# 城市轨道交通1800 V高速混合式直流断路器研制

程 显<sup>1,2</sup>, 王华清<sup>1,2</sup>, 葛国伟<sup>1,2</sup>, 赵海洋<sup>1,2</sup> (1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省输配电装备与电气绝缘工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要:为解决城市轨道交通直流牵引系统短路故障电流上升率高、短路峰值大、难以快速开断的问题,设计了 1800 V/10 kA高速混合式直流断路器,并提出了其高速开断策略。高速混合式直流断路器整体方案选用零 电压型混合式直流断路器拓扑结构,采用快速斥力机构提升断路器响应速度,重点对真空电弧电流转移特 性、真空短间隙介质恢复特性与绝缘栅双极型晶体管(IGBT)短脉冲开断裕量等关键基础特性进行研究,得 到上述关键特点的影响规律,基于此提出了混合式直流断路器高速开断策略和算法。研制了1800 V/10 kA 高速混合式直流断路器,进行了初步实验验证,研究结果表明,高速开断策略可实现全分断时间小于2 ms,并 通过理论推导得到IGBT短脉冲开断裕量可以达到5倍以上。

关键词:混合式断路器;电流转移;开断策略;城市轨道交通;直流断路器

中图分类号:TM 561;TM 92

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202001002

## 0 引言

直流牵引供电系统供电的安全性、可靠性是城 市轨道交通系统的必要保障。而城市轨道交通供电 系统短路故障发展速度快,短路电流幅值可达数十 千安,对断路器的快速性提出了较高要求<sup>[1]</sup>。现有 城市轨道交通断路器多采用空气式直流断路器,其 开断能力可达 40 kA以上,但开断速度较慢,约为 15~30 ms,对系统冲击较大,且国产灭弧栅等关键技 术有待突破,无法满足快速开断的需求。基于绝缘 栅双极型晶体管(IGBT)的固态直流断路器满足了 快速性需求,开断时间在 0.5 ms以内,但其通态损耗 大、成本高昂,长期运行时可靠性和寿命受限<sup>[23]</sup>。 基于机械开关与电力电子元件并联构成的混合式直 流断路器,综合了机械开关通态损耗小和电力电子 开关响应速度快的优点,具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。

目前国内外在混合式断路器的拓扑结构、基础 特性研究及样机设计等方面开展了较多研究。在拓 扑结构方面,文献[5]设计了一种新型IGBT缓冲电 路,能在不降低吸收过电压效果的基础上,改变充、

#### 收稿日期:2019-01-03;修回日期:2019-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407163);中国博 士后科学基金面上资助项目(2017M622370);国家轨道交通 电气化与自动化工程技术研究中心开放课题资助项目 (NEEC-2017-B07);河南省高校重点科研项目(16A470014) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407163), the General Program of China Postdoctoral Science Foundation(2017M622370), the National Rail Transportation Electrification and Automation Engineering Technology Research Center(NEEC-2017-B07) and the Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan(16A470014) 放电回路的电容;文献[6]对直流断路器的缓冲电路 进行重新设计,保证了缓冲电容过电压的吸收效果: 文献[7]提出一种Z源断路器拓扑结构,可在发生短 路故障时自动切断故障电流。在基础特性研究方 面,文献[8]对限流断路器的工作原理进行了相关研 究,可将预期100kA的直流短路电流限制到16kA 以内,文献[9]对船用1500 V 直流断路器进行了相 关研究,实现了强迫电流投入的准确性;文献[10]对 混合式直流断路器的关断过电压特性进行了优化,采 用双机械开关并联 IGBT 和吸收电容,有效降低了关 断过电压的上升率和幅值。样机设计方面,文献[11] 提出了超快速机构与集成门极换流晶闸管(IGCT) 并联的混合式断路器结构,并研制了1500 V/4 kA 样机;文献[12]设计了IGBT与快速斥力机构并联的 600 V/6 kA 试验样机,其开断时间为1.2 ms;文献 [13]从利用混合式直流断路器的控制时序理论分析 分断瞬态过程及特性出发,设计了适用于航空的 270 V/2.2 kA 混合式直流断路器。上述研究主要围 绕混合式直流断路器拓扑结构、快速操动机构和缓 冲电路设计等方面展开,而对基于真空电弧电流转 移特性、真空短间隙介质恢复特性、IGBT短脉冲开 断裕量等关键特性为基础的快速开断策略的研究不 足,本文旨在通过关键基础特性研究,提出快速开断 策略,并设计智能样机,实现大容量开断。

