

基于电弧电压的混合型直流断路器

吕 玮, 方太勋, 杨 浩, 杨 兵, 王 宇, 石 巍

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211102)

摘要: 混合型直流断路器同时具有传统机械开关良好的静态特性和固态开关无弧快速关断的动态特性, 多端直流输电网络很大程度上依赖于直流断路器技术的发展。文中提出了一种基于电弧电压的混合型直流断路器, 推导了电流换流物理过程的数学关系。通过有限元分析软件, 进行了关键部件——电磁斥力机构高速开关的仿真计算。在以上基础上进行了 1 kA/15 kV 直流断路器样机的设计研制, 试验结果表明, 该样机的电弧最大换流能力为 3 kA, 电流从高速开关向固态开关转移的过程呈指数关系, 与理论推导相符。该样机能够在 5 ms 内分断 10 kA 短路电流, 分断时间主要取决于高速开关开断速度以及电弧电压大小。

关键词: 电弧电压; 绝缘栅双极型晶体管; 电磁斥力机构; 有限元分析

0 引言

多端高压直流输电系统由于电压等级高、线路阻抗小, 一旦发生线路短路故障, 将很快影响到直流输电网络和交流网络, 必须迅速切除故障。高压直流断路器动作速度快, 能够最大限度地减小故障持续时间或抑制故障电流, 减小故障对交/直流输电网络的冲击^[1]。尽管如此, 高压直流断路器的发展并不需要等待高压直流输电网的全面出现。目前, 大多数输电方案为高压直观点对点连接, 高压直流断路器在线仍然可以发挥作用。除了功率转换, 高压直流换流站同时还可以通过无功功率控制来提高交流网络稳定性。发生故障时, 如果换流器能够迅速地与高压直流输电线路断开, 那么换流站可以直接进入独立运行状态, 作为静止同步补偿装置(STATCOM), 继续为交流网络的稳定性提供支持。

目前众多高校以及电气设备制造商都在对可快速分断故障的高压直流断路器进行研究。ABB公司于 2012 年提出了一种高速开关串联功率半导体辅助支路后再与主半导体支路并联的混合型直流断路器结构^[2], 并在其实验室进行了 10 kA 短路电流分断试验。阿尔斯通也在近些年采用机械开关与半导体固态开关相结合的混合型结构进行了直流断路器试验, 在 2.5 ms 内切断电流 3 kA。国内目前的研究主要集中于低压直流断路器^[3-6]。

本文提出了一种基于电弧电压的新型混合型直流断路器结构, 结合理论分析和软件仿真, 设计研制了一台 1 kA/15 kV 样机, 该样机能够在 5 ms 内分断 10 kA 短路电流。

1 工作原理

1.1 拓扑结构

本文提出的新型混合型直流断路器的结构如图 1 所示, 主要由高速开关、固态开关和氧化锌避雷器(MOV)组成, 其中 L_1 和 L_2 为断路器连接导线的电感, i_1 为高速开关支路电流, i_2 为固态开关与 MOV 并联总支路电流, U_{arc} 为高速开关电弧电压, U_d 为固态开关导通压降。

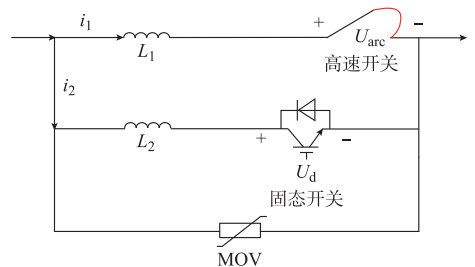


图 1 新型混合型直流断路器结构
Fig.1 Structure of new hybrid direct current circuit breaker

正常工作时, 高速开关闭合, 固态开关关断, 电流流过高速开关。高速开关接触电阻很小, 因此稳态损耗低。断路器工作原理如下。

t_1 时刻直流线路发生短路故障; t_2 时刻短路电流达到断路器换流定值, 触发固态开关开通, 有少部

分电流分流至固态开关; t_3 时刻高速开关触头分离产生电弧, 将电流向固态开关转移; t_4 时刻电流完全转移到固态开关; t_5 时刻高速开关分闸到位, 此时关断固态开关; t_6 时刻关断固态开关产生的过压达到 MOV 动作门槛值时, 电流转移到 MOV 中, 最终消耗至 0。混合型直流断路器的分断电流过程如图 2 所示。

