

复合开关自然换流型混合式直流断路器的 研究及测试

甘之正¹, 余占清^{1*}, 屈鲁¹, 黄瑜珑¹, 曾嵘¹, 严鑫¹, 张志成²

1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市海淀区 100084;
2. 山东泰开高压开关有限公司, 山东省 泰安市 271000)

Natural Commutation Hybrid DCCB Based on Vacuum and Gas Mechanical Switch

GAN Zhizheng¹, YU Zhanqing^{1*}, QU Lu¹, HUANG Yulong¹, ZENG Rong¹, YAN Xin¹, ZHANG Zhicheng²

- (1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;
2. Shandong Taikai High Voltage Switchgear Co., Ltd., Tai'an 271000, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Hybrid DC circuit breaker is one of the most promising solutions to the problem of DC circuit breakers. In this paper, a natural commutation hybrid DC circuit breaker based on vacuum switch and gas switch in series is proposed. In principle, the natural commutation is driven by the high arc voltage of gas arc, and the transient recovery voltage caused by the turn-off of power electronics devices is withstood by the vacuum gap due to its fast dielectric recovery. The proposed breaker is characterized by the qualities of low loss, reliable breaking, small size and low cost. The characteristics of the arc voltage of gas mechanical switch are analyzed, and the laws of effects of different factors such as opening speed, magnetic field, gas type, arc current, and gas pressure on the arc voltage of gas mechanical switch are researched. The design method of gas and vacuum mechanical switch is presented. Based on this, a 10 kV natural commutation DCCB prototype is developed and tested, and the breaking current reaches 15kA, which effectively verifies the feasibility of the proposed hybrid switches scheme.

KEY WORDS: flexible DC grid; DC circuit breaker; arc voltage; natural commutation

摘要: 混合式直流断路器(hybrid DC circuit breaker, HDCCB)是解决直流开断最有前景的方案之一。但基于电力电子的负载换流开关(load commutation switch, LCS)在主通流支路上的导通损耗和成本较高, 阻碍了HDCCB的应用。该文提出一种基于真空开关与气体开关串联的复合开关自然换流型

混合式直流断路器, 其利用气体开关的高弧压特性驱动自然换流, 利用真空开关的快介质恢复特性承担暂态恢复电压, 具有损耗低、换流可靠、体积紧凑、成本低等特点。该文分析气体机械开关的电弧电压特性, 详细研究分闸速度、燃弧电流、气体类型和磁场、气体压强等不同因素对气体机械开关弧压的影响规律, 并提出气体机械开关的设计方法。在此基础上, 研制10kV复合开关自然换流型直流断路器原理样机, 并进行开断测试, 开断电流可达15kA, 有效验证了该自然换流方法的可行性。

关键词: 柔性直流电网; 直流断路器; 电弧电压; 自然换流

0 引言

柔性直流电网因其低阻抗特性, 其故障方式多、故障发展快、故障影响范围广。因此, 迫切需要故障隔离技术, 以保障柔性直流电网的安全可靠运行^[1-2]。

直流断路器是直流输配电系统中实现直流故障隔离最为理想的选择之一。根据拓扑结构的不同, 直流断路器主要分为3类。第1类是固态直流断路器, 其开断较快, 但通态损耗大^[3-4]; 第2类是机械式直流断路器^[5], 其采用机械开关承载额定电流, 通态损耗低, 但在小电流开断时可能重击穿^[6]; 第3类由机械开关载流, 固态开关实现关断, 即混合式直流断路器。由于其快速开断和低损耗特性, 混合式直流断路器成为高压直流断路器的主要发展方向之一。

国内外学者围绕混合式直流断路器开展了广泛研究^[7-9]。目前, 混合式断路器的换流方式主要包

基金项目: 国家自然科学基金项目(51922062); 国家自然科学基金(重点项目)(51837006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51922062); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Key Program) (51837006)。

括强迫换流和自然换流^[10-11]。文献[12]提出基于弧压提升真空开关自然换流的混合式直流断路器，通过真空电弧电压驱动电流转移，研制了15kA/10kV样机，但需要额外的励磁线圈，控制比较复杂；北卡罗莱纳州立大学的研究人员提出一种基于负载转移开关强迫换流的10kV混合式直流断路器方案，并实现了10kA电流开断^[13]。类似的拓扑在高压直流断路器中也被采用，如ABB公司的320kV/15kA辅助开关直流断路器，然而辅助换流开关存在导通损耗大的缺陷。由此，清华大学张翔宇等提出基于耦合负压强迫换流的直流断路器，并应用于张北±500kV直流电网中^[14]，耦合负压拓扑导通损耗近于0，但仍存在体积大、成本高的缺点。

考虑到气体开关形成的气体电弧弧压较高^[15]，可在电流转移阶段快速驱动自然换流，真空开关形成的真空断口介质恢复较快^[16]，可承受电力电子开关关断时的暂态过电压，因此，本文提出一种基于真空与气体串联开关的复合开关自然换流型混合式直流断路器，研究气体机械开关的弧压特性与影响因素，在此基础上，研制新型断路器的原理样机，并进行换流特性测试和开断测试。

1 拓扑结构和工作原理

基于真空与气体机械开关串联的复合开关自然换流型混合式直流断路器的拓扑结构如图1所示，主要包括主通流支路、转移支路和能量吸收支路。其中，主通流支路由真空快速机械开关和气体快速机械开关串联组成；转移支路由双向固态开关组成，其器件采用全控电力电子器件，双向拓扑结构可采用反串联结构、全桥结构和二极管桥结构；能量吸收支路由金属氧化物压敏电阻(metal-oxide varistor, MOV)组成。

