

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.006

特高压电容器组专用断路器开断特性及试验研究

隋玉秋, 李学斌, 赵义松, 王飞鸣, 程 远, 韩洪刚

(国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006)

摘要: 特高压电容器组专用断路器不但要满足短路大电流的开断要求,而且要保证额定小电流开断后不发生重击穿。文中比较分析不同灭弧室结构的绝缘性能和冷态介质恢复特性,确定最佳的灭弧室结构。计算额定1.6 kA小电流短燃弧和短路40 kA大电流开断特性,搭建试验回路,测量不同开距下的击穿电压值。结果表明:灭弧室内引弧环结构增大弧触头间的电场值,降低冷态开断介质恢复速度和击穿裕度;屏蔽罩结构对大开口打开后的弧触头间电场分布具有屏蔽作用;小电流电弧燃弧时间越短,击穿裕度值越小,尽量避免燃弧时间小于0.5 ms,保证弧后具有较大的击穿裕度。预测开断短路电流的最短燃弧时间为15 ms,断路器对开断短路长燃弧的稳定性较高,介质恢复速度较快。文中计算结果与试验结果基本吻合,由于试验击穿点存在分散性,在刚分时刻后0.5 ms内存在重击穿的可能,分闸过程应避免在此时间范围内熄弧,保证燃弧时间大于0.5 ms。

关键词: 特高压; SF₆; 断路器; 开断特性; 介质恢复特性; 动态击穿试验

Research on Breaking Characteristics of Dedicated Circuit Breaker for UHV Capacitor Bank

SUI Yuqiu, LI Xuebin, ZHAO Yisong, WANG Feiming, CHENG Yuan, HAN Honggang

(Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: Dedicated circuit breaker for UHV capacitor bank must meet the breaking requirement for large short-circuit current, and ensure absence of breakdown after breaking small current. In this study, the cold dielectric recovery and insulation characteristics of different arc interrupter structures were analyzed and compared to determine the best interrupter structure. The breaking characteristics for rated 1.6 kA small short-circuit current and 40 kA large current were calculated. Test circuit was built to measure the values of breakdown voltage under different open distances. The results showed that: 1)The arc ring structure enhanced the electric field of the arc contacts, resulting in the decrease in recovery speed of breaking dielectric and breakdown margin; 2)The shield structure shielded the electric field distribution between arc contacts; and 3)The shorter the small current arcing time, the smaller the breakdown margin, so it is necessary to keep the arcing time longer than 0.5 ms to ensure a large breakdown margin. The predicted minimum arcing time for breaking short-circuit current was 15 ms. Calculated results agreed with the experimental data. Since the breakdown points in the test are dispersive, breakdown may occur within 0.5 ms after breaking, so arc extinguishment should avoid this time range.

Key words: UHV; SF₆; high voltage circuit breaker; breaking characteristics; dielectric recovery characteristic; dynamic breakdown test

0 引言

特高压工程建设迅速发展,带来巨大的经济效益、社会效益的同时,在建设、运行中也存在自身的

技术问题。特高压电网送电功率变化大,为了控制线路的电压水平,提高传输能力,必须按不同的有功状况对线路进行无功补偿^[1-4]。目前,对系统电压控制的有效手段为采用投切主变第三绕组侧的电容器组,这将导致电容器组断路器频繁动作,日频

收稿日期:2016-05-09; 修回日期:2016-06-23

可达 3~4 次^[9],对电容器组断路器开断性能提出了新的要求,不但要具有短路大容量开断与关合性能,近区故障开断性能,也要满足高电气寿命下容性小电流开断和涌流关合性能等。

断路器开断容性小电流时,由于电弧能量小,电弧等离子体处于不断发展的非平衡态,在灭弧室内气吹的作用下极易熄灭,增大开断过程中的重燃弧几率,产生操作过电压,严重损害断路器的开断性能和相邻设备的绝缘性能,影响特高压电网的正常运行^[6-8]。为了满足特高压电网无功补偿电容器组断路器特殊工况的需求,降低关合涌流的危害和开断重燃弧几率,抑制操作过电压的产生,需要对断路器灭弧室结构进行设计,考虑断路器灭弧室结构对开断性能的影响,提出断路器满足容性小电流开断要求的灭弧室结构。

断路器的开断性能主要取决于弧后介质强度恢复过程和触头间电压恢复过程的“竞赛”,由于在熄弧后的短时间内,弧隙仍有残余弧柱存在,它将严重地影响到介质强度及其恢复速度^[9-14]。以往介质恢复特性的研究都是针对大电流开断,电弧模型都是建立在局部热力学平衡的假设下。对于小电流开断情况,一般的处理方法是将电弧作为能量源加入到灭弧室中,或者是作为空载条件简单处理。这种处理方法并不能准确地描述小电流非平衡态电弧的动态特性,就是对介质恢复特性研究也仅仅停留在简单的宏观公式计算。目前为止,对于负载容性小电流介质恢复特性的研究仍然没有形成一套完整的理论模型和数值计算方法^[15-17]。断路器开断特性数值计算模型及方法缺少试验验证,断路器设计优化研发主要是在参考数值计算和分析的基础上,更多的凭借工程和试验经验。因此有必要对断路器灭弧室结构和小电流开断特性进行数值计算,通过断路器介质恢复特性试验验证计算的准确性,指导电容器组断路器的研发设计。

