第 50 卷 第 2 期：551-560　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 551-560
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230643

基于逆阻型 IGCT 器件的固态式直流断路器设计及研制

严　鑫[1]，余占清[1,2,3]，屈　鲁[1,3]，甘之正[1]，任春频[1]，曾　嵘[1,2,3]
（1. 清华大学电机工程与应用电子技术系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室，北京 100084;
2. 清华四川能源互联网研究院直流研究中心，成都 610042;
3. 清华大学能源互联网创新研究院，北京 100084）

摘　要：直流系统是支撑高比例新能源接入与灵活高效用能的重要技术方向。固态式直流断路器(solid state DC circuit breaker，SSCB)具有开断速度极快、无电弧、寿命长等优点，在中低压直流系统的故障保护中得到广泛应用。随着电力电子器件的发展，固态式直流断路器的拓扑结构、工作性能也在不断进步。为此基于逆阻型集成门极换流晶闸管(intergated gate commutate thyristor，IGCT)，提出了一种新型的固态式直流断路器结构及设计方法，通流支路采用逆阻 IGCT 反并联结构实现双向通流，缓冲支路采用金属氧化物避雷器(metal oxide varistor，MOV)-电容结构来抑制过电压，吸能支路采用 MOV 吸收系统能量。进一步地，给出了关键元器件的参数设计方法，并验证了有效性；设计了性能良好的重力热管散热器，单个模块散热功率可达 700 W；提出了主被动结合的控保策略，提高断路器的保护性能。最后，研制了固态式直流断路器样机，可用于 750 V 以内的低压直流系统，额定通流可达 2 kA，可在百微秒内开断 10 kA 故障电流，成本低、体积小、高可靠，具有良好的应用前景。
关键词：直流输配电；固态式直流断路器；逆阻型 IGCT；反并联结构；缓冲设计

Design and Development of Solid-state DC Circuit Breaker Based on Reverse Blocking IGCT

YAN Xin[1], YU Zhanqing[1,2,3], QU Lu[1,3], GAN Zhizheng[1] , REN Chunpin[1], ZENG Rong[1,2,3]
(1. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. DC Research Center, Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610042, China; 3. Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

Abstract：DC systems are an important technical direction that supports a high proportion of new energy access and flexible and efficient energy use. Solid state DC circuit breaker has the advantages of extremely fast breaking speed, simple structure, and service life, and is widely used in medium and low voltage DC systems. With the development of power electronic devices, the topology and working performance of solid-state DC circuit breakers are also constantly improving. Based on the reverse blocking intergrated gate commutated thyristor(IGCT), this paper proposes a new type of solid-state DC circuit breaker structure: the main branch adopts the reverse blocking IGCT anti-parallel structure to realize bidirectional flow. The snubber branch adopts the MOV-C structure to suppress overvoltage and AC harmonics wave. At the same time, the parameter design method of key components is given and verified, a gravity heat pipe radiator with 700 W heat dissipation power is designed, and a control strategy is proposed to improve the reliability of the circuit breaker. Finally, a 750 V/2 kA solid-state DC circuit breaker prototype is developed and passes the long-term test and breaking test with 10 kA maximum turn-off current. It has the advantages of low cost, small size, high reliability and good application prospects.
Key words：DC transmission and distribution; solid-state DC circuit breaker; reverse blocking IGCT; anti-parallel structure; snubber branch design

0　引言

直流技术具有功率分配灵活、系统效率高、供电容量大、线路损耗低、电能质量高等优点[1-3]。但直流系统的阻抗低，导致短路故障电流上升率高，电流在短时间内即可发展到非常高的水平。同时，直流系统中的短路电流无过零点，给故障快速可靠隔离带来挑战[4-5]。

固态式直流断路器(solid state DC circuit break-

基金资助项目：国家自然科学基金 (51922062；52241701)；国家重点研发计划 (2021YFB2401604)；台达中达学者计划(编号略)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51922062, 52241701), National Key R&D Program of China (2021YFB2401604), Delta Scholar Project Sponsorship.

er，SSCB)具有极快的开断速度，百微秒内即可实现故障隔离，抑制故障电流发展。同时，固态式直流断路器操作简单，易于重合闸。相较于机械式直流断路器和混合式直流断路器，避免使用机械开关使得固态式直流断路器的体积更小，可靠性和寿命更高[6-9]。但长期导通下，功率器件的损耗更高，使得固态式直流断路器不适用于高压场合，更常用于中低压的场景中，如数据中心的可靠供电、船舶的全电推进系统、中低压直流配电系统等。功率电力电子器件是固态式直流断路器的核心之一，其性能直接决定了断路器的性能。晶闸管具有非常低的通态压降和高浪涌能力，但缺乏主动关断的能力。绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)具备主动关断能力，还具有高耐压、强关断、频率高的优点，但通态压降较高，器件成本高，较少用于固态式直流断路器中。集成门极换流晶闸管(intergrated gate commutated thyristor，IGCT)同样具有主动关断能力，通态压降介于晶闸管和 IGBT 之间，耐压水平与晶闸管相同，显著高于 IGBT，而且成本比 IGBT 更低，非常适合固态式直流断路器的工况[10-11]。近年来 IGCT 器件在关断能力上取得了巨大进展，清华大学研制了最大关断电流 17 kA 的 IGCT[12]。同时，逆阻型 IGCT(reverse blocking intergrated gate commutated thyristor，RB-IGCT)已经量产应用，在兼具 IGCT 优点的基础上增加了反向耐压能力，使断路器的双向通流更加容易。基于晶闸管的 Z 型固态式断路器具有较低的通态压降，但需要耦合电抗器，结构复杂，控制要求高，而且元器件长期工作，可靠性低 [13-16]。基于常规全控电力电子器件的固态式直流断路器具有较强的开断能力，开断速度快，控制简单，但器件无法耐受反压使得断路器需要采用二极管桥结构或反串联结构[17-21]，这提高了通态损耗，并对散热设计提出了更高的要求。ABB 公司基于逆阻型 IGCT 研制了固态式直流断路器样机，但通流能力弱，风冷散热性能差，缺少缓冲支路，开断过电压高，且缺少实际运行的测试结果，无法满足实际运用的需求[22]。

