

城市轨道交通走行轨回流系统钢轨电位抑制技术综述^{*}

唐兆军¹ 王颖² 朱松涛³ 俞南均⁴ 郭志奇⁵ 何行健⁶

(1. 杭州市地铁集团有限责任公司, 310003, 杭州; 2. 绍兴市轨道交通集团有限公司, 312099, 绍兴;
3. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 312035, 绍兴; 4. 杭州市建设工程质量安全监督总站, 310005, 杭州;
5. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京; 6. 中铁七局集团电务工程有限公司, 450008, 郑州)

摘要 [目的] 在城市轨道交通直流牵引供电系统中, 钢轨电位超标和杂散电流问题已然成为运营线路的顽疾和通病, 因此有必要对城市轨道交通走行轨回流系统钢轨电位抑制技术进行总结归纳。[方法] 基于我国已运营线路的钢轨电位及杂散电流现状及突出问题, 从直流牵引供电系统回流机理出发, 梳理了直流牵引供电系统中影响钢轨电位的主要因素。介绍了钢轨电位抑制技术, 并对并联电阻、并联电容及纳入闭锁电流逻辑保护定值等抑制操作过电压产生的几种方法进行了对比分析。介绍了联动屏蔽门新型钢轨电位限制装置、IGBT (绝缘栅双极晶体管) 智能化杂散电流抑制型钢轨电位限制装置和柔性拓扑钢轨电位限制装置的技术方案。[结果及结论] 通过电力电子全功率变换器拓扑单元对走行轨接地电压和电流进行动态柔性控制是极具潜力的治理措施, 在未来可用于对走行轨回流系统中钢轨电位和杂散电流的综合控制。在线路设计阶段, 针对不同制式需求, 可通过提高牵引电压、优化牵引间距、降低轨道纵向电阻、避免场段库内走行轨直接接地等措施来降低钢轨电位。此外, 正线与场段、线路与线路之间电气系统的完全隔离也是抑制钢轨点位的重要措施。

关键词 城市轨道交通; 走行轨回流系统; 钢轨电位

中图分类号 U239.5; U226

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.043

Overview of Rail Potential Suppression Technology in Urban Rail Transit Running Rail Circuit Return System

TANG Zhaojun¹, WANG Ying², ZHU Songtao³, YU Nanjun⁴, GUO Zhiqi⁵, HE Xingjian⁶

(1. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., 310003, Hangzhou, China; 2. Shaoxing Rail Transit Group Co., Ltd., 312099, Shaoxing, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing Power Supply, 312035, Shaoxing, China; 4. Hangzhou Construction Engineering Quality and Safety Super-

vision Station, 310005, Hangzhou, China; 5. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China; 6. China Railway Seventh Group Electric Engineering Co., Ltd., 450008, Zhengzhou, China)

Abstract [Objective] In the DC (direct current) traction power supply system of urban rail transit, excessive rail potential and stray current issues are persistent problems and common ailments for operational routes. Therefore, it is necessary to summarize and generalize the rail potential suppression technology in urban rail transit running rail circuit return system.

[Method] Based on the situation and prominent issues of rail potential and stray current in operational lines in China, starting from the mechanism of DC traction power supply system return flow, the main factors affecting rail potential in the system are sorted. A rail potential suppression technology is introduced, some methods for suppressing overvoltage generation are compared and analyzed, such as parallel resistors, parallel capacitors, and incorporating locking current logic protection set values. Technical solutions for the novel rail potential limitation device with linked shielding doors, the intelligent stray current suppression type rail potential limitation device using IGBT (insulated gate bipolar transistor), and the flexible topology rail potential limitation device are presented. [Result & Conclusion] By implementing power electronic full-power converter topological units, the dynamic and flexible control of rail-to-ground voltage and current demonstrates a highly promising remedial measure for future comprehensive control of rail potential and stray current in running rail circuit return system. During the line design phase requirements of different systems, rail potential reduction can be met by increasing traction voltage, optimizing traction spacing, reducing longitudinal track resistance, and eliminating direct grounding of running rails in depot garages. Additionally, complete isolation of electrical systems

^{*} 浙江省住房和城乡建设厅科研课题(2021K173)

between mainlines and depots and between different lines is also an important measure to suppress rail potential.