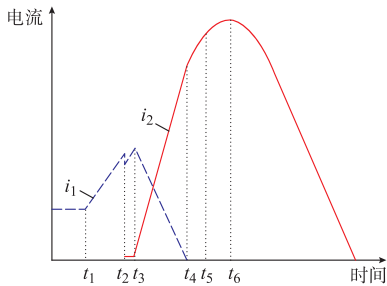


图 2 混合型直流断路器分断电流波形
Fig.2 Breaking current waveform of hybrid direct current circuit breaker

1.2 电流转移原理

如图 1 所示, 电流转移过程可表示为:

$$U_{\text{arc}} = (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} + U_d \quad (1)$$

式中: di_1/dt 为电流转移的速率, 电流转移越快越有利于缩短整个混合型断路器的分断时间。

根据上式可知, 提高 di_1/dt 的方法主要有提高电弧电压 U_{arc} , 降低固态开关通态压降 U_d 以及减小回路导线电感 L_1 和 L_2 。

由绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 饱和特性可知, 固态开关通态压降 U_d 的值与电流基本呈线性关系, 因此可以假设:

$$U_d = ki_1 \quad (2)$$

式中: k 为线性系数, 也可认为是固态开关的通态电阻。

将式 (2) 代入式 (1), 可得:

$$U_{\text{arc}} = (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} + ki_1 \quad (3)$$

通过求解式 (3), 可近似获得换流至通态阀组的短路电流 i_1 与换流时间 t 的数学关系为:

$$i_1 = \frac{U_{\text{arc}}}{k} (1 - e^{-\frac{k}{L_1 + L_2} t}) \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 电流是以指数函数的形势从高速开关支路向通态阀组支路转移的。

1.3 真空电弧特性

高速开关的电弧电压决定了故障电流转移的时间, 本文研制的高速开关断口采用的是 17.5 kV 真空灭弧室。真空电弧有 10 kA 以下的扩散型和

10 kA 以上的集聚型两种形态^[7]。混合型断路器电弧电流一般只有几千安, 属于扩散型电弧。对扩散型真空电弧电压起主导作用的是阴极压降, 而阴极压降主要由触头材料决定。触头材料的沸点温度与热导率的乘积越大, 阴极压降越高。因此为提高电弧电压, 缩短电流换流时间, 可以选取高沸点和热导率的触头材料^[8-10]。除此之外, 文献^[11]提出也可通过外加磁场的方式提高电弧电压, 电弧电压最高可达数千伏。

本文中高速开关采用的是宝光真空灭弧室厂生产的 17.5 kV/1 250 A 的真空灭弧室, 触头开距为 (9 ± 1) mm, 运动部分质量为 1.1 kg。触头材料选用的是沸点较高的铜钨。对其电弧电压进行了试验测试, 结果如图 3 所示。

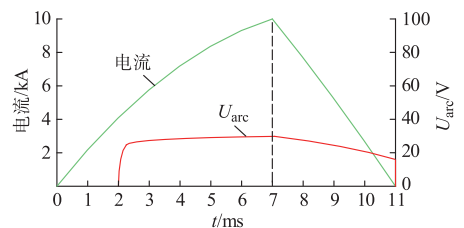


图 3 铜钨触头真空电弧电压
Fig.3 Vacuum arc voltage of copper-tungsten contacts

由图 3 可以看出, 当电流从 4 kA 增大到 10 kA 时铜钨触头的真空电弧电压基本在 30 V 左右保持稳定, 当电流下降时电弧电压有所降低。

2 样机研制

2.1 高速开关研制

2.1.1 高速开关电磁斥力机构原理

混合型直流断路器中 IGBT 阀组的分断时间是微秒级的, 因此, 直流断路器的分断时间主要是受高速开关的影响。近些年, 电磁斥力机构作为一种高速操作机构被广泛研究^[12-15]。本文中高速开关的操作机构也采用电磁斥力机构, 能够在 3 ms 内快速分闸成功, 从而大大缩短整个直流断路器的分断时间。