为了满足中低压直流输配电系统对故障快速隔离的应用需求，本文基于逆阻型 IGCT 提出了一种反并联结构的固态式直流断路器，在具备双向通流能力的同时，减少了所需器件数量，降低了通态损耗和成本；提出了基于金属氧化物避雷器(metal oxide varistor，MOV)和电容的 MOV-C 缓冲设计，有效抑制了开断过电压和交流谐波，给出了关键参数的设计方法及仿真验证；完成散热设计和结构低杂散设计，最后优化控保策略，成功研制出额定电压 750 V 的低压固态式直流断路器样机并进行了试验，验证了方案的可行性和有效性。

1 基于新型 IGCT 器件的固态式直流断路器拓扑及原理

1.1 逆阻型 IGCT 器件

固态式直流断路器的开合是通过控制电力电子器件中载流子的运动来实现的。所以电力电子器件的特性将直接决定断路器的特性，也会影响到断路器的拓扑结构。

逆阻型 IGCT 具有反向耐压的能力。相较于非对称 IGCT 器件，逆阻型 IGCT 增加了阳极 p 基区的厚度，去掉了非对称器件中的 n 区缓冲层。这使得 RB-IGCT 中阳极 p 基区与 n 基区形成的 J_1 结可以耐受反向电压。通过合适的掺杂浓度调整，可以使 RB-IGCT 的正反向耐压在相同水平。图 1 展示了非对称 IGCT 和逆阻型 IGCT 的结构对比。在相同耐压水平下，逆阻 IGCT 芯片比非对称 IGCT 更厚[23]。

1.2 新型固态式直流断路器拓扑

为了实现断路器的双向通流，通流支路常常采用反串联结构或者二极管桥结构。而采用逆阻型 IGCT，可以将通流支路的结构简化为反并联的结构。一方面，反并联结构可以在相同功率等级下使用更少的器件，降低通态压降损耗；另一方面，该结构可以减少对散热的需求，节约断路器的体积和成本。

基于逆阻型 IGCT，本文提出一种反并联结构的固态式直流断路器拓扑结构，如图 2 所示。其由通流支路、缓冲支路与耗能支路三部分并联组成。其中，通流支路由逆阻 IGCT 组成，缓冲支路由金 MOV 和电容 C 组成，耗能支路由 MOV 组成，用于抑制开断电压和吸收系统中的能量。

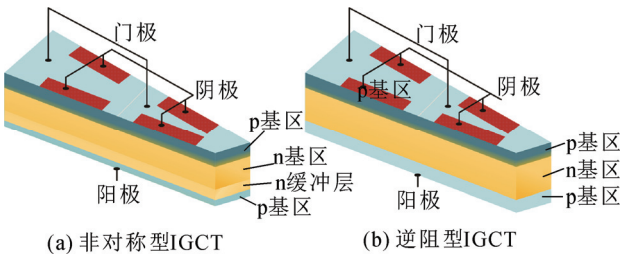


图 1 IGCT 结构对比图

Fig.1 Structure comparison of IGCTs

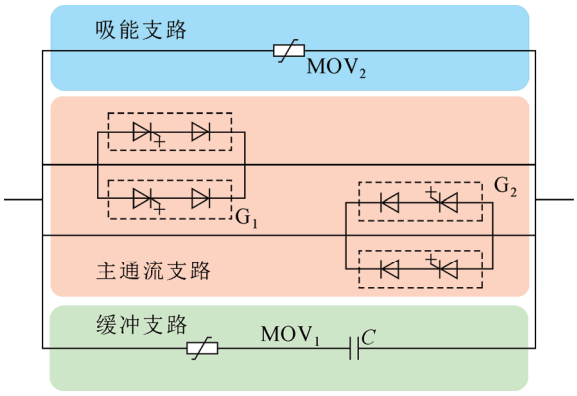


图 2　基于 RB-IGCT 的固态式直流断路器拓扑

Fig.2　Solid state DC circuit breaker topology based on RB-IGCT

主通流支路由 G_1 和 G_2 两组可耐受反压的逆阻型 IGCT 构成，缓冲支路由 MOV 与电容串联构成，即 MOV-C 结构。无缓冲支路会使得关断过电压过高，而且耗能 MOV 的杂散参数会引起高频振荡，而常见的 RC 缓冲结构无法阻断交流谐波，电阻-电容-二极管(resistance-capacitance-diode，RCD)缓冲结构不适用于双向通流的需求。MOV-C 结构可以以较低的成本解决上述结构的问题，同时满足双向通流的需求[24]。

1.3　开断原理

假定负载位于断路器右侧并发生接地短路故障，结合图 3 分析断路器的工作原理。

1）0~t_0：IGCT 保持导通，系统电流流经 IGCT，如图 3(a)所示。

2）t_0~t_1：t_0 时刻故障发生，t_1 时刻直流断路器控制器收到系统命令或检测到故障电流达到开断电流阈值，发送关断指令到电力电子开关。在此阶段，故障电流迅速上升。

3）t_1~t_2：IGCT 收到关断指令后立刻动作。随着 IGCT 电压达到 MOV_1 的额定电压，电流开始从器件所在的通流支路换流到缓冲支路，冲击电容，建立电压。如图 3(b)所示。

4）t_2~t_3：随着电容电压的提升，缓冲支路的电压随之上升。当电压达到耗能 MOV_2 的动作电压，故障电流换流到耗能支路，如图 3(c)所示。

5）t_3~t_4：t_3 时刻，电流完全转移至耗能支路，断路器两端电压达到 MOV_2 的残压。MOV_2 吸收系统中剩余的能量。吸能过程完成后，断路器两端电压回落到母线电压，整个关断过程完成。