Key words urban rail transit; running rail circuit return system; rail potential

0 引言

目前,钢轨电位超标和杂散电流问题已然成为我国城市轨道交通的顽疾和通病。随着城市轨道交通的网络化建设与规模化运营,在城市轨道交通线路内部,同一线路的停车场/车辆段(以下简称“场段”)与正线之间钢轨电位与杂散电流相互影响,不同车站之间的 OVPD(钢轨电位限制装置)相互影响,不同线路之间的轨电位与杂散电流相互影响,以上这些原因导致了城市轨道交通线路中钢轨电位与杂散电流的异常升高问题,可能对轨旁设备、主体结构钢筋、线路周边关键地下工程(如管线、建筑物结构钢筋等)、线路周边交流供电系统等造成严重的危害。文献[1]的研究表明,停车场的钢立柱电腐蚀主要是由正线钢轨泄漏至停车场的杂散电流引起的。文献[2]的研究表明,线路运营时,正线泄漏的杂散电流主要通过场段轨道收集,经单向导通装置再次返回正线,场段杂散电流的主要来源为正线运行泄漏的杂散电流。文献[3]的研究表明,车辆段运用库挂、拆地线时发生“打火”(烧灼),以及车站屏蔽门、车辆段棘轮补偿装置和检修平台金属护栏发生“打火”等现象均是杂散电流引起的。文献[4]的研究表明,在分断负荷电流时, OVPD 的接地接触器操作过电压会导致全线钢轨电位抬高。

在走行轨回流系统中,由于钢轨自身固有的阻抗特性,无法从材料和施工工艺角度解决钢轨与大地的完全绝缘问题。当杂散电流入地后,杂散电流与钢轨自身固有阻抗会使得钢轨和大地之间产生电位差,而电位差过高将会威胁乘客的人身安全,必须通过 OVPD 将钢轨与大地接地导通,从而导致杂散电流大量泄漏至大地。为了保证乘客的人身安全,我国部分城市的已运营地铁场段将检修库内的走行轨通过电缆直接接地,或将 OVPD 的接地接触器长期置于合闸位置,为杂散电流提供更为便利的通路。因此,在直流牵引供电系统的设计和建造过程中,有关走行轨的接地处理技术十分重要,应对城市轨道交通走行轨回流系统钢轨电位的抑制

技术进行系统性分析。

本文针对城市轨道交通日趋严重的钢轨电位和杂散电流问题,通过工程实践探讨了城市轨道交通直流牵引供电系统中影响钢轨电位的主要因素,总结了目前直流牵引供电系统中钢轨电位和杂散电流的现状及存在的问题,对钢轨电位的抑制方案进行了详细的分析和讨论。本文研究可为钢轨电位综合抑制治理提供理论基础。

1 钢轨电位影响因素

在直流牵引供电系统中,主要考虑正常运行状态或短路故障时的钢轨电位,影响钢轨电位的因素主要有牵引电流、短路电流、标称电压、走行轨回流长度、钢轨纵向电阻、轨道绝缘、轨道对地连接等。

由负载导致的牵引电流和短路电流的增加均会增大钢轨电位值。在牵引电流一定的情况下,随着回流导体长度的增加,钢轨电位呈线性增加趋势。在计算钢轨电位时,需综合考虑牵引变电所(以下简称“变电所”)间距及工程投资等因素。通过降低走行轨的纵向电阻可以减小钢轨电位。

此外,轨道对地连接是影响供电系统钢轨电位的重要因素。直流牵引供电回流系统通常绝缘安装,沿线钢轨电位对地对称分布。不同工况下,直流牵引供电系统沿线钢轨电位分布示意图如图 1 所示。工况 1 指所有变电所正常工作,列车分布在线路区间的不同位置,正在取流的列车使得钢轨电位有所升高,而变电所处的电压为负极性。工况 2 指某变电所(例如:变电所 C)故障退出运行,则在变电所 B—变电所 D 区间内的回流钢轨压降较大、钢轨电位有所升高;在相邻列车附近的钢轨电位有所升高,在远端边界范围的钢轨电位稍有下降,这是

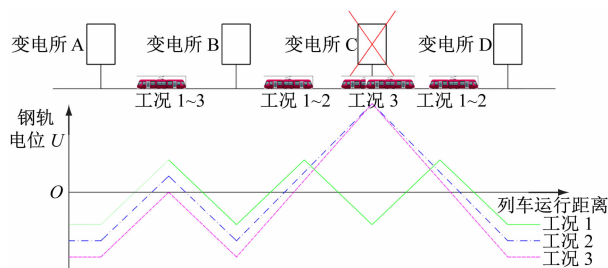


图 1 不同工况下的直流牵引供电系统沿线钢轨电位分布示意图

Fig. 1 Diagram of rail potential distribution along the route in DC traction power supply system under different working conditions

由于轨道对地电阻对钢轨电位引起的对称效应导致的。工况3指当两列列车在故障退出的变电所C处相遇时,相遇处的钢轨电位升高到最大值。在所有工况中,最不利工况为工况2、工况3,或是某变电所的钢轨电位因其他原因接地的工况(轨道接地会导致其对称方向远端走行轨对地电位提升)。

