

地铁列车在线时接触网短路跳闸故障分析

池代臻

(成都唐源电气股份有限公司, 510653, 广州//高级工程师)

摘要 对某地铁列车在线时发生的接触网短路跳闸故障进行了分析。详细描述了故障的发生过程及故障特征,建立了整流机组等效电路模型并对其短路过程进行了分析。同时对短路引起的电压变化与反向大电流给出解释,提出保护设计与应急处置的建议。

关键词 地铁列车; 接触网; 短路跳闸故障

中图分类号 U226.8⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.043

Analysis of Catenary Short Circuit Fault in Locomotive On-line Operation

CHI Daizhen

Abstract In this paper, a catenary short circuit fault is analyzed in-depth when a locomotive is on-line running. The process and characteristics of the fault are described in detail, and an equivalent circuit model of rectifier unit is established to analyze the short circuit process. Then, the voltage changes and reverse high current caused by short circuit are explained, relevant protection design and emergency disposal measures are proposed.

Key words metro train; catenary; short circuit fault

Author's address Chengdu Tangyuan Rail Transit Technology Co., Ltd., 510653, Guangzhou, China

地铁列车运行过程中,可能因接触网短线脱落、错挂地线、绝缘子闪络^[1]及列车顶部对接触网放电等多方面的原因,造成接触网短路故障。接触网发生短路瞬间会产生几万安培过电流^[2],其最为直接的后果就是对应的直流馈线开关发生跳闸。若此时保护装置无法将短路电流正常切除,必然造成设备烧毁甚至发生火灾。同时,故障短路电流流经钢轨及综合接地网,可能形成瞬间高压而烧毁其他设备,造成极大的破坏性,影响地铁的正常运营。经对近期发生的一起接触网短路跳闸故障进行分析,发现在相邻供电臂上列车在线运行时,接触网短路故障会引发邻线接触网跳闸,扩大了故障范围。对该故障的经过、特征进行了详细分析,并对

其中故障电流产生的机理进行了剖析,以期掌握故障的原因与规律,从而形成可借鉴的经验。

1 接触网短路跳闸故障介绍

1.1 接触网短路跳闸故障区域的设备

图1为接触网短路跳闸故障区域牵引变电所结构示意图。其工作原理为:交流电能由中压环网输入牵引变电所,经变压器与整流器转换成DC 1 500 V,并通过直流进线开关201、202输入到进线母排上;母排上的电压由直流馈出开关215、216输出,再经上网电缆、上网刀闸2151、2161向出、入段线的接触网供电。列车从接触网取流,电流经钢轨及回流电缆流至回变电所负极。全线直流供电系统采用绝缘安装,与综合接地系统形成电气绝缘。

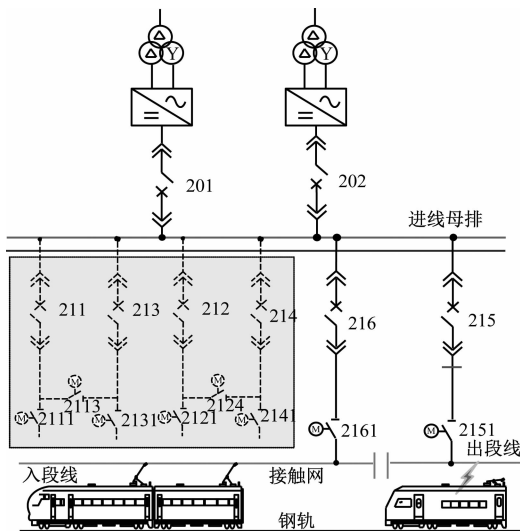


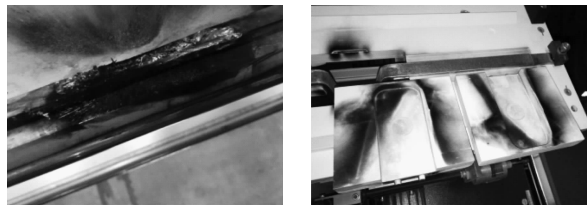
图1 牵引变电所结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traction substation structure

1.2 接触网短路跳闸故障描述

该起接触网跳闸故障发生在某车辆段出入段线。如图1所示,事故发生时,网轨检测车在出段线上行驶,同时末班电客车收车回车辆段。因网轨检测车的天窗盖未盖好锁牢,在行进过程中,天窗盖

弹起与接触网接触,导致接触网经网轨检测车与钢轨短路。如图2 a)所示,接触网上迅速形成电弧,灼伤接触网,在汇流排与接触线上留下黑色灼烧痕迹。如图2 b)所示,断路器的动静触头有明显的灼烧痕迹,在直流开关断路器的灭弧栅上也有明显的拉弧痕迹。



a) 接触网灼烧痕迹

b) 直流开关拉弧痕迹

图2 短路点灼烧痕迹

Fig. 2 Burning trace at short circuit point

在网轨检测车造成接触网短路后,车辆段出段线215开关、车辆段入段线216开关跳闸,造成相应的供电分区停电。约1 s之后,直流开关215、216自动重合闸成功,接触网恢复正常供电。