固态式直流断路器的开断时序图如图 4 所示。

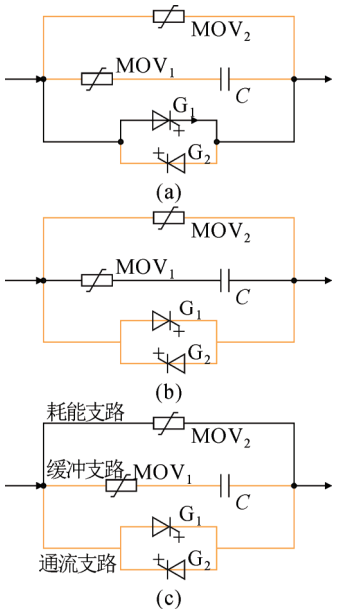


图 3　固态式直流断路器开断过程

Fig.3　Breaking process of the SSCB

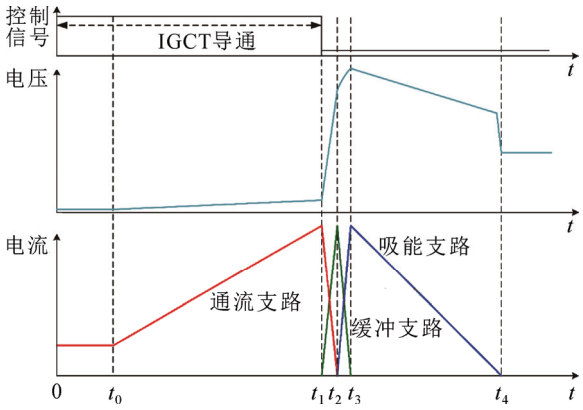


图 4　基于 RB-IGCT 的固态式直流断路器开断时序图

Fig.4　Breaking diagram of solid-state DC circuit breaker based on RB-IGCT

1.4　重合闸过程

上述拓扑完成开断后，收到重合闸命令时，通过直接闭合通流支路的电力电子开关，完成合闸。若重合于故障线路，则按照开断过程再次完成开断即可；若重合于正常状态，则保持导通状态，正常工作。

2　关键参数设计及仿真验证

2.1　缓冲电容设计

缓冲电容可以降低关断过程中的过电压。由于 MOV 存在陡波效应，电压上升率过高时，吸能 MOV 的残压会高于设计值，使电力电子器件存在过压损

坏的风险。缓冲电容可以降低电压上升率，电流冲击吸能 MOV 的速度，从而降低残压，保护器件的安全。

关断过程中，缓冲 MOV 与电容的电压之和应等于耗能 MOV 的残压，即：

$$U_{\text{rmov1}}+U_{\text{c}}=U_{\text{rmov2}} \tag{1}$$

式中：U_{rmov1}为缓冲 MOV$_1$ 的残压；U_{c}为电容上的最大电压；U_{rmov2}为吸能 MOV$_2$ 的残压。

将吸能 MOV 达到标准残压对应的电流波前时间记为 t_{res}。如果在关断过程中的电流波前时间 t_{f} 大于 t_{res}，就可以保证器件两端的过电压不会超过耗能 MOV 的设计残压值，从而避免了过压损坏。所以得到：

$$t_{\text{f}}=\frac{Cu_{\text{c}}(t_{\text{f}})}{I_{\text{main}}}>t_{\text{res}} \tag{2}$$

式中：I_{main}为 IGCT 最大关断电流，u_{c}为缓冲电容上的最大电压。

所以，将式(1)代入式(2)中，得：

$$C>\frac{I_{\text{main}}t_{\text{res}}}{U_{\text{rmov2}}-U_{\text{rmov1}}} \tag{3}$$

从而得到电容设计的下限值。对于缓冲电容的上限没有限制，但电容容值增加会带来成本和体积的影响，所以缓冲电容不宜过大。

2.2 缓冲 MOV 设计

缓冲 MOV 可以在断路器开断状态下阻断交流谐波，避免电容长期工作而损坏，而常用的 RC 缓冲支路则无法抑制交流谐波。同时，缓冲 MOV 还可以抑制重合闸时电容通过电力电子器件的放电电流。

重合闸时 IGCT 导通，缓冲电容的能量通过缓冲 MOV、IGCT 放电。保证 IGCT 可以关断该放电电流，需要保证放电电流低于 IGCT 最大关断电流，即：

$$I_{\text{d}}=\frac{U_{\text{c}}}{R_{\text{mov1}}}<I_{\text{main}} \tag{4}$$

式中：I_{d}为放电电流；R_{mov1}为缓冲 MOV 的等效电阻。所以缓冲 MOV 的残压与其对应电流的比值应该大于等于 R_{mov1}。

另外，缓冲 MOV 的残压不能过高。根据式(3)知，缓冲 MOV 的残压越高，对于缓冲电容的容值要求就越高。一般缓冲 MOV 的残压不超过耗能 MOV 残压的一半。

2.3 仿真分析

本文所设计的低压固态直流断路器的基本电气元器件参数如表 1 所示。在仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建模型并进行仿真。

仿真结果如图 5 所示。在 t=0.1 s 时系统发生接地故障、经过 0.8 ms 后，系统给 IGCT 下达关断指令。收到指令后，IGCT 立刻关断，电压建立。随着电压上升，电流被换流到缓冲支路。当电容电压达到较高的幅值后，电流从缓冲支路换流到耗能支路，两端电压维持在耗能 MOV 的残压。随后电流全部换流到耗能支路，被耗能 MOV 吸收，完成整个关断。

2.4 试验对比

为了验证 MOV-C 缓冲结构的有效性，搭建了试验测试平台。首先，在 IGCT 器件两端不加缓冲支路，直接并联缓冲 MOV。其开断波形如图 6 所示。由于没有缓冲，IGCT 在关断过程中的电流直接转移冲击 MOV，电压上升率非常快，引起非常高的电压过充，过充幅值超过设计过电压的 40%，给器件带来击穿的风险。另外，MOV 吸收系统的大部分能量后，剩余的能量由于 MOV 的寄生参数，引起电压的高频振荡。

在增加了 MOV-C 缓冲支路后，再次进行开断试验，波形如图 7 所示。U_{L}、I_{L}、U_{R}、I_{R} 分别表示并联的 2 只 IGCT 器件各自的电压、电流波形。可

表 1 固态式直流断路器仿真参数

Table 1 Parameters of SSCB in simulation

电气元件参数	数值
母线电容/mF	8
回路电感/μH	60
缓冲电容 C/μF	10
缓冲 MOV 残压 U_{rmov1}/V	750
耗能 MOV 残压 U_{rmov2}/V	1500

