

地铁接触网短路状态下钢轨电位和限压保护装置研究

李怀志

(浙江纺织服装职业技术学院机电与轨道交通学院,315211,宁波//副教授)

摘 要 钢轨电位限制装置(OVPD)是地铁回流网络中重要的保护装置。构建了地铁供电网络电路模型,仿真测量了接触网短路状态下的钢轨电位、流经 OVPD 保护点晶闸管中的电流。研究成果可为 OVPD 保护装置晶闸管的选型提供依据。

关键词 地铁供电;接触网;短路电流;钢轨电位

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.05.005

Research on Rail Potential and Voltage Limiting Protection Device Under Short Circuit Condition of Catenary in Metro

LI Huaizhi

Abstract Rail potential limiting device OVPD is an important protective device in metro backflow network. Subway power supply circuit model was constructed, and the rail potential under short circuit condition of catenary as well as the current flowing though the protecting thyristor of the OVPD device were simulated and measured. The research results can provide a basis for the thyristor selection of protection device.

Key words metro power supply; overhead contact line; short circuit current; rail potential

Author's address Zhejiang Fashion Institute of Technology, 315211, Ningbo, China

地铁供电系统由牵引整流器(以下称“整流器”)、接触网、回流网、排流柜以及各种保护装置组成。其中,回流网包括钢轨和排流网,钢轨用于牵引回流,排流网用于收集杂散电流。列车在某个供电臂下运行,相应供电区段的钢轨就会产生对地电位,这个电位对作业人员和设备安全具有很大威胁,尤其对车站和车辆段作业人员的威胁更大。本文采用集中参数电路模型,分析计算几种短路状态下钢轨的电位数值和 OVPD(钢轨电位限制装置)保护点的对地短路电流,为晶闸管的选型提供依据。

1 直流牵引供电网络模型建立和参数选择

1.1 直流牵引供电网络

地铁接触网供电系统的单个供电臂采用双边供电模式,即供电臂两端的整流器为该供电臂同时供电,整流器电源的正极通过馈线接到接触网,负极通过回流线与钢轨接在一起。排流网布置在轨枕下面,与钢轨走向一致,起到搜集杂散电流的作用。绝大多数情况下杂散电流很小,排流网不投入工作,即排流网与整流器负极断开。供电臂双边供电原理如图 1 所示。

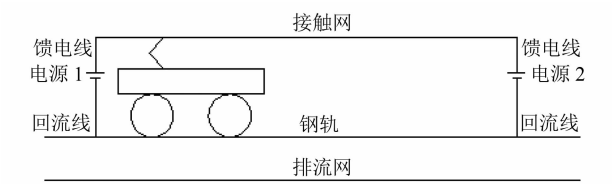


图 1 供电臂双边供电原理图

1.2 供电网络模型及参数

考虑到接触网、钢轨和排流网都存在着电阻,钢轨和排流网之间存在着过渡电阻,因此可将图 1 简化成一个供电网络,供电网络模型如图 2 所示。

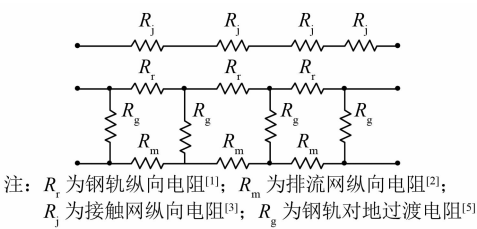


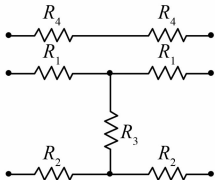
图 2 供电网络模型

图 2 中各参数取值为： $R_r = 0.015\ 00\ \Omega/\text{km}$ ， $R_m = 0.092\ 77\ \Omega/\text{km}$ ， $R_j = 0.010\ 00\ \Omega/\text{km}$ ， $R_g = 3.000\ 00\ \Omega/\text{km}$ 。

1.3 集中参数单元电路模型

假设图 2 中各个电阻参数是线性的,那么可将图 2 分拆成多个 100 m 长的集中参数单元电路,即

2 km长的供电臂可以视为由 20 个 100 m 长的集中参数单元电路串联而成。集中参数单元电路模型如图 3 所示。



注：R₁、R₂、R₃ 和 R₄ 分别为 100 m 长供电臂的钢轨纵向电阻、排流网纵向电阻、钢轨对地过渡电阻和接触网纵向电阻

图 3 集中参数单元电路模型

图 3 中各参数取值为： $R_1 = 0.000\ 75\ \Omega$ ， $R_2 = 0.000\ 464\ \Omega$ ， $R_3 = 30.000\ 00\ \Omega$ ， $R_4 = 0.000\ 50\ \Omega$ 。