图3所示为牵引降压混合变电所直流开关215、216的故障录波。其中,图3 a)为出段线215开关的电压、电流波形。由图3 a)可知,在-3 ms时,网轨检测车与接触网短路,短路电流迅速上升;在时间为0时电压被拉低至1 049 V,电流增大至9 380 A,直流开关的保护装置检测电流上升率及电流增量($DDL + \Delta I$ 保护)并动作输出;在分闸指令输出后,短路电流持续升高,检测到电流达到11 562 A,而后保护装置又输出电流速断保护(I_{\max}^{++} (电流速断保护功能的简称代码)保护);电流波形存在截顶的情况,由于断路器分闸灭弧需要一个过程,在分闸指令后电流呈增大趋势;在27 ms时,灭弧完成,电流降低为0。

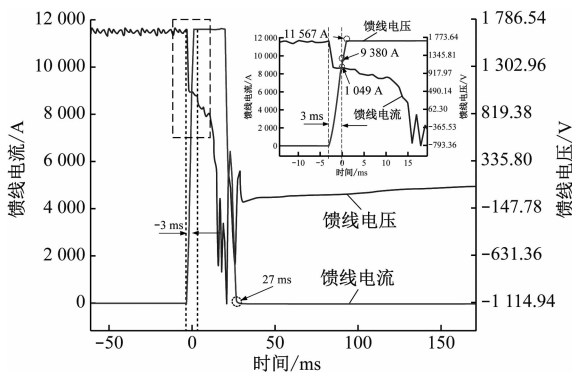
图3 b)为入段线216开关的电压、电流波形。因215、216开关取电自同一母线,当215开关的负载发生短路,馈线电压被迅速拉低,同样造成216开关电压被拉低。在-14 ms时,电压被拉低至816 V,同时形成反向电流-4 495 A;而后电压、电流恢复,并形成冲击,在时间为0时电压、电流分别达到1 906 V与2 599 A。在该变化的过程中,当电流变化满足 $DDL + \Delta I$ 保护的定值要求时,保护装置发出跳闸命令;在30 ms时,断路器灭弧完成,电流降低为0;在母线电压被拉低后,列车断路器因低压下限保护跳闸,导致入段线上电客车失电。

通过对牵混所直流开关215、216故障录波的描述与分析,需对以下内容做进一步研究。

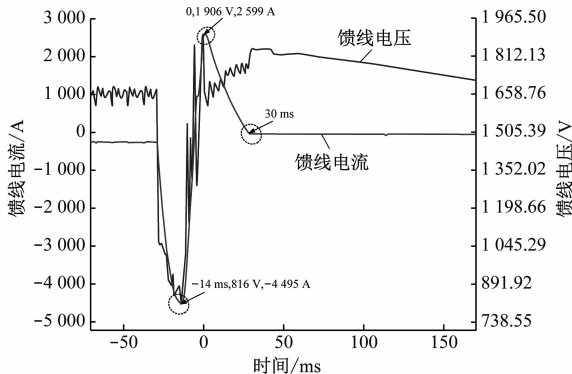
1) 在215馈线开关发生短路跳闸后,需考虑引起216开关跳闸的原因;

2) 在216开关上检测到-4 495 A反向电流的原因;

3) 在216开关上检测到超过额定值1 906 V正向电压的原因。



a) 215开关故障录波(出段线,网轨检测车)



b) 216开关故障录波(入段线,电客车)

图3 直流馈出开关的故障录波

Fig. 3 Fault recording of DC feeder switch

2 接触网短路跳闸故障分析

2.1 牵引变电所电源分析

目前,城市轨道交通通常采用的等效24脉波整流机组,由2台12脉波的整流变压器和与之匹配的整流器共同组成。 U_d 为整流机组输出端口电压, U_d 不仅与整流机组设计参数有关,而且受外部负载情况影响。如当接触网在远近不同点处发生短路时,其表现出的短路压降、短路电流和等值内阻均不同。图4为整流机组等效电路。图4中, U_{d0} 为牵引变电所直流母线空载电压; R_{eq} 为牵引变电所的等值内阻; L_{eq} 为等效电抗。其中, L_{eq} 可取整流变压器及

