四项初期对策,并从这初期收效中得出了持续超载是发生跳闸故障的重要原因的初步意见,同时对故障性质的离散性现象和非超载条件下的跳闸现象进行了分析。提出了在目前客流情况下,继续采取各种分流限流措施,增加运能;对一些车况差的列车和特殊区段进行重点检测;加强检修和保养,及时更换老化的器件和设施等建议。

关键词 牵引直流开关;跳闸故障;超载

上海轨道交通1号线牵引变电站直流开关及1号线列车高速开关曾频繁发生跳闸,影响了地铁的正常供电与列车的安全运营。针对1号线跳闸故障情况,从牵引供电系统、列车牵引系统、列车自动运行(ATO)、钢轨回流、弓网关系、轮轨关系以及综合客流等相关方面,进行了认真的分析和研究。

1 跳闸故障的统计信息与特征

1.1 跳闸故障的统计信息

跳闸故障的统计信息是能否控制和解决故障的主导资源,为此每日需对跳闸故障进行动态跟踪,每阶段进行综合分析;并注重对跳闸故障的性质即事实性、实效性、不完全性及等级性进行归类分析,以便实时寻找跳闸故障的特征。

ΔI 保护跳闸系直流供电短路保护,当系统中存在短路时才会发生跳闸;而过负荷则通过 I_{max} 、IDP保护跳闸,其过电流值的意义是不同的。正常情况下 ΔI 保护对电流变化值反映更灵敏。

1.2 跳闸故障的特征

- (1)牵引供电跳闸形式几乎统一,均为 ΔI 保护跳闸;
- (2)跳闸的统计中82.63%为DC01型直流车;
- (3)跳闸区段主要集中在陕西南路站至上海火车站上、下行区间,尤其在人民广场牵引变电站故障发生较为集中;
- (4)跳闸前期时间主要集中在早高峰之前;
- (5)故障主要导致DC01型列车牵引电机、电抗器、门极可关断晶闸管(GTO)、制动晶闸管、削磁电阻、橡胶联轴节、主接触器等损坏,AC01型列车高速断路器损坏,AC04型列车主牵引箱、辅助逆变器箱中的熔丝损坏。

2 初期对策及收效

2.1 初期对策

(1)对牵引供电 ΔI 保护跳闸,曾先后两次对轨道交通1号线上海火车站至莘庄的直流开关的定值进行调整:第一次将 ΔI 保护值从2 500 A调整至4 000 A,第二次将 ΔI 保护值的时间定值从2 ms调整至5 ms。

(2)对占列车高速开关跳闸总数为82.63%的直流车作为重点分析对象,对直流车的原理以及构造进行分析。

(3)对跳闸集中的人民广场区段,要求车辆、供电、通号、工务进行统一集中检查,以及各自专业的深度维护保养与测试。

(4)对直流车故障的损坏器件的表征,要求重点对直流车主回路进行分析,及时做好器件分析和备件的储备工作。

2.2 初期收效

(1)将牵引供电值调整至4 000 A、5 ms后,列车高速开关跳闸时牵引变电站同时跳闸数大为减少,但未完全解决。这也证实了列车高速开关跳闸时,还存在大于4 000 A、5 ms的电流域值。

(2)通过对直流DC01型车的原理及构造的分析知,串激直流电动机具有软机械特性,当列车加速到36 km/h时,是靠削磁加速。而列车设计时为了使削磁电阻具有良好的散热环境,削磁电阻安装在电阻箱靠风机进风口的第一片。在对故障列车的检修中,发现牵引电机、制动电阻箱内的粉尘中含有大量金属,并且牵引电机、制动电阻片均存在无规则放电的现象(以往牵引电机环火,一般都通过放电螺栓放电)。

(3)人民广场区间的集中检查,发现小曲率半径处钢轨的磨耗已达到11 mm,钢轨周边确实有大量金属粉尘。目前通过小曲率半径处的运营速度还保持在设计的规范之中,但轮轨接触面的配合即新轮旧轨、新轨旧轮之间的关系应予以关注。经重点对人民广场牵引变电站直流开关的触点、整定值、出线电缆、回流线进行多次检测,情况正常,唯一发现人民广场进站处分段绝缘器的安装位置离站65 m(一般为10 m);加之全线土建构架中,广场站坡度最大,为此列车进站时,较其它车站进站时运行工况有所不同。



2.3 制定对策

- (1)开发直流系统在线记录装置,对牵引供电及车辆运行进行监测,以便及时分析;
- (2)对车辆超载运行及运行工况进行重点检测。实测结果个别车辆设计最大载重量为 24.6 t,实测载荷为 30 t(超出 22%);设计最大电枢电流为 360 A,实测负载电流为 403 A(超出 12%);
- (3)对各种车型的再生制动电流、电压工况实测,情况正常;
- (4)对直流车的滤波电容进行更换及检测,情况正常;
- (5)对直流车的削磁电阻进行更换并对电阻箱进行重点维护。