文中针对厂家所提供的两套灭弧室结构方案进行绝缘性能和冷态介质恢复特性计算,通过比较分析引弧环和屏蔽罩结构对断路器开断性能的影响,确定灭弧室最佳的结构方案。计算额定 1.6 kA 小电流短燃弧和短路 40 kA 大电流开断特性,确定合理可靠的额定开断相角和短路开断最短燃弧时间。搭建 126 kV SF₆ 断路器冷态介质恢复特性试验回路,测量断路器不同开距下的击穿电压值,对比理论计算结果,验证理论研究的正确性。研究结果直接应用到特高压电容器组专用断路器的设计制造中。

1 断路器灭弧室结构设计

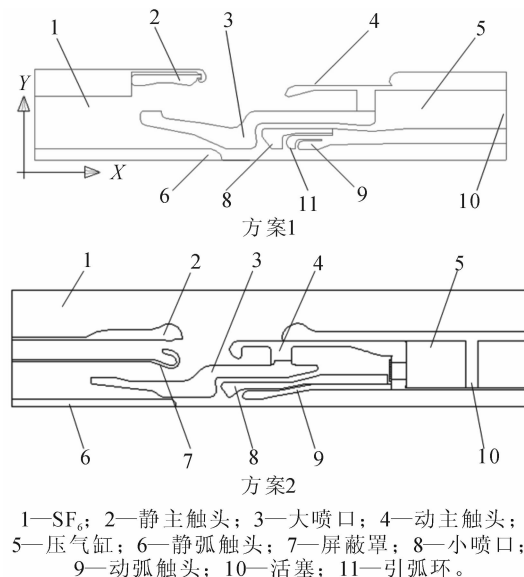
1.1 灭弧室结构

特高压电容器组专用断路器设计参数与标准(GB 1984—2003)参数的比较见表 1。特高压电容器组断路器与传统的开断参数上存在较大的差距,合理的灭弧室结构是保证断路器开断特性的关键问题。依据断路器厂家所提供的两套灭弧室设计方案,通过灭弧室绝缘特性的计算比较,确定最佳的灭弧室结构方案。断路器厂家提供的断路器灭弧室结构方案设计见图 1。

表 1 额定容性开合电流标准参数与设计要求的比较

Table 1 Comparison of rated capacity switching current standard parameters and design requirements

项目	额定电压/kV	额定开断电流/A	额定关合涌流/kA	操作次数/次
标准	126	400	20.0	标准
要求	126/145	1 600	9.3	3 000~5 000



1—SF₆; 2—静主触头; 3—大喷嘴; 4—动主触头;
5—压气缸; 6—静弧触头; 7—屏蔽罩; 8—小喷嘴;
9—动弧触头; 10—活塞; 11—引弧环。

图 1 灭弧室结构方案设计图

Fig. 1 Design diagram of arc extinguishing chamber structure

两套灭弧室设计方案都采用双动操动技术,弧触头相对平均开断、关合速度为 9.6 m/s 和 6.6 m/s;断路器 SF₆ 额定气压为 0.6 MPa(表压)。

方案 1:主要特点是动弧触头前端增加了引弧环结构,没有屏蔽罩;静弧触头半径为 9.5 mm,弧触头行程为 120 mm,开距为 90 mm,超程为 30 mm。

方案 2:动弧触头和静弧触头的相对行程为 200 mm;开距为 150 mm;超程为 50 mm;静弧触头半径为 9.5 mm;方案 2 去掉了引弧环,增加屏蔽罩结构,将大喷嘴喉部长度为 55 mm。

1.2 引弧环结构对灭弧室绝缘特性的影响

电场计算以有限元法为基础,采用轴对称建模方式,智能网格剖分方法。喷口材料聚四氟乙烯的介电常数 $\varepsilon_1=2.1$, SF_6 气体介电常数 $\varepsilon_2=1.0024$ 。动弧触头和动主触头边界的一类边界条件为 $\varphi_1=1\text{ V}$; 静主触头、静弧触头及屏蔽罩边界的一类边界条件为: $\varphi_2=0\text{ V}$ 。在方案 1 和方案 2 触头间 27 mm 开距时, 方案 1 最大电场值为静弧触头表面处的 0.2 V/mm, 大于方案 2 的 0.1 V/mm; 75 mm 开距时, 方案 1 最大电场值为静弧触头表面处的 0.048 V/mm, 大于方案 2 的 0.042 V/mm, 见图 2。

通过对比分析两种方案在相同开距下电场分布情况可以看出, 电场最大值一般都在静弧触头表面处, 方案 1 的电场最大值要大于方案 2。这主要是由于方案 1 中引弧环结构所造成的, 引弧环与动弧触头等电位, 引弧环的设置使得电极间的距离减小, 造成触头间电场值整体变大。方案 2 去掉引弧环结构, 触头间分布电场值相对于方案 1 有所下降, 证明方案 2 去掉引弧环结构对于改善电场分布、降低电场值是有利的。

1.3 屏蔽罩结构对灭弧室绝缘特性的影响

大喷口打开时方案 1 与方案 2 灭弧室电场分布见图 3, 在大喷口刚打开时, 方案 1 电场最大值在静弧触头表面为 0.048 V/mm; 方案 2 电场最大值出现在屏蔽罩表面处为 0.031 V/mm, 屏蔽罩表面电场最大值明显大于静弧触头表面电场最大值 0.024 V/mm 和动弧触头表面电场最大值 0.26 V/mm。方案 2 在前 25 mm 开距间, 动弧触头表面电场值最大; 在 25~90 mm 开距间, 由于小喷口结构对电场分布的影响, 静弧触头表面电场值出现波动, 但整体上大于动弧触头电场值; 在 90~150 mm 开距间, 电场最大值由静弧触头表面转移到屏蔽罩表面处, 这对于提高触头间介质临界击穿电压值是十分有利的, 因此增加屏蔽罩结构, 对于优化触头间电场分布、提高介质临界击穿电压是切实可行的措施, 见图 4。

