

城市轨道交通直流断路器小电流开断试验研究

刘禹彤¹ 齐 阳¹ 白坚实² 孟倩钰¹ 赵竞智¹

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 110015, 沈阳;

2. 国网辽宁省电力有限公司, 110006, 沈阳//第一作者, 工程师)

摘 要 目的:城市轨道交通直流断路器开断过程中,熄弧问题将导致系统开断问题,因电弧能量小、燃烧时间长等问题会引发开断时间增加,甚至不能开断的情况。因此,需研究快速切除故障电路、保障系统供电可靠的关键部件,以保障轨道交通系统安全稳定运行。方法:针对电流开断所产生的电弧运动问题,分析了该电弧的形态和位置变化;基于直流开断过程中的电磁学原理,对城市轨道交通直流断路器进行试验研究;通过开断试验对直流断路器分析实际开断小电流过程中的多种特性;研究了触头电弧电压、电流、开断时间等参数,并分析直流断路器开断小电流的难点和原因;研究了提升小电流开断能力的方法和装置,并通过试验验证方案的可行性。结果及结论:由于电弧自身的能量和断路器结构等问题,小电流开断时间相对短路条件等大电流开断时间有所延长,而随着开断电流的变化,存在开断时间临界拐点,此时开断小电流的时间最长。同时,通过附加装置引入外磁场,可产生电磁吹弧效果,有效提升小电流开断能力。

关键词 城市轨道交通;直流断路器;小电流开断

中图分类号 TM561:U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.027

istics of the actual low current breaking in DC circuit breaker are analyzed. Parameters such as contact arc voltage, current, breaking time are studied, and challenges and reasons for breaking low currents are analyzed. Methods and devices to enhance the low current breaking ability are explored, and the feasibility of the proposed solutions is verified through testing. **Result & Conclusion:** Due to the arc's own energy and circuit breaker structure issues, the low current breaking time is relatively longer than that for short-circuit conditions with higher currents. With variations in breaking current, there is a critical turning point in breaking time, where the breaking time for low current is the longest. Additionally, introducing an external magnetic field through additional devices can create an electromagnetic blowing arc effect, effectively enhancing the ability to break low currents.

Key words urban rail transit; DC circuit breaker; low current breaking

First-author's address Economy Technical Research Institute of Liaoning Electric Co., Ltd., 110015, Shenyang, China

Research on Low Current Breaking Test of DC Circuit Breakers in Urban Rail Transit

LIU Yutong, QI Yang, BAI Jianshi, MENG Qianyu, ZHAO Jingzhi

Abstract **Objective:** In the process of opening a DC circuit breaker in urban rail transit, the arc extinction problem can lead to system initiation issues. Problems such as low arc energy and extended burning time can cause an increase in breaking time or even situations where breaking is not impossible. Therefore, it is essential to study key components that rapidly cut off faulty circuits and ensure system power supply reliability, in order to ensure the safe and stable operation of the rail transit system. **Method:** In regard to the arc motion problem generated during current breaking, the form and position changes of the arc are analyzed. Based on the electromagnetic principles of DC breaking, tests are carried out on urban rail transit DC circuit breakers. Through breaking tests, various character-

0 引言

国家“十四五”规划提出大力发展城市轨道交通,提升人民日益增长的物质生活需要,促使社会由高速发展向高质量发展转型。城市轨道交通系统作为一级重要电力负荷,其对保障社会稳定、维持人民生活起着至关重要的作用。DCCB(直流断路器)是城市轨道交通供电系统的关键部件,其具有快速切除故障电路、保障系统供电可靠的能力^[1-3]。目前,直流断路器的开断能力受直流系统无自然过零点的制约,使得开断过程中的熄弧问题成为系统开断研究的难题。