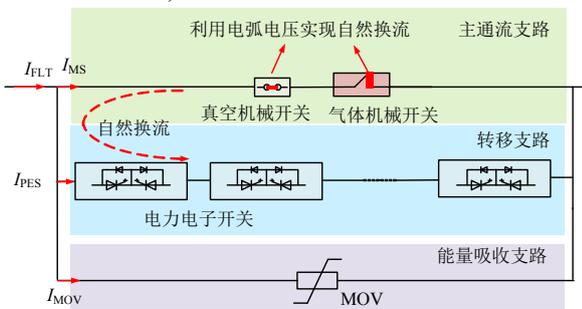


图1 复合开关自然换流直流断路器拓扑结构
Fig. 1 Topology of DC breaker based on series gas and vacuum switch

复合开关自然换流型断路器的动作时序如图2所示。

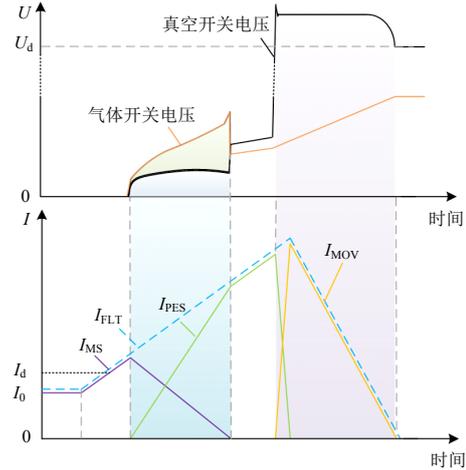


图2 复合开关自然换流型断路器动作时序
Fig. 2 Time sequence of DC breaker based on series gas and vacuum switch

复合开关自然换流型断路器的工作原理为，当直流系统发生故障后，电流达到控保系统动作阈值 I_d 后，首先分闸快速机械开关，同时导通转移支路中双向固态开关模块，电弧电压驱动故障电流 I_{FLT} (图2中蓝色虚线) 从主通流支路转移至转移支路，并使得转移支路固态开关电流 I_{PES} 上升。当快速机械开关电流 I_{MS} 过零后，触头熄弧，经过一定的介质恢复时间后，关断转移支路中双向固态开关，从而产生很高的暂态恢复电压(transient recover voltage, TRV)，由于真空开关介质恢复较快，这部分 TRV 主要由真空开关承担，随后故障电流转移至能量吸收支路。直流断路器端间电压被能量吸收支路限制，同时故障电流逐渐下降至0。

若忽略系统电流的上升，定义从主通流支路到转移支路的换流电流 $I_{com} = I_{MS} - I_{PES}$ ，则换流过程可描述为

$$U_{arc} - U_{SS} = L_{loop} \frac{dI_{com}}{dt} \quad (1)$$

式中： U_{arc} 为气体开关和真空开关的总弧压； L_{loop} 为换流回路的杂散电感； U_{SS} 为固态开关导通压降。

由式(1)可见，弧压、固态开关压降和杂散电感是影响换流快慢的主要因素。

复合开关混合式直流断路器的参数设计需要综合考虑成本、开断可靠性、整体尺寸等多方面因素。其中，气体机械开关作为机械支路中主要的电流转移单元，其电弧特性决定了复合开关混合式直流断路器的开断时间和开断能力；真空快速机械开关作为主要承受暂态电压的单元，其介质恢复特性决定了断路器开断的可靠性。机械开关支路参数、换流支路参数与耗能支路参数间的相互配合，关系

到直流断路器的开断能力和整体成本。

关于真空快速机械开关的弧压特性和介质恢复特性已有大量的研究成果^[17]。而基于平板触头和电磁斥力操动机构的气体快速机械开关,其弧压特性的相关研究较少,故本文将聚焦于气体快速机械开关的弧压特性和断路器整机的换流及开断特性研究。

2 气体快速机械开关弧压特性研究

2.1 弧压特性研究方法

复合开关自然换流型混合式直流断路器能否快速并可靠地转移、开断故障电流很大程度上取决于真空和气体快速机械开关的弧压、固态开关的导通压降和换流的杂散阻感。其中,真空开关的弧压主要取决于触头材料,大小约为 20~30V^[18]。本节通过试验气体机械开关分闸速度、起弧电流、气体类型和灭弧室气压等参数对气体开关弧压特性的影响进行研究,进而为转移支路的参数设计、气体机械开关的方案配置提供可行性依据,为复合开关自然换流型直流断路器的整体设计提供参考。

试验回路如图 3 所示。试验原理为通过充电机给放电电容预充一定电压,导通触发晶闸管后电容向电感放电,电流开始上升,一定时间后向机械开关发送“断路器分闸”命令,用示波器测量记录下灭弧室动静触头间电压,即弧压与试验回路总电流的波形。

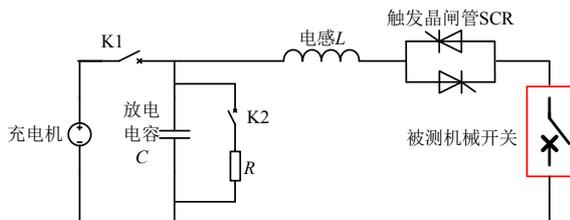


图 3 气体快速机械开关弧压特性试验回路

Fig. 3 Test circuit of arc voltage characteristic of gas fast mechanical switch

由于实际需求中,自然换流型混合式直流断路器的换流时间通常不超过 1.5ms,因此本文重点研究燃弧 0~1.5ms 的弧压特性。在不同的试验内容下,仅改变要研究的变量,并固定其他变量,具体试验条件如表 1 所示。