2 钢轨电位抑制技术

2.1 设计阶段钢轨电位抑制方案

在线路设计之初就需要考虑回流系统参数对钢轨电位的影响。若城市轨道交通线路建成后,其供电系统结构及电气参数难以改变,运营过程中只需保证相关电气参数稳定即可。可通过以下措施抑制钢轨电位:①提高牵引电压;②降低钢轨回流电阻;③减小供电距离;④增加钢轨对地的绝缘电阻;⑤避免场段库内走行轨直接接地;⑥正线与场段电气系统完全隔离;⑦运营线路之间完全电气隔离。

2.2 钢轨电位操作过电压抑制方案

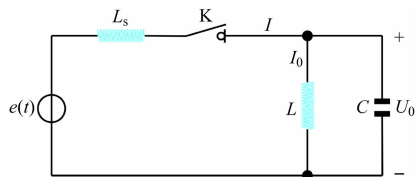
在城市轨道交通直流牵引供电走行轨回流系统中,钢轨电位限制装置的直流接触器开断是典型的直流系统开断过程。直流开断的重点是如何在没有电流零点的情况下灭弧,即将通过开关的恒定电流强迫熄弧,需要将能量彻底吸收,同时抑止过电压,避免保护设备受到损坏。当直流接触器开断时,由于直流系统储存着巨大的能量要释放出来,而释放出的能量又会在回路上产生过电压。直流接触器开断过程中的过电压主要来源于线路中的电感磁能,接触器最终把系统电流切断至0,电感磁能将电弧能量的形式释放出来。电感电流在不能突变的前提下,需要瞬间(燃弧时间)释放出较大的能量,这将会形成高阶振荡电路而产生操作过电压。

回流系统暂态模型如图2所示。 C 、 L 、 I 均会对操作过电压的峰值产生影响。当开关 K 分断瞬间,存储在电感中的磁场能量转化为电容的电场能量,则在电容两端产生的过电压与电感电容两者之间的能量有以下关系:

$$\frac{1}{2}CU_{c\max}^2 = \frac{1}{2}CU_0^2 + \frac{1}{2}LI_0^2 \quad (1)$$

$$U_{c\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L}{C}I_0^2} \quad (2)$$

抑制操作过电压的基本思路是通过加装阻容



注: $e(t)$ 为系统等值电源; L_s 为系统等值电感; K 为接触器开关; I 为系统电流; I_0 为电感电流; L 为回路电感; C 为回路电容; U_0 为电容电压。

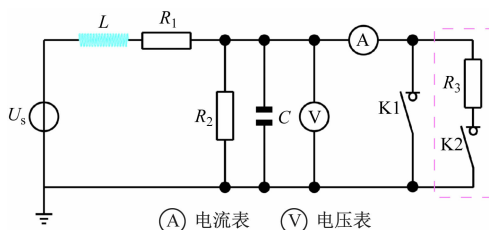
图2 回流系统暂态模型

Fig. 2 Transient model of circuit return system

吸收装置将原本的振荡电路变为非振荡电路,利用阻容元件两端电压不能突变的特性抑制过电压峰值^[5]。

2.2.1 并联电阻抑制操作过电压

在OVPD主回路两端并联电阻抑制操作过电压,其简化原理示意图如图3所示,其中,过电压抑制回路接触器 K_2 与过电压抑制回路电阻 R_3 构成过电压吸收回路。



注: U_s 为试验电源; R_1 为回路电阻(可依据试验电压、电流的需求进行适当调整); K_1 为OVPD接地回路主接触器; R_2 为RC(电阻电容)回路电阻。

图3 并联电阻抑制操作过电压简化原理图

Fig. 3 Diagram of simplified principle of parallel resistance suppressing operation overvoltage

通过试验传统OVPD接地回路和并联过电压抑制回路,当 R_3 为 2Ω 时,并联电阻抑制操作过电压测试结果如表1所示。由表1可知:并联 2Ω 的电阻后,操作过电压均低于120V,不会触发OVPD动作。采用并联电阻过电压抑制回路的优点为能明显抑制过电压,其缺点为并联电阻不能长期接入系统。当OVPD闭合时,接入并联电阻,复归后由另外的接触器切除电阻。

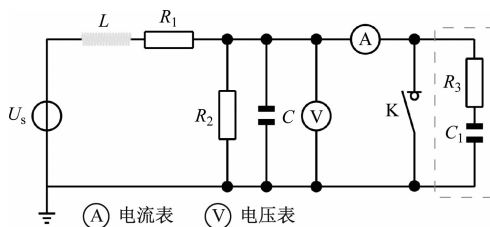
2.2.2 并联RC抑制操作过电压

采用在接地接触器开关侧并联RC阻容吸收器来降低弧电压的方法。文献[5]的研究结果表明:加装RC过电压抑制回路可避免钢轨电位误动作。对于城市轨道交通直流牵引供电走行轨回流系统而言,并联电容可能会与钢轨电感等参数引起系统