其工作原理是: 预先充电的储能电容向分闸或合闸线圈放电, 斥力盘因为线圈上的脉冲电流产生感应涡流, 涡流产生的磁场与线圈脉冲电流产生的磁场相互作用, 从而推动斥力盘以及连杆运动, 实现分、合闸动作。

2.1.2 电磁斥力机构仿真

电磁斥力机构的动作过程涉及放电电路、电磁感应耦合、运动物理特性等多个相互作用的动态子过程, 需要联合电路方程、空间磁场与涡流方程以及机械物理运动方程来求解其动态特性。本文采用

Ansoft 有限元软件对电磁斥力机构进行 3D 建模仿真,分析其动作特性,为设计性能优良的高速电磁斥力开关提供依据。

仿真时忽略了安装金属结构件的影响,建立的 3D 模型如图 4 所示。

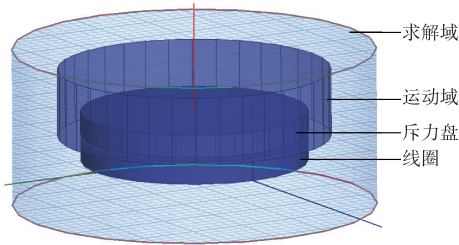


图 4 电磁斥力机构 3D 仿真模型

Fig.4 3D simulation model of electro-magnetic repulsion mechanism

影响电磁斥力机构运动特性的因素有很多,主要包括储能电容充电电压 U_b 、线圈匝数、斥力盘材料等。根据以上不同影响因素分别进行了仿真分析,仿真结果如图 5 所示。

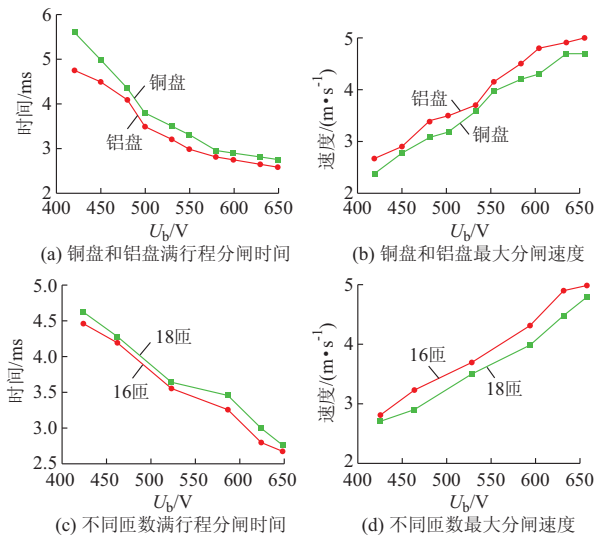


图 5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

由仿真结果可见:①储能电容电压提高,分闸速度和分闸时间明显提高;②采用铝制斥力盘,虽然电导率有所降低,但质量比铜盘低,分闸时间明显缩短;③线圈数 18 匝与 16 匝相比,匝数多造成线圈自感增加,影响脉冲电流,从而影响分闸时间,因此并不是匝数越多越好。

根据仿真结果,设计出的高速电磁斥力开关参数如下:线圈材料为紫铜,外径为 80 mm,内径为 55 mm,高度为 10 mm,匝数为 16 匝;斥力盘材料为铝,半径为 80 mm;运动部件质量为 3 kg;空气间隙为 2 mm;储能电容容值为 8.5 mF。

2.1.3 高速开关试验

按照上述计算及仿真结果,研制出了一台高速电磁斥力开关,其外形结构图见附录 A 图 A1。因高速开关的运动速度和加速度都非常大,常规如滑线变阻器原理的测速方法不能适用。在对样机测试时采用了 MTS10H 型磁栅尺进行测量。该磁栅尺的最大测量频率为 300 kHz,最大速度为 12 m/s,分辨率为 10 μm 。磁栅尺的磁带固定在绝缘拉杆上,分、合闸时可以随绝缘拉杆上下运动,磁栅读数头固定在斥力开关托盘上不动。测试结果如图 6 所示。