2.2 机械开关各参数对弧压特性影响

2.2.1 分闸速度对弧压特性的影响

根据直流故障对断路器快速响应的要求,快速机械开关采用动作最快的电磁斥力操动机构,其原理为电容向电感线圈放电,在斥力盘中感应出电

表 1 不同试验内容下的试验条件

试验内容	分闸电容	起弧	气体	灭弧室	外部
	电压/V	电流/kA	类型	气压/MPa	磁场/mT
改变 U_{sc}	600~750	0.34	SF ₆	1.5	0
改变燃弧电流	750	0.4~12	SF ₆	1.5	0
改变磁场和气体类型	700	~8	多种气体	1.6	~49
改变气体压强	700	8	He	1.2~4.2	~49

流,并产生电磁力驱动触头运动,刚分时间可在 1ms 以内,分闸速度可达 3mm/ms。根据电磁力的安培定律得知,分闸速度与操动机构的分闸电容电压 U_{sc} 正相关,刚分时间与 U_{sc} 负相关。

改变分闸电容电压 U_{sc} 的弧压测试中,通过固定放电电容电压和机械开关分闸指令时刻,固定燃弧起始时刻电流,约为 340A。机械开关收到分闸指令后,对应不同的分闸电容电压,有不同的分闸速度。分别设置分闸电容电压为 600、650、700、750V 这 4 种情况,测量气体电弧在燃弧 0~1.5ms 的平均弧压 $U_{1.5ms}$,如图 4 所示。由于分闸电容电压过高会导致机械寿命变短,因此没有进行更高分闸电容电压的试验。另外,在每个分闸电容电压下进行了 3 次重复试验。

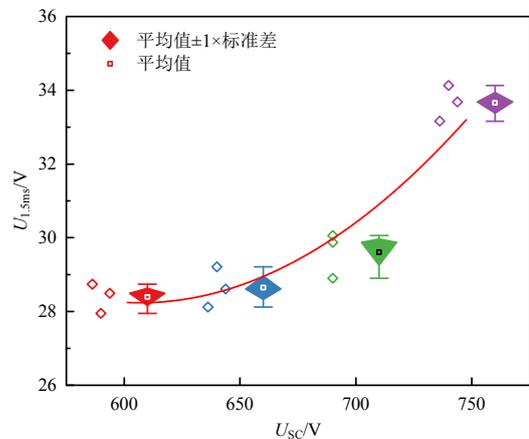


图 4 燃弧 0~1.5ms 平均弧压与分闸电容电压关系

Fig. 4 Relationship between 0~1.5ms average arc voltage and the voltage of separating capacitor

由图 4 可见,气体电弧 0~1.5ms 的平均弧压与分闸电容电压呈正相关关系,且斜率的导数大于 0。具体分析如下。

平板触头快速机械开关的电弧长度近似等于开距,根据文献^[19]研究,气体电弧在某一阶段的平均弧柱压降 U_{col} 与电弧长度 L_{arc} (约等于开距)近似呈正比关系,在初始开距为 0 的情况下,与加速度也成正比。

$$U_{\text{col}} \propto L_{\text{arc}} = \int (\int a_c dt) dt \propto a_c \quad (2)$$

同时, 安培力 F_{amp} 减去一定的触头保持力 F_{hold} 即为斥力盘所受作用力, 触头的初始加速度 a_c 与其成正比, 即:

$$a_c \propto F_{\text{amp}} - F_{\text{hold}} \quad (3)$$

由于采用电磁斥力操动机构, 其分闸速度和分闸电容电压有关, 文献[20]研究表明, 斥力盘受到的安培力和分闸线圈电流 I_{coil} 的平方成正比, 而分闸线圈电流又和 U_{SC} 成正比, 故有:

$$F_{\text{amp}} \propto I_{\text{coil}}^2 \propto U_{\text{SC}}^2 \quad (4)$$

而气体电弧在某一时段的平均弧压 U_{arc} 等于弧柱压降 U_{col} 与弧根压降 U_{root} 之和, 后者基本保持不变, 即:

$$U_{\text{arc}} = U_{\text{col}} + U_{\text{root}} \quad (5)$$

综上可知, 弧压 U_{arc} 与分闸电容电压近似成二次关系, 由于保持力和弧根压降的存在, 二次曲线顶点不过零, 符合图4显示的特征。由图4可知, 提高分闸电压对提高弧压有显著效果, 因此可通过特制更大行程的灭弧室和更坚固的拉杆, 保证快速分闸下拉杆和缓冲系统的可靠性, 从而进一步提高分闸电压的上限。

2.2.2 燃弧电流对气体电弧弧压特性的影响

由于直流断路器需要开断从负载电流到额定短路电流不同等级的电流, 有必要研究不同燃弧电流下的气体弧压特性。

改变起弧电流的弧压测试中, 通过改变放电电容电压, 并固定机械开关分闸指令时刻, 改变起弧时刻电流, 范围从0.4~12kA, 其余条件参见表1, 并进行适当的重复试验以测试分散性。由于测试回路放电周期为30ms, 且控制在电流接近峰值处起弧, 故在燃弧0~1.5ms, 电弧电流的变动在10%以内, 可近似认为电流恒定。