表 1 并联电阻抑制操作过电压测试结果 ($R_3 = 2 \Omega$)Tab. 1 Test results of parallel resistance suppressing operation overvoltage ($R_3 = 2 \Omega$)

序号	未采取操作过电压措施		并联电阻过电压抑制措施	
	燃弧时间/ms	过电压峰值/V	燃弧时间/ms	过电压峰值/V
1	10.1	347.2	28.3	110.9
2	16.6	156.0	27.9	109.9
3	10.2	340.5	27.8	117.5
4	9.1	361.6	28.3	111.7
5	10.3	364.4	28.8	111.6
6	18.6	117.6	28.2	110.6
7	14.5	177.3	29.0	110.1
8	22.5	151.4	28.5	121.9
9	19.9	154.4	29.2	110.5
10	14.1	303.2	27.8	111.1

振荡,而并联 RC 可以抑制操作过电压,但同样也会引起其他位置处的钢轨电位发生一定的振荡。并联 RC 抑制操作过电压简化原理图如图 4 所示。



注: C_1 为 RC 吸收回路电容。

图 4 并联 RC 抑制操作过电压简化原理图

Fig. 4 Diagram of simplified principle of parallel RC (resistance capacitor) suppressing operation overvoltage

2.2.3 结合闭锁电流设置多段整定值

OVPD 是保护乘客人身安全的设备,其整定值的设置需满足规范。关于乘客人身安全,一般按照 IEC 62128-1:2013《轨道交通. 固定装置. 第 1 部分: 防电击的保护性措施》提供的人体耐受曲线、不同持续时间最大允许人体压降和接触电压(直流)来要求的。电压越低,人体耐受时间越长。当钢轨电位达到 150 V 时,人体的耐受时间为 300 s,故在欧洲标准及 IEC(国际电工委员会)标准中,将钢轨电位限制为 120 V,以提供一个安全系数。OVPD 的整定值应同框架电压保护及标准人体耐受电压-时间曲线配合。2 个标准中的电压 U -时间 t 曲线、钢轨电位限制装置及电压型框架保护整定曲线对比如图 5 所示。

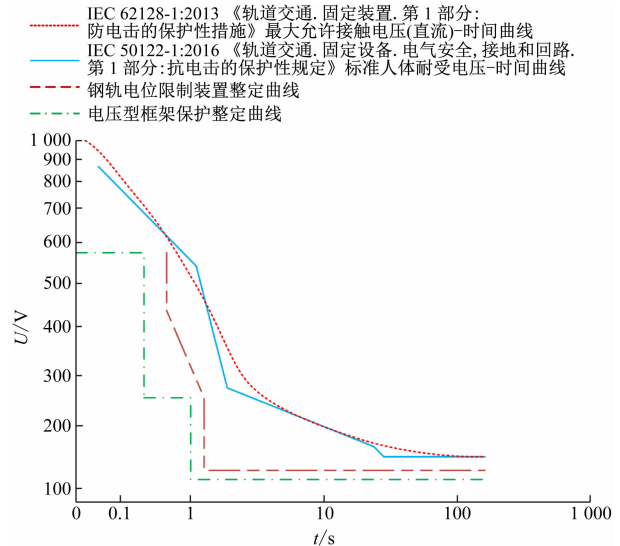


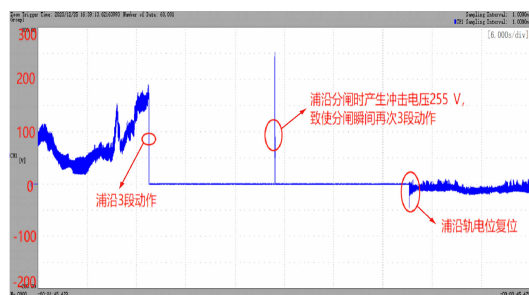
图 5 2 个标准中的电压-时间曲线、钢轨电位限制装置及电压型框架保护整定曲线对比

Fig. 5 Comparison of voltage-time curves, OVPD (over-voltage protection device) and framework voltage protection setting curves in two standards

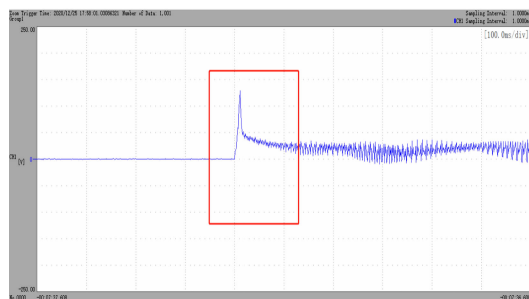
我国运行的线路经常出现钢轨电位过电压定值 2 段、甚至过电压定值 3 段电压保护误动的情况,尤其是钢轨电位过电压定值 2 段动作尤为明显。OVPD 动作电压波形软件截图如图 6 所示。由图 6 a)可知:本站钢轨电过电压定值 3 段动作,钢轨对地电位被拉低至零电位,一段时间后复归,钢轨电位接触器分闸,此时轨地之间存在 100 A 的电流,直流接触器截断线路钢轨上的电感电流;由于电弧的不稳定性,接触器分闸时会产生 255 V 的冲击过电压,导致分闸瞬间 OVPD 的钢轨电位过电压定值 3 段再次动作。由图 6 c)可知:邻站轨电位动作后在分闸复归过程中,会影响到周边 2~3 个车站。