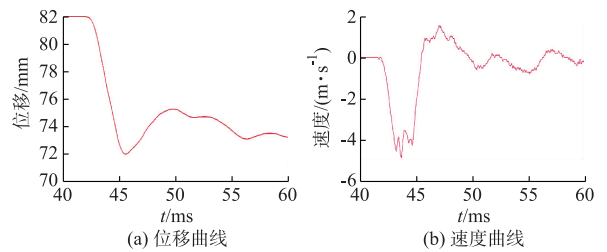


图 6 高速开关位移和速度曲线

Fig.6 Displacement and speed curves of high-speed switch

图 6 中的测试波形是储能电容电压为 550 V 时测得的。可以看出,电磁斥力开关动触头运动到额定开距 9 mm 时的时间约为 2.8 ms,分闸过冲约为 1 mm,分闸反弹约为 2 mm,最大分闸速度约为 5 m/s,该样机满足设计需求。

2.2 固态开关设计

固态开关的作用是待电流完全转移到其中后接收控制命令关断,最终实现无弧分断。因此,固态开关必须选择全控型大功率半导体器件,本文样机采用的是压接式 IGBT。

压接式 IGBT 区别于传统模块式 IGBT,它的主要安装方式采用压接方式,一般集电极和发射极分别位于 IGBT 的两端,栅极通过引线引出。压接式 IGBT 的自身特点决定了其更适合并联和串联,均压控制相对容易。

2.2.1 串联设计

固态开关串联的 IGBT 数量主要由混合型直流断路器分断电流时产生的最大过电压决定,即由其并联的避雷器残压 U_{mov} 决定。假设 IGBT 安全工作电压为 U_s ,串联数量为 n ,则

$$n \geq \frac{U_{\text{mov}}}{U_s} \quad (5)$$

串联 IGBT 器件本身的寄生参数以及栅极驱动信号的延时会导致串联 IGBT 在关断过程中,先关断的器件会承受很大的过电压,在开通过程中,后开

通的器件会承受很大的过电压。本文样机中采用了 RCD 缓冲回路作为串联 IGBT 的均压策略,如图 7 所示。

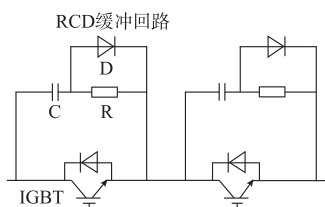


图 7 采用 RCD 缓冲回路的均压策略

Fig.7 Equalizing strategy with RCD snubber circuit

在每个 IGBT 上并联一个 RCD 缓冲回路,可以抑制器件端电压的变化率,从而抑制开关瞬间的过电压,防止器件因过电压损坏。同时,缓冲电路可以抑制静态电压失衡。该电路结构简单,易于实现。在进行装配时,尽量降低 IGBT 主回路和缓冲回路的杂散电感,接线越短越粗越好。

2.2.2 并联设计

固态开关并联数是由混合型直流断路器最大分断电流能力和 IGBT 器件决定的,本文样机最大分断电流能力为 10 kA,该电流值已经进入了单个 IGBT 的退饱和区,器件将无法保证安全关断。因此考虑采用两并联结构,再考虑到均流特性,单串 IGBT 流过的最大电流为 6 kA,可安全关断。

采用两并联结构虽然解决了 IGBT 关断问题,但同时也带来了均流问题。本文样机从电气结构及栅极驱动两方面入手,设计时尽量做到并联对称性,从而降低电流的分布不均。

2.3 MOV 设计

MOV 的作用一是限制固态开关关断瞬间会产生过电压,保护串联 IGBT,二是吸收系统中的短路能量。

在 2.2 节中提到避雷器的残压 U_{mov} 决定了固态开关 IGBT 的串联数。残压选择越大,串联的 IGBT 就越多,短路电流在避雷器上消耗到 0 的时间就越短;残压选择越小,串联的 IGBT 就越多,但短路电流在避雷器上消耗到 0 的时间就越长。因此,避雷器残压应根据断路器额定电压、成本等因素综合考虑。本文 15 kV 样机选择的残压为 20 kV。