测量气体电弧在燃弧0~1.5ms的平均弧压 $U_{1.5\text{ms}}$, 并绘出其与起弧电流的关系如图5所示。

由图5可见, 起弧电流小于2kA时, 0~1.5ms平均弧压与起弧电流正相关, 且变化率很大; 起弧电流为2~12kA时, 0~1.5ms时间段内平均弧压与起弧电流没有明显关系。由文献[21]可知, 随着电流的增大, 电弧弧柱电压梯度将增大, 这就导致弧压增大, 其饱和趋势也与文献[21]中的实验结果相似。

根据式(1)可知, 对于复合断口直流断路器, 要

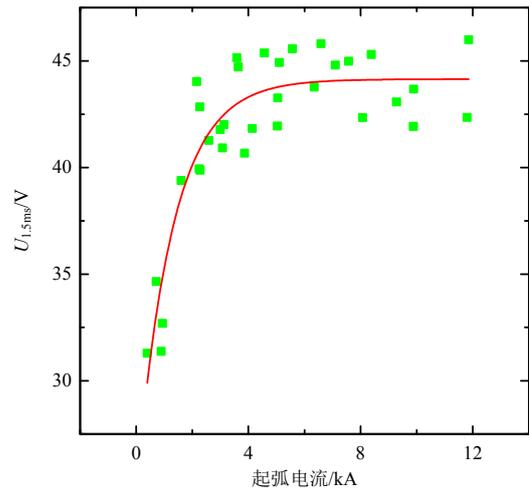


图5 燃弧0~1.5ms平均弧压与起弧电流关系

Fig. 5 Relationship between 0~1.5ms average arc voltage and the arcing current

换流的电流越大, 所需的弧压越高, 因此该特性对于换流是有帮助的。

2.2.3 气体类型和磁场对电弧弧压特性的影响

复合开关直流断路器的原理决定了其对气体开关的介质恢复能力没有要求, 故气体介质不局限于绝缘性能较好的 SF_6 , 为了寻求弧压更高的气体介质, 可对常见的 SF_6 替代气体进行弧压特性的测试。

此外, 采用磁吹提高气体电弧弧压是直流接触器中常用的灭弧方式^[15]。在外界磁场 (external magnetic field, EMF) 的作用下, 电弧将会弯曲拉长, 使得弧压有所提高。因此, 将N52型钕铁硼永磁体安装于气体灭弧室外侧, 仿真结果表明, 灭弧室中心的磁感应强度约为49mT。

在有EMF和无EMF的条件下, 对不同气体进行了弧压特性测试, 结果如图6所示。

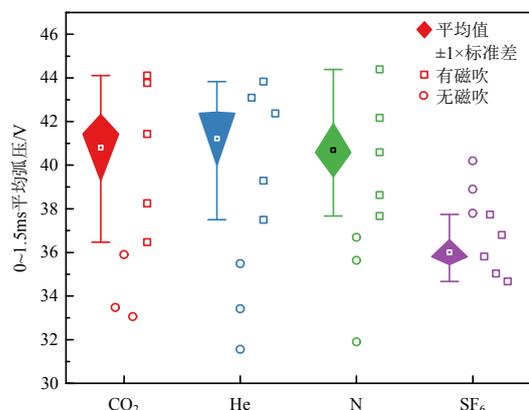


图6 不同气体和EMF下的燃弧0~1.5ms弧压均值特性

Fig. 6 Average arc voltage characteristics in 0~1.5ms under different kinds of gas and EMF

由图6可见, 由于不同气体具备不同的化学性质, 其基础弧压(定义为无EMF的弧压)和磁吹弧压

均有较大差异。

首先, 在基础弧压的比较中, SF_6 最高, CO_2 略大于 N_2 , N_2 大于 He 。这是因为在电弧等离子体的高温下分子将会大量分解成原子, 所以气体弧压主要受原子电负性影响^[19], 而电负性排序为 $\text{F} > \text{O} > \text{N} > \text{He}$, 所以产生了上述差异。其次, 在 EMF 的作用下, CO_2 、 He 和 N_2 在燃弧 0~1.5ms 平均弧压提高了 5~10V, 但 SF_6 弧压反而有所下降。

最后, 关于 EMF 对 SF_6 替代气体的弧压增益比较, 可以看到 He 大于 CO_2 , CO_2 和 N_2 比较接近, 这主要是因为电弧弯曲拉长程度取决于导电粒子的洛伦兹加速度, 也就是取决于导电粒子的荷质比。

2.2.4 气体压强对磁吹气体电弧弧压特性的影响

当气体的压强不同时, 弧压也会有所区别, 已有文献研究主要集中于没有 EMF 下的气压和弧压的关系, 并且在小电流下, 得到了气压越大, 弧压越高的结论^[22]。鉴于 EMF 可以显著提升弧压, 有必要研究 EMF 作用下气压和弧压的关系, 由于 He 在磁场作用下弧压提升量较高, 本节测试主要通过改变灭弧室气压, 对 He 气体进行了弧压试验, 其余条件参见表 1。

试验的测量内容仍然是气体电弧在燃弧 0~1.5ms 的平均弧压 $U_{1.5\text{ms}}$, 并绘出其与灭弧室气压关系。图 7 为 He 的弧压-气压特性。

