

两起同型号单断口 330 kV GIS 断路器击穿故障分析

倪辉¹, 相中华², 刘威锋², 马飞越²

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011;

2. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘 要: 以两起同型号单断口 330 kV GIS 断路器击穿故障为例, 结合返厂解体、电场仿真、工艺模拟试验、绝缘裕度验证试验等, 对其产生原因进行分析, 并提出相应的防范措施。结果表明: 单断口结构在无异物的情况下可正常运行, 绝缘裕度符合要求, 两次击穿故障主要是断路器内存在异物, 需从装配至现场安装全过程管控。

关键词: 断路器; 单断口; 电场仿真; 绝缘裕度

中图分类号: TM 561 **文献标志码:** B **文章编号:** 1672-3643(2019)02-0041-05

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2019.02.009>

Analysis on circuit breakers breakdown failures of 330 kV GIS with single – break of the same type for two cases

NI Hui¹, XIANG Zhonghua², LIU Weifeng¹, MA Feiyue¹

(1. Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750011, China;

2 State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750001, China)

Abstract: The two breakdown faults of single – break 330 kV GIS circuit breaker with the same type were taken as an example, combining with the disintegration, electric field simulation, process simulation test and insulation margin verification test, the causes were analyzed and corresponding preventive measures were presented. The results show that the single – break structure can operate normally without foreign particles, and the insulation margin meets the requirements. The two breakdown faults were mainly caused by foreign particles in the circuit breaker, which need to be controlled from assembly to site installation.

Keywords: circuit breaker; single – break; electric field simulation; insulation margin

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2019.02.009

收稿日期: 2018-12-25

作者简介: 倪辉(1989), 男, 工程师, 从事电力设备带电检测和故障诊断工作。

气体绝缘全封闭组合电器 (gas insulated switchgear, GIS) 已经被大量应用于各电压等级变电站、电厂, 断路器是其重要的组成部分, 也是故障多发部位。随着技术日趋成熟, 断路器已经向高电压、大容量、少断口方向发展, 其中 330 kV 单断口断路器已被成功研制并应用多年, 其结构紧凑、占地面积小, 已逐步替代同电压等级双断口断路器^[1-4], 然而单断口结构断路器也出现了一些新的问题, 以两起同型号单断口 330 kV GIS 断路器击穿故障为例, 对其产生原因进行具体的分析, 并提出相应的防范措施。

1 事故简述

1.1 3321 断路器故障

某 330 kV 变电站某线路双套线路保护 A 相动作, 跳开 3321、3320 断路器, 同时, 该变电站 330 kV VI 母第 1 套母差和第 2 套母差动作出口 (A 相故障), 跳开 3321 断路器。由故障录波可知, A 相故障电流为 17.6 kA。

故障发生后, 检测 3321 断路器 A 相灭弧室分解产物测试异常, 其中 SO_2 为 $81.3 \mu\text{L/L}$, H_2S 为 $0 \mu\text{L/L}$, CO 为 $4.8 \mu\text{L/L}$, HF 为 $0 \mu\text{L/L}$ 。怀疑 3321 断路器气室 A 相内部发生故障放电。

现场打开故障断路器非机构侧 (静侧) 盖板, 发现断路器罐体内部存在放电分解的白色粉尘, 并且机构侧发现黑色放电灼烧痕迹, 确定故障点位于 3321 断路器 A 相罐体内部。

1.2 3310 断路器故障

另一 330 kV 变电站在投运期间, 3310 断路器第 3 次合闸对 1 号主变充电, 合闸 3 min 后, 1 号主变双套保护、330 kV II 母双套保护动作, 3310、3322 断路器跳闸。通过对录波记录进行调取分析, 初步分析为 3310 断路器 A 相存在故障, 一次故障电流为 3.15 kA 左右。

故障发生后, 检测 3310 断路器 A 相灭弧室分解产物测试异常, 其中 SO_2 为 $11.61 \mu\text{L/L}$, H_2S 为 $0 \mu\text{L/L}$, CO 为 $2.1 \mu\text{L/L}$, HF 为 $0 \mu\text{L/L}$, 水分、纯度正常, 怀疑 3310 断路器气室 A 相内部发生放电。

1.3 设备概况

3321 断路器和 3310 断路器为同一厂家生产, 型号均为 LW-363/Y4000-50 [G], 额定电压 363 kV, 额定电流 4 kA, 额定短路开断电流 50 kA。

该型号断路器灭弧室为单断口卧式布置结构, 采用压气式熄弧原理, 每极配用 1 台液压操作机构, 水平直连, 具有结构简单、开断能力强、传动可靠、操作稳定等特点