此外避雷器的能量也应根据系统短路容量进行设计。能量越大,安全裕度越大,但成本增加,造成无谓浪费。

3 样机集成测试

3.1 试验系统

在以上仿真及样机研制的基础上,搭建了样机

试验平台,对整体样机进行了测试。试验平台测试回路如图 8 所示,实物图见附录 A 图 A2。试验平台主要包括 40 kV 直流充电电源、电容组和 3 个电感值不同的电抗器。电容组由 15 个容值为 8 mF、额定电压为 2 kV 的电容器组成,可通过串并联的方式组合,以满足不同试验容值或者电压的需求。

试验时直流电源先对电容充电,断路器处于合闸位置,触发放电球隙击穿,放电电容经限流电感短路放电,模拟短路故障。

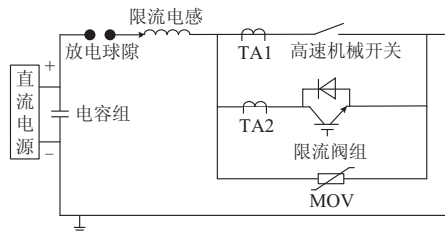


图 8 试验系统原理图

Fig.8 Principle diagram of test system

3.2 测试结果

为了配合断路器的控制保护,如图 8 所示,在样机内部串联了 2 只电子式电流互感器 TA1 和 TA2。样机控制逻辑如下。

TA1 检测到线路电流达到断路器分断门槛值时,开通限流阀组固态开关,100 μ s 延时后分断高速开关;TA2 检测到线路电流达到 10 kA 最大分断电流值,并且 TA1 检测到高速开关支路电流到 0 时,关断限流阀组固态开关。

高速开关分闸时预充电电容电压为 600 V,线圈电流约为 5.8 kA,高速开关动触头从分闸命令发出到触头分离的时间约为 0.6 ms,相应波形见附录 A 图 A3。

断路器控制保护装置中设置分断门槛值为 2 kA,最终限流阀组固态开关关断电流为 10 kA,避雷器残压为 20 kV,整个样机分断时间约为 5 ms,相应波形见附录 A 图 A4。

分断过程中,电流从高速开关向固态开关转移的波形见附录 A 图 A5 和图 A6,可以看出,电流以指数形式转移,与上文的理论推导相符。

实际高速开关燃弧换流电流约为 3 kA,换流时间约为 680 μ s。当电流完全转移到固态开关中后,固态开关延时约 1 ms 关断,让高速开关拉开足够的开距。

对样机高速开关在不同换流电流值下进行了测试,测试结果如表 1 所示。

因为限流阀组固态开关 IGBT 的通态压降基本与电流成正比,导致换流电流越大,换流平均速率

di/dt 就越小,需要的换流时间越长。当换流电流增大到使得限流阀组固态开关 IGBT 的通态压降 U_d 高于电弧电压 U_{arc} 时电流将无法完全转移,换流失败,即导致断路器开断失败。因此为保证断路器可靠开断,必须保证高速开关燃弧换流电流不高于某一阈值。

表 1 换流特性实际测试结果

Table 1 Test results of current commutation features

充电电压/kV	换流电流/A	换流时间/ μs	最大速率/ $(A \cdot \mu s^{-1})$
0.1	35.0	15	3.5
1.5	0.5	145	4.1
3.0	1.0	290	5.4
5.5	2.0	520	5.0
6.5	3.0	680	4.5

4 结语

依靠电弧电压转移电流的混合型断路器能够可靠、快速地分断直流故障电流。在高压应用场合,因串联 IGBT 数量增加,必须增大电弧电压才能可靠换流。增大电弧电压的方法有:改变真空灭弧室触头材料;采用外加磁场;多断口串联。