由式(1)和式(2)可知:在 L 与 C 不变的情况下,通过降低分闸时刻流经 OVPD 的电流 I_0 可减小分闸产生的操作过电压。对 OVPD 分闸条件进行改进,当 OVPD 合闸动作完成后,检测流经 OVPD 的 I_0 绝对值:若 I_0 绝对值较大,且大于分闸电流整定值,OVPD 不分闸;若 I_0 绝对值较小,OVPD 可以分闸。

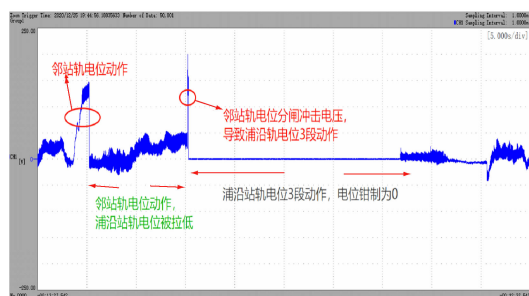
以钢轨电位动作闭锁电流作为分闸条件,可以减小分闸操作过电压,减少对邻近车站的影响,但电流的设置需根据不同设备厂商的接触器参数结合线路运行情况来确定。闭锁电流设置过高容易引起操作过电压,但 OVPD 合闸保持时间短,有利于减少入地的杂散电流;闭锁电流设置过低可减少



a) 波形 1



b) 波形 2



c) 波形 3

图6 OVPD 动作电压波形软件截图

Fig. 6 Software screenshots of OVPD action voltage waveform

操作过电压,但 OVPD 合闸保持时间长,杂散电流泄漏量较多,且分闸小电流会给接触器的灭弧带来一定的困难。OVPD 保护整定参数及整定值如表 2 所示。

2.3 新型抑制钢轨电位装置

2.3.1 屏蔽门系统与钢轨电位限制装置联动方案

地铁运行线路属于封闭区域,目前我国地铁均设置了屏蔽门。在列车未进站或乘客在车内等电位环境下,均处于安全状态,危及乘客安全的钢轨电位往往出现在列车进、出站的起停瞬间。屏蔽门系统与钢轨电位限制装置联动方案将列车的进、出站信号引入 OVPD 保护动作判定条件,对于列车进站后的钢轨电位进行分析。屏蔽门系统与 OVPD 联动方案示意图如图 7 所示。

表 2 OVPD 保护整定参数及整定值

Tab. 2 OVPD protection setting parameters and setting values

设备	保护项目	整定项目	整定值	备注
OVPD	电压保护	电压保护 1 段电压/V	120	
		电压保护 1 段时间/s	9	
		电压保护 2 段电压/V	158	
		电压保护 2 段时间/s	0.8	
		电压保护 3 段电压/V	170	
		电压保护 3 段时间/s	0	
		晶闸管动作电压/V	500	晶闸管固有值
		闭锁电流/A	60	可根据设备调整

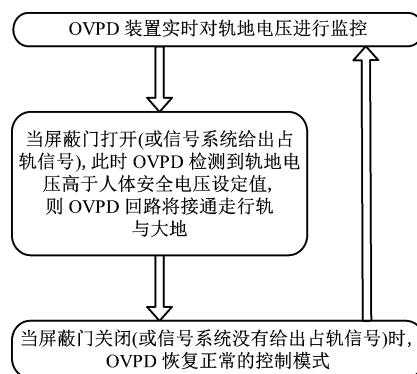


图7 屏蔽门系统与 OVPD 联动方案示意图

Fig. 7 Diagram of shield door system and OVPD linkage scheme

新型的 OVPD 控制方式可以在保证乘客上下车人身安全的基础上,增加列车进、出站信号作为 OVPD 的动作条件,减少由于 OVPD 动作而造成的杂散电流腐蚀,有利于降低对列车正常运行的干扰^[6]。

2.3.2 杂散电流抑制型钢轨电位限制装置

通过在传统的 OVPD 开关回路中并联一路非开关 IGBT(绝缘栅双极晶体管)限压支路,通过测量电压高低调节 IGBT 的导通角大小,进而改变接入支路的电阻,将轨地电位限制在安全范围,导通回路接入限流电阻,轨地回路电流也限定在较小范围,使得泄漏至大地的杂散电流量可控。