本文在前期研究的基础上,首先对自然换流型 直流断路器的工作过程进行了分阶段分析,重点研 究了开断过程中真空电弧电流转移特性、真空短间 隙介质恢复特性及IGBT短脉冲开断裕量等关键基 础特性,得到上述各阶段的影响规律和控制参考依 据。在此基础上研制了一种城市轨道交通高速混合 式直流断路器,并对高速开断策略进行了试验验证。

## 1 混合式直流断路器拓扑结构与工作原理

混合式直流断路器由快速斥力真空开关、IGBT 开断单元以及吸能支路并联组成<sup>[14]</sup>,其中IGBT与 RC缓冲电路构成IGBT开断单元,ZnO避雷器作为 吸能元件用于吸收系统电感储存的能量。本文设计 的城市轨道交通混合式直流断路器额定电压为 1800 V,额定电流为2.5 kA,开断容量为10 kA,可用 于1500 V电压等级的城市轨道交通牵引供电系统, 其电路拓扑结构见附录A中图A1,开断过程见图1。



① 真空开关电流,② 电弧电压,③ IGBT 支路电流 ④ 避雷器电流,⑤ 断路器两端电压

## 图1 中压混合式直流断路器开断过程示意图

Fig.1 Principle of medium voltage hybrid DC circuit breaker

混合式直流断路器开断过程可分为3个阶段。

(1)阶段 I:电流转移阶段。真空开关触头分离,电流开始由真空开关向IGBT转移。

(2)阶段 II: IGBT 承担电流阶段。真空电弧电 流转移完成后,主电流完全由 IGBT 承担。

(3)阶段Ⅲ:IGBT开断及吸能阶段。IGBT关断, 过电压达到避雷器动作电压后,避雷器动作,耗散系 统电感储存能量。

通过上述分析可知,影响混合式直流断路器开 断时间的关键因素包括真空开关分闸时间、真空电 弧电流转移特性、真空短间隙介质恢复特性和IGBT 短脉冲开断裕量。其中真空开关分闸时间主要取决 于快速斥力机构的响应时间,现有技术可令真空开 关响应时间小于0.5 ms,已满足快速性需求。因此 本文将重点研究其余3个关键基础特性,通过研究 真空电弧电流转移特性,可以得出其电流转移时间 和转移速率,进而与真空短间隙介质恢复特性配合, 可在保障IGBT关断后真空短间隙已完成介质恢复 的条件下,尽量缩短IGBT承受电流时间,以此发挥 IGBT的短脉冲开断裕量,即脉冲电流时间越短,其 开断容量越大的特性<sup>[15]</sup>,降低IGBT的使用数量,同 时降低控制难度,提升断路器稳定性。综上所述,本 文重点对真空电弧电流转移特性、真空短间隙介质 恢复特性和IGBT短脉冲开断裕量等关键基础特性 及相互协同配合策略进行研究。

## 2 混合式直流断路器关键基础特性

#### 2.1 真空电弧电流转移特性

真空电弧电流转移特性是指真空电弧电流向 IGBT支路转移的特性。前期通过仿真与实验研究 了IGBT支路电感、分布电容参数、电流大小和电弧 电压等对真空电弧电流转移特性的影响,并采用等 效电阻得到了真空电弧电流转移特性判据<sup>[16]</sup>。本文 采用实际国产3.3 kV/1.5 kA IGBT对前期所得的真 空电弧电流转移特性结论进行验证,试验电路如图 2所示。



图 2 电流转移试验电路 Fig.2 Testing circuit of current communication

试验电路主要包括电容器组 $C_1$ 、电感 $L_1$ 、反向二 极管 $V_D$ 、真空开关(VB)、IGBT 元件、阻容缓冲支 路和辅助开关S等。试验电路可产生最高峰值为 3000 A、最低频率为25 Hz的正弦电流波形;电容器 组采用40组450 V/10000 μF电解电容并联构成, 其容量为0.4 F;电感 $L_1$ =400 μH,并可根据需要进行 调节;真空灭弧室选用纵磁触头真空灭弧室,IGBT 选用 TIM1500ESM33 型号的 3.3 kV/1.5 kA IGBT, 阻容缓冲支路电阻和电感分别为2Ω和10 μF。