除了短路条件下的开断困难外,直流断路器还存在小电流开断的难题,因电弧能量小、燃烧时间长等问题引发开断时间增加,甚至不能开断的情

况,这困扰着国内外众多学者;同时,关于小电流开断的研究也少见报道。

因此,本文基于直流开断过程中的电磁学原理,分析了直流断路器开断小电流的难点和原因,研究了提升小电流开断能力和装置,最后通过试验验证该方案的可行性。

1 小电流开断电磁学研究

1.1 小电流电弧产生原理

电弧是高温高电导率的游离气体,其在触头间产生并运动时对触头材料产生烧蚀作用^[4-5]。本研究建立的灭弧系统模型如图 1 所示,选取 1 000 A 和 200 A 的电流作为开断条件,通过高速摄影仪拍摄的电弧运动过程见表 1。由表 1 可以发现,当回路电流较大时,触头断开过程产生的电弧向灭弧室中运动,被灭弧室格栅分割,最后完全熄灭,实现电流的完全开断;当电流较小时,电流电弧在触头间产生,却不能进入到灭弧室中,在经历较长时间的持续燃烧后,最终才能完全熄灭,极端条件甚至出现无法开断的情况。

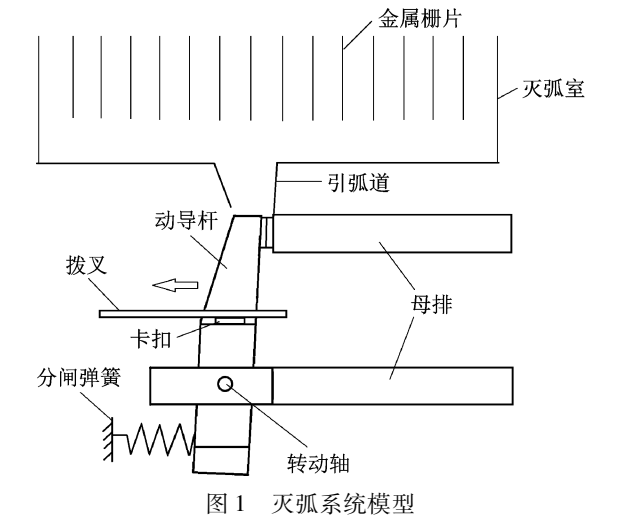


图 1 灭弧系统模型

1.2 小电流电磁计算

供电系统回路的电流密度 J 可以通过电场方程式(1)和式(2)求得:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 \\ \mathbf{E} = -\nabla \varphi \\ \mathbf{J} = \mathbf{E} / \sigma \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$I = \oint_s \mathbf{J} d\mathbf{S} \quad (2)$$

表 1 不同时间、电流开断条件下的电弧运动过程
Fig. 1 Arc motion process under different time and current interruption conditions

时间 t/ms	电流 $/\text{A}$	电弧运动过程
2.0	1 000	
5.0	1 000	
8.0	1 000	
8.5	1 000	
8.7	1 000	
9.0	1 000	
10.1	1 000	
11.5	1 000	
12.5	1 000	
7.5	200	
28.0	200	
50.0	200	
70.0	200	
100.0	200	
150.0	200	

式中:

- φ ——电位标量;
- ∇ ——梯度算子;
- E ——电场强度;
- J ——电流密度;
- σ ——导体的电导率;
- S ——磁场线穿过的面积;
- I ——流过导体的总电流。

根据恒定电流的磁场方程式(3)计算电磁场分布。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \mathbf{A} \end{cases} \quad (3)$$

式中：

μ ——介质磁导率；

A ——磁场线穿过的表面积；

B ——磁感应强度。

使用 ANSYS 有限元分析软件对直流断路器进行电磁仿真。回路模型在 ANSYS 有限元分析软件中进行属性赋值、网格剖分、施加载荷和有限元求解等步骤^[6-8]，其得到的电流分布和磁场分布如图 2 及图 3 所示。由图 2 及图 3 的仿真结果可知，小电流开断时电磁分布在触头处最为密集。

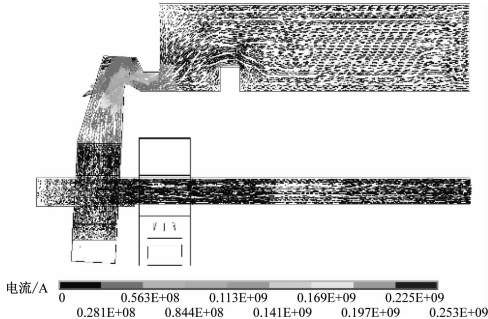


图 2 采用 ANSYS 软件计算电流分布矢量图截图

Fig. 2 Screenshot of current distribution vector diagram calculated by ANSYS

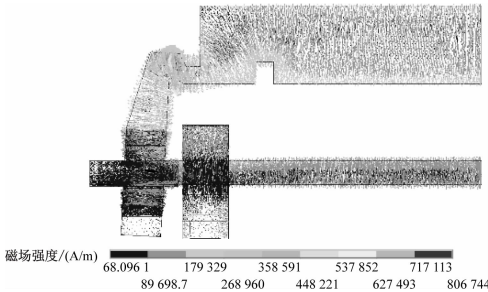


图 3 采用 ANSYS 软件计算磁场分布矢量图截图

Fig. 3 Screenshot of magnetic field distribution vector diagram calculated by ANSYS

