

一起 800kV 罐式断路器合闸电阻故障原因分析

安影 张海滨 杨涛 张自华

平高集团有限公司 河南 平顶山 467001

【摘要】某 800kV 罐式断路器在送电操作后发生放电故障，对断路器解体检查和取样分析，通过电场仿真分析和温升理论计算，找出故障产生的原因为气室内部异物导致场强畸变，引起电阻屏蔽对筒体发生放电，合闸电阻在故障电流作用下温度急剧升高，进而导致发生炸裂。在今后的产品装配过程中需进一步加强“四无管理”和点检工作，保证产品的可靠运行。

【关键词】绝缘强度；合闸电阻；热容量

引言

高压罐式断路器在输变电系统中被广泛应用，但其内绝缘距离小，由于异物导致的不均匀电场对内部场强影响大，大大增加放电概率^[1-4]。本文对某 800kV 罐式断路器合闸电阻故障问题进行解体检查，分析故障原因，并进行分析计算，提出后续的改进措施。

1 故障简述

2019 年 10 月 20 日，灵州换流站准备对方州线送电操作，现场 II 母带电。20:01 分时合上 7573 断路器，约 8 秒后，II 母母线差动保护动作，显示最大差电流为 12.581A (变比 2500: 1, 故障电流 31.5kA)。经现场排查，发现仅 7573 间隔 B 相断路器气室 SO₂ 超标，确认故障位置。

2 故障检查

故障发生后，将该相断路器返厂，并进行解体检查，打开两侧盖板，将气室置换为空气，发现气室内部有明显的放电痕迹，断路器合闸电阻碎裂。



图 1 断路器放电痕迹

根据断路器内部的放电痕迹，选取 4 处位置进行取样分析，取样位置见图 2 所示，取样分析结果如图 3 所示。

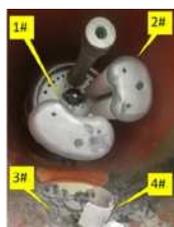


图 2 取样位置示意图

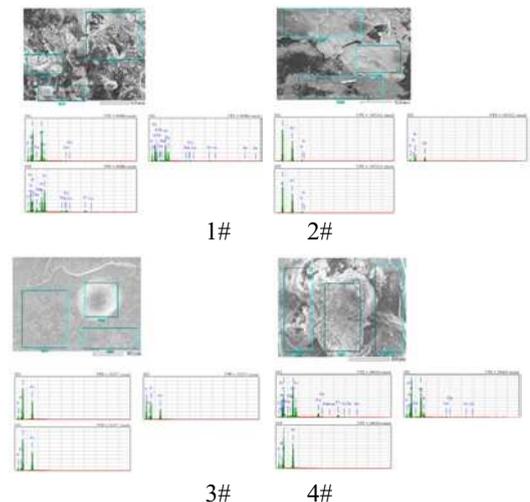


图 3 取样分析结果

通过对放电区域粉末的取样分析，其主要成分为 C、F、Al，主要为导体材质和导向环材质，未见其他异常成分。

3 故障分析

本次故障主要为电阻屏蔽对地击穿放电和合闸电阻发热炸裂，因此从产品电场强度和合闸电阻热容量两方面分析故障原因。

3.1 电阻屏蔽电场强度计算

采用 ansys 有限元分析软件对断路器电阻体两端屏蔽电场进行仿真计算分析，中心导体及其屏蔽施加 2100kV 电压，外壳为 0 电位，计算结果如图 4 所示。

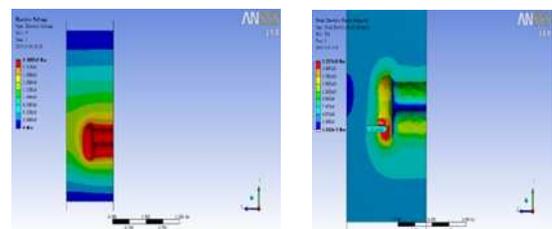


图 4 屏蔽处电场计算结果

计算得到中心导体及屏蔽处于 2100kV 电压下的最

大电场为 22.373kV/mm, 而在闭锁气压 0.5MPa 的 SF₆ 下, 其绝缘判据为 28.7kV/mm, 因此该结构的绝缘裕度为 1.363 倍, 产品结构满足绝缘强度要求。

3.2 合闸电阻热容量计算

每相阻值 R = 600Ω, 反相合闸两次, 两次合闸间隔 Δt = 30min, 每次投入时间不小于 11ms, 预击穿时间 1ms, 取 t = 0.012s。电阻片温升允许值为 230K, 电阻片尺寸为: φ151×φ38.5×25.4mm。

(1) 第一次反相合闸后电阻温升计算

注入能量:

$$W_1 = \frac{U^2}{R} t = \frac{(2 \times 800 \times 1000)^2}{3 \times 600} \times 0.012 = 1.71 \times 10^7 \text{ J}$$

温升:

$$\Delta T_1 = \frac{W_1}{CV_1} = \frac{1.71 \times 10^7}{2 \times 425.17 \times 176} = 114.3 \text{ K}$$

式中:

C —— 电阻比热, C = 2.0 (J/°C/cm³)

V₁ —— 电阻片的总体积 (cm³)