试验原理为利用电容电感振荡产生低频电流, 并取其峰值附近的准平顶波模拟直流电流进行试 验。试验时,由辅助开关S引入主电流,同时触发 IGBT,真空开关分闸产生弧压,使IGBT导通。IGBT 导通后,真空开关电弧电流开始向IGBT转移,记录 转移时间。

在15V栅极驱动电压的条件下,进行1.5kA以 内的电流转移实验,与等效电阻实验结果的对比如 图3所示。



#### 图3 IGBT与等效电阻的真空电弧转移特性的对比

Fig.3 Comparison of vacuum arc transfer characteristics between IGBT and equivalent resistance

由图 3 可见, IGBT 与等效电阻的真空电弧电流 转移速率都较为恒定,基本呈线性关系,平均速度分 别约为 8.43 A/μs和7.55 A/μs,等效电阻的转移速 率略低于 IGBT,但在 IGBT 额定电流范围内符合程 度较高,验证了等效电阻试验结论的有效性。

发生短路故障时,电流上升率较高,电流幅值可 以在短时间内上升到较高数值,因此需要对发生短 路时的真空电弧电流转移时间进行研究。试验电路 同图2,电流上升率分别为0、2和5 A /μs,调整真空 开关动作时间,在电流上升过程中的不同阶段进行 换流,测试其换流时间。电流上升过程中,初始电流 和结束电流幅值不相同,本文选取开始转移时真空 开关中的电流幅值作为转移的电流数值,电流上升 速率对电流转移时间的影响如图4所示。





对比上述结果可以得出,在电流上升状态下,电流转移特性仍基本呈线性关系。但在电流上升过程中,总电流处于增加状态,所以电流上升率越高,电流幅值增加越快,转移速率越慢,在电流上升率为5A/µs的条件下转移速率仅为约6.67A/µs。

综上所述,等效电阻得出的真空电弧电流转移特性依然有效,且短路电流上升率越大,电流转移速率越小。在短路电流上升率为5 A / μs、幅值为10 kA 以内时,单个 IGBT 的转移时间小于 1.5 ms。依据前期研究成果,混合式直流断路器的转移速率可以通过使用横磁磁吹提升弧压、并联 IGBT、降低 IGBT 导通压降等方式,进一步提升其转移速度,缩短整体开断所需时间。

## 2.2 真空短间隙介质恢复特性

真空开关的短间隙介质恢复过程位于混合式直流断路器开断过程的阶段 II。为确保真空开关换流完成,且不被 IGBT关断过电压击穿,通常设定较大的 IGBT关断延时,该方式在一定程度上确保了断路器开断的可靠性,但也增加了 IGBT 承受电流和断路器的开断时间,不利于发挥 IGBT 的短脉冲开断裕量的作用。

真空短间隙介质恢复特性主要受电流幅值、电流下降率(真空电弧电流转移速率)和触头开距的影响。经前期实验<sup>[17]</sup>,得出电流幅值对真空介质恢复特性影响主要由电弧模式决定,试验过程中,电流幅值较小,真空电弧是扩散电弧模式,在相同的电流下降率下,电流幅值对真空介质恢复特性影响较小。

在开距为0.5 mm时,选取电流幅值为1 kA条

件下的电流下降率6.67、8.33、10 A / μs,电流幅值为 1.5 kA条件下的电流下降率12.5 A / μs,电流幅值为 2 kA条件下的电流下降率16.67、19.03 A / μs,分别 得到其介质恢复时间和平均介质恢复速度,并通过 图 5表示电流下降率与平均介质恢复强度的关系。 图中,di/dt为电流下降率;V,为平均介质恢复速度。



图 5 电流下降率对平均介质恢复速度的影响 Fig.5 Influence of reducing rate on average recovery rate of vacuum

随着电流下降率的增加,平均介质恢复速度逐渐减小。通过数据拟合得到平均介质恢复速度V,(kV/µs)与电流下降率di/dt(A/µs)的关系满足:

$$V_{\rm r} = -0.035 \frac{{\rm d}i}{{\rm d}t} + 1.1 \tag{1}$$

选取0.5~2 mm 真空短间隙,在 di/dt = 8.33 A/μs 的条件下,对不同开距对介质恢复速度的影响进行 研究,结果如图6所示。图中,各点对应的V,分别 为0.78、0.93、1.25 和 1.67 kV /μs。