此外,为降低整个断路器分断时间,可以进一步优化高速开关斥力操作机构的设计,缩短高速开关的分闸时间。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [2] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers: a key innovation for reliable HVDC grids[C]// Integrating Supergrids and Microgrids International Symposium in Bologna, September 13-15, 2011, Italy.
- [3] 庄劲武,张晓锋,杨锋,等.船舶直流电网短路限流装置的设计与分析[J].中国电机工程学报,2005,25(20):26-30.
ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, YANG Feng, et al. Analysis and design of fault current limiter for ship DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 26-30.
- [4] 陈刚,江道灼,蔡永华,等.具有旁路电感的新型固态故障限流器的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(7):200-205.
CHEN Gang, JIANG Daozhuo, CAI Yonghua, et al. Study on a novel solid state fault current limiter with bypass reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 200-205.
- [5] 娄杰,李庆民,肖茂友,等.基于快速开关的串联谐振型故障限流器的仿真[J].高电压技术,2006,32(5):80-83.
LOU Jie, LI Qingmin, XIAO Maoyou, et al. Simulation of an series resonant type FCL based on fast transfer switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 80-83.
- [6] 陈金祥,董恩源,邹积岩.具有串联补偿作用的新型故障限流器(FCL)的研究[J].电工技术学报,2001,16(1):48-51.
CHEN Jinxiang, DONG Enyuan, ZOU Jiyan. Study of a new fault current limiter (FCL) with series compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 48-51.
- [7] 王季梅.真空电弧理论研究及其测试[M].西安:西安交通大学出版社,1993.
- [8] 徐国政,张节容,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [9] SUGIMOTO S, KIDA J, ARITA H, et al. Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 842-847.
- [10] 黄绍平,扬青,李靖.基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(5):64-66.
HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 64-66.
- [11] KIMBLIN C W, GORMAN J G, HOLMES F A. Development of a current limiter using vacuum arc current commutation[R]. Palo Alto, CA, USA: Palo Alto Electric Power Research Institute, 1979.
- [12] YUKIMORI K, KENICHI K, HIROYUKI S, et al. Development of the high speed switch and its application[C]// IEEE Industry Applications Conference, October 12-15, 1998, St. Louis, MO, USA: 2321-2328.
- [13] 李庆民,刘卫东,钱家骊.电磁推力机构的一种分析方法[J].电工技术学报,2004,19(2):20-24.
LI Qingmin, LIU Weidong, QIAN Jiali. An analytical method for electromagnetic repulsion mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 20-24.
- [14] 董恩源,李博,邹积岩.超高速斥力机构与永磁机构的实验性能对比分析[J].高压电器,2007,43(2):125-126.
DONG Enyuan, LI Bo, ZOU Jiyan. Comparison analysis of experiment performance between high-speed repulsion mechanism and permanent magnetic mechanism [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 125-126.
- [15] 王子建,何俊佳,尹小根,等.基于电磁斥力机构的 10 kV 快速真空开关[J].电工技术学报,2009,24(11):68-75.
WANG Zijian, HE Junjia, YIN Xiaogen, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 68-75.

吕 玮(1986—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:高压大功率电力电子技术。E-mail: lvw@nari-relays.com

方太勤(1973—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统高压交直流控制保护及大功率电力电子技术。

杨 浩(1979—),男,高级工程师,主要研究方向:大功率电力电子技术。

(编辑 万志超)

(下转第 102 页 continued on page 102)

Hybrid DC Breaker Based on Arc Voltage

LYU Wei, FANG Taixun, YANG Hao, YANG Bing, WANG Yu, SHI Wei

(NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The hybrid direct current (DC) breaker has good static characteristics and good dynamic characteristics. The multi-terminal high-voltage direct current (HVDC) transmission network is largely dependent on the development of DC circuit breaker technology. This paper presents a hybrid DC circuit breaker based on arc voltage, and derives mathematical relationship of current-commutation. Simulating the key part-high speed switch by the electro-magnetic repulsion mechanism is performed using finite element analysis. A 1 kA/15 kV hybrid DC breaker is designed based on the above research, and the test results show that the prototype's arc maximum current-commutation capacity is 3 kA. The process of current transfer from high-speed switch to solid state switch accords with the exponential function, and is consistent with theoretical derivation. The prototype can break the short-circuit current less than 10 kA within 5 ms, and the break time depends primarily on high-speed switch and arc voltage.

Key words: arc voltage; insulated gate bipolar transistor (IGBT); electro-magnetic repulsion mechanism; finite element analysis