杂散电流抑制型钢轨电位限制装置主要由限压支路、接触器支路、晶闸管支路、测量回路、智能保护测控装置等组成。当钢轨电位升高时,限压、限流支路能够实现自动限压、限流;当钢轨电位降低后,限压、限流支路能够自动关断轨道与大地之间的杂散电流通路,并降低轨地电位。晶闸管支路

与开关支路作为限压支路的后备保护。当限压支路故障或钢轨电位超限时,将钢轨与大地直接短接,在保护限压支路的同时起到钢轨电位限制作用,保障乘客和设备的安全。杂散电流抑制型 OVPD 原理示意图如图 8 所示。

通过限压试验测试,限压支路通过定值设定(可整定):在钢轨电位大于等于 100 V 时自动投入,小于 90 V 时自动退出。OVPD 限压试验测试内容及结果如表 3 所示。在限压支路投入后,钢轨对地电位被可靠限制在安全电位范围内。

OVPD 限流试验测试内容及结果如表 4 所示。钢轨电位的施加试验电压 100 V,采用开关支路投入时的回路电流为 397 A,采用限压支路投入时的回路电流为 28 A。由此可知,限压支路的限流效果十分明显。

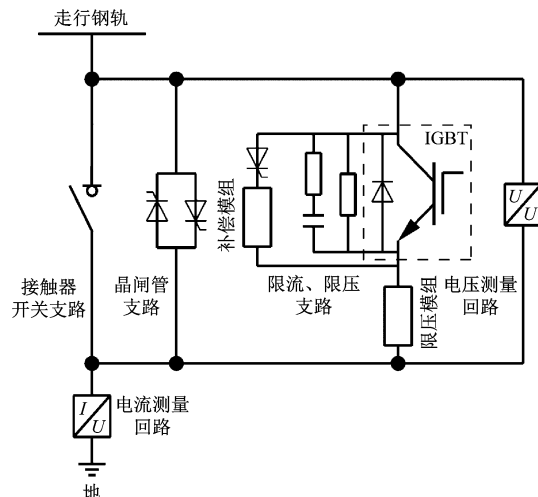


图 8 杂散电流抑制型 OVPD 原理示意图

Fig. 8 Principle diagram of stray current suppression type OVPD

表 3 OVPD 限压试验测试内容及结果

Tab. 3 OVPD voltage limitation test content and results

试验步骤	限压前电压/V	限压后电压/V	回路电流/A	限压支路状态	开关支路状态	备注
1	0	0	0	退出	分断	
2	50	50	0	退出	分断	
3	100	92	56	自动投入	分断	限压状态
4	130	94	146	投入	分断	限压状态
5	150	98	201	投入	分断	限压状态
6	130	94	146	投入	分断	限压状态
7	100	92	56	投入	分断	限压状态
8	89	89	0	自动退出	分断	限压状态
9	50	50	0	退出	分断	
10	0	0	0	退出	分断	

表 4 OVPD 限流试验测试内容及结果

Tab. 4 OVPD current limitation test content and results

试验步骤	限流前电压/V	限流后电压/V	回路电流/A	限压支路状态	开关支路状态
1	100	0	397	退出	强制闭合
2	100	92	28	强制投入	分断

2.3.3 柔性拓扑钢轨电位限制装置

柔性接地综合控制钢轨电位和杂散电流是指接地电压和电流全可控,可以根据系统状态动态控制接地电压、电流状态,实现钢轨电位与杂散电流的综合控制。目前,线路上 OVPD 频繁动作,其中大部分是由于接地状态改变引起的异常动作,而不是系统中正常产生的钢轨电位。

某车站钢轨电位超过 90 V 后,该车站的 OVPD 保护动作,将轨道直接与大地连接。此时,该车站

的钢轨电位会被钳位到零电位附近,而远端车站钢轨电位会被抬升,原本远端车站低于 90 V 的钢轨电位可能会被抬升至超过 90 V,进一步引起远端车站 OVPD 的保护动作。由 OVPD 动作引起的钢轨电位分布变化示意图如图 9 所示。

在实际应用中,由 OVPD 动作引起的其他车站 OVPD 误动作的情况频繁出现,大大增加了线路 OVPD 的动作频次,导致通过 OVPD 泄漏到周边的杂散电流较多。与此同时,排流装置的极性接地也