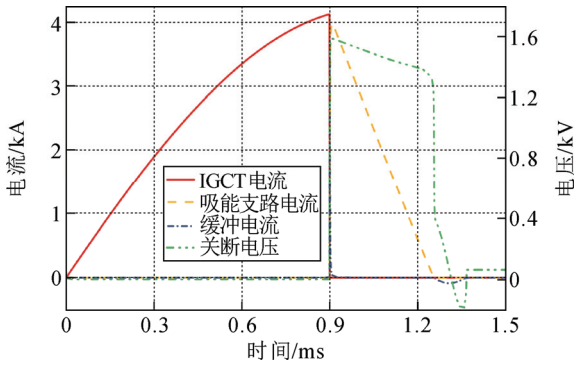


图 5 固态式直流断路器仿真波形

Fig.5 Simulation waveform of the SSCB

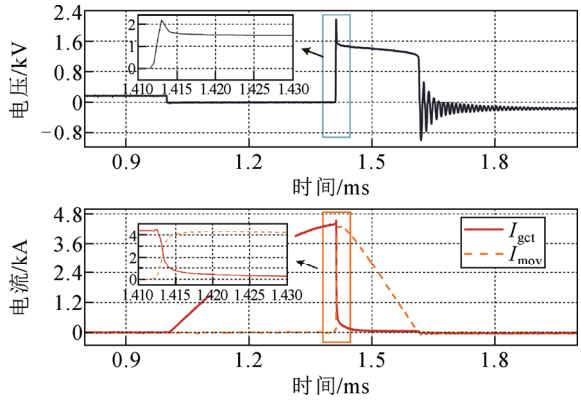


图 6　无缓冲开断波形

Fig.6　Breaking waveform without snubber

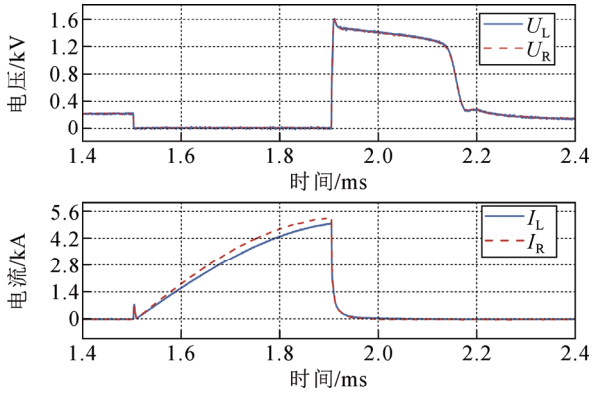


图 7　具有 MOV-C 缓冲结构的开断波形

Fig.7　Breaking waveforms with MOV-C snubber branch

以看到，由于电容的作用，开断过程中的电压峰值明显被抑制，从 2.1 kV 降低到了 1.6 kV，控制在吸能避雷器的残压附近，这说明 MOV-C 缓冲结构在抑制过电压的方面有明显的效果。而且由于电容的存在，后续的高频振荡也被抑制，有效地避免了高频电磁干扰。

在 PSCAD 中仿真了缓冲电容容值对开断过程的影响，如图 8 所示，电容值分别取 5、10 和 20 μF。可以看到，缓冲电容容值越大，电压上升率更低，同时电压高频振荡现象被抑制。电压降低并反向的过程是缓冲电容通过缓冲 MOV 对回路放电的过程，该过程也随着电容增加导致电压变化周期变长。缓冲电容容值对于电流的影响主要是缓冲支路的电流随着电容容值的增加而增加，缓冲的作用更好。仿真结果表明，缓冲电容容值越大，对于开断过程保护更好，过电压更低，缓冲作用更明显。

表 2 列出了 3 种缓冲结构之间的对比，MOV-C 结构可以抑制交流谐波干扰和高频振荡，同时还可以抑制开断过程中的过电压，具有显著的优越性。

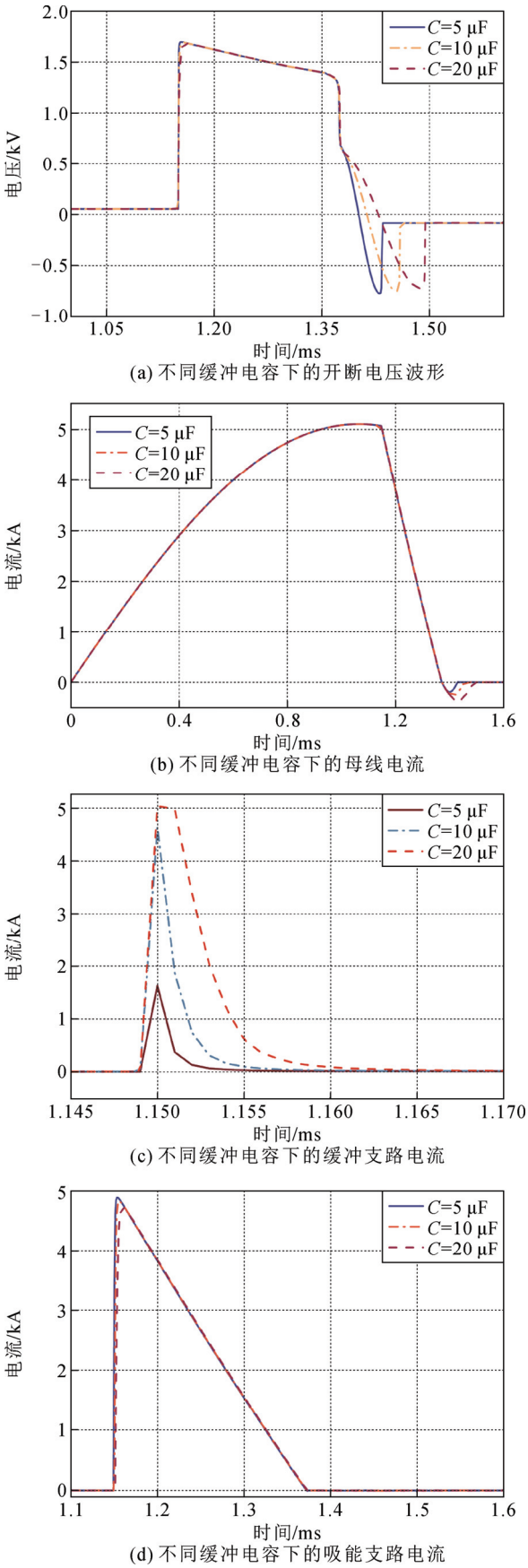


图 8　缓冲电容对开断过程的影响

Fig.8　Influences of snubber capacitance on the breaking process

表 2 缓冲支路性能比较

Table 2 Comparison of three types of snubber branches

缓冲结构	电压抑制效果	交流谐波抑制效果	高频振荡抑制效果
MOV-C	好	好	好
无缓冲	差	好	差
RC	好	差	好

3 样机研制及实验验证

本章以额定电压 750 V 固态式直流断路器为研究目标，额定通流上限为 2 kA，最大开断能力为 10 kA，设计直流断路器的散热结构，提出主被动保护结合的控制策略，并研制出了固态式直流断路器样机，进行了长期测试和开断试验。