## 图 6 不同开距对真空介质平均恢复速率的影响 Fig.6 Influence of gap distance on average recovery rate of vacuum

在同电流幅值、同电流下降率条件下,真空开关 开距和真空介质的平均恢复速率呈指数型关系。对 其曲线进行拟合,可以得到同电流幅值、同电流下降 率时平均介质恢复速度 V<sub>r</sub>(kV / μs)与开距L(mm)的 关系符合:

$$V_r = 0.550 \,6 \,\mathrm{e}^{0.536 \,2L} \tag{2}$$

综合式(1)与式(2),联立方程并构造相应函数, 可以得出在本文试验范围内平均真空介质恢复速度 V.与开距L及电流下降率 di/dt之间的经验公式为:

$$V_{\rm r} = \left(-0.0199 \,\frac{{\rm d}i}{{\rm d}t} + 0.7008\right) {\rm e}^{0.5962L} \tag{3}$$

依据式(3)可在短间隙下依据不同电流下降率 及开距对平均介质恢复速度进行估算。在城市轨道 交通牵引系统中,快速斥力机构的平均速度可达到 5 m/s以上,结合2.1节的电流转移数据,可计算出 750 μs内开距可达到3.75 mm,则电流幅值为5 kA、 电流下降率为 6.67 A/μs 的条件下,真空介质完全 恢复时间约为 6 μs,保留一定裕量条件下仍仅需 10 μs,且 3.75 mm 的真空开距完全满足 1500 V 供电系 统的绝缘要求。

#### 2.3 IGBT短脉冲开断裕量

IGBT 的短脉冲开断裕量指短时间(一般小于 1 ms)内IGBT 能够稳定开断的最大电流值。其主要 原理为:IGBT 内部载流子密度随 IGBT 的栅极驱动 电压的升高而增大,因此当IGBT 的栅极驱动电压较 高时,具有运输大电流的能力,同时短时间内 IGBT 通流产生的热量较小,不至于损坏 IGBT<sup>[18]</sup>。因此 理论上当 IGBT 栅极电压足够高,且通流时间较短 时,即可拥有一定的过电流工作能力,如 IGBT 技术手 册通常规定 IGBT 能在 1 ms 内开断等于额定电流 2 倍的电流。

IGBT的短脉冲开断裕量受栅极电压、温升等因素的影响,在混合式直流断路器开断过程中,通过箝位栅极驱动电压,可避免发生闩锁效应与过流失效,利用缓冲吸收支路吸收过电压,可避免过压失效。因此在混合式直流断路器开断过程中导致IGBT损坏的主要因素为热失效<sup>[19]</sup>。引起IGBT热失效的主要因素在于电流过大导致的IGBT的导通功耗和开关损耗的增加,通过建立相应的IGBT电热模型,即可通过仿真对IGBT的脉冲裕量特性进行仿真。

提取 TIM1500ESM33型 IGBT 参数<sup>[20]</sup>并在 Saber 软件中建立基于 Hefner 模型的 IGBT 电热联合仿真 模型,在15 V栅极电压条件下得到的关断过程仿真 结果与实际关断过程对比如图7所示。







由图7可见,仿真波形已接近实际IGBT波形, 结合技术手册中所给出的4层RC热网络参数建立 电热联合仿真模型,基于该模型下对IGBT进行电热 联合仿真,其电路图如图8所示。

图中, $U_1$ =1 800 V;电感 $L_2$ =180 nH; $R_1$ 为可变限 流电阻; $U_2$ 和 $R_2$ 分别为IGBT驱动电路等效电压源和 栅极电阻,其中 $R_2$ =1.2  $\Omega$ , $U_2$ 容量无限大,可视为已 被箝位; $R_{th1}$ — $R_{th7}$ 和 $C_{th1}$ — $C_{th7}$ 分别为IGBT热阻和热 容;环境温度设定为25 °C( $T_{25 \circ}$ ),无散热。在该条件 下进行不同栅极电压、不同电流幅值的IGBT仿真实