1.4 整流器电源模型

图 1 中双边供电的两个整流器相当于实际电源 1 和实际电源 2，一个供电臂的由这两个电源同时供电。整流器电源模型(见图 4)由实际电源 1 和实际电源 2 等效的理想电压源与内阻 R_0 串联构成，实际电源 1 和实际电源 2 的额定输出电压 U_1 和 U_2 均为 1 500 V。

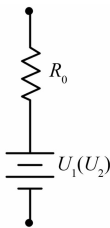


图 4 整流器电源模型

R_0 的计算公式为：

$$R_0 = K_r \frac{u_{k\%}}{100} \times \frac{U_d^2}{0.9n S_T}$$

式中：

K_r ——内阻系数，取值为 1.2。

$u_{k\%}$ ——变压器阻抗电压百分值^[4]，取值为 7；

U_d ——接触网额定电压，取值为 1 500 V；

n ——整流器组数，取值为 2；

S_T ——整流变压器的视在功率，取值为 2 000 kVA。

即得 $R_0 = 0.052\ 5\ \Omega$ 。

1.5 单个供电臂供电网络模型

单个供电臂供电网络如图 5 所示。假设单个供电臂长度 $L = 2\ \text{km}$ ，由 20 个 100 m 长的单元电路构成，整流器 1 正极与负极跨接在单元 1 中电阻 R_4 和

R_1 的两端，整流器 2 正极与负极跨接在单元 20 中电阻 R_4 和 R_1 的两端，即相当于整流器正极通过馈电线与接触网连接，整流器负极通过回流线与钢轨连接。考虑到边缘效应，单元电路 1 和单元电路 20 对应的 A 处和 B 处两条虚线表示排流网与钢轨之间的过渡电阻 R_g 为无穷大。

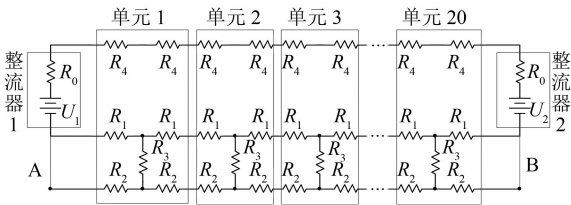
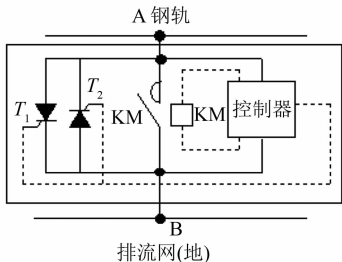


图 5 单个供电臂供电网络模型

2 短路状态下 OVPD 保护装置处钢轨对地电位和电流

2.1 OVPD 保护装置工作原理

地铁 OVPD 保护装置安装在车站(车辆段)区域内，监测钢轨和排流网(地)之间的电位，一旦钢轨对地电位超出规定值，OVPD 保护装置内的电路就会把监测点钢轨与地短接，钳制钢轨电位为零电位。OVPD 保护装置结构示意图如图 6 所示。地铁 OVPD 保护装置保护动作逻辑顺序如表 1 所示。



注：T₁、T₂ 为晶闸管；KM 为接触器

图 6 OVPD 保护装置结构示意图

表 1 OVPD 保护装置动作逻辑表

$ U_{AB} $	OVPD 装置动作类型	
	接触器常开触点状态	晶闸管状态
$\geq 90\ \text{V}$ (持续 0.8 s)	闭合	截止
$\geq 150\ \text{V}$	闭合	截止
$\geq 600\ \text{V}$	先断开，再闭合	先导通，再截止

注：U_{AB} 为 A 和 B 两点之间电压

从表 1 可以看出，当 OVPD 装置检测到 A 和 B 两点之间电压绝对值幅度超过 600 V 时，会立刻向晶闸管 T₁ 和 T₂ 发送触发脉冲，如果 A 点电位高于 B 点电位，晶闸管 T₁ 导通；反之，晶闸管 T₂ 导通。利用晶闸管的快速导通特性可迅速将 A 和 B 两点短路，

随后接触器触点闭合,晶闸管两端因为被接触器触点短接而重新处于截止状态。晶闸管和接触器的顺序动作保证了人身和设备的安全。

2.2 供电网络短路时 OVPD 装置处电位

本文讨论 OVPD 装置设置在车站轨行区内,距离整流器位置 150 m 的 A 点处的情况。图 7 中 A、B 两点间的电压也是 OVPD 装置监测钢轨对地电位。

对于整流器 1 和整流器 2 来说,存在着正极对负极短路、正极对排流网(地)的短路的可能和风险,即图 7 中 C 对 D 和 E 短路,G 对 H 和 J 短路。对于接触网来说,存在着接触网对钢轨短路的可能和风险,即图 7 中 F 点对 A 点短路。当然,对于 1 km 长的接触网来说,接触网各点都存在着对钢轨短路的可能,由于不具有极值特性,本文不做讨论。