3 初步分析意见

3.1 持续超载是发生跳闸故障的重要原因

下面着重对直流电动车特性进行分析。轨道交通 1 号线直流电动车设计为牵引状态时 4 台直流串激电动机两串再两并。根据电机原理可知,串激直流电动机具有软机械特性,如图 1 所示。

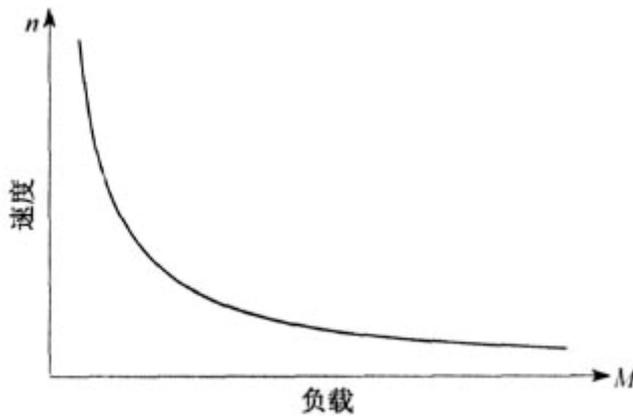


图 1 软机械特性示意图

从车辆运行情况看,一个显著的变化是,轨道交通 1 号线客流量持续上升,客流量仍居高不下。当负载很大时,电动机输出转矩就很大,而此时相应的转速就较低。显然,这样的低速是不能适应运营要求的。

在客流量持续增加而车辆能有限的情况下,只能有两种应对措施:增加单车载重或提高车速以加快车辆周转。若增加单车载重,势必引起电机严重过载(具体表现为电流增加)。原来每台直流电动机的额定电流为 310 A,现在上升到 400 A 以上,过载率超过三成。

若采用提高车速的办法,轨道交通 1 号线的直流车为斩波器调压调速结合削磁调速,按正常情况,由列车控制单元(TCU)对牵引电机的电枢电压 U_D 进行斩波调压,通过控制 GTO 的 V1 和 V2 的占空比(α 来实现调压, α 从 0.05 到 0.95 范围调节)。

当调到 $\alpha=0.95$ 时,对应的车速为 36 km/h,然后接通励磁线圈的并联电阻 1R3-R6(参阅 B 车主电路—动力装置电路图)进行分流而达到削磁升速(削磁比 $\beta=0.5$),电阻 1R3-R6 上要分流原来一半的电流。额定负载情况下,流过电阻的电流为 155 A,按过载三成计算,现在为 200 A 以上。而按设计要求,此电阻只是在调速到高速的短时间通流,但现在非但过流,而且通流时间大大加长,导致电阻发热异常。

电动机调速的机械特性如图 2 所示。

图中特性曲线 1 表示斩波器 $\alpha=0.05$ 时的低速特性,曲线 2 表示对应于 $\alpha=0.95$ 的特性。在额定负载 M_N 时车速约为 36 km/h(图中 A 点)。正常情况下,在此基础上欲再升速,即通过削磁的方法,其相应的特性曲线上移,但特性的硬度降低,即曲线变得更陡。削磁率为 0.5(即减少磁通一半)时,在额定负载下车速为 60 km/h,即运行在图中削磁特性曲线 3 的 C 点。如果设定超载为 130%,在 $\alpha=0.95$ 的斩波特性上,列车只能运行在 B 点(约 25 km/h),而斩波器此时已无能为力再把导通比



α 往上调,只能提前进入削磁(也即在 25 km/h 时就要开始削磁升速);由此电阻 1R3-R6 通电时间大大超过设计时间,电阻持续超功率通电使温升不断攀升,导致电阻箱绝缘材料发生化学和物理变化,使其电气性能大大下降。

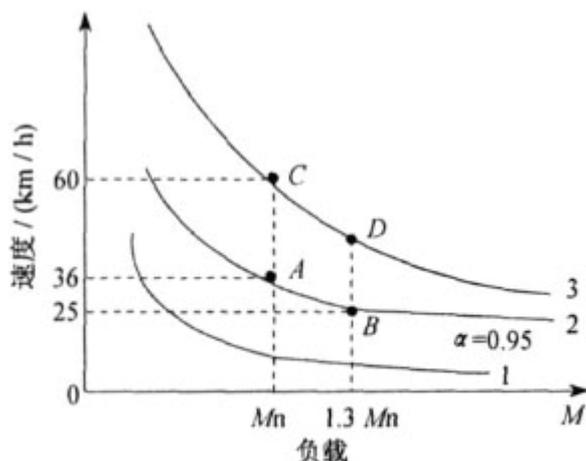


图 2 电动机调速的机械特性图

再从电动机转矩看,在忽略了空载转矩时,电动机输出转矩

$$M = C_T \Phi_a I_a$$

其中:

C_T ——与电动机结构有关的转矩常数;

Φ ——每极磁通;

I_a ——电枢电流。

当负载额定时, $\Phi = \Phi_N, I_a = I_N$;

当负载为 1.3 倍额定负载时,由于此时 $\Phi = 0.5 \Phi_N$, 则:

$$I_a = \frac{1.3 C_T \Phi_N I_N}{C_T 0.5 \Phi_N} = 2.6 I_N$$

如此程度的过载将持续在整个削磁高速期间,就很可能发生跳闸。且此时只是削磁特性曲线上 D 点的速度;若再要上升到 60 km/h 或以上,情况可能更为严重。而如此的过载电流并不只是流经两并两串的电动机主极线圈和削磁电阻箱上,在它所经的路径内所有电气元器件的绝缘部分都会造成严重的后果。

3.2 故障性质的离散性及非超载条件下的跳闸现象

3.2.1 故障性质的离散性现象

一方面,从电路、设备作进一步深入的技术探讨;另一方面,通过现场的随车跟踪测试、对牵变的全天候数据采样、向行车人员和检修人员多方了解故障前后的现象、查看设备器件维修更换日报表以及与相关技术人员切磋交流,透过跳闸故障性质的离散性的表面现象,找到它们的共同性。从检修人员反映及设备器件维修更换日报表上看,损坏和更换最频繁的是削磁电阻箱、牵引电机换向极、电刷、接触器、主晶闸管和放电螺栓等。这些部件所处的位置和功能以及耐受能力各不相同,因它们的损坏引起故障的现象也各不相同,因此造成故障性质的离散性。但这些部件的损坏显然都与过电流、绝



绝缘性能下降甚至局部短路(例如削磁电阻箱的进线出线端的绝缘频频烧坏、牵引电机出现环火等)有关。这正是产生故障的共性所在。

3.2.2 关于非超载条件下的跳闸现象

电气设备中绝缘材料的等级是有高有低的。高等级的绝缘材料允许的温升高,耐受过电流的能力相对强,但价格也相对高。绝缘材料等级的选择是依据它在运行中可能承受的最大电流值及持续通过的时间来确定的(即设计人员通过作出负载图来进行精确计算确定的)。国外设计人员的设计理念可能与国内一些人喜欢一味放大裕量的做法不一样,他们在满足技术性能指标的前提下,十分重视经济性,能用大部分时间处于正常运行的低等级绝缘材料时是尽可能不会用高等级的材料去取代它的。但如前所述,持续超载引起承受电流的绝对值大大超过绝缘材料允许温升及设计时间(不仅削磁电阻箱如此,其它带绝缘材料的器件也都如此),造成这些绝缘部件的电气性能下降,由此大大缩短了使用寿命。

当然,绝缘材料性能的降低不等于马上发生故障,它具有一个积累、渐变和老化的过程,经过一段时间的量变到质变的转换,最终才导致部分短路和击穿,发生跳闸故障。

4 后续研究与建议

几年来,会同有关部门针对客流量大的现状,采取了一系列分流、限流以及增能措施,有效地遏制了超载的势头,跳闸故障在很大程度上得到了缓解;近年来又在1号线增加运能,显然对减小客流量的压力会起到一定的积极作用。然而,持续上升的客流需求与相对滞后的运能增长这对矛盾依然存在。针对目前实际的车况,建议:

(1)在目前的客流情况下,继续采取各种分流、限流措施,增加运能,从根本上避免超载引起的各种故障。

(2)加强检测,特别对一些车况差的列车(如直流列车)和一些特殊区段进行重点检测,有条件的话最好实施全天候测试。可以根据需要对多通道测试仪不断加以改进,采集更为详尽、更为宽泛的数据,以便及时发现尚处于苗头状态的故障,做到防患于未然。

(3)加强检修保养,及时更换老化的器件和设施,对区间各类垃圾形成长效管理制度,杜绝可能导致跳火、短路的因素。

(4)对故障处理中出现的问题做好阶段总结,并就此对原有的故障应急处置机制予以调整、修订。

(5)继续做好故障信息的统计、分析和研究工作。

(6)进一步研究各种运能条件下车辆高速开关及牵引变电站整定值的设置和匹配。

参考文献

- [1]赵勤,左均超,蔡登明,等.直流 1500V 牵引供电系统框架保护特性[J].城市轨道交通研究,2007(11):58.
- [2]李建民,王丽红.城市轨道交通牵引供电系统整流机组的接入与输出方案[J].城市轨道交通研究,2007(10):64.
- [3]崔杰,张曹勇.地铁供电系统中的并行送电技术探讨[J].城市轨道交通研究,2005(4):80.

