

考虑电动斥力的直流牵引供电系统开断特性

齐 阳 刘禹彤 吉 星 佟俊达 周 沫 高凤喜

(国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 110015, 沈阳//第一作者, 工程师)

摘 要 空气直流断路器在城市轨道交通直流牵引供电系统中起着分断电路的作用。随着断路器的开断容量的提高, 电动斥力对供电系统开断性能的影响越发明显。基于麦克斯韦电磁学理论, 分析了电动斥力的产生原理, 计算了分断电流过程触头间的电动斥力。通过建立动力学仿真模型, 分析了断路器空载和短路开断时的分闸特性, 并进行了断路器开断特性的试验研究。

关键词 城市轨道交通; 直流牵引供电系统; 空气断路器; 电动斥力; 开断特性

中图分类号 U231.8; TM561.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.01.016

Opening and Breaking Characteristics of DC Traction System Based on Electro-dynamic Repulsion Force

QI Yang, LIU Yutong, JI Xing, TONG Junda, ZHOU Mo, GAO Fengxi

Abstract The air DC circuit breaker in urban rail transit DC traction power supply system is mainly used for breaking circuit. With the increase of opening and breaking volume, the impact of electro-dynamic repulsion force on the opening and breaking performance of power supply system is growing evident. Based on Maxwell electromagnetism theory, the emergence principle of electro-dynamic repulsion forces is analyzed, and the electro-dynamic repulsion force between contact point during current breaking process is calculated. Through building dynamics simulation model, the separation characteristics demonstrated during breaker empty load and short circuit opening and breaking are analyzed, and opening and breaking characteristics of the breaker are tested and studied.

Key words urban rail transit; DC traction power supply system; air DCCB (direct current circuit breaker); electro-dynamic repulsion force; opening and breaking characteristics

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

作为城市轨道交通的重要供电形式, 直流牵引供电系统具有输送电能功率和能量损耗更小、对通信干扰小、调节更加快速准确等优点。作为城市轨道

交通直流牵引供电系统保护开关的中低压空气直流断路器(Air Direct Current Circuit Breaker, 简称 Air DCCB), 因其具有开断原理简单、可靠性高等特点, 应用非常广泛。

直流断路器的主要性能体现在开断短路电流的能力。近年来多所国家重点院校和大型企业进行了直流断路器开断技术的自主研究工作。文献[1]利用 ADAMS 动力学分析软件对断路器的机构特性进行动态的仿真计算, 获得了断路器分、合闸过程的动态特性曲线, 并通过试验验证了仿真计算的正确性; 文献[2]对空气断路器中的电弧行为进行了仿真计算和试验研究, 讨论了电弧在开断过程中的运动过程及参数特性, 为直流开断过程中电动斥力的分析提供了有效的参考。以往对于断路器分断特性的研究, 由于受技术条件限制, 仅仅停留在对空载状态时触头系统运动特性的计算分析上。而直流断路器在开断短路电流时, 由于受到电动斥力的作用, 其分闸特性与空载状态下的相比有着巨大的差异, 包括分闸时间、触头速度及弹跳等物性参数都有显著差异。同时, 由于断路器的分闸过程需要分闸弹簧、缓冲限位以及脱扣器等操作机构的协同配合来完成, 而组成这些机构的零件繁多、运动复杂^[3], 因此, 仿真和试验结合的研究方式成为关键而重要的方法。综上所述, 对于城市轨道交通牵引供电系统的直流断路器而言, 建立一套全面完备的分断特性研究体系, 其必要性不言而喻。

本文基于城市轨交通用空气直流断路器, 首先分析了断路器开断电流时电动斥力的产生原理和计算方法, 然后仿真计算了断路器触头分闸特性, 最后进行了相关的试验研究, 得到了相关的特性参数, 并从能量转化等方面分析了触头弹跳等分闸特性参数。