1.4 冷态介质恢复特性计算分析

断路器冷态介质恢复过程气流场计算不考虑电弧的作用, 因此对描述气流动态变化的 Navier-Stokes 和 $k-\varepsilon$ 方程进行改进, 令电弧的能量源项为零, SF_6 气体流动的控制方程在文[18]中详细给出。文中对 SF_6 断路器气流场 Navier-Stokes 和 $k-\varepsilon$ 方程求解, 通过计算得不同开距下弧触头间的密度分布见图 5。文[19-20]给出了 SF_6 气体的临界击穿电压 U_b 与触头间密度 ρ 和电场强度 E 之间的关系为

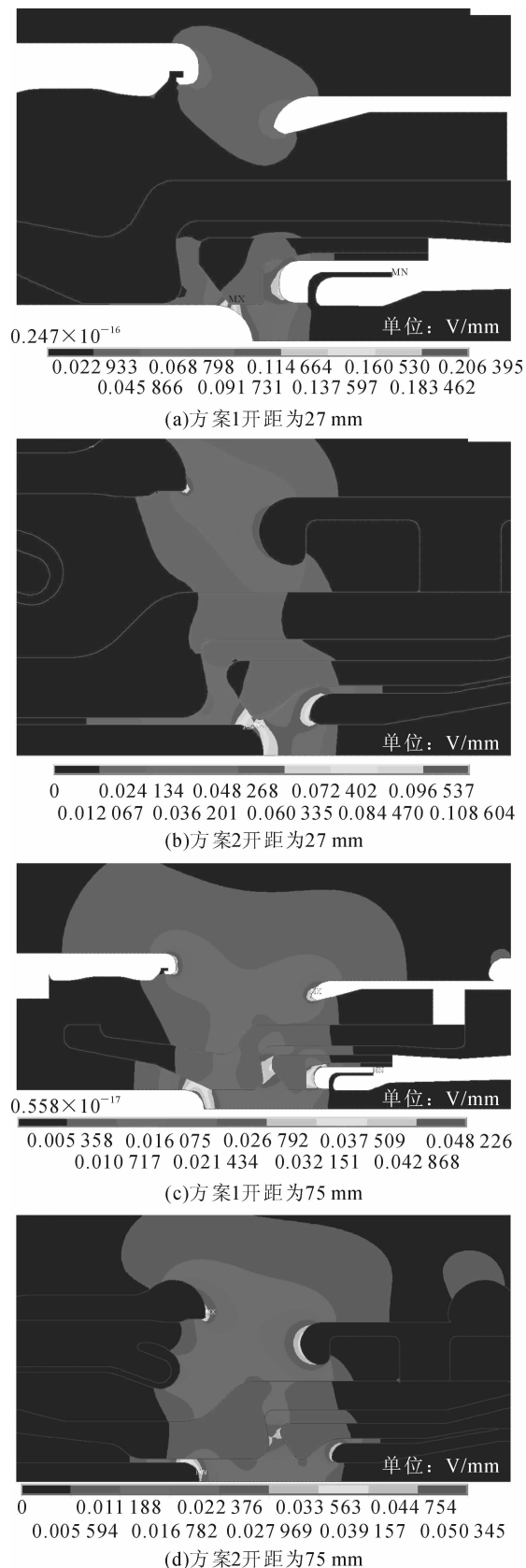


图 2 不同开距下方案 1 与方案 2 灭弧室电场分布

Fig. 2 The electric field distribution in scheme 1 and scheme 2 arc extinguishing chamber under different open distance



图3 大喷嘴打开时方案1与方案2灭弧室电场分布
Fig. 3 The electric field distribution in scheme 1 and scheme 2 arc extinguishing chamber at the time of large nozzle opening

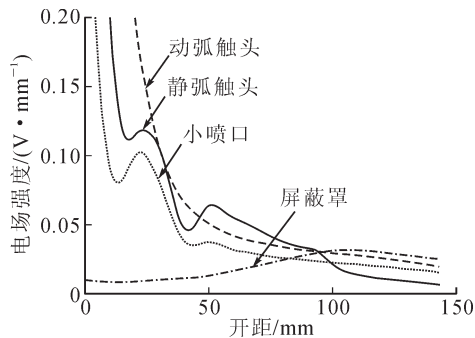


图4 方案2灭弧室内不同位置电场值随开距变化曲线
Fig. 4 The curves of electric field at different locations in scheme 2 arc extinguishing chamber changed with the distance

$$U_b = 1.167 \frac{\rho}{E} \quad (1)$$

式(1)中: U_b 单位为 kV; ρ 单位为 kg/m^3 ; E 为单位电压 1 V 下的电场强度, 单位为 V/mm。结合灭弧室电场计算结果, 计算不同灭弧室方案下的冷态开断介质恢复特性曲线见图 6。令“击穿裕度=(临界击穿电压值-TRV 值)/TRV 值”, “介质恢复速度=临界击穿电压 U_b /时间 t ”。根据国标 GB 1984—2003《高压交流断路器》可知, 126 kV 断路器 C2 级容性分闸的恢复电压在 8.7 ms 内达到峰值 281 kV, 电压恢复速度为 32.3 kV/ms。击穿裕度与介质恢复速度随开距变化曲线见图 7。