Fig.8 Simulation circuit in Saber

验,在IGBT内部结温T<sub>i</sub>超过120℃时认为IGBT可能 发生损坏,以此测试IGBT能够承受的最大电流与承 受时间的关系,并与前文中的5A/µs电流上升率下 的电流转移时间得出两者的匹配范围,如图9所示。



图9 IGBT脉冲裕量仿真结果与电流转移时间对比

Fig.9 Comparison between simulative results of surge current capacity of IGBT and short current transfer time

仿真中的IGBT电流波形与实际开断过程中的 IGBT电流波形有所区别,但其发热量可依据周期电 流平方时间积公式进行等效换算。仿真结果显示, 随着IGBT栅极电压的不断升高,IGBT承受过电流 的能力也同时提升,但在接近短路电流时仍然无法 承受较长时间,与技术手册中的说明一致。同时结 合高电流上升率下的电流转移时间,可以得出在 20 V的栅极电压下,IGBT可开断的过电流约为 7.5 kA,为其额定电流的5倍。而30 V条件下IGBT 最大可开断约8.5 kA的电流,约为额定电流的5.67 倍。上述结果未考虑IGBT的电流集聚效应,实际开 断容量会略有减少。

## 3 断路器结构与软硬件设计

基于上述关键基础特性的研究,本文研制了一种1800 V/10 kA 城市轨道交通混合式直流断路器 样机,其结构图如附录 A 中的图 A2 所示,下面对其 各部分进行详细介绍。

#### 3.1 快速真空斥力开关设计

混合式直流断路器采用快速斥力机构作为机械 开关的操纵机构。经过前期对快速斥力机构的相关 研究<sup>[21]</sup>,本文采用的快速斥力机构结构为双线圈结 构,采用永磁机构保持与固体聚氨酯材料缓冲,最大 开距为5 mm,始动时间为0.5 ms,2 ms内达到全开 距。真空灭弧室型号为TJC243,额定电压为3.6 kV, 全开距为3 mm,额定电流为2.5 kA,短路容量为25 kA,通流能力与绝缘能力满足城市轨道交通应用 要求。

## 3.2 IGBT换流支路与缓冲支路设计

样机额定电压与最大开断电流为1800 V/10 kA, 依据 IGBT 短脉冲开断裕量的研究结论,仅需要2个 TIM1500ESM33 型号的 IGBT 即可完成10 kA 短路电 流的分断。IGBT 使用大功率光纤隔离双单元驱动 电路,其驱动输出电压可根据输入信号调节为15~ 50 V,供 IGBT 脉冲开断裕量使用。依据式(4)和式 (5),可以计算出吸收关断能量所需的 RC 缓冲电路 中电阻 R 和电容 C 的范围<sup>[22]</sup>。

$$C = \frac{L_{\rm A}^2 I}{\Delta U^2} \tag{4}$$

$$2\sqrt{L_{\Lambda}/C} \leqslant R \leqslant \frac{t_z}{4C} \tag{5}$$

其中, $L_{A}$ 为线路总电感; $\Delta U$ 为IGBT寄生电感产生的 过电压;I为线路电流幅值; $t_{A}$ 为IGBT的导通时间。 因断路器同时采用避雷器作为吸收能量的器件,因 此RC缓冲电路的主要功能为限制IGBT关断过电压 的上升速率,保证避雷器稳定动作。由此可选择缓 冲电路中缓冲电阻 $R=2\Omega$ ,缓冲电容 $C=10 \mu$ F。

避雷器需要依据实际工况的母线额定电压、额 定放电电流和短路放电电流等因素进行综合选 择<sup>[23]</sup>,在本文的设计要求下,避雷器额定电压应不低 于2.4 kV。

## 3.3 智能控制部分设计

新型高速混合式直流断路器的控制部分包含各 支路电流电压监测、IGBT驱动模块、快速斥力机构 驱动模块、远程通信、主控制器等部分,其设计依据 为上述混合式直流断路器的各类关键基础特性,具 体结构如附录A中的图A3所示。

混合式直流断路器的主控制芯片型号选择为 DSPTMS320F2812芯片,满足混合式断路器的控制 与数据处理需求。监测部分采用15 mm 直线位移 传感器对真空快速斥力开关触头行程进行监测,采 用霍尔线圈对机械开关、IGBT进行电流监测,采用 6 kV 电压互感器对断路器电压进行监测,并将数据 输入数字信号处理器(DSP)芯片。DSP芯片依据智 能开断策略实行故障分断,同时监测断路器的设备 温度、分合闸线圈电流、避雷器动作次数等。