1 电动斥力的计算原理和方法

载流导体在磁场中会受到电动斥力的作用, 一

方面会使断路器的组件发生破坏性变形;另一方面,触头部件可能会由于电动力的作用被斥开而在触头间隙中产生电弧,电弧的巨大能量会烧蚀触头材料,造成触头表面凹凸不平,影响断路器的性能,而当触头斥开后又在触头弹簧力的作用下再次闭合,极有可能会出现动熔焊现象,导致断路器的损坏。因此,利用电磁分析对动触头在出现短路电流时所受到的电动斥力进行计算,有着十分重要的意义。

1.1 电动斥力的产生原理

在动静触头闭合状态下,导电回路产生的自励磁场会对动触头产生电动斥力的作用,如图1所示。斥力主要分为两部分:当电流流经动、静导电回路时会出现异向电流,由电磁场基本原理可知异向电流相互之间产生斥力,即洛伦兹力,如图1a)所示;同时,动静触头间接触表面看似平整,在微观下却粗糙不平,当触头闭合时,实际上仅有少数的导电斑点相互接触,实际接触面积仅占触头视在接触面积很小的一部分,这就导致电流在流过导电斑点前后发生收缩的现象,由此产生的力为霍尔姆力^[4],如图1b)所示。霍尔姆力实际上也是因为异向电流相互作用所产生的斥力,因此从本质来说是一种特殊的洛伦兹力。导电回路中只要有电流流过的单元都受到电动力的作用,因此电动力是非均匀分布的力密度。将每个单元相对于转轴的距离与此单元受到的力叉积,然后将单一转矩进行积分,即得到相对于转轴的总转矩。

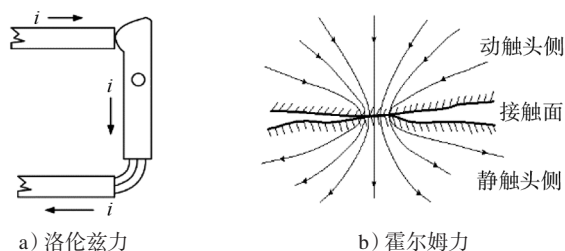


图1 触头电动斥力产生原理示意图

1.2 洛伦兹力的计算方法

洛伦兹力本质上是导电回路中的电流在自身产生的磁场中受到的作用力。断路器在通过稳定电流时,触头导电回路的电流密度可以通过式(1)和式(2)的麦克斯韦电场方程求得。

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

$$I = \int_S J \cdot dS \quad (2)$$

式中:

φ ——电位标量;
 E ——电场强度;
 J ——电流密度;
 σ ——导体的电导率;
 I ——流过导体的总电流;
 ∇ ——散度算子;
 S ——导体截面积。

计算得到电流密度的分布之后,根据恒定电流的磁场方程式(3)即可计算整个场域电磁场的分布。

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times D = J \\ B = \nabla \times D \end{cases} \quad (3)$$

式中:

μ ——介质磁导率;
 D ——矢量磁位;
 B ——磁感应强度。

根据安培力定律计算触头杆受到的洛伦兹力,对于转动式触头结构要先计算动触头杆受到的相对转轴的合力矩,然后再计算归算到触点处的电动斥力。转动力矩和洛伦兹力 F_L 可以通过式(4)计算得到。

$$\begin{cases} M = \int V r \times (J \times B) dV \\ F_L = M / l \end{cases} \quad (4)$$

式中:

l ——触点中心到动触头杆转轴之间的距离;
 r ——触点半径;
 V ——触点体积。

1.3 霍尔姆力的计算方法

根据电接触理论,霍尔姆力 F_H 的计算解析式为:

$$F_H = \frac{\mu_0}{4\pi} I_{CT}^2 \ln \sqrt{\frac{\xi H A}{F}} \quad (5)$$

式中:

I_{CT} ——流过触头系统的电流值,A;
 μ_0 ——真空中磁导率;
 ξ ——接触情况系数,根据相关的实验和仿真经验, ξ 的值一般在 0.3~0.6 之间^[5];
 H ——触点材料的布氏硬度,kgf/mm²,对于 AgCdO(15)触头, H 的取值为 700~1250 kgf/mm²;
 A ——触点之间的视在接触面积,mm²;
 F ——触头之间实际接触压力,N。

式(5)中的接触力 F 等于触头终压力 F_k 与触点受到的电动斥力 $(F_L + F_H)$ 之差,即:

$$F = F_k - F_L - F_H \quad (6)$$

于是霍尔姆力的计算公式变为:

$$F_H = \frac{\mu_0}{4\pi} I_{Cr}^2 \ln \sqrt{\frac{\xi H A}{F_k - F_L - F_H}} \quad (7)$$

记为:

$$f(F_H) = F_H - \frac{\mu_0}{4\pi} I_{Cr}^2 \ln \sqrt{\frac{\xi H A}{F_k - F_L - F_H}} = 0 \quad (8)$$

在已知触头终压力、电流和触点视在接触面积的情况下,求解该方程,即可获得动静触点之间的霍尔姆力。由于在开断过程中产生的电弧是高温高导电率的游离气体,其形状、位置是时刻变化的。经过大量的试验研究发现,对于同一个灭弧系统,在正常开断时,电弧的运动是具有规律性的,其位置的变化、运动的轨迹在一定的范围内。经过计算,在 80 kA 短路电流下不同触头分开距离(以下简称“开距”)时触头受到的电动斥力如表 1 所示。

表 1 80 kA 短路电流下不同触头开距时触头受到的电动斥力

触头开距/ mm	触头受力			
	电动斥力/N		电动斥力力矩/(N·m)	
	最大值	最小值	最大值	最小值
0	3 098	3 098	123.70	123.70
5	1 199	988	165.21	136.13
10	1 526	1 395	210.28	192.22
15	1 147	1 127	158.04	155.34

2 分闸特性建模计算

直流断路器触头系统和操作机构是影响断路器分闸性能的重要方面,使用动力学仿真软件 ADAMS 建立空载状态下动力学模型对其进行数值分析。由于断路器内众多零部件对断路器分闸特性没有影响,因此对模型进行适当简化处理,简化后的模型如图 2 所示。对各部件的材料属性进行赋值,添加联动部件的运动约束,施加载荷^[6]。经过动力学仿真求解,可以得到相应的参数曲线、动态视频和分析报告^[7]。图 3 所示为触头开距曲线和触头分开速度曲线。

将计算得到的电动斥力利用样条函数(Spline)导入,然后使用 AKISPL(Akima Fitting Method)对动触头施加随开距变化的电动斥力,得到如图 4 所示的触头分闸特性曲线。图 4 中两条曲线分别为考虑最大和最小电动斥力的分闸特性。