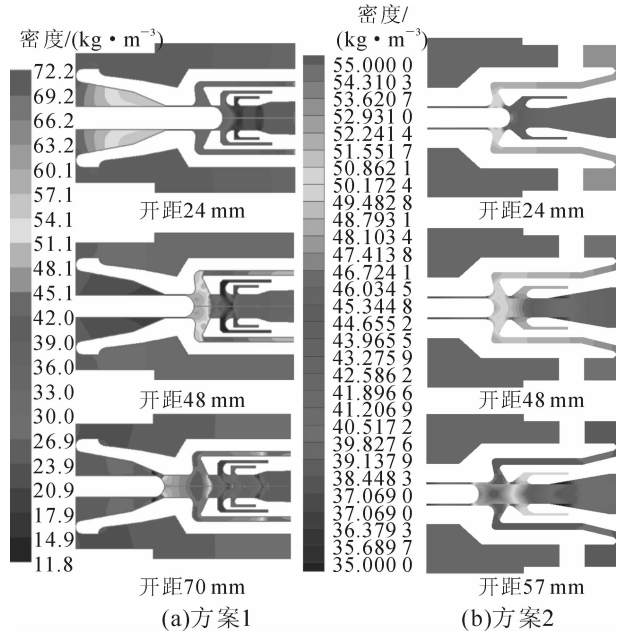


图5 方案1与方案2灭弧室内密度分布
Fig. 5 The density distribution of scheme 1 and scheme 2 arc extinguishing chamber

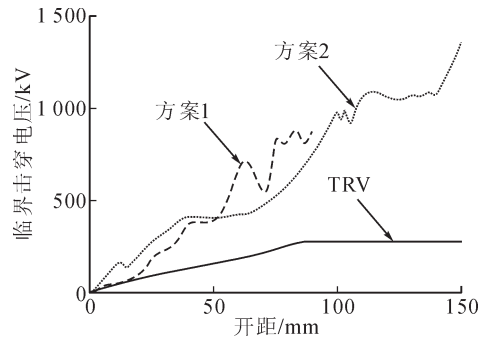


图6 方案1与方案2冷态介质恢复特性曲线
Fig. 6 The cold state medium recovery characteristic curve of scheme 1 and scheme 2

通过分析看出: 方案1在50 mm开距内的介质恢复特性曲线要明显低于方案2, 方案1介质恢复速度平均值为59 kV/ms, 方案2为92 kV/ms; 方案1在19 mm开距位置击穿裕度小于零, 证明发生重燃现象; 方案2全过程开断裕度大于1, 无重燃现象。分析方案1发生重燃现象主要是引弧环结构导致灭弧室内电场值增大所造成的。因此, 在断路器灭弧室结构设计上放弃引弧环结构, 保留屏蔽罩结构, 方案2可以保证断路器刚分后由较大的介质恢复速度, 降低重燃弧几率。

2 断路器开断特性分析

通过对不同灭弧室结构绝缘性能和冷态介质恢复特性的比较分析可以看出, 方案2具有更好的冷态介质恢复速度和开断裕度。因此, 确定方案2

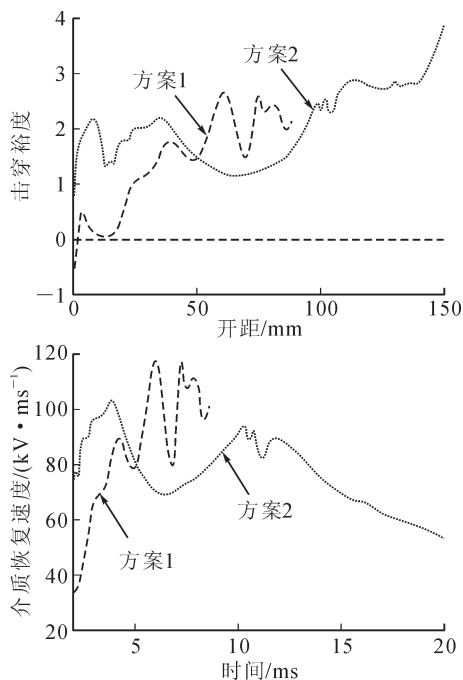


图 7 方案 1 与方案 2 击穿裕度和介质恢复速度变化曲线
Fig. 7 Breakdown margin and dielectric recovery velocity change curve of scheme 1 and scheme 2

为特高压电容器组断路器灭弧室结构,以下对断路器开断特性进行详细分析。

2.1 额定小电流电弧开断特性分析

针对容性小电流电弧而言,由于电流值较小、能量也较小,弧隙间热电离并不充分,并不能达到电弧稳定燃弧的热力学平衡态。电弧小电流过零时,电弧功率为零,此时弧隙得不到能量,却仍以对流、传导等方式继续散出能量,这样弧隙内的消电离将大大增加,使得弧隙温度迅速下降。这样将导致弧后热电离程度较低,发生弧后热击穿导致重燃的概率较低。但是在小电流短时间燃弧的情况下,电弧熄灭后弧触头间间隙较短,在恢复电压的作用下,弧隙间电场值较大,导致弧隙间场致电离作用增强,介质强度恢复过程减弱。当弧后介质强度恢复过程慢于电压恢复过程时,将会发生电击穿导致重燃,所以小电流电弧短燃弧时间下电击穿导致重燃的概率较高^[18]。应用文[21]中的非平衡态电弧数学模型,重点分析小电流短燃弧的介质恢复特性。在考虑不同燃弧时间的情况下,以弧触头间区域内介质强度最薄弱点为取值点,计算开断额定 1 600 A 小电流电弧的介质恢复特性随时间变化曲线,见图 8,为燃弧时间小于 2 ms 的弧后介质恢复特性和击穿裕度曲线。