电缆等主要回路的等效电抗。

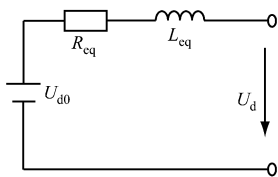


图4 整流机组等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of rectifier unit

根据北京城建设计研究总院地铁短路试验,可得到计算牵引变电所等值内阻的经验简化公式^[3],其计算精度满足工程要求。其计算公式如下:

$$R_{eq} = k_r \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{2N}^2}{0.9nS_N} \quad (1)$$

式中:

U_{2N} ——直流侧额定电压,kV;

U_k ——牵引变压器短路电压,kV;

S_N ——牵引变压器额定容量,MVA;

n ——牵引整流机组套数,套;

k_r ——内阻系数。

式(1)中,根据短路点至变电所的不同距离, k_r 可取不同值。通常情况下,短路点远离变电所时, k_r 可取1;出口短路时(短路点距变电所<400 m), k_r 可取1.3,本文故障情况下, k_r 可取1.3。

2.2 电客车驱动电路

电客车采用“+Tc-Mp-M+Mp-Tc+”6节编组。其中:Tc为有司机室的拖车,Mp为带受电弓的动车,M为不带受电弓的动车,“+”为半自动密接式车钩,“-”为半永久棒式车钩。2节Mp与2节M上均采用DC/AC变换器驱动三相电机,且每个DC/AC变换器输入前端并联有LC电路。在不考虑列车制动反送电的情况下,可将变换器视为负载,故可将此等效成图5中的电路。

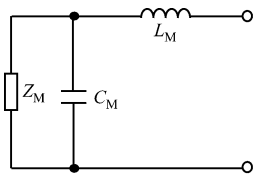


图5 电客车驱动等效电路

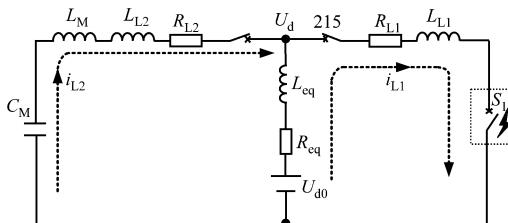
Fig. 5 Tram driving equivalent circuit

由图5可见,在故障过程中列车不存在制动过程,同时等效阻抗 Z_M 产生功率远小于短路时的功率,因此,为分析简便,可将 Z_M 忽略不计。在车载逆变器前端的平波电抗 L_M 与滤波电容 C_M ,因列车

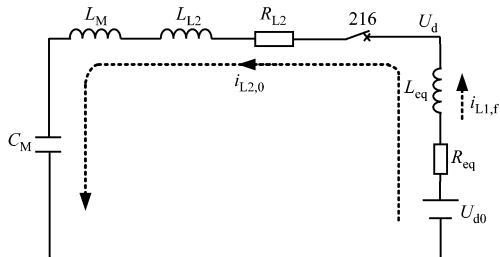
车型不同而略有差别。

2.3 列车在线时的接触网短路电路模型建立

考虑到短路暂态过程的电气分量,接触网与钢轨的瞬时电抗不能忽略。其中, R_{L1} 、 R_{L2} 和 L_{L1} 、 L_{L2} 分别为线路等效电阻与电抗。将直流馈线开关215与216视为理想开关,并采用开关 S_1 等效短路效果。建立如图6所示的列车在线时的接触网短路电路模型,因直流母排与整流机组直接相连,故电压为 U_d 。



a) 阶段1:网轨检测车发生短路后电流分析图



b) 阶段2:215开关跳闸后电流分析图

图6 列车在线时的接触网短路电路模型

Fig. 6 Short-circuit model of on-line locomotive OSC

2.3.1 阶段1

列车正常运行初始,215、216开关处于合闸供电状态,电客车由216开关取电运行。网轨检测车在215供电分区出段运行,发生短路故障时,直流215开关保护装置检测到 I_{max}^{++} 动作,触发215开关断路器跳闸,可将断路器跳闸之前视为阶段1。其分析过程如图6a)所示。由此可见,网轨检测车因发生金属性短路,接触网通过车体与钢轨发生短路,可等效为理想开关 S_1 合闸。

根据经验值可得接触网的电阻为 $0.02 \Omega/\text{km}$,电感为 $1.139 \text{ mH}/\text{km}$;回路钢轨的电阻为 $0.0095 \Omega/\text{km}$,电感为 $0.164 \text{ mH}/\text{km}$ 。因此,在近端发生短路的情况下,等效电阻几乎可忽略不计,这样必然形成大短路电流 i_{L1} ,约 $11\ 000 \text{ A}$ 。由于采样截顶,故实际短路电流将更大。此时保护装置通过检测到的电流判断出过流速断保护 I_{max}^{++} 动作,触发215开

(下转第222页)

4 结语

列车车门控制是信号车载系统安全防护和自动控制中的重要功能。太原轨道交通 2 号线 FAO 系统中门控功能的实现,是基于对运营场景需求的充分分析和讨论。本文全面总结了常规运营和故障情况下的各种车门控制流程,需注意,在 FAO 系统中,由于运行控制场景的复杂化,除了从系统层面面对运营需求、行车效率和安全性的充分保障,对参与运营人员的培训必须全面,调度、维保人员需明确各种场景下的运营操作限制,严格遵守系统操作规范来执行操作控制。

参考文献

[1] 梁浩. 太原市轨道交通 2 号线信号系统 ATC 用户手册[Z].