2 小电流开断优化方案

2.1 小电流开断过程优化

由上文可知：①在小电流开断过程中，在 1 000 A 电流中实现断路器的开断，其全开断时间约为 13 ms，在 $t=2.0$ ms 时，电弧起燃；在 $t=5.0$ ms 左右，电弧燃点已转移到跑弧道上，整个电弧转移过程需 3.0 ms。②在小电流开断过程中，在 200 A 电流中实现断路器开断时间大于 150.0 ms：在 $t=7.5$ ms 时，电弧起燃；在 $t=50.0$ ms 左右，电弧燃点转移到跑弧道上，整个电弧转移过程需 42.5 ms，其远大于 1 000 A 电流的开断时间。通过分析可以发现，电

流减小后对电弧转移过程的影响相对较小，电弧在跑弧道上的运动速度和在灭弧室内的扩展速度明显减慢；同时，由于电弧能量偏小，电弧运动的连续性变差，电弧电压的多次跌落表明电弧在运动过程中发生了多次背后转移现象。

考虑到上述电弧燃烧时间延长的分析结果，需要采取辅助手段驱动电弧向灭弧室运动，使弧柱不断被拉长冷却以产生高电压。同时，增加的小电流辅助开断装置应不影响断路器的其他性能，特别是不能影响大电流下的开断性能。

2.2 小电流开断优化装置

本文通过对灭弧优化方法的研究，采用外加磁场的手段来辅助直流断路器中小电流的开断，其本质是通过外加磁场提供的附加电磁力来驱动电弧的运动。

为对小电流开断进行优化，本文设计了一套小电流磁吹装置，如图 4 所示。该装置由 1 个线圈和多个导磁体组成。线圈由直径为 1 mm 宽、额定电流为 2 ~ 4 A 的细导线绕制而成，共绕制 20 000 匝。图 5 为小电流磁吹装置电路图。磁吹装置通过外部提供稳定电源和系统 1 800 V 电源形成电磁力。

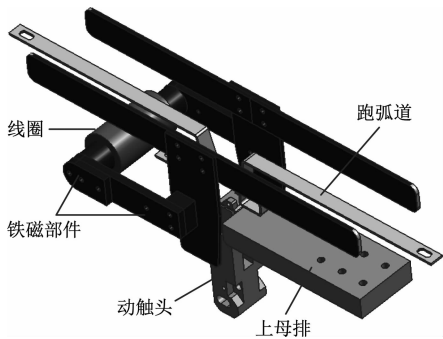


图 4 小电流磁吹装置图

Fig. 4 Device diagram of lowcurrent magnetic blowing device

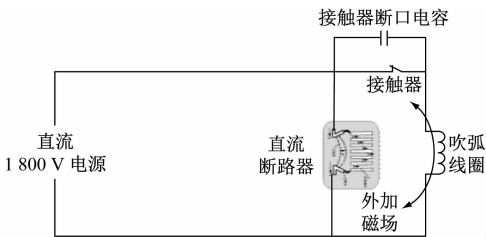


图 5 小电流磁吹装置电路图

Fig. 5 Circuit diagram of low current magnetic blowing system

3 小电流开断试验

试验所用的直流回路如图 6 所示,通过变压、整流获得试验直流 1 800 V 电源电压。试验使用城市

轨道交通空气直流断路器作为试验设备,其额定电压为直流 1 800 V,额定电流为 4 000 A,初始状态置于合闸位置。试验中,给回路通以不同峰值的小电流,通过断路器自身的脱扣装置实现小电流开断。