3.1 基于强迫风冷的重力热管散热器设计

固态式直流断路器的 IGCT 长期通流，所以需要设计散热模块带走 IGCT 产生的热量，保证芯片处于安全的工作温度内。表 3 给出了常见的散热[25-26]。

重力热管属于蒸发冷却，所以具有较强的散热能力，同时其结构设计可以与断路器结构件兼容，尽可能地节省体积。图 9 展示了基于强迫风冷的重力热管及其在 FloTHERM 软件中的仿真结果。其散热原理是在散热器内部加入低沸点的液体，利用该液体的汽化吸收 IGCT 传递的热量；当气体上升到散热器尾端后，利用强迫风冷的方式将气体液化回流，从而形成循环，保证散热长期有效。

对重力热管进行散热性能测试，测试平台如图 10 所示，其结果如表 4 所示，P 为加热功率。

逆阻型 IGCT 在 1 kA 的直流电流下导通压降约为 1 V，稳态下 IGCT 的发热功率约 1 kW。考虑冗余，对应单个重力热管的散热功率为 600 W。实验结果表明，在 600 W 下，散热器的最高温升为 33 ℃，符合实际工作要求。

3.2 主被动保护结合的控制策略

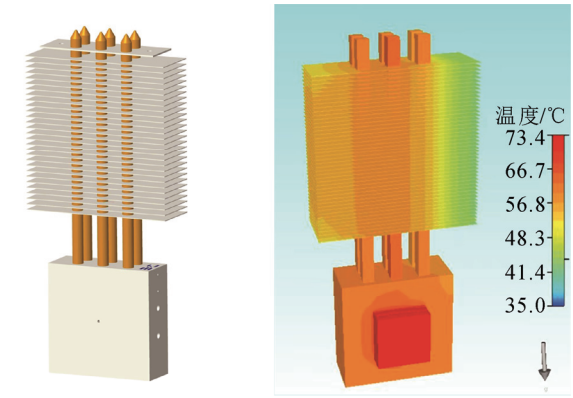
当短路故障发生后，系统需要经过 3 ms 的判断时间才会给断路器下发动作指令。由于直流系统的阻抗非常低，严重的短路故障将引起极高的电流上升率，甚至故障电流在出口时间内就超过了断路器的最大开断水平。为了避免该情况的出现，提出了一种主被动保护相结合的控制方式。

为了断路器能够有效排除干扰、准确做出判断，不仅在系统级增加了电压、电流检测，还在断路器设备级增加了电流检测装置，双重检测以保证电压、电流测量的准确性。在设备层级配置霍尔电流传感器测量母线电流。霍尔电流传感器可以实时

表 3 不同散热方式对比

Table 3 Comparison of different cooling methods

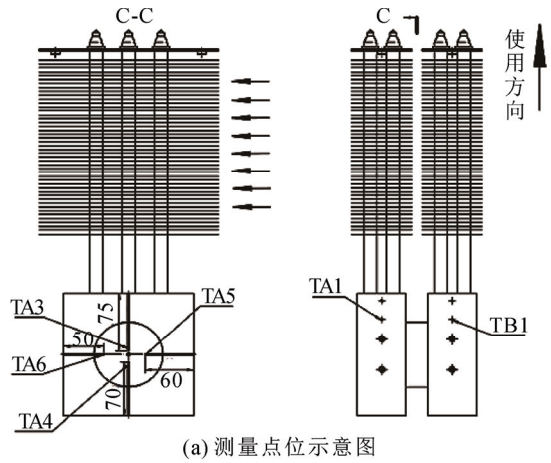
参数	数值			
	自然风冷	强迫风冷	液体冷却	蒸发冷却
表面冷却极限功率密度/(W·m^{-2})	800	16 000	160 000	5×10^{7}
体积功率密度/(W·cm^{-3})	0.009	0.43	0.6	1.22



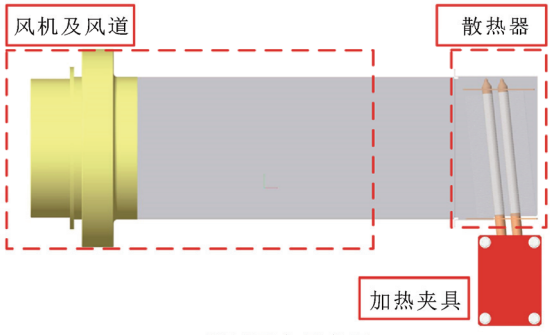
(a) 重力热管结构示意图 (b) 700 W功率仿真结果

图 9 重力热管结构及测试图

Fig.9 Gravity heat pipe structure and test diagram



(a) 测量点位示意图



(b) 测试平台示意图

图 10 重力热管测试

Fig.10 Gravity heat pipe test

表 4　重力热管散热性能测试

Table 4　Gravity heat pipe cooling performance test

测量点位置	测量点温升/℃			
	P=400 W	*P*=500 W	*P*=600 W	*P*=700 W
TA1	14	17	20	24
TB1	13	17	20	23
TA3	19	24	29	34
TA4	22	27	33	39
TA5	19	24	29	34
TA6	18	22	26	31

采样直流稳态电流的幅值，并将其转换为电压信号上传到断路器的控制系统。设备自身的动作阈值高于系统动作阈值。当故障电流达到系统设置的动作阈值时，系统下发关断指令，在收到上级控保系统发出的关断指令后，IGCT 关断，切除短路故障，这被认为是被动保护。若短路故障的电流上升非常快，在上级控保系统没有给出动作指令时，电流超过了系统设置的阈值，达到设备自身的动作阈值，断路器自身会主动给 IGCT 发出关断指令，切除故障，同时向上级控保系统上传自身的状态。系统级控制在收到断路器的关断信号后，3 ms 后进行重合闸操作。如果重合闸到故障上，系统迅速控制 IGCT 再次关断；如果没有故障，那么则正常操作。图 11 展示了主被动保护结合的原理。i_{th} 为最大关断电流，i_n 为额定通流幅值。