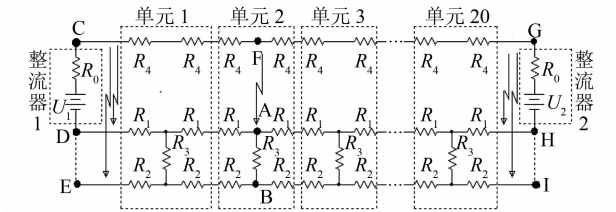


图 7 供电网络短路状态示意图

通过 multism 软件对图 7 中的电路进行模拟仿真,得出供电网络各种短路状态下 OVPD 装置处的电位,即 A 点到 B 点的电位 U_A ,模拟仿真结果如表 2 所示。

表 2 OVPD 装置处电位模拟仿真结果	
短路类型	U_A/V
C 点对 D 点短路	185
C 点对 E 点短路	-1 463
F 点对 A 点短路	195
G 点对 J 点短路	-1 388
G 点对 H 点短路	-185

2.3 供电网络短路时流经 OVPD 装置处短路电流

由表 1 和表 2 可知,表 2 中各种短路类型的 A 点电位都超过了 OVPD 动作限值。各种短路类型 OVPD 装置动作如表 3 所示。

表 3 各种短路状态下 OVPD 动作类型	
短路类型	OVPD 动作类型
C 点对 D 点短路	接触器常开触点无延时闭合
C 点对 E 点短路	晶闸管触发 T_2 导通
F 点对 A 点短路	接触器常开触点无延时闭合
G 点对 J 点短路	晶闸管触发 T_2 导通
G 点对 H 点短路	接触器常开触点无延时闭合

OVPD 接触器常开触点闭合或者晶闸管 T_2 导通,A 和 B 两点被短路,短路电流流经接触器常开触点或者晶闸管 T_2 。电阻 R_3 被接触器常开触点和晶闸管 T_2 短路,所以去掉电阻 R_3 ,用短接线取而代之,流经 OVPD 处的短路电流用 I_K 表示,方向如图 8 所示。

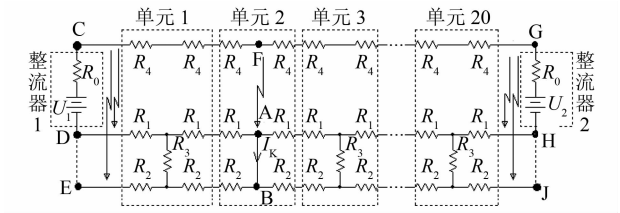


图 8 去掉电阻 R_3 后的供电网络短路状态示意图

在各种短路类型下,用 multisim 软件模拟仿真流经接触器常开触点和晶闸管 T_2 中的短路电流 I_K 。模拟仿真结果如表 4 所示。

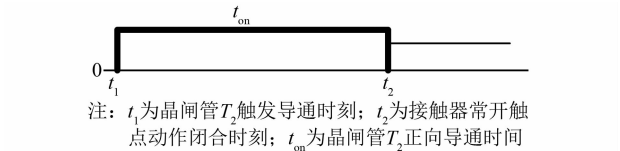
表 4 各种短路类型下短路电流模拟仿真结果	
短路类型	I_K/kA
C 点对 D 点短路	0.12
C 点对 E 点短路	-33.70
F 点对 A 点短路	0.13
G 点对 J 点短路	-7.14
G 点对 H 点短路	-0.19

表 4 中数据具有如下特点:

- 1) C 点对 D 点短路和 F 点对 A 点短路时,短路电流流经接触器常开触点,方向向下;
- 2) G 点对 H 点短路时,短路电流流经接触器常开触点,方向向上;
- 3) C 点对 E 点短路,流经晶闸管 T_2 的电流最大,方向向上。

3 OPVD 装置晶闸管参数选择

由表 4 可知,C 点对 E 点短路时,A 点对 B 点电位最高。晶闸管 T_2 触发导通和接触器常开触点闭合的时间顺序如图 9 所示。



注: t_1 为晶闸管 T_2 触发导通时刻; t_2 为接触器常开触点动作闭合时刻; t_{on} 为晶闸管 T_2 正向导通时间

图 9 晶闸管 T_2 触发导通和接触器常开触点闭合的时间顺序

图 9 中各参数取值为: $t_1 = 0.005\text{ ms}$, $t_2 = 10.000\text{ ms}$, $t_{on} = 9.995\text{ ms}$ 。