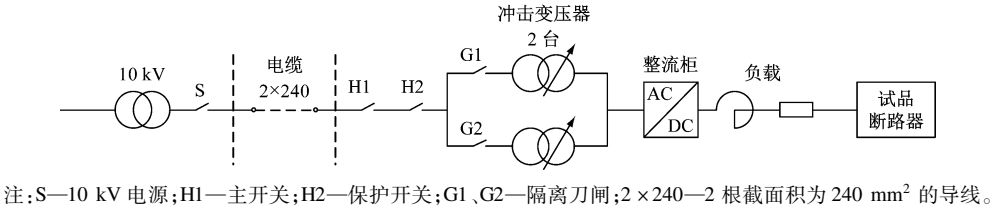


图 6 试验回路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the test circuit

为了测试断路器在磁吹装置辅助下的小电流开断性能,试验采用 200 A 及以下小电流进行多组开断试验。同时,为了消除试验随机性,试验采用双向电流分别进行开断。图 7 为 50 A 电流下测得的 U - I (电压-电流) 曲线。由图 7 可以发现,在外加磁场作用下,电弧沿跑弧道向灭弧室运动,电弧电压呈现上升趋势;而后电弧进入到灭弧室中,弧柱被金属格栅切割,电压不断升高,电流随之减小,最终开断时间约为 140 ms,低于未装磁吹装置的开断时间。这证明了磁吹装置的有效性。

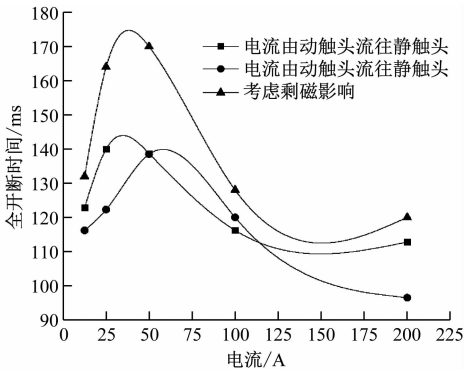


图 8 小电流开断时间曲线图

Fig. 8 Low current breaking time curve

小,开断时间开始减少,这是因为电弧电流过小时,电弧弧柱过度收缩,拉开一定长度便会迅速冷却熄灭。因此,可以得出小电流开断过程存在开断临界点,为直流断路器开断过程研究及轨道交通直流供电系统的可靠性研究奠定了试验基础。

4 结语

本研究分析了:①城市轨道交通直流断路器的小电流开断原理;②利用 ANSYS 有限元软件计算电磁分布;③分析了开断小电流的难点和原因;④研究了提升小电流开断能力的方法和装置,并通过试验验证了方案的可行性。通过本研究,可得到以下结论:

1) 小电流开断时,由于电弧自身的能量和断路器结构等问题,使得开断时间较短路条件等大电流开断时间延长,而外加磁场可有效提升小电流开断能力。

2) 小电流开断时,随着电流的不断减小,开断时间存在先增加后减小的变化趋势,供电系统存在电流临界点,此时开断时间最长,后续可做进一步

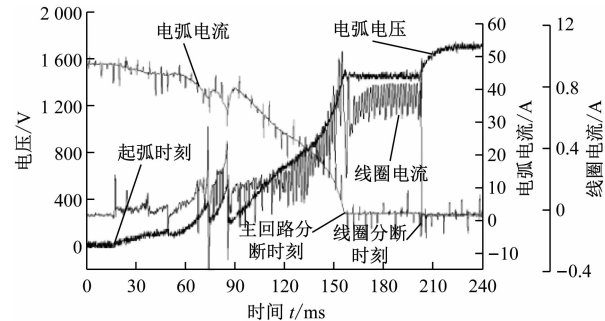


图 7 50 A 电流下开断过程的 U - I 曲线图

Fig. 7 U - I curve diagram of the breaking process at 50 A current voltage

试验中,在小电流磁吹装置的辅助下开断 12.5 ~ 200.0 A 的小电流回路,得到小电流开断时间曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,随着开断电流逐渐减小,开断时间呈现先增加再减小的趋势;通过分析电弧电压和电流的变化可以发现,电流越小,电弧受到的电磁力减小,使得电弧运动过程变慢,导致电弧电压上升变慢,电流到达过零点的时间延长;同时,由于电弧能量偏小,电弧运动连续性变差,电压多次跌落表明过程中发生了多次背后转移。当电流进一步减

研究,分析临界点的影响条件和降低临界点开断时间的优化措施。

参考文献

[1] 齐阳. 多 HVDC 输电系统 SSO 抑制措施的协调控制研究[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 108.
QI Yang. The coordination control for SSO restrain in multi-HVDC transmission system[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 108.