(上接第 212 页)

关断路器跳闸。因整流机组容量有限,不可视其为理想电压源,存在等效电阻 R_{eq} ,在短路大电流流过后,造成直流母排上电压 U_d 迅速降低至约 816 V。在电压 U_d 降低后,电客车上 C_M 的电压不能突变,则形成了由列车车载电容器流经 216 开关,回馈到直流母排上的反向电流 i_{L2} ,其电流值达 4 495 A。

2.3.2 阶段 2

如图 6 b) 所示,因过流速断保护 I_{max}^{++} 触发 215 开关跳闸,短路电流被切除,进入阶段 2。在 215 开关跳闸后,短路线路切除,整流机组输出电压 U_d 迅速恢复。同时由上述分析可知,整流机组上存在等效电抗 L_{eq} ,在 215 开关跳闸前流过断流大电流 i_{L1} 。由于电感有反向电动势作用,电感的电流不能瞬时突变,在 L_{eq} 上形成续流电流 $i_{L1,f}$,与整个后端负载构成 Boost 升压电路,此时 U_d 迅速抬高且超过整流机组空载电压 U_{d0} 。

在接触网短路过程中,列车上的 C_M 因释放能量而导致电压下降,且此时电压小于 U_d ;同时 216 开关柜上的电流 i_{L2} 迅速改变为正电流,通过叠加 $i_{L1,f}$,构成电流 $i_{L2,0}$ 。随着 $i_{L2,0}$ 迅速升高,其电流变化满足 DDL + ΔI 保护的定值要求,保护装置发出跳闸命令,电流变化率和 ΔI 满足电流变化率保护,DDL + ΔI 保护发出跳闸动作命令,触发 216 开关跳闸。在母线电压被拉低后,入段线上电客车检测到电压降低,列车断路器因低压下限保护跳闸。

上海:上海富欣智能交通控制有限公司,2020。

LIANG Hao. Taiyuan rail transit Line 2 signaling project ATC user manual[Z]. Shanghai: Shanghai Fuxin Intelligent Transportation Solution Co., Ltd., 2020.

[2] 王华. 南京地铁客室车门系统故障分析及处理[J]. 数字技术与应用,2014(6): 143.

WANG Hua. Fault analysis and treatment of passenger door system in Nanjing metro [J]. Digital Technology and Application, 2014 (6):143.

[3] 闫学祥,刘海东,杨培盛. 城市轨道交通列车车门紧急解锁控制联动优化[J]. 城市轨道交通研究,2017(12): 38.

YAN Xuexiang, LIU Haidong, YANG Peisheng. Optimum control linkage of door emergency unlocking for urban rail transit vehicle [J]. Urban Mass Transit, 2017(12):38.

(收稿日期:2021-05-31)

3 结语

1) 考虑在直流开关柜的故障识别中,利用形态学、小波分析等手段对故障波形进行形态识别,在保护装置中将此类波形进行判别,避免不必要的跳闸。

2) 在正常运营过程中,某处接触网发生短路故障时,可能会引起相邻接触网发生同类型故障跳闸,造成电客车停运,导致故障范围扩大。在应急处置时,应当掌握此类故障特征,制定相应的故障响应措施,以实现接触网供电快速恢复。

参考文献

[1] 张宝奇,班瑞平. 电力机车车顶绝缘子闪络引发接触网故障的研究及对策[J]. 铁道机车车辆,2007(5): 63.

ZHANG Baoqi, BAN Ruiping. Research on electric locomotive car roof insulator contamination cause catenary fault[J]. Railway Locomotive & Car,2007(5): 63.

[2] 许嘉轩. 基于 Gauss-Seidel 法的城市轨道交通直流牵引供电系统稳态短路计算方法[J]. 城市轨道交通研究,2020(7):138.

XU Jiaxuan. Steady state short-circuit calculation of DC traction power supply system based on Gauss-Seidel iteration [J]. Urban Mass Transit, 2020(7):138.

[3] 黄德胜,张巍. 地下铁道供电[M]. 北京:中国电力出版社,2010:223-224.

HUANG Desheng, ZHANG Wei. Metro power supply [M]. Beijing:China Electric Power Press,2010:223-224.

(收稿日期:2019-11-21)