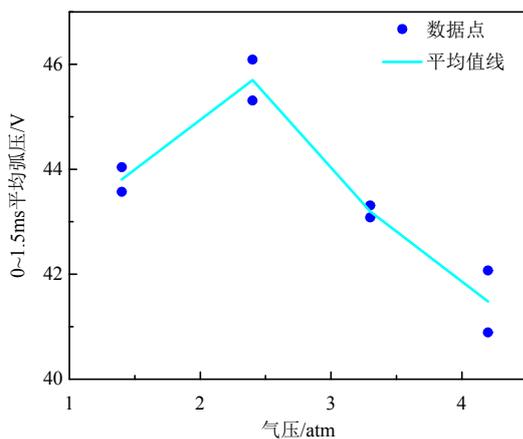


图 7 He 的弧压与气压相关特性

Fig. 7 Arc voltage-pressure characteristics of He

对于 He , 在 EMF 作用下燃弧 0~1.5ms, 平均弧压随气压出现了先增大、后减小的现象, 最大值点大约在 0.2~0.25MPa 之间。这个现象不是很直观, 但可以根据文献^[23]的经验得出以下公式:

$$V_{\text{arc}} = 4 \cdot 6B^{0.6} I^{0.4} d^{-0.4} \rho^{-0.5} \quad (6)$$

式中: V_{arc} 为电弧横向运动的速度; ρ 为灭弧室内气体相对于大气的密度。

由式(6)可见, 横向磁场作用下, 气体电弧运动速度与气体密度呈负相关关系。一种可能的解释是: 压力的增加导致电弧的弯曲变少, 从而导致电弧电压下降, 更精确的解释需要观测实际的电弧运动。因此, 若气体灭弧介质采用 He 且外加 EMF, 建议充气气压为 0.2~0.25MPa, 并综合考虑灭弧室器壁在长时间燃弧后的压强承受能力。

3 断路器样机研制

基于复合开关的自然换流型混合式直流断路器拓扑结构, 研制了一台 10kV 直流断路器原理样机, 其额定开断电流 10~15kA, 额定开断时间小于 3ms, 主要包括复合机械开关、转移支路和能量耗散 MOV。

3.1 复合机械开关设计

在工程应用中, 通常要求断路器尽可能紧凑化, 本节通过真空开关和气体开关共用同一套操动机构, 形成复合机械开关, 可以进一步降低成本和体积, 其结构如图 8 所示。整个复合机械开关的进线端和出线端分别位于真空开关的上端子和气体开关的下端子, 真空开关的下端子通过软铜排与下方的气体开关上端子相连, 由此实现 2 个开关的串联。由于均为金属连接, 复合机械开关具备双向流和换流能力。考虑到实际工程中, 气体开关存在开断失败而持续燃弧的风险, 此时需要对气体开关进行可靠合闸操作, 使其内部气压不至于过高, 导致灭弧室器壁破裂。然而, 如果分合闸机构均采用电磁斥力操动机构, 则开关分闸时需要合闸电容放电以进行缓冲, 合闸电容需要重新充能, 导致短时

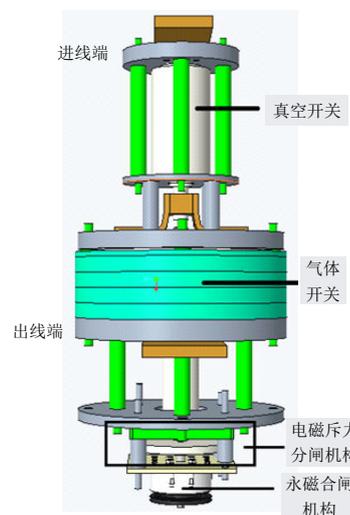


图 8 复合机械开关结构

Fig. 8 Structure of hybrid mechanical switch

间内无法进行合闸。因此，复合机械开关采用电磁斥力操动机构分闸，双弹簧单稳态永磁操动机构进行合闸。另外，永磁机构也可以提供保持力，也就是在开关合闸位置，机构的永久磁铁利用动、静铁心提供的低磁阻抗通道将动铁心保持在合闸位置。

另外，为了防止开关运动过程中灭弧室漏气，灭弧室与运动导杆接触位置采用了密封圈。

3.2 转移支路设计

考虑到注入增强栅极晶体管(injection enhanced gate transistor, IEGT)具备较强的单次关断能力，额定电流 3kA 的器件可单次关断 15kA，转移支路电力电子器件采用 IEGT。其拓扑和开断正反向电流的路径如图 9 所示，由 IEGT 及其缓冲吸收回路组成的二极管桥电力电子模块串联而成，由 IEGT 及二极管级联而成的二极管桥两端并联 RC 电路，关断过程中，当 IEGT 关断后，模块端间电压达到一定值后，MOV 保护导通，抑制端间电压，避免 IEGT 过电压失效。