通过图 8 可以看出,由于小电流短燃弧能量小,电弧能量对弧后介质恢复特性的影响小。开断

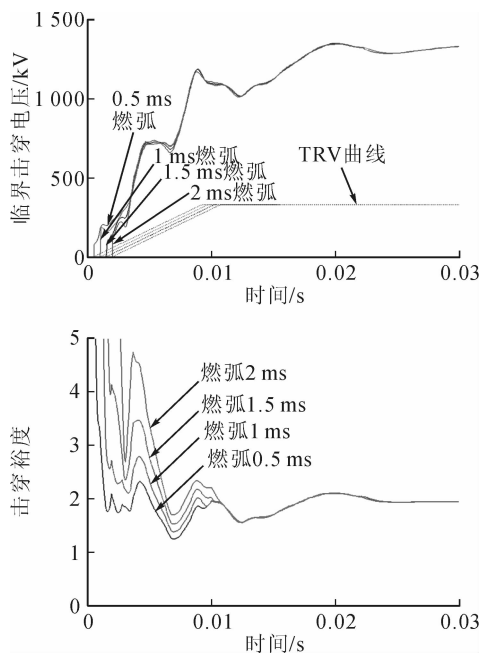


图 8 短燃弧介质恢复特性和击穿裕度变化曲线
Fig. 8 The recovery characteristic and breakdown margin curve of short arc medium

3 ms 后,不同燃弧时间介质恢复特性曲线趋于一致。短燃弧介质恢复特性曲线与 TRV 曲线并没有相交,弧后并无重击穿现象。燃弧时间越短,击穿裕度值越小,燃弧 0.5 ms 的最低击穿裕度为 1.25。综上所述,灭弧室结构方案 2 可以保证小电流短燃弧弧后不发生重击穿现象,但是要尽量避免燃弧时间小于 0.5 ms,保证弧后具有较大的击穿裕度。

2.2 短路大电流电弧开断特性分析

特高压电容器组专用断路器要有稳定开断短路 40 kA 大电流电弧的能力。根据文[22-23]建立大电流电弧模型,将电弧数学模型及电导率参数带入到气流场与电场的耦合计算模型中,计算不同燃弧时间下的密度和温度分布。通过流注击穿判据计算短路大电流开断下的介质恢复特性曲线。电弧过零时刻温度和密度分布见图 9。

通过对图 9 的分析可以看出,燃弧时间在 13 ms 和 14 ms 时,电弧过零瞬间的弧道温度保持在 4 000 K 以上,弧道密度在 5 kg/m³ 以下,电弧过零时刻介质恢复速度分别为 0.86 kV/μs 和 1.32 kV/μs,均小于 GB 1984—2003《高压交流断路器》中规定 126 kV 断路器 T100 开断瞬态恢复电压上升率 2 kV/μs。此时大喷口刚刚打开,压气缸内的高密度气体还没有进入到电弧区间内,气吹对电弧的作用时间较短,带走的电弧能量不足以导致电弧过零熄弧,因此燃弧时间小于 14 ms 的短路大电流电弧在大喷口

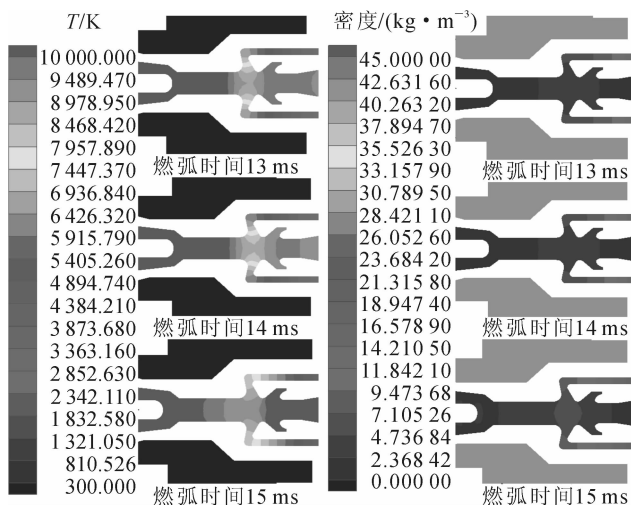


图9 电弧过零时刻温度和密度分布

Fig. 9 Temperature and density distribution of arc over zero time

打开后并不能熄弧。燃弧时间大于 15 ms 的范围内, 电弧过零瞬间的弧道出现温度与密度的断点, 即温度小于 4 000 K, 密度大于 5 kg/m³, 此时认为压气缸内的高密度的冷气流进入燃弧区域, 带走了电弧大量的能量, 弧道断裂, 电弧熄灭, 介质进入快速的恢复阶段, 因此预测开断短路电流的最短燃弧时间应该在 15 ms 左右。通过对燃弧时间为 15、16、17 ms 的短路大电流电弧气流场的计算分析可以看出, 断路器对开断短路长燃弧电弧的稳定性较高, 介质恢复速度较快。短路大电流开断不同燃弧时间的介质恢复特性曲线见图 10。