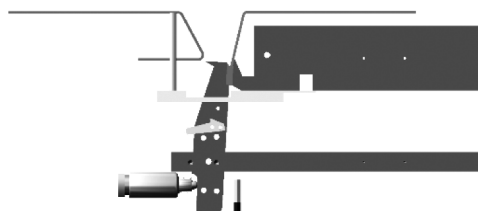


图 2 直流开断系统 ADAMS 动力学模型示意图

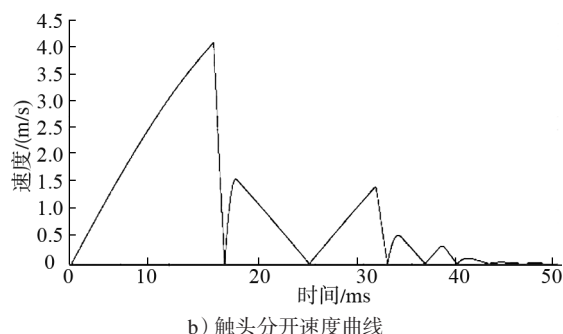
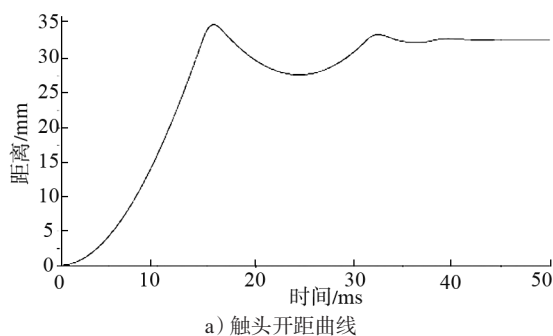


图 3 直流开断系统空载状态分闸特性曲线图

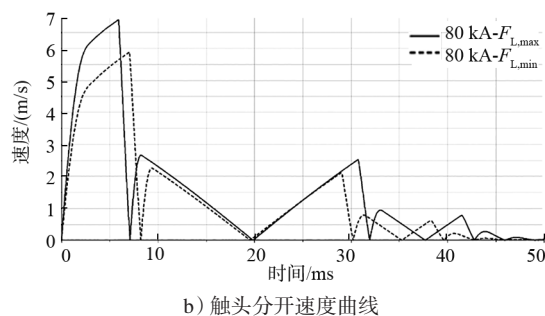
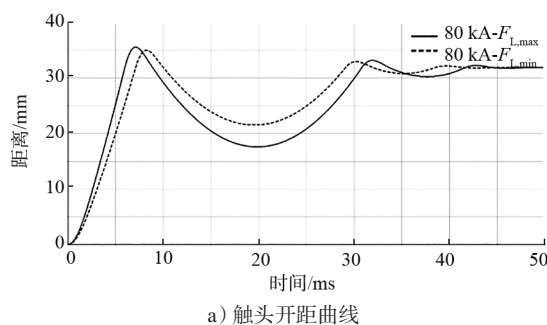


图 4 直流开断系统 80 kA 短路电流开断时分闸特性曲线图

不同载荷状态下直流断路器分闸特性参数如表 2 所示。由表 2 可见,空载状态和短路开断时的分闸特性两者差异十分明显。在开断过程中电动斥力的介入,使动触头到达最大开距时间更短,碰撞前的瞬时速度更快,反弹的距离更大,弹跳持续的时间更长。由此可知,电动斥力对直流开断的影响十分巨大。

表 2 不同载荷状态下直流断路器分闸特性参数

参数	载荷状态	
	空载	80 kA 短路电流开断
触头开距/mm	35.0	35.0 ~ 35.5
刚分到最大开距时间/ms	15.5	7.1 ~ 8.3
最大反弹距离/mm	7.5	13.5 ~ 18.0
第一次反弹持续时间/ms	17.0	22.0 ~ 25.0
触头最大瞬时速度/(m/s)	4.2	5.9 ~ 6.9

3 开断特性的试验研究

3.1 试验条件

本文利用文献[1]中 2 kV/30 kA 直流断流冲击

试验回路进行直流断路器在空载和短路开断时的分闸特性研究。试验所用的城市轨道交通空气直流断路器如图 5 所示,其额定电压为 DC 1 800 V,额定电流为 4 kA,最大开断电流为 120 kA,主要包括合闸机构、导电回路、脱扣机构、触头系统、灭弧系统和控制电路等,可实现自动脱扣分闸、远程控制分合闸等功能。直流断流冲击试验回路工作原理如图 6 所示,从 10 kV 电网取电,经两根电缆输送到保护开关、冲击变压器、整流柜获得试验时所需的直流电源。