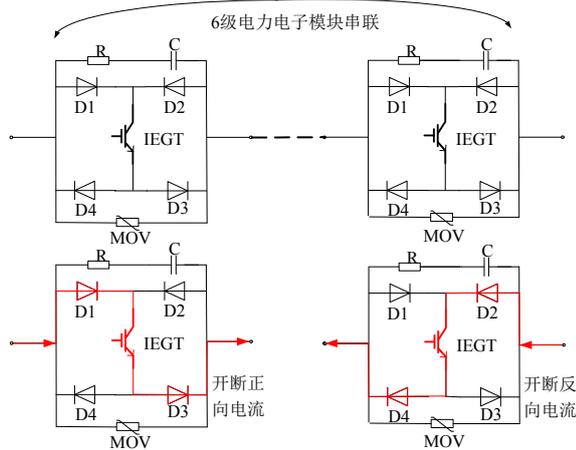


图9 转移支路电力电子模块拓扑

Fig. 9 Topology of power electronics module in commutation path

模块串联数主要基于以下几个因素确定：

- 1) 避雷器保护水平和内部杂散电感引起的过电压共同决定；
- 2) 各种工况下转移支路端间电压应力大小；
- 3) 半导体器件安全系数大于 1.2，并加入冗余级。

综上所述，转移支路串联电力电子模块数取 6 级，包括冗余 1 级。在 15kA 分断及端间直流耐压等工况下，最大电压应力为 3.43kV，半导体器件安全系数 1.3。另外，阀串实测初始导通压降为 22V，10kA 通流下导通压降约 74V，15kA 通流下导通压降 105V。

能量吸收支路主要由 MOV 并联而成，其额定电压 11kV，额定残压为 17kV。容量可根据应用需求决定。

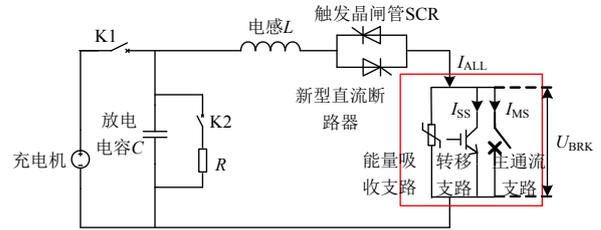
4 断路器整机测试

4.1 整机测试试验条件

搭建了试验平台以测试新型直流断路器。如图 10 所示，采用振荡电流源模拟系统故障电流，测试电路中电容为 6.8mF，电感设置为 360μH。系统电流、主通流支路电流和转移支路电流由 Rogowski 线圈测量，换流试验中各开关弧压由低压探头测量，开断试验中断口过电压由高压探头测量。



(a) 试验现场图(左为 LC 回路，右为断路器样机)



(b) 试验电路图

图 10 断路器整机测试试验平台

Fig. 10 DC breaker test platform

为了验证上文中磁吹提升气体电弧弧压的结论，在加入并联的转移支路和自然换流过程后，进行了换流特性测试，测量不同电流和磁场下的换流时间(定义为机械开关刚分到主通流支路电流过零的时间)。气体机械开关分闸电压为 700V，灭弧室充 0.2MPa 的 N₂，定义总换流电流为换流完成时转移支路的电流。在有磁场作用和无磁场作用下分别测量换流时间与总换流电流关系，结果如图 11 所示。

由图 11 可知，换流时间随着总换流电流的增大而增大，式(1)可知，在弧压、转移支路导通压降和回路电感变化不大的情况下，换流电流的上升率基本一定，因此换流时间会随总换流电流的增大而增大。而有外部磁场作用下换流时间显著缩短，这和上文施加外部磁场可显著提高弧压的结论相符。

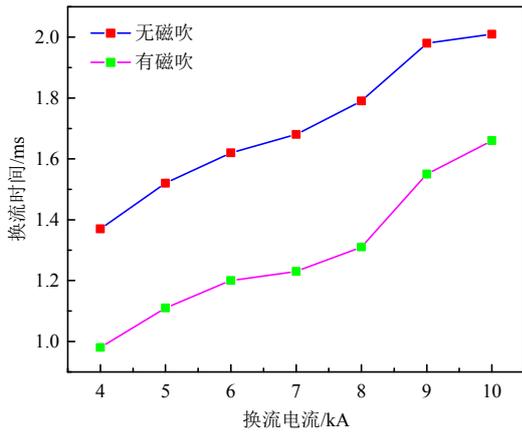


图 11 换流时间与总换流电流关系

Fig. 11 Relationship between commutation time and commutation current

4.2 整机开断试验结果

最后，为了验证复合开关自然换流断路器耐受转移支路关断过电压的可靠性，进行断路器整机开断试验。开断测试的试验回路仍为图 10 所示。

试验波形如图 12 所示，触发回路电流 I_{ALL} 在 $t_1=5.8\text{ ms}$ 时上升，在 $t_2=6.1\text{ms}$ 时下发机械开关分闸和转移支路导通指令，根据 3ms 的动作时间需求，转移支路应在 $t_4=9.1\text{ms}$ 时开断。

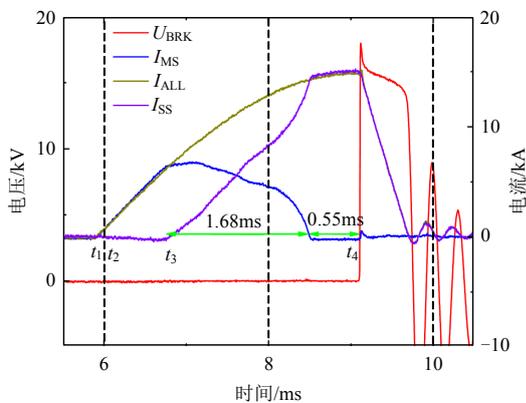


图 12 15kA 开断测试波形

Fig. 12 15kA DC breaking test waveform

机械开关在 $t_3=6.8\text{ms}$ 时刻刚分起弧，主通流支路电流 I_{MS} 开始向转移支路换流，转移支路电流 I_{SS} 上升。由于起始时刻气体弧压较低，开始时换流速度相对较慢。约 $300\mu\text{s}$ 后，随着气体弧压的升高，导致电流换流速度加快；约 1.3ms 后，随着开距的进一步增大，EMF 对气体弧压的增强作用更为显著，且电流下降后，气体电弧的负伏安特性显现，气体弧压快速提高，促使电流快速向转移支路转移，电流换流过程总时间约 1.68ms。主通流支路电流过零熄弧后，经过约 0.55ms 的介质恢复时间，转移支路 IEGT 关断 15kA 电流，真空和气体串联开关