图 12 展示了基于主动保护的实验结果。设置采样对比的阈值电压为 6 V，对应的稳态电流为 7.8 kA。当故障电流达到 7.8 kA 后，采样电压达到了设定的阈值 6 V。随后断路器控制器给 IGCT 下达了关断指令，成功关断 7.8 kA 电流。由于响应时间和转换精度的原因，霍尔传感器的测量结果会存在一定的误差，但可以通过实际测量和调试来解决。i_{all} 为总电流，U_{all} 为开断电压，U_{hall} 为霍尔传感器测量电压。

3.3　整机开发

基于逆阻型 IGCT 的固态式直流断路器样机模型如图 13 所示，阀串拓扑结构如图 2 所示，主通流支路上单向并联 2 只开关器件，其电气性能指标如表 5 所示。为了保证并联支路的均流效果，阀串结构和元器件均对称布置。

固态电力电子器件是固态式直流断路器的核心元器件。ABB 公司研制的逆阻型 IGCT 器件 5SHZ 60L2500，直流耐受电压可达 1550 V，最高耐受电压为 2500 V，最大关断电流为 5600 A。表 6 列出了该款器件的核心参数。

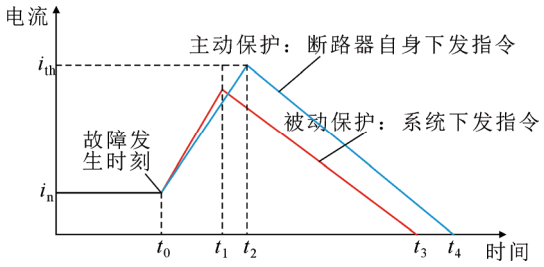


图 11　主被动保护控制逻辑

Fig.11　Active and passive protection control

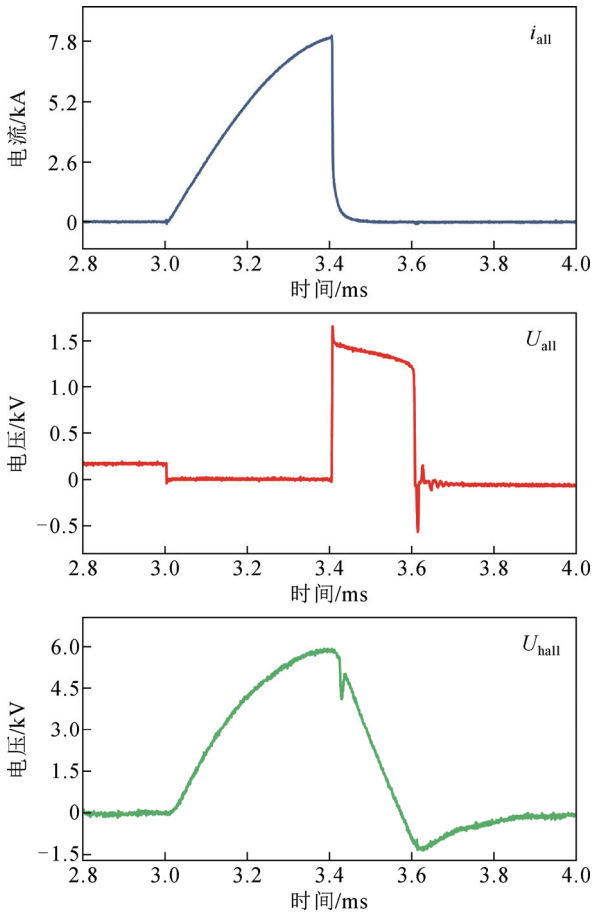


图 12　主动关断测试

Fig.12　Active breaking test

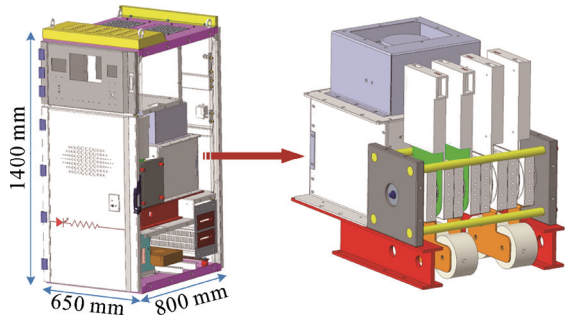


图 13　固态式直流断路器三维结构图

Fig.13　Three-dimensional structure diagram of solid-state DC circuit breaker

表 5 固态式直流断路器样机参数

Table 5 Parameters of SSCB

参数/材料		数值
电气性能	额定电压	750 V
	单向额定电流	2 kA
	开断电流	10 kA
	开断时间	0.1 ms
	过电压水平	1500 V
通流支路	逆阻型 IGCT	U_{max}=2.5 kV，I_{max}=5.6 kA
缓冲支路	缓冲电容 C	10 μF
	缓冲避雷器	1 mA(400 V)，10 kA(750 V)
耗能支路	耗能避雷器	1 mA(800 V)，10 kA(1500 V)

表 6 逆阻型 IGCT 器件参数

Table 6 Parameters of RB-IGCT

参数	符号	典型值
最大重复关断电压	U_{DRM}	2500 V
最大反向耐受电压	U_{RRM}	2500 V
短时耐受直流电压	$U_{DC,short}$	1800 V
最大长期通态电流	I_{TM}	3690 A
最大浪涌电流	I_{TSM}	7000 A
最大可关断电流	I_{TGQM}	5600 A

3.4 实验验证

为了验证断路器的散热性能，进行了断路器长期工作测试，分别通流 1 kA 和 2 kA，结果如图 14 所示。当母线额定电流为 2 kA、环境温度为 25 ℃时，测得逆阻 IGCT 的导通压降分别为 0.98 V 和 0.97 V，散热器表面的温度稳定在 56 ℃和 54 ℃，重力热管散热器的温升控制在 30 ℃，根据器件手册的热阻推算逆阻型 IGCT 的结温控制在 70 ℃，保证了器件工作在安全温度内。

为了验证断路器的开断性能，我们进行了断路器开断测试，结果如图 15 所示，$i_{mov\text{-}c}$ 为缓冲结构电流，i_{mov} 为吸能支路电流。利用 LC 谐振电路来模拟故障电流，母线电容容值为 1 mF，回路电抗为 70 μH。并联 2 只逆阻型 IGCT 器件，共关断 10 kA 电流，分别为 4.6 kA 和 5.4 kA，电流不均匀度为 $s=2|I_1-I_2|/(I_1+I_2)=4\%$，$I_1$ 和 I_2 分别是 2 只并联 IGCT 的电流，满足设计要求。开断过电压控制在 1.6 kV 以内，与预期一致，说明 MOV-C 的缓冲支路起到了较好的效果。