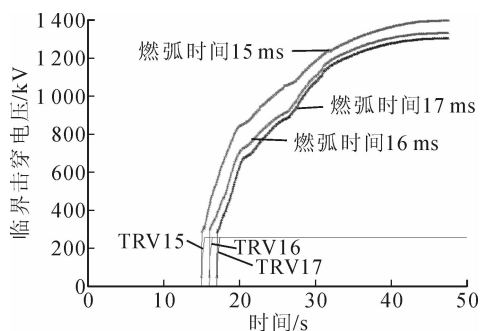


图10 短路开断弧后介质恢复特性曲线

Fig. 10 Characteristic curve of dielectric recovery after short circuit breaking arc

3 介质恢复特性试验研究

搭建 126 kV SF₆ 断路器冷态介质恢复特性试验回路, 测量断路器单次合一分过程中不同开距下的击穿电压值, 灭弧室充气压力为 0.7 MPa, 开断速度 $v_k=9.6$ m/s, 关合速度 $v_h=6.6$ m/s, 试验电路见图 11。首先使被测量的断路器 CB 处于分闸状态, 通过直流发生电路对高压电容器 C_5 和 C_6 充以直流 380 kV

电压, 包括: 高压试验变压器 T, 直流倍压电路(电容器: C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和高压硅堆: D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4), 高压电容器 $C_5=0.5$ μ F, $C_6=200$ pF, 额定工作电压 400 kV DC。使断路器 CB 进行一次关合操作和紧随的开断操作, 通过电阻分压器 R_1 和 R_2 测量电容器 C_5 的充电电压值, 通过电容器分压器 C_6 和 C_7 测量触头间隙的击穿电压随时间变化的波形^[24-27], 应用断路器行程传感器测量触头间行程变化曲线。

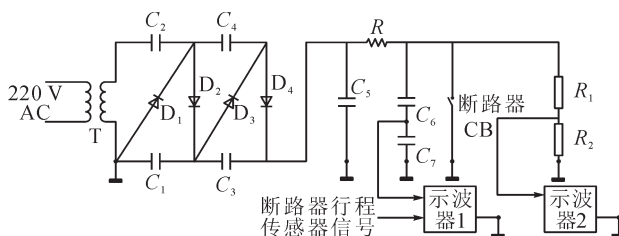


图11 断路器触头间隙动态击穿特性试验电路

Fig. 11 Circuit breaker contact gap dynamic breakdown characteristics test circuit

在上述断路器的开断操作中, 当触头分离后, C_6 被开路, C_5 通过电阻 R 对 C_6 充电, C_6 电压快速升高。当 C_6 的电压超过触头间介质的临界击穿电压时, 断路器触头间隙被击穿。击穿过程产生电弧, C_6 内的电荷瞬时释放, C_6 两端电压快速下降直到电弧熄灭, 由于 C_6 为电容值很小, 电弧电流只有几百毫安, 燃弧时间小于 0.1 ms。如此充电、击穿、放电、熄弧、再充电的过程交替重复, 形成开断过程中的重复击穿过程。随着触头开距的不断增大, 击穿电压增大, 直至触头间隙足够大, 不再能够被击穿。断路器动弧触头侧为地电位, 静弧触头分别施加正向电压和负向电压, 断路器弧触头间最大电压为 380 kV, 每种试验条件正、负极性下各进行 10 次合一分试验操作, 测量断路器不同开距下动态击穿点电压值。对比分析试验数据与计算曲线, 见图 12。计算曲线与试验结果基本吻合, 由于试验击穿点存在一定的分散性, 在刚分时刻后 0.5 ms 内, 存在击穿点电压值小于 TRV 的现象, 存在重击穿的可能, 因此分闸过程应避免在此时间范围内熄弧, 保证燃弧时间大于 0.5 ms。

4 结论

文中针对断路器厂家所提供的灭弧室结构方案进行绝缘性能和冷态介质恢复特性计算分析; 计算额定 1.6 kA 小电流短燃弧和短路 40 kA 大电流开断特性; 搭建 126 kV SF₆ 断路器冷态介质恢复特性试验回路, 测量断路器不同开距下的击穿电压值; 通过对比分析计算与试验结果, 具体得出以下

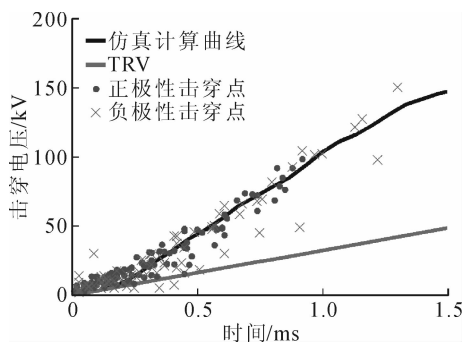


图 12 不同压力分闸过程击穿电压随时间变化曲线

Fig. 12 The opening movement breakdown voltage with time curves under different pressure

结论:

1)方案 1 中引弧环结构使电极间的距离减小,触头间电场分布值变大,在 19 mm 开距位置击穿裕度小于零,发生重燃现象;方案 2 中屏蔽罩结构对大喷口打开后弧触头间的电场分布具有屏蔽作用,全过程开断裕度大于 1,无重燃现象。因此,在断路器灭弧室结构上放弃引弧环结构,保留屏蔽罩结构,方案 2 可以保证断路器刚分后有较大的介质恢复速度,降低重燃弧几率。