成功耐受 17.8kV 暂态过电压。试验验证了复合开关直流断路器自然换流和耐受开断过电压的可靠性。若电流进一步增大至数十千安，换流时间会变长，开断时间将会超过 3ms，甚至可能换流失败，但若采用多个气体机械开关串联以提升弧压，根据式(1)可知，换流能力将增强，理论上只要串联的开关数量足够，则仍能满足快速换流开断的需求。

5 对比分析

自然换流型直流断路器相比于强迫换流型直流断路器的最大优势在于，其具备更好的经济性和更小的体积。本文以额定电压 10kV、额定开断电流 15kA 的应用场景为例，对比两种近零损耗直流断路器的成本和体积，即耦合负压型直流断路器和自然换流型直流断路器的成本和体积。

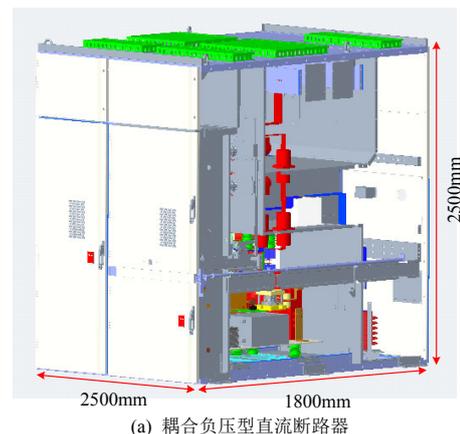
经过市场调研，得到两种断路器成本对比如表 2 所示，其中共同部分的成本省略。

表 2 断路器成本对比

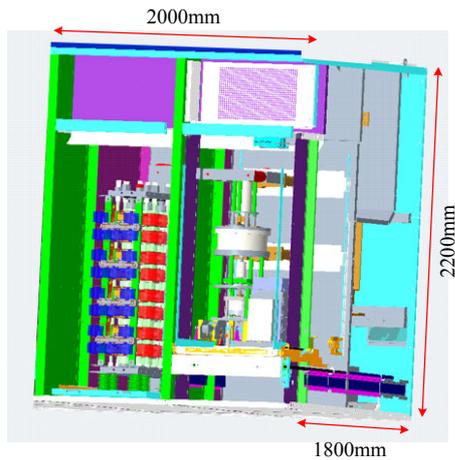
组件	耦合负压断路器	自然换流断路器
耦合电抗器	50000	0
电容与充电机	21000	0
放电晶闸管	35000	0
机械开关	15000	30000
总成本	121000	30000

另外，还对两种断路器进行了结构设计或市场调研，得到耦合负压型直流断路器的开关柜尺寸为 2500mm(宽)×1800mm(深)×2500mm(高)；自然换流型直流断路器的开关柜尺寸为 2000mm(宽)×1800mm(深)×2200mm(高)。

综上，所提基于复合机械开关的自然换流断路器方案相比于耦合负压方案，可降低体积约 30%，降低成本 8 万元以上，具备优越的应用前景。两者的结构设计示意图如图 13 所示。



(a) 耦合负压型直流断路器



(b) 自然换流型直流断路器

图13 直流断路器结构示意图

Fig. 13 Schematic diagram of DC circuit breaker structure

6 结论

本文提出一种基于真空与气体串联开关的复合开关自然换流型混合式直流断路器。首先开展气体快速机械开关的分闸电容电压、起弧电流、气体类型、外加磁场与气体压强对气体弧压特性的影响研究,得到适用于复合开关断路器的气体快速机械开关弧压特性和设计方法。

1) 提高分闸电压对提高弧压有显著效果,可通过特制更大行程的灭弧室和更坚固的拉杆,以提高分闸速度上限;

2) 起弧电流越大,燃弧 0~1.5ms 平均弧压将更高,有利于大电流下的自然换流;

3) 外加 EMF 的情况下,对于 SF₆ 替代气体 He、CO₂、N₂,弧压将显著提高。采用 He 作为复合开关直流断路器中气体开关的介质,并外加 EMF 是较好的方案。如果能保证灭弧室的气密性,H₂也是推荐采用的介质。

4) 若气体灭弧介质采用 He 且外加 EMF,建议灭弧室气压为 0.2~0.25MPa,并综合考虑灭弧室器壁在长时间燃弧后的压强耐受能力。

为了验证复合开关自然换流型混合式直流断路器拓扑结构的可行性和气体快速机械开关选型设计方法的有效性,研制一台基于复合开关的混合式直流断路器原理样机,完成开断电流为 15kA 的测试,换流时间约 1.7ms,开断时间 3ms,验证了新型复合开关混合式直流断路器应用于中压直流系统的可行性,为实现工程应用奠定了技术基础。对于高压大开断电流场合,由于理论上每增加一个