轨道交通混合式直流断路器智能开断策略流程 如附录A中的图A4所示。

智能控制策略可依据具体故障状况,根据不同 故障电流和上升率,自动控制断路器进行分闸操作。 并依据真空电弧电流转移特性与IGBT短脉冲开断 裕量的研究结论,选择20V驱动电压作为故障开断 时IGBT驱动电压选择的预设值。

混合式直流断路器的故障开断具体执行步骤 为:当故障电流峰值或上升率 di/dt 到达整定值时, DSP芯片发出分闸指令,快速斥力机构分闸,并依据

预设值选择 IGBT 驱动电压,导通 IGBT,两支路换 流,DSP芯片依据故障时的电流上升率 di/dt 和真空 电弧电流转移开始时的幅值1,利用真空电弧电流转 移特性预判真空电弧电流转移时间t,,计算出换流 速率V,,利用位移传感器监测其开距,待电流转移完 成后,将此时真空开关开距、电流转移速率代入式 (3)计算出真空介质恢复所需的最短时间<sub>t</sub>,并加上 t<sub>1</sub>得出故障电流发展的总时间,依据电流转移时间  $t_1$ 、真空介质恢复时间 $t_2$ 得到IGBT总导通时间 $t_2$ ,结 合故障电流峰值 I<sub>A</sub>,理论计算 IGBT 的短脉冲开断所 需的驱动电压并进行调节,发挥IGBT的脉冲裕量。 对真空介质恢复过程进行计时,待真空介质恢复完 成后向 IGBT 发出软关断信号,关断故障电流,并重 置IGBT的驱动电压,待缓冲电路完成能量释放后, 断路器整体分闸过程完成,分断上升率为5A/us、 幅值为10kA的故障电流时,依据该控制策略,混合 式直流断路器的整体分闸时间不超过2ms,满足快 速性需求,同时保证了开断的可靠性。

## 4 样机试验

为验证开断策略的可行性,本文利用永磁真空 断路器与单个TIM1500ESM33型IGBT并联搭建了 混合式直流断路器测试样机进行测试,样机实物图 如附录B中的图B1所示。

试验电路同图 2,电容充电电压为100 V,回路 电感为53 μH,混合式直流断路器成功开断1.5 kA 直流电流,其开断波形图如图10所示。



试验中给定电流幅值为1.5 kA,依据真空电弧 电流转移特性可得到其转移时间175 μs,依据IGBT 短脉冲开断裕量调节IGBT驱动电压为15 V,在 175 μs时真空开关开距约为0.1 mm,IGBT预期关断 过电压2.8 kV,真空短间隙无法承担此过电压,因此 IGBT需继续承担电流200 μs,此时真空开关开距达 到0.2 mm,可以承担关断过电压,因留有一定裕量, 实际实验中IGBT承受电流时间为246 μs,此时发出 IGBT关断信号,IGBT关断,避雷器泄放电流时间为 52 μs,结合前述快速斥力机构分闸时间0.5 ms,总时 间约973 μs,符合高速标准,证明了本文开断策略的 有效性。

217

## 5 结论

本文针对城市轨道交通直流牵引系统的直流开 断问题,开展了城市轨道交通1800 V混合式直流断 路器关键基础特性研究,得到结论如下。

(1)对混合式直流断路器中真空电弧电流转移 特性、真空短间隙介质恢复特性与IGBT短脉冲开断 裕量这3个关键基础特性进行研究。结果表明:使 用等效电阻对真空电弧电流转移特性的试验有效, 在短路电流为10kA、电流上升率为5A/μs的条件 下,转移时间约为1.5ms;得到了真空短间隙介质恢 复特性的数学描述,可为真空短间隙介质恢复时间 提供参考;IGBT短脉冲开断裕量主要受栅极电压和 热温升影响,20V栅极电压下最高可开断5倍额定 电流。

(2)基于上述特性研究提出了1800 V / 10 kA 城市轨道交通混合式直流断路器的技术方案,短路 开断时间小于2 ms,在保证开断容量的条件下降低 了 IGBT 的使用数量和成本,并提升了断路器的稳定性。

(3)提出了可根据短路条件与断路器状态综合 计算判断的混合式直流断路器的智能开断策略,并 在样机中对开断策略进行了验证。后续将针对混合 式直流断路器在更高电压等级、更大容量开断下的 应用进行进一步研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

## 参考文献:

[1]许成.轨道交通直流牵引系统短路故障研究[D].杭州:浙江 大学,2014.