2)小电流短燃弧能量小,电弧能量对弧后介质恢复特性的影响小,开断 3 ms 后,不同燃弧时间介质恢复特性曲线趋于一致,弧后并无重击穿现象。燃弧时间越短,击穿裕度值越小,燃弧 0.5 ms 的最低击穿裕度为 1.25。尽量避免燃弧时间小于 0.5 ms,保证弧后具有较大的击穿裕度。预测开断短路电流的最短燃弧时间为 15 ms,断路器对开断短路长燃弧电弧的稳定性较高,介质恢复速度较快。

3)计算曲线与试验结果基本吻合,由于试验击穿点存在一定的分散性,在刚分时刻后 0.5 ms 内,存在击穿点电压值小于 TRV 的现象,存在重击穿的可能,因此分闸过程应避免在此时间范围内熄弧,保证燃弧时间大于 0.5 ms。

参考文献:

- [1] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社,2011:323-334.
LIN Xin. The modern high voltage electrical technology[M]. 2nd ed.. Beijing:China Machine Press,2011:323-334.
- [2] 刘振亚. 特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M]. 北京:中国电力出版社,2008:33-37.
LIU Zhenya. Over-voltage and insulation coordination of UHV AC transmission system[M]. Beijing:China Electric Power Press,2008:33-37.
- [3] 袁焯锋,梁天明,付 冲,等. ± 500 kV 兴安直流工程无功功率检测逻辑改进措施研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(4):41-47.
- [4] YUAN Zhuofeng, LIANG Tianming, FU Chong, et al. Improvement measures study on reactive power detection logic for ± 500 kV Xing'an HVDC project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4):41-47.
- [5] 常 伟,朱 亮,陈竹异. 1 000 kV 沪西站并联电容器组接线及配置分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(1):15-20.
CHANG Wei, ZHU Liang, CHEN Zhuyi. Wiring and configuration analysis of shunt capacitor bank at 1 000 kV Huxi substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1):15-20.
- [6] 王 亮. SF₆ 断路器开断容性小电流介质恢复特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2012.
WANG Liang. Research on dielectric recovery characteristic of small capacitive current in SF₆ circuit breaker [D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2012.
- [7] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003:109-111.
LI Bin. SF₆ high voltage apparatus design[M]. Beijing: China Machine Press, 2003:109-111.
- [8] 荣命哲,杨 茜,范春朵. 高压自能式 SF₆ 断路器电弧能量作用过程仿真[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):92-97.
RONG Mingzhe, YANG Qian, FAN Chunduo. Simulation of the process of arc energy-effect in HV auto-expansion SF₆ circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 92-97.
- [9] 朱 凯,李兴文,赵 虎,等. 高压气体断路器弧后电流特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(21): 3512-3517.
ZHU Kai, LI Xingwen, ZHAO Hu, et al. Experimental study on characteristics of post-arc current of high voltage gas circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3512-3517.
- [10] 姜 旭,贾申利,李兴文,等. 基于真实气体模型的 SF₆ 断路器中冷态气流场特性的仿真分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):167-173.
JIANG Xu, JIA Shenli, LI Xingwen, et al. Simulation and analysis of cold flow field characteristics in SF₆ circuit breakers with UDRGM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7):167-173.
- [11] 张佰庆,崔艳东,马 骏,等. 500 kV 同塔双回线路工频电场精细化仿真计算[J]. 电瓷避雷器,2015(5):66-70.
ZHANG Baiqing, CUI Yandong, MA Jun, et al. Refined simulation of electric field around 500 kV transmission line with double circuits on same tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(5):66-70.
- [12] 朱泽伟,郭在华,范 娟,等. 雷击分流接地系统地电位特性试验及仿真分析[J]. 电瓷避雷器,2014(3):126-131.