复合机械开关,弧压就能提升一倍,从而换流能力增加一倍。因此,可以通过增加复合机械开关的串联数和转移支路的器件串并联数以进一步提高断路器的电压和开断电流等级,若能解决分闸同步性和换流回路杂散电感优化等技术挑战,所提断路器也具备应用于高压大开断电流场合的潜力。

参考文献

- [1] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6790-6801.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6790-6801(in Chinese).
- [2] 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(in Chinese).
- [3] MIAO Zhenyu, SABUI G, ROSHANDEH A M, et al. Design and analysis of DC solid-state circuit breakers using SiC JFETs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3): 863-873.
- [4] ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, CHEN Zhengyu, et al. Optimal design of diode-bridge bidirectional solid-state switch using standard recovery diodes for 500-kV high-voltage DC breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(2): 1165-1170.
- [5] 温伟杰,黄瑜珑,吕纲,等. 应用于混合式直流断路器的电流转移方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 4005-4012.
WEN Weijie, HUANG Yulong, LÜ Gang, et al. Current commutation method in hybrid DC circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 4005-4012(in Chinese).
- [6] 许军,逯江华,张慧媛,等. 一种改进型电容换流式直流断路器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7816-7823.
XU Jun, LU Jianghua, ZHANG Huiyuan, et al. An improved capacitor commutated DC circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7816-7823(in Chinese).
- [7] SHI Z Q, ZHANG Y K, JIA S L, et al. Design and numerical investigation of A HVDC vacuum switch based on artificial current zero[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1):

- 135-141.
- [8] CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, ZHANG Xiangyu, 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.
- [9] YU Zhanqing, YAN Xin, ZHANG Xiangyu, et al. The design and development of a novel 10 kV/60 kA hybrid DC circuit breaker based on mixed solid-state switches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2440-2449.
- [10] SHUKLA A, DEMETRIADES G D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 627-641.
- [11] 魏晓光, 周万迪, 张升, 等. 模块化混合式高压直流断路器研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 2038-2046.
WEI Xiaoguang, ZHOU Wandi, ZHANG Sheng, et al. Research and application of modular hybrid high voltage DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2038-2046(in Chinese).
- [12] WU Yifei, XIAO Yu, WU Yi, et al. Hybrid MVDC circuit breaker based on enhanced arc voltage of vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4776-4785.
- [13] NOVELLO L, BALDO E, FERRO A. Development and testing of a 10-kA hybrid mechanical-static DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(6): 3621-3627.
- [14] 张翔宇, 余占清, 黄瑜珑, 等. 500 kV 耦合负压换流型混合式直流断路器原理与研制[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 413-422.
ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, HUANG Yulong, et al. Principle and development of 500 kV hybrid DC circuit breaker based on coupled negative voltage commutation [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 413-422(in Chinese).
- [15] 纽春萍, 熊乾村, 徐丹, 等. 大功率直流接触器在不同介质中开断电弧特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3481-3486.
NIU Chunping, XIONG Qiancun, XU Dan, et al. Experimental study on arc breaking characteristics of high-power DC contactor in different gases[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3481-3486(in Chinese).
- [16] 程显, 杨培远, 葛国伟, 等. 基于真空与 SF₆ 气体串联间隙的新型高压直流断路器介质恢复特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2393-2402.
CHENG Xian, YANG Peiyuan, GE Guowei, et al. Dielectric recovery characteristics of serial vacuum and SF₆ gaps in Novel HVDC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2393-2402(in Chinese).
- [17] XIAO Yu, WU Yi, WU Yifei, et al. Study on the dielectric recovery strength of vacuum interrupter in MVDC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 7158-7166.
- [18] 吕纲, 曾嵘, 黄瑜珑, 等. 10kV 自然换流型混合式直流断路器中真空电弧电流转移特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1012-1020.
LÜ Gang, ZENG Rong, HUANG Yulong, et al. Researches on commutating characteristics of mechanical vacuum switch in 10kV natural-commutate hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1012-1020(in Chinese).
- [19] GHEZZI L, BALESTRERO A. Modeling and simulation of low voltage arcs[J]. Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, 2010.
- [20] 温伟杰. 直流断路器中快速开关及其电流转移介质恢复特性[D]. 北京: 清华大学, 2017.
WEN Weijie. Research on current commutation and dielectric recovery characteristics of the ultra-fast mechanical switch in DC circuit breaker[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017(in Chinese).
- [21] GUILLE A E, ADAMS V W, LORD W T, et al. High-current arcs in transverse magnetic fields in air at atmospheric pressure[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1969, 116(4): 645-652.
- [22] 韩璐瑶, 樊诗诗, 管臣, 等. CO₂ 直流电弧特性的试验研究[J]. 电器与能效管理技术, 2019(11): 20-23.
HAN Luyao, FAN Shishi, GUAN Chen, et al. Experimental research on CO₂ DC arc characteristics [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(11): 20-23(in Chinese).
- [23] GUILLE A E, NAYLOR K A. Further correlation of experimental data for electric arcs in transverse magnetic fields[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1968, 115(9): 1349-1354.



甘之正

在线出版日期: 2022-12-15.

收稿日期: 2022-08-24.

作者简介:

甘之正(1998), 男, 博士研究生, 主要研究机械开关、直流断路器、直流限流器和柔性直流系统等领域, ganzz20@mails.tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 余占清(1981), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究直流断路器、直流电网技术、电力系统电磁暂态、新型传感等领域, yzq@tsinghua.edu.cn.

(编辑 李婧妍, 李新洁)