XU Cheng. The study of short-circuit fault on DC traction system of rail transit[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2014.

- [2]何俊佳,袁召,赵文婷,等.直流断路器技术发展综述[J].南 方电网技术,2015,9(2):9-15.
   HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology,2015,9(2):9-15.
- [3] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J].
   电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
   SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [4] 郑占锋,邹积岩,董恩源,等.直流开断与直流断路器[J].高 压电器,2006,42(6):445-449.
   ZHENG Zhanfeng,ZOU Jiyan,DONG Enyuan, et al. DC interruption and DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006,42(6):445-449.
- [5] 刘顺炮,郑建勇,查申森,等.基于新型混合式断路器的IGBT 缓冲电路研究[J].电力自动化设备,2006,26(3):31-34.
   LIU Shunpao,ZHENG Jianyong,ZHA Shensen, et al. Research on IGBT snubber based on hybrid circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(3):31-34.
- [6]刘程卓,王渝红,龚鸿,等.一种适用于混合式高压直流断路器 负载换流开关的新型缓冲电路[J].电力自动化设备,2018,38

(3):205-209,217.

LIU Chengzhuo, WANG Yuhong, GONG hong, et al. Novel snubber circuit for load commutation switch of hybrid HVDC breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 205-209, 217.

- [7] CORZINE A. A new Z-source DC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6):2796-2804.
- [8] 王晨,庄劲武,江壮贤,等.新型混合型限流断路器在直流电力 系统中的限流特性研究[J].电力自动化设备,2011,31(5):90-93,98.

WANG Chen, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Research of current limiting characteristics for hybrid current limiting circuit breaker in DC power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5):90-93, 98.

- [9] 董恩源,丛吉远,邹积岩.1500 V船用新型直流断路器的研究
   [J].中国电机工程学报,2004,24(5):157-160.
   DONG Enyuan, CONG Jiyuan, ZOU Jiyan. Study of 1500 V new type DC circuit breaker used in ship[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):157-160.
- [10] LEI Gao, KUN Yang, BIN Xiang, et al. A DC hybrid circuit breaker with buffer capacitor and vacuum interrupters [C] // 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Greifswald, Germany: [s.n.], 2018: 615-618.
- [11] MEYER J M, RUFER A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and Integrated Gate-Commutated Thyristors (IGCT) [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000,21(2):646-651.
- [12] POLMAN H, FERREIRA J A, KAANDERS M, et al. Design of a bi-directional 600 V / 6 kA ZVS hybrid DC switch using IGBTs[C]//Industry Applications Conference. Chicago, IL, USA: IEEE, 2001:1052-1059.
- [13] 霍文磊,武建文,李德阁,等. 航空 270 V 混合式断路器分断瞬态特性及实验研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):1062-1071.
   HUO Wenlei, WU Jianwen, LI Dege, et al. Interruption tran-

sient characteristics and experimental research of aero 270 V DC hybrid breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(4): 1062-1071.

- [14] 黄金强,廖敏夫,葛国伟,等. 直流微网混合式零电压开关直流 断路器[J]. 高电压技术,2015,41(9);3148-3155.
   HUANG Jinqiang,LIAO Minfu,GE Guowei,et al. Zero-voltageswitch hybrid DC switch for DC microgrid[J]. High Voltage Engineering,2015,41(9);3148-3155.
- [15] BASLER T, LUTZ J, JAKOB R, et al. Surge current capability of IGBTs[C]//International Multi-conference on Systems. Berlin, Germany: IEEE, 2012; 1-6.
- [16] HUANG J, GE G, LIAO M, et al. The current commutation characteristics of DC micro-grid hybrid circuit breakers [C] // International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum. Suzhou, China: IEEE, 2016:1-4.
- [17] 秦涛涛,董恩源,刘贵新,等. 真空直流开断固有介质恢复强度研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1453-1459.
  QIN Taotao, DONG Enyuan, LIU Guixin, et al. Free recovery of dielectric strength after DC interruption in vacuum[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(5):1453-1459.
- [18] KOWALSKY J, SIMON T, GESKE M, et al. Surge current behavior of different IGBT designs[C]//Pcim Europe. Nuremberg, Germany: VDE, 2015:1-10.
- [19] 马晋,王富珍,王彩琳. IGBT失效机理与特征分析[J]. 电力电 子技术,2014,48(3):71-73,76.
   MA Jin,WANG Fuzhen,WANG Cailin. Analysis of failure mecha-

nism and features of IGBT[J]. Power Electronics, 2014, 48 (3):71-73,76.