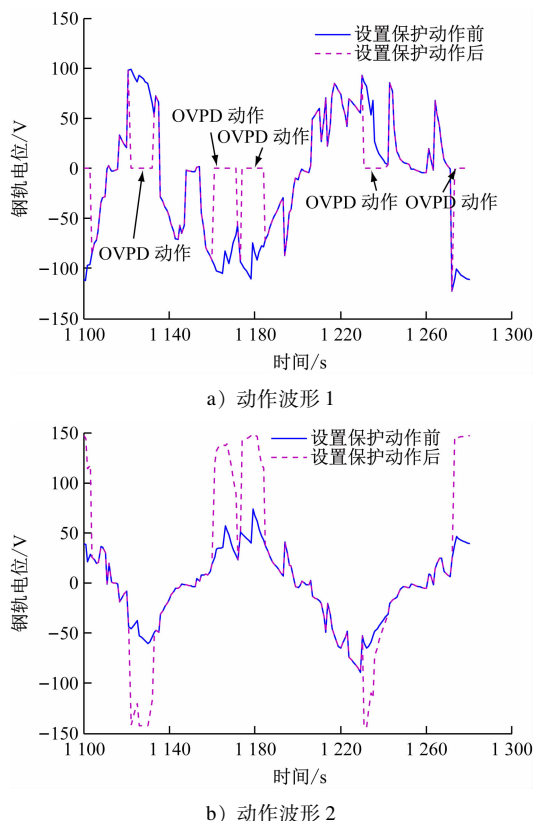


图9 由 OVPD 动作引起的钢轨电位分布变化示意图

Fig. 9 Diagram of rail potential distribution changes caused by OVPD action

会大大抬升线路钢轨电位的幅值,引起钢轨电位异常升高而导致 OVPD 动作。通过柔性接地控制技术可以使钢轨电位进行接地动作时为可控接地,而不是直接接地,将被控制的钢轨电位限制在 90 V (或低于 90 V 的可设定电压)。此时,就近车站的钢轨电位就不会引起远端车站钢轨电位的抬升,避

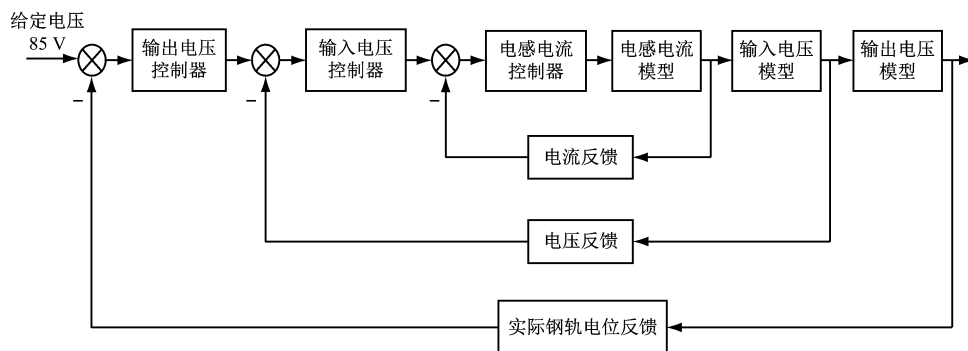


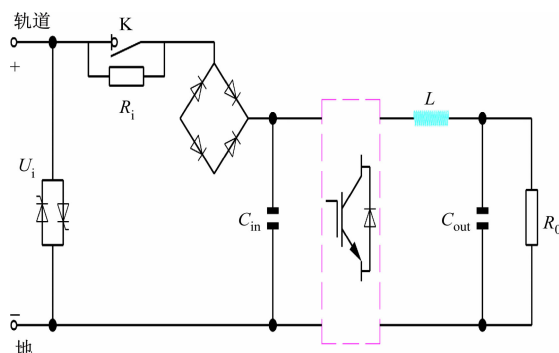
图 11 源端恒压控制策略示意图

Fig. 11 Diagram of source-side constant voltage control strategy

在柔性接地方案设计过程中,为保证短路等极端情况下设备的安全性,保留了传统 OVPD 钢轨电位过电压定值 3 段保护支路,反并联晶闸管支路,可

免了 OVPD 的异常频繁动作,大大降低了钢轨电位与杂散电流的幅值水平。

目前,柔性接地设计方案为基于电力电子技术的 DC(直流)/DC 全控变流装置,输出端接入电阻负载进行能量消耗。被控对象为走行轨对地电位,等效负极为大地,将装置设计成非隔离式 Buck 电路,输出端接电阻。通过 PWM(脉冲宽度调制)控制输出电压,实现输入电压、输出电压、输入电流的连续可调。柔性接地原理示意图如图 10 所示。电力电子全控功率单元可设计为模块化交错并联 Buck 电路、桥式电路等模块化功率单元的形式,实现调节电压的功能。根据不同的控制模式,分别设计不同的控制策略。源端恒压控制策略示意图如图 11 所示。为了实现装置的通用化,拟构建支路化、模块化系统结构,通过多模块并联满足不同工况下的系统容量需求。