图 5 空气直流断路器实景图

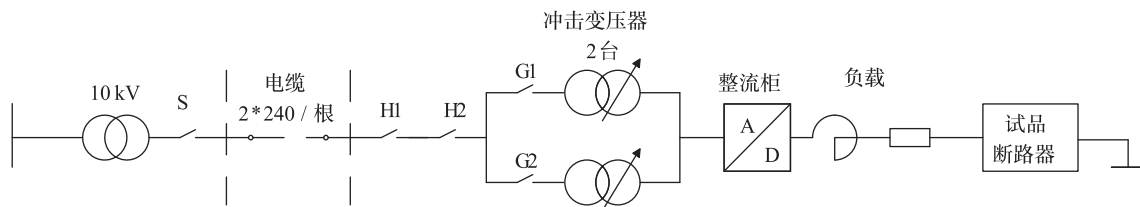


图 6 空气直流断路器直流断流冲击试验回路示意图

试验时,要将断路器置于合闸状态,给回路通一个具有一定上升率的直流大电流,以观察直流断路器是否会因直接脱扣器的动作实现脱扣分闸。试验准备时,调节电源电阻和电源电抗,达到需要的电源电压;调节负载电阻和负载电抗,实现试验电流和时间常数的调整。

3.2 开断特性试验

试验中利用直线位移传感器测量动触头开距的变化。通过试验得到的空载状态下分闸特性相关参数如表 3 所示。

为了分析断路器在开断过程中的分闸特性,需要进行短路条件下的开断试验。在开断试验中,使用直线位移传感器来观察触头的开距变化,并使用示波器进行记录。在计算触头开距时,将输出的电压信号换算成位移信号。经过测量发现,传感器输出位移曲线的数值乘以 7.4 即为动静触头的开距值。

试验中,将直流断路器作为测试品接入到直流回路中,利用操作台控制直流回路的主开关闭合。在开关闭合的瞬间,断路器上出现直流大电流。当电

表 3 直流断路器空载状态时触头分闸特性参数表

参数	试验结果
触头开距/mm	34.0
刚分到最大开距时间/ms	15.0
最大反弹距离/mm	7.0
第一次反弹持续时间/ms	18.0
触头最大瞬时速度/(m/s)	4.0

流值达到直流断路器的脱扣整定值时,脱扣器动作,使断路器开始分断。试验的操作时序使用国家标准规定的 O(15 s)—CO(15 s)—CO(60 s)—CO 的开断顺序。O 操作是在断路器闭合时通以短路电流进行脱扣分闸动作;CO 操作是在断路器分闸状态时先闭合触头再进行分闸的过程^[7]。在进行了多次成功开断的基础上,代表性地选取一组时序的开断过程进行分闸特性的分析。一次 O 操作和一次 CO 操作的触头位移变化曲线如图 7 所示。