[2] 齐阳, 刘禹彤, 吉星, 等. 考虑电动斥力的直流牵引供电系统开断特性[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1): 74.
QI Yang, LIU Yutong, JI Xing, et al. Opening and breaking characteristics of DC traction system based on electro-dynamic repulsion force[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(1): 74.

[3] 张冠生. 电器理论基础[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1989.
ZHANG Guansheng. Fundamentals of electrical appliance theory [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1989.

[4] 荣命哲, 杨飞, 吴翊, 等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1.
RONG Mingzhe, YANG Fei, WU Yi, et al. New developments in switching arc research in DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 1.

[5] 陈德桂. 直流开断技术的进展与新型直流断路器[J]. 电器与

能效管理技术, 2014(21): 1.
CHEN Degui. Development of modern DC switching technologies and new type of DC circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(21): 1.

[6] 齐阳, 刘禹彤, 白坚实, 等. 基于多能转换的多端直流开断系统开断特性试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 87.
QI Yang, LIU Yutong, BAI Jianshi, et al. Breaking characteristics experiment of multi-terminal DC system based on multi-energy exchange[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 87.

[7] 齐阳, 刘禹彤, 杨天蒙, 等. 轨道交通用空气直流断路器关键部件仿真研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(1): 1.
QI Yang, LIU Yutong, YANG Tianmeng, et al. Overview of simulation research on key components of air DC circuit breaker used in rail transportation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(1): 1.

[8] 齐阳, 刘禹彤, 杨天蒙, 等. 基于空气直流断路器的中低压直流开断性能的试验研究[J]. 电工电气, 2019(4): 42.
QI Yang, LIU Yutong, YANG Tianmeng, et al. Experimental research on opening characteristics of mid-low voltage DC grid based on air DCCB[J]. Electrotechnics Electric, 2019(4): 42.

(收稿日期:2021-09-01)

阿尔斯通发布意大利首列氢动力列车

2023 年 10 月 3 日,意大利伦巴第大区 FNM 交通集团与阿尔斯通联合推出氢动力 Coradia Stream 列车。该型列车将于 2024 年底至 2025 年初在瓦尔卡莫尼卡投入商业运营服务。氢动力型的 Coradia Stream 列车满足欧洲到 2050 年二氧化碳排放量减少 100% 的目标,是意大利第一列配备氢动力的零碳排放列车,被称为“动力车”的中间车是氢能源的核心技术所在。该列车总容量为 260 个座位,续航里程超过 600 km。

FNM 和阿尔斯通于 2020 年 11 月签署协议,将为意大利北方列车公司(Trenord)提供 6 列氢燃料电池列车,并可选择另外提供 8 列列车。旨在从交通领域开始,在瓦尔卡莫尼卡发展价格合适的和产业化的氢供应链,启动该地区的能源转换,并为当地主要的公共交通方式的脱碳做出贡献。这是一个高度创新的项目,除其他外,设想建设 3 座工厂,用于生产、储存和分配可再生氢且不排放二氧化碳。

新型氢动力列车基于阿尔斯通单层 Coradia Stream 区域列车平台研制,面向欧洲市场,已由阿尔斯通在意大利生产。氢动力 Coradia Stream 列车将保持电动版被乘客高度评价的高标准舒适度,并将提供与柴油列车相同的运行性能(包括续航里程)。氢动力 Coradia Stream 列车可以在非电气化线路上运行,作为使用化石燃料的火车的替代品,并具有与其他电动 Coradia 车型相当的舒适性和安静性。

该列车是在阿尔斯通位于意大利的工厂制造和生产的,萨维利亚诺工厂负责开发、认证、生产和测试,瓦多利古雷工厂负责“动力车”的装备(其中安装了技术创新的氢相关部件,塞斯托圣乔瓦尼工厂负责组件的生产,博洛尼亚工厂负责信号系统的开发。

(摘编自网易-轨道世界)