注: U_i 为预充电回路电源; R_i 为预充电回路电阻; C_{in} 为输入电容; C_{out} 为输出电容; R_0 为回路电阻。

图 10 柔性接地原理示意图

Fig. 10 Diagram of flexible grounding principle

控硅晶闸管反向重复峰值电压不小于 3 000 V,正向平均电流不小于 3 000 A,可以保证与原 OVPD 装置具有相同的极端情况保护能力。

3 结语

目前,我国各大城市轨道交通运营线路已进入网络化运营时代,面临着频繁的钢轨电位越限动作和大量的杂散电流入地问题。本文从直流牵引供电系统回流理论入手,分析了钢轨电位及杂散电流的产生机理,探讨了影响钢轨电位的主要因素,调研了目前直流牵引供电系统中钢轨电位和杂散电流的现状问题,并对钢轨电位的抑制方案进行了详细的分析和讨论。

对于运营线路 OVPD 操作过电压引起的频繁误动作,可通过阻容吸收过电压进行抑制,但其在系统中的应用还待进一步验证,纳入闭锁电流逻辑的多段保护定值来抑制操作过电压是目前比较通用的方案。

在新型 OVPD 技术方案中,通过电力电子全功率变换器的拓扑单元对走行轨接地电压和电流进行动态柔性控制是极具潜力的治理措施,有望成为今后钢轨电位综合抑制治理的发展方向。

参考文献

- [1] 陆煜旻, 张华英. 上海轨道交通 3 号线石龙路停车场杂散电流状况分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 1): 75.
LU Yumin, ZHANG Huaying. Analysis of stray current in Shilong Road parking lot of Shanghai Rail Transit Line 3[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 75.
- [2] 赵勤, 王军平, 张栋梁. 城市轨道交通车辆段杂散电流分布规律测试分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 23.
ZHAO Qin, WANG Junping, ZHANG Dongliang. Field test on

stray current distribution in urban rail transit car depot[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(10): 23.

- [3] 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.
HU Chuan, BI Lin. Analysis of impact of metro track system resistance on stray current[J]. Modern Urban Transit, 2018(10): 47.
- [4] 李立勃. 北京地铁大兴线钢轨电位限制装置瞬动原因分析与优化设计[J]. 现代城市轨道交通, 2018(3): 10.
LI Libo. Rail potential limiting device transient cause analysis and optimization design on Daxing Line of Beijing Metro[J]. Modern Urban Transit, 2018(3): 10.
- [5] 陈民武, 赵鑫, 丁大鹏, 等. 城市轨道交通供电系统钢轨电位限制装置操作过电压研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 94.
CHEN Minwu, ZHAO Xin, DING Dapeng, et al. Research on switching surge of rail over-voltage protection device in power supply system for urban rail transit[J]. China Railway Science, 2017, 38(6): 94.
- [6] 王凯建, 韩连祥. 钢轨电位限制器新型控制方式研究[J]. 都市快轨交通, 2012, 25(6): 103.
WANG Kaijian, HAN Lianxiang. Study on the new control method of negative potential monitoring and protection device[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(6): 103.

· 收稿日期:2022-02-14 修回日期:2022-03-14 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-14 Revised:2022-03-14 Published:2024-07-10
· 第一作者:唐兆军,高级工程师, 1196165100@qq.com
通信作者:王颖,高级工程师, 418931311@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 252 页)

- [5] 李月, 张许颖. 我国“十四五”时期及中长期人口发展态势分析[J]. 人口与健康, 2020(8): 41.
LI Yue, ZHANG Xuying. China's '14th Five-Year Plan' period and medium and long-term analysis of population development trends[J]. Population and Health, 2020(8): 41.
- [6] 北京大学光华管理学院. 未来 15 年, 中国城市格局将发生重大变化[R/OL]. (2021-08-24) [2023-08-09]. <https://www.gsm.pku.edu.cn/economics/info/1024/2455.htm>.
Peking University. Guanghua School of Management. In the next 15 years, China's urban landscape will undergo major changes[R/OL]. (2021-08-24) [2023-08-09]. <https://www.gsm.pku.edu.cn/economics/info/1024/2455.htm>.
- [7] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通发展战略与“十四五”发展思路[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2021.
China Association of Metros. Urban rail transit development strategy and the development idea of the '14th Five-Year Plan'[R]. Beijing: China Association of Metros, 2021.

- [8] 夏海山, 韩宝明, 王琳妍. 中国城市轨道交通 TOD 建设发展 30 年回顾与思考[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(4): 2.
XIA Haishan, HAN Baoming, WANG Linyan. Review and reflections: transit-oriented development of urban rail transit in China in the past 30 years[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(4): 2.
- [9] 周晓勤. 中国城市轨道交通发展战略与“十四五”发展思路[J]. 城市轨道交通, 2020(11): 16.
ZHOU Xiaojin. The development strategy of China urban rail transit and the thinking of the tenth Five-Year Plan[J]. China Metros, 2020(11): 16.

· 收稿日期:2023-06-30 修回日期:2023-08-09 出版日期:2024-07-10
Received:2023-06-30 Revised:2023-08-09 Published:2024-07-10
· 通信作者:李娟,高级工程师, mengxiangkaiquan@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license