4 性能对比分析

与反串联结构以及二极管桥结构相比，反并联结构仅使用逆阻型 IGCT 器件，无需功率二极管。这使得基于逆阻型 IGCT 的反并联结构所需器件数量减少一半。这使得反并联结构的阀串体积相较反串联结构降低 40%，较二极管桥结构降低 60%。在成本方面，反并联结构可以节省功率二极管的成本，特别是二极管桥结构中的快恢复二极管成本。反并联结构最大的优势在于功率器件的直接并联，使得损耗比其他 2 种结构的低 40%~60%。一方面，这大大降低了设备的长期运行损耗，使得固态式直流断路器更具经济性；另一方面，大幅降低断路器冷却系统的容量和要求，这有利于断路器的结构设计和长期可靠性，同时，反并联结构中长期工作的功率器件更少，也有利于提高设备的可靠性。图 16 展示了固态式直流断路器的常见 3 种拓扑的对比结果。基于逆阻型 IGCT 的反并联结构在可靠性、散热需求、体积、成本以及通态损耗 5 个方面均具有显著的优势。

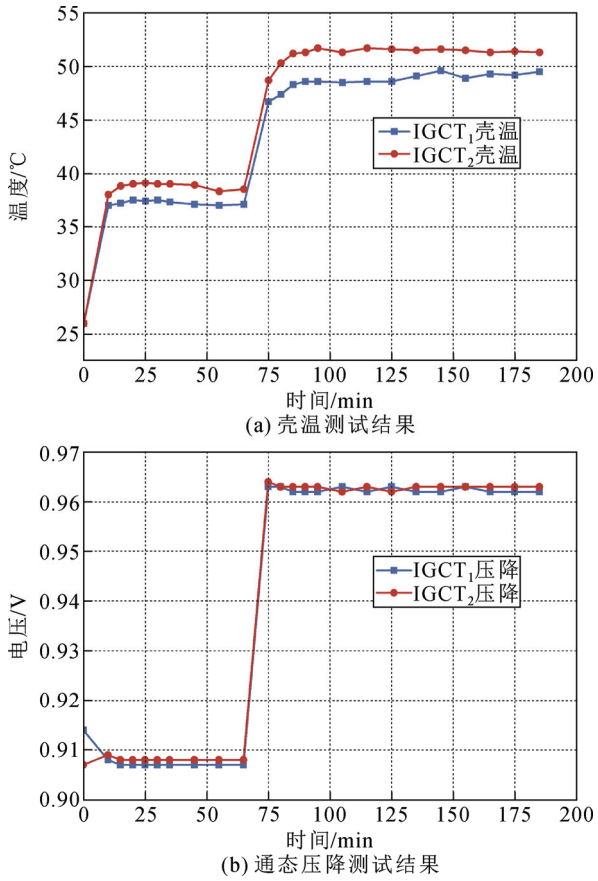
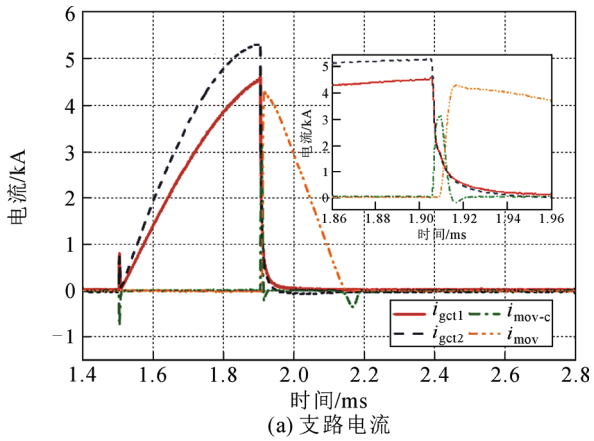


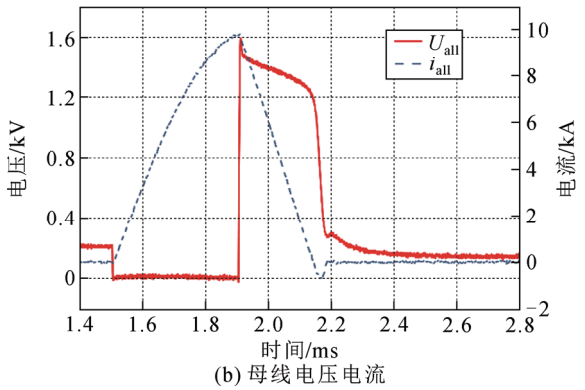
图 14 长期测试波形

Fig.14 Long-term test waveforms

在缓冲结构方面，MOV-C 缓冲结构相较于无缓冲结构和 RC 缓冲结构也具有明显的优势。首先，MOV-C 结构可以有效抑制开断过程中的过电压幅值，保证器件的开断安全；其次，MOV 的特性使得 MOV-C 缓冲结构可以抑制交流谐波，而 RC 缓冲结构无法抑制交流谐波，使得缓冲支路长期通流，



(a) 支路电流



(b) 母线电压电流

图 15　开断测试波形

Fig.15　Breaking test waveform

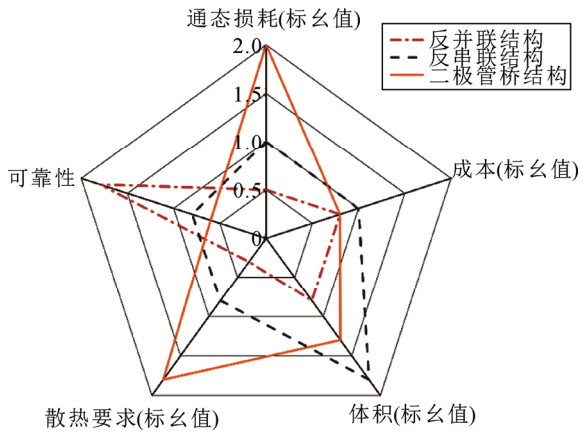


图 16　3 种拓扑结构的性能对比

Fig.16　Performance comparison of the three topologies

导致元器件热损坏；最后，MOV-C 缓冲结构可以抑制吸能 MOV 寄生电容引起的高频振荡(如图 6 所示)，降低元器件损坏的风险和电磁干扰。

5　结论

1）在拓扑方面，采用电力电子开关反并联结构，简化了拓扑结构，降低了成本与体积；提出了基于 MOV-C 的缓冲支路设计方法，降低了开断过电压，抑制了交流谐波干扰和高频振荡。

2）在散热方面，研制了基于强迫风冷的重力热管散热器，相对水冷散热具有体积小、可靠性高的优点。

3）设计了主被动保护结合的控制策略，使固态式直流断路器可靠性更高、保护能力更强。

4）研制了 750 V/10 kA 的固态式直流断路器，分断时间可以控制在百微秒以内，有效抑制直流短路电流的发展，为系统提供可靠保护。

参考文献　References

[1] CHEN W J, ZENG R, HE J, et al. Development and prospect of direct-current circuit breaker in China[J]. High Voltage, 2021, 6(1): 1-15.