当出现短路时,经过 0.005 ms 的延时,已经承

受 1 463 V 正向导通电压的晶闸管 T_2 受到触发开始正向导通,直到接触器常开触点闭合时才截止,持续导通时间近似等于 10.000 ms。

晶闸管的浪涌电流 I_{TSM} 定义为 10.000 ms 持续时间内正向通过晶闸管中电流的峰值。由表 4 可知,流过晶闸管 T_2 中最大的电流为 33.7 kA,所以可以取晶闸管 T_2 的浪涌电流 $I_{TSM2} = 33.7$ kA,其断态不重复峰值电压 $U_{DSM2} = 1\ 463$ V,其反向不重复峰值电压 $U_{RSM2} = 195$ V;晶闸管 T_1 和晶闸管 T_2 的工作过程相同,流过晶闸管 T_1 最大的电流为 130 A,所以可以取晶闸管 T_1 的浪涌电流 $I_{TSM1} = 130$ A,其断态不重复峰值电压 $U_{DSM1} = 195$ V,其反向不重复峰值电压 $U_{RSM1} = 1\ 463$ V。

4 结语

在供电臂接触网的各种短路状态下,OVPD 保护装置都会动作,通过 OVPD 装置短接保护点对地电位能够达到限制钢轨对地电位的目的。任何一种形式的接触网短路都是危险的,OVPD 保护装置处电位最低达到 185 V,最高达到 1 463 V,这对于人身安全是致命的威胁。

OVPD 保护装置中起短接作用的有接触器的主触点和晶闸管,其中晶闸管工作方式是采用两个并联的晶闸管反接。由于大功率的晶闸管成本相对

较高,所以通过电路模拟仿真得出晶闸管两端的断态不重复峰值电压 U_{DSM} 、反向不重复峰值电压 U_{RSM} 和流过晶闸管的浪涌电流等参数,可以在考虑安全系数情况下正确选择晶闸管型号。

接触网短路情况下,决定短路电流大小的因素有接触网纵向电阻、钢轨纵向电阻、钢轨对地过渡电阻和变压器容量等,但是在正极负极、正极对地短路情况下,上述因数对短路电流大小影响不大,OVPD 保护装置都会动作。维护运行人员要按照安全规范定期检查接触网整流器正极和负极,正极和排流网(地)之间的绝缘,确保出现不出现极端的短路故障,保证接触网正常运行。

参考文献

- [1] 潘宇辉.浅谈地铁钢轨过渡电阻的测试[J].技术与市场,2011,18(4): 46.
- [2] 胡传,毕林.地铁轨道系统电阻对杂散电流的影响分析[J].现代城市轨道交通,2018(10): 47.
- [3] 于松伟,杨兴山,韩连祥,等.城市轨道交通供电系统设计原理及应用[M].成都:西南交通大学出版社,2008.
- [4] 陈超录,杨洋,解培金,等.城市轨道交通钢轨电位限制技术研究[J].机车电传动,2018(6): 97.
- [5] 北京市地下铁道科学技术研究所.地铁杂散电流腐蚀防护技术规程:CJJ 49—1992[S].北京:中国标准出版社,1992.

(收稿日期:2019-08-10)

(上接第 18 页)

上对有轨电车充电站布局进行了初步研究,提出了一种基于遗传算法的充电站布局优化方法。结合实际有轨电车线路数据的仿真分析结果,证明了该优化算法具有良好的收敛性以及可靠性。研究成果为科学选择充电站布局提供了可靠的数据及理论支撑,具有一定的工程意义。

参考文献

- [1] 李雪飞,王占国,马泽宇.基于锂离子电池的双动力动车组电池系统设计[J].中国铁路,2013(7): 73.
- [2] 宋强.低地板轻轨列车混合动力储能系统研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [3] 陈彦秋,宋鹏云,张继业.混合动力列车运行仿真平台的研究与开发[J].计算机仿真,2014(2): 221.
- [4] 蒋捷.现代有轨电车载系统的仿真研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [5] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach[J]. Applied Energy, 2015, 139: 151.

- [6] 胡远江.混合动力列车车载储能与地面充电方案系统优化研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [7] 单金生,吴立锋,关永,等.超级电容建模现状及展望[J].电子元件与材料,2013(8): 5.
- [8] 卢怡.储能式有轨电车电源系统的参数匹配与能量管理研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [9] 杨奇,胡文斌,余轩,等.现代城市储能式有轨电车运行建模与仿真研究[J].电气化铁道,2019(3): 72.
- [10] 雷霄.有轨电车燃料电池/超级电容混合动力系统建模与仿真[D].成都:西南交通大学,2015.
- [11] 滕靖,潘炜维,王园园,等.现代有轨电车一体化仿真系统设计与实现[J].都市轨道交通,2018(3): 32.
- [12] 吴杰.混合动力动车组动力集成方案设计与评估仿真平台[D].成都:西南交通大学,2015.
- [13] 陈磊.基于列车运行仿真的ATO速度命令节能设计研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [14] 胡远江.混合动力列车车载储能与地面充电方案系统优化研究[D].成都:西南交通大学,2017.

(收稿日期:2020-01-21)