- [20] HEFNER A R. Modeling buffer layer IGBTs for circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(2):111-123.
- [21] 田阳,田宇,李志兵,等.高速机械开关单元多场耦合仿真优化 设计[J].电网技术,2018,42(4):1273-1280.
  TIAN Yang,TIAN Yu,LI Zhibing, et al. Multi-field coupling simulation optimization of high-speed mechanical switch unit [J]. Power System Technology,2018,42(4):1273-1280.
- [22] 姜栋栋,王烨,卢峰. IGBT 过电压产生机理分析及 RC缓冲电路的设计[J]. 电力科学与工程,2011,27(4):23-29.
  JIANG Dongdong,WANG Ye,LU Feng. Analysis on the reasons of over voltage for IGBT and the design of RC Snubber circuit[J]. Electric Power Science and Engineering,2011,27(4): 23-29.
- [23] 张顺,陈松辉,唐湘越. 地铁车辆用避雷器选型分析[J]. 电力 机车与城轨车辆,2012,35(4):22-24,37.

ZHANG Shun, CHEN Songhui, TANG Xiangyue. Selection analysis of surge arrester for metro vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2012, 35(4):22-24, 37.

#### 作者简介:



程 显(1982—),男,河南平顶山人, 教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向 为混合断路器技术、多断口真空开关技术 (**E-mail**:chengxian@zzu.edu.cn);

王华清(1994—), 男, 河南濮阳人, 硕 士研究生, 主要研究方向为开关设备与绝缘 技术(E-mail:237522104@qq.com);

葛国伟(1987—),男,河南新乡人,讲 师,博士,主要从事智能化高压电器及高电

压新技术方面的研究工作,着重研究多断口真空开关技术、 真空电弧动态恢复特性(E-mail:ggw@zzu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## Research and design of 1800 V high-speed hybrid DC circuit breaker for urban rail transit system

CHENG Xian<sup>1,2</sup>, WANG Huaqing<sup>1,2</sup>, GE Guowei<sup>1,2</sup>, ZHAO Haiyang<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Engineering Research Center of Power Transmission & Distribution Equipment and

Electrical Insulation, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the short circuit fault current problems of sharp current rise rate, large amplitude of short circuit, and difficult to break instantly in the DC transit system of urban rail, an 1800 V/10 kA high-speed hybrid DC circuit breaker is designed and the corresponding high-speed breaking strategy is proposed. The overall scheme of high-speed hybrid DC circuit breaker adopts zero-voltage hybrid DC circuit breaker topology, and adopts a repulsive mechanism to improve the response speed of the circuit breaker. The vacuum arc current transfer characteristics, the vacuum short gap medium recovery characteristics and the surge current breaking capacity of the IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) are emphatically researched to obtain the regular patterns of the above key characteristics, based on which, the high-speed breaking strategy and algorithm of hybrid DC circuit breaker are proposed. An 1800 V/10 kA high-speed hybrid DC circuit breaker is developed and preliminarily verified by experiments. The results show that the high-speed breaking strategy can achieve a full breaking time of less than 2 ms. It is deduced that the surge current breaking capacity of IGBT can reach more than five times.

Key words: hybrid circuit breaker; current communication; breaking strategy; urban rail transit; DC circuit breaker





图 A1 中压混合式直流断路器拓扑结构示意图

Fig.A1 Structure of medium voltage hybrid DC CB





Fig.A2 Structure of hybrid circuit breaker in urban rail transit system





Fig.A3 Design of control system of hybrid DC circuit breaker



图 A4 混合式直流断路器开断策略流程

Fig.A4 Interruption strategy flow of hybrid DC circuit breaker

附录 B



图 B1 1800V 混合式直流断路器试验样机 Fig.B1 Prototype of 1800V hybrid DC breaker