- ZHU Zewei, GUO Zaihua, FAN Juan, et al. Experimental and simulation analysis on ground potential breakdown characteristics of the lightning distribution grounding system[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2015(3):126-131.
- [12] 金立军, 董 骁, 闫书佳, 等. 基于灭弧室气压特性对半自能式 SF₆ 断路器分闸速度的优化[J]. *高电压技术*, 2013, 39(4):776-781.
- JIN Lijun, DONG Xiao, YAN Shujia, et al. Determin the break-brake speed of a half-self extinguish SF₆ circuit breaker through analyzing the pressure characteristics of chamber [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39 (4): 776-781.
- [13] 钟建英, 林 莘, 何荣涛. 自能式 SF₆ 断路器熄弧性能的并行计算仿真[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(20): 154-159.
- ZHONG Jianying, LIN Xin, HE Rongtao. The parallel computation simulation of the extinguishing arc performance in the self-extinguished SF₆ circuit breaker[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(20): 154-159.
- [14] 魏俊梅, 林 莘. SF₆ 高压断路器压力特性与机械特性耦合数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(15): 110-116.
- WEI Junmei, LIN Xin. Pressure character and mechanism character coupling computation of SF₆ high voltage circuit breaker [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27 (15): 110-116.
- [15] 韩书谟. 1 100 kV GIS 中 SF₆ 断路器关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- HAN Shumo. Research on key techniques of SF₆ circuit breaker of 1 100 kV GIS[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [16] 林 莘, 李鑫涛, 王飞鸣, 等. 触头烧损对 SF₆ 断路器介质恢复特性的影响[J]. *高电压技术*, 2014, 40(10):3125-3134.
- LIN Xin, LI Xintao, WANG Feiming, et al. Dielectric recovery characteristics of SF₆ circuit breaker considering contact burning loss[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(10):3125-3134.
- [17] 张俊民. 喷口电弧与喷口材料蒸气相互作用的数学模型[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7):210-213.
- ZHANG Junmin. Mathematical model of the interaction between nozzle arc and ptfе vapour[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7):210-213.
- [18] 王飞鸣, 林 莘, 徐建源. 高压 SF₆ 断路器非平衡态等离子体电弧的熄弧特性[J]. *高电压技术*, 2014, 40(10): 3073-3084.
- WANG Feiming, LIN Xin, XU Jianyuan. Extinction characteristics of non-equilibrium plasma arc in high-voltage SF₆ circuit breaker[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40 (10):3073-3084.
- [19] 王 亮, 林 莘. SF₆ 断路器开断小电流介质临界击穿电压数值模拟计算分析[C]//2012 输变电年会论文集. 上海: [s.n.], 2012:89-94.
- WANG Liang, LIN Xin. Numerical simulation analysis of the small current media critical breakdown voltage on SF₆ circuit breaker [C]//2012 Transmission Annual Meeting Proceedings. Shanghai: [s.n.], 2012:89-94.
- [20] WANG Liang, LIN Xin, WANG Feiming, et al. Analysis of arc plasma during small capacitive current interruption in SF₆ circuit breaker[C]//2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology (ICEPE-ST). [S.l.]:IEEE, 2013:1-4.
- [21] 林 莘, 王 亮, 徐建源, 等. 非平衡态双温度 SF₆ 等离子体电弧数学模型研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(3):1-7.
- LIN Xin, WANG Liang, XU Jianyuan, et al. Non-equilibrium dual temperature SF₆ plasma arc mathematical model research[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(3):1-7.
- [22] CHERVY B, GLEIZES A, RAZAFINIMANANA M. Thermodynamic properties and transport coefficients in SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300~30 000 K and pressures of 0.1~1 MPa[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 1994, 27(6):1193-1206.
- [23] LESLIE S F, RICHARD W L. Composition and transport properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow arc model[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1971, 59(4): 474-485.
- [24] 林 莘, 李学斌, 徐建源. 快速接地开关对交流特高压同塔双回输电线路潜供电弧的限制[J]. *电网技术*, 2010, 34(9):26-30.
- LIN Xin, LI Xuebin, XU Jianyuan. Suppress secondary arc in double UHVAC circuit on the same tower by high speed grounding switch [J]. *Power System Technology*, 2010, 34 (9):26-30.
- [25] 林 莘, 李学斌, 徐建源. 特高压同塔双回线路感应电压、电流仿真分析[J]. *高电压技术*, 2010, 36(9):2193-2198.
- LIN Xin, LI Xuebin, XU Jianyuan. Simulation and analysis of induced voltage and current for UHV double circuit transmission lines on the same tower [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(9):2193-2198.
- [26] 李学斌, 韩洪刚, 林 莘. 超高压耦合线路潜供电流计算及电抗器优化配置[J]. *东北电力技术*, 2013, 34(2):5-9.
- LI Xuebin, HAN Honggang, LIN Xin. The calculation of secondary arc current on EHV coupling lines and optimization allocation for reactor[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2013, 34(2):5-9.
- [27] 林 莘, 王飞鸣, 刘卫东, 等. 高压 SF₆ 断路器关合预击穿特性计算与试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(5):1445-1452.

- [8] DEVIRENM D A, KSEL Y. Developing a fuzzy analytichierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management[J]. Information Sciences, 2008, 178(6): 1717-1733.
- [9] HA J S, SEONG P H. A method for risk-informed safety significance categorization using the analytic hierarchy process and bayesian belief networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 83(1): 1-15.
- [10] 孟遂民, 郭 昊, 李维维, 等. 应用模糊层次分析法的带电跨越施工安全评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 358-363.
- MENG Suimin, GUO Hao, LI Weiwei, et al. Safety evaluation for construction over live wires using fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2014, 33(3): 358-363.
- [11] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.
- ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88.
- [12] 祝慧娜, 袁兴中, 梁 婕, 等. 河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. 中国环境科学, 2011, 31(3): 516-521.
- ZHU Huina, YUAN Xingzhong, LIANG Jie, et al. An integrated model for assessing the risk of water environmental pollution based on fuzziness[J]. China Environmental Science, 2011, 31(3): 516-521.
- [13] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵的一种排序方法[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(1): 47-50.
- XU Zeshui. A method for priorities of triangular fuzzy number complementary judgement matrices[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(1): 47-50.
- [14] 姚升保, 徐 敏. 群组决策中三角模糊数互补判断矩阵的相容性及方案排序研究[J]. 中国管理科学, 2012, 20(5): 152-156.
- YAO Shengbao, XU Min. Research on compatibility of triangular fuzzy number complementary judgment matrices in group decision-making[J]. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(5): 152-156.
- [15] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵排序方法研究[J]. 系统工程学报, 2004, 19(1): 85-88.
- XU Zeshui. On priority method of triangular fuzzy number complementary judgement matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(1): 85-88.
- [16] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311-314.
- XU Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4): 311-314.

孟遂民(1957—), 男, 教授, 主要研究方向为输电线路工程。

徐文洋(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路工程。

(上接第 41 页)

LIN Xin, WANG Feiming, LIU Weidong, et al. Research on calculations and experiments of closing pre-strike characteristics in high voltage SF₆ circuit breakers[J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(5): 1445-1452.

隋玉秋(1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为

设备智能化及故障诊断、智能变电站及运维技术、清洁能源、能源和电力工程等。

王飞鸣(1986—), 男, 博士, 研究方向为高压断路器开断技术、电工装备设计理论、变电站瞬态性能与绝缘特性的研究等。