通过试验所测的位移变化量,再结合位移变化时间,可以计算出分断过程中触头系统分断特性的相关参数,如表 4 所示。

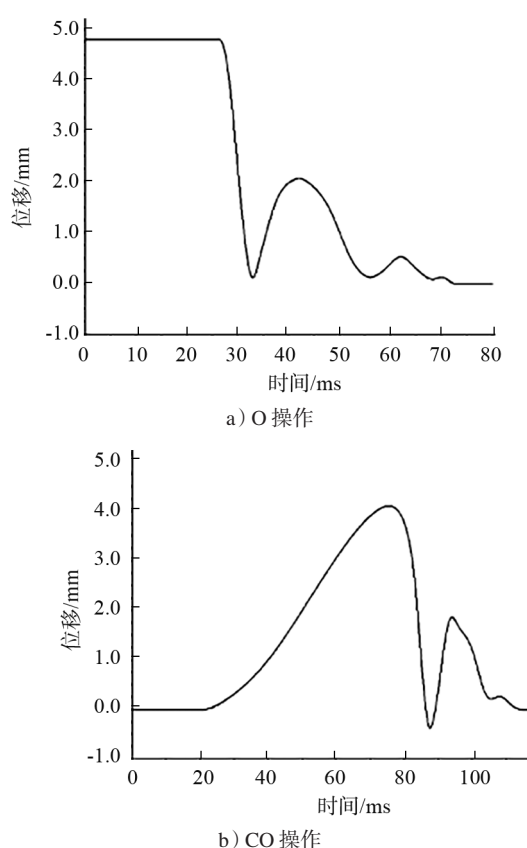


图7 直流断路器触头位移变化曲线图

表4 直流断路器短路开断时分闸特性参数表

参数	试验时序			
	O	CO-1	CO-2	CO-3
触头开距/mm	35.5	35.5	35.5	35.5
刚分到最大开距时间/ms	8.0	7.5	8.0	8.0
最大反弹距离/mm	15.5	14.8	16.2	17.8
第一次反弹持续时间/ms	23.5	23.0	24.0	25.0
触头最大瞬时速度/(m/s)	5.8	5.6	5.9	6.2

3.3 试验结果分析

为了更加全面地研究断路器的分闸性能,本文从能量转化等角度对断路器触头系统的分闸特性进行分析。根据对动触头的分闸过程的分析可知,在与限位碰撞前后,动导杆的转动动能一部分转化为分闸弹簧的弹性势能,其余部分则以与限位碰撞的形式损失掉。通过计算分闸时动触头到最大开距时的动能,以及反弹到最大回弹位置时的弹簧储能,可以得到分闸过程中的能量的转化效率,计算结果如表5所示。

由表5可见,在同一触头系统和操作机构中,如果动触头的分闸速度越快,在反弹过程中因碰撞和摩擦损失的能量也越大,但损失能量所占的百分比却越低。通过研究可知,这是因为动触头在与限位碰

撞时,如果触头运动速度相对较小时,缓冲部件吸收能量的效率较高,因而摩擦和碰撞损失的能量占的比重相对较大;而随着触头速度增加,吸收效率降低,所占比重就越小。这为直流断路器分闸系统的缓冲设计提供了分析方法和数据基础,同时也为城市轨道交通供电系统的可靠性考核提供了更加全面的参考和依据。

表5 直流断路器触头系统分闸特性的能量转化表

参数	试验时序				
	空载	O	CO-1	CO-2	CO-3
触头回弹距离/mm	7.0	15.5	14.8	16.2	17.8
动导杆转动动能/J	6.5	12.4	11.8	12.7	14.2
碰撞损失能量/J	5.9	10.0	9.6	10.0	11.0
损失能量百分比/%	90.8	80.6	81.4	78.7	77.5

4 结语

本文介绍了城市轨道交通直流牵引供电系统直流断路器开断电流时电动斥力的产生原理,仿真分析了电动斥力的变化趋势,计算了开断的动态过程,基于试验研究了断路器开断特性及触头弹跳的能量转化过程。通过本文研究,得到以下结论:

1) 当触头分离后,开断过程中电动斥力随着触头开距变化呈现出先增大后减小的趋势,这是由于电弧在开断过程中形态发生变化导致的。

2) 触头分闸速度影响着因摩擦和碰撞损失的能量的比重,在设计分闸系统的缓冲时可在触头分离的过程中设法降低运动速度,或通过选用合适的材料提高材料的吸收效率,以期提高城市轨道交通供电系统的稳定性。

参考文献

- [1] 宁嘉琪.轨道交通用中压大电流直流断路器关键特性设计与研究[D].西安:西安交通大学,2014.
- [2] 吴翊,荣命哲,杨茜,等.低压空气电弧动态特性仿真及分析[J].中国电机工程学报,2005(21):143.
- [3] 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.
- [4] HOLM R. Electric Contacts[M]. 4th Ed. New York: Springer-Verlag, 1967.
- [5] 张冠生.电器理论基础[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [6] 陈德桂,李兴文.低压断路器的虚拟样机技术[M].北京:机械工业出版社,2009:369.
- [7] 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.

(收稿日期:2019-04-27)