[2] 汤广福，罗　湘，魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报，2013，33(10)：8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[3] 温家良，吴　锐，彭　畅，等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报，2012，32(13)：7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.

[4] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.

[5] VAN HERTEM D, GHANDHARI M, DELIMAR M. Technical limitations towards a SuperGrid-a European prospective[C]//2010 IEEE International Energy Conference. Manama, Bahrain: IEEE, 2010: 302-309.

[6] SANO K, TAKASAKI M. A surgeless solid-state DC circuit breaker for voltage-source-converter-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2690-2699.

[7] SCHMERDA R, CUZNER R, CLARK R, et al. Shipboard solid-state protection: overview and applications[J]. IEEE Electrification Magazine, 2013, 1(1): 32-39.

[8] 余占清，曾　嵘，屈　鲁，等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2617-2626.
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626.

[9] 张　杰，纪江辉，张玉婵，等. 具备重合闸功能的经济型直流断路器研究[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1083-1091.
ZHANG Jie, JI Jianghui, ZHANG Yuchan, et al. Research on economical DC circuit breaker with reclosing function[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1083-1091.

[10] CHEN Z Y, YU Z Q, ZHANG X Y, et al. Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 2883-2892.

[11] LIU J P, YU Z Q, ZHOU W P, et al. Ultra-low on-state voltage IGCT for solid-state DC circuit breaker with single-switching attribute[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3292-3303.

[12] 刘佳鹏. 大容量门极换流晶闸管的关断失效机理与关断能力提升[D]. 北京：清华大学，2021.
LIU Jiapeng. Research on turn-off failure mechanism and controllable current optimization of high capacity gate commutated thyristors[D].

Beijing, China: Tsinghua University, 2021.

[13] SHU J, WANG S L, MA J P, et al. An active Z-source DC circuit breaker combined with SCR and IGBT[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10003-10007.

[14] MACKEY L, RIFAT KAISAR RACHI M, PENG C, et al. Z-source circuit breaker utilizing ultra-fast mechanical switch for high efficiency DC circuit protection[C] // 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM). Nuremburg, Germany: IEEE, 2017: 452-458.

[15] MAQSOOD A, OVERSTREET A, CORZINE K A. Modified Z-source DC circuit breaker topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7394-7403.

[16] CORZINE K A, ASHTON R W. A new Z-source DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 2796-2804.

[17] 朱 童，余占清，曾 嵘，等. 全固态直流断路器在低压直流配电系统中的应用[J]. 南方电网技术，2016，10(4)：50-56.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Application of all-solid-state circuit breaker in low-voltage DC distribution system[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 50-56.

[18] 彭振东，任志刚，姜 楠，等. 新型直流固态限流断路器设计与分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(4)：1028-1036.
PENG Zhendong, REN Zhigang, JIANG Nan, et al. Design and analysis for a novel DC solid state current limiting circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1028-1036.

[19] 蒋纯冰，赵成勇. 具备重合闸判断能力的电容换流型直流断路器[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3254-3263.
JIANG Chunbing, ZHAO Chengyong. Capacitor-commutated DC circuit breaker with reclosing judgment capability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3254-3263.

[20] WANG S S, SONG Z Q, GAO G, et al. A 15-kA solid-state circuit breaker research and development for the switch network unit of the EAST Tokamak[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(9): 2979-2986.

[21] QI L, CAIROLI P, PAN Z, et al. Solid-state circuit breaker protection for DC shipboard power systems: breaker design, protection scheme, validation testing[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 952-960.

[22] AGOSTINI F, VEMULAPATI U, TORRESIN D, et al. 1MW bi-directional DC solid state circuit breaker based on air cooled reverse blocking-IGCT[C]//2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Old Town Alexandria, USA: IEEE, 2015: 287-292.

[23] REN C P, LIU J P, WU J P, et al. Deciphering the effect of corrugated p-base on reverse blocking IGCT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(9): 5059-5067.

[24] 杨 兵，石 巍，方太勋，等. 高压直流断路器耗能支路 MOV 关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3208-3217.
YANG Bing, SHI Wei, FANG Taixun, et al. Key technology of MOVs in energy dissipation branch of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3208-3217.

[25] 戴夫·S 斯坦伯格. 电子设备冷却技术[M]. 2 版. 北京：航空工业出版社，2012：10-20.
STEINBERG D S. Cooling techniques for electronic equipment[M]. 2nd ed. Beijing, China: Aviation Industry Press, 2012: 10-20.

[26] 李庆友，王 文，周根明. 电子元器件散热方法研究[J]. 电子器件，2005，28(4)：937-941.
LI Qingyou, WANG Wen, ZHOU Genming. Status of techniques on heat dissipation in electronic components[J]. Journal of Electron Devices, 2005, 28(4): 937-941.



严 鑫
1997—，男，博士生
主要从事大功率电力电子器件及直流断路器的研究
E-mail: yan-x19@mails.tsinghua.edu.cn

YAN Xin
Ph.D. candidate



余占清(通信作者)
1981—，男，博士，副教授，博导
主要从事直流系统及电磁兼容等研究工作
E-mail: yzq@tsinghua.edu.cn

YU Zhanqing
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



屈 鲁
1987—，男，博士，副研究员
主要从事直流系统及直流断路器等研究工作
E-mail: qulu@tsinghua.edu.cn

QU Lu
Ph.D.
Associate professor

收稿日期 2023-04-20 修回日期 2023-09-06 编辑 曾文君