每片体积:

$$V_0 = \frac{\pi}{4} (15.12 - 3.852) \times 2.54 = 425.07 \text{ cm}^3$$

电阻片数: 176 片

(2) 第一次合闸 30min 后电阻片温度下降值为:

$$\Delta T_s - \Delta T_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) = 0.393 \Delta T_1$$

式中:

Δt —— 散热时间, Δt = 30min

τ —— 散热时间常数, τ = 60min

(3) 第二次合闸后电阻温升

$$\Delta T_3 = (\Delta T_1 - \Delta T_s) + \Delta T_1 = 1.607 \Delta T_1$$

$$= 1.607 \times 114.3 \text{ K} = 183.7 \text{ K} < 230 \text{ K}$$

可以看出, 合闸电阻设计满足工程应用要求。

3.3 故障电流下电阻温升计算

本次故障为电阻端部金属屏蔽对壳体放电,

图 5 为此处断路器放电原理图, 其中 R1=58Ω, R2=R3=75Ω, R4=92Ω, R2+R3+R4=242Ω。

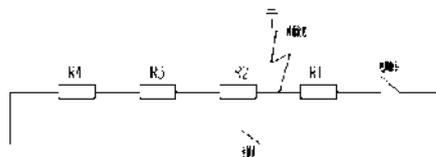


图 5 断路器放电电路

(1) 电网向单侧电阻注入的能量

注入总能量:

$$W_0 = I^2 R t = (9.7 \times 10^3)^2 \times 46.8 \times 0.00166 = 7.3 \times 10^6 \text{ J}$$

式中:

I —— 短路电流, I=9.7kA;

R —— 电阻, R=(242×58)/(242+58)=46.8Ω;

t —— 故障电流持续时间, t=0.00166s;

R1 注入能量:

$$W_1 = [(R_2+R_3+R_4)/(R_1+R_2+R_3+R_4)] \times W_0 = 5.9 \times 10^6 \text{ J}$$

R2+R3+R4 注入能量:

$$W_2 = 1.4 \times 10^6 \text{ J}$$

(2) 电阻温升计算:

式中:

C —— 电阻比热, C = 2.0 (J/°C/cm³)

V₁ —— 单侧电阻片的总体积 (cm³)

R1 电阻片数: 17 片

R2+ R3 +R4 电阻片数: 71 片

R1 温升:

$$\Delta T_1 = \frac{W_1}{CV_1} = \frac{5.9 \times 10^6}{2 \times 425.17 \times 17} = 400 \text{ K} > 230 \text{ K}$$

R2+ R3 +R4 温升:

$$\Delta T_2 = \frac{W_2}{CV_2} = \frac{1.4 \times 10^6}{2 \times 425.17 \times 71} = 23.2 \text{ K} < 230 \text{ K}$$

(3) 电阻超出温升限值的时间计算

令 R1 温升, 得

$$W_1 = 3.32 \times 10^6 \text{ J}$$

根据 W₁ = [(R₂+R₃+R₄)/(R₁+R₂+R₃+R₄)]×W₀, 得:

$$W_0 = 4.12 \times 10^6 \text{ J}$$

根据 W₀ = I²Rt = (9.7×10³)²×46.8t, 得:

$$t = 0.94 \text{ ms}$$

即电阻片承受短路电流 9700A 的时间不超过 0.94ms。

根据以上计算, 电阻屏蔽对筒体短路时, 1.66ms 时 R1 电阻温升超过 400K, 超过电阻可接受的能量, R2~R4 的温升正常; 在 0.94ms 时, R1 电阻温升达到允许值 230K。通过计算以及波形显示, 可确认电阻片在 1.66ms 时损毁。

4 原因判定

通过计算分析, 电阻两端屏蔽处设计裕度合理, 电阻体沿面电场设计合理, 电阻片热容量设计满足产品性能要求。因此罐体内存在异物是本次故障的直接原因。在断路器合闸状态运行过程中, 异物导致电场畸变, 造成屏蔽罩对罐体内壁击穿放电。

闪络导致电阻流过故障电流, 短时间内故障电流引起电阻片温度急剧升高进而炸裂, 炸裂的碎片引发复杂的放电过程, 电阻两侧屏蔽等部位多处电弧烧蚀。

5 建议

虽然在出厂操作试验后、耐压试验前对所有开关

单元都实施了严格的气室内部点检，但还是有极个别气室内存在隐藏的金属异物。因此，在今后的产品装配过程中进一步加强“四无管理”（无异物产生、无异物混入、无异物残留、无螺栓忘记紧固），从根本上防止异物的发生。同时强化装配过程中的点检，针对整个装配

过程可能会发生异物的环节，将点检过程前移，不仅要加强连续操作试验后的气室内部点检，还要加强装配分装时的点检，各类配合、传动结构装配后，及时、仔细地地点检确认是否有金属异物产生和残留。

【参考文献】

- [1] 林莘. 现代高压电器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [2] 黎斌. SF6 高压电器设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] 李建基. 高压开关设备实用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [4] 葛猛, 陶安培. 一起 SF6 封闭式组合电器故障的原因分析 [J]. 高压电器, 2008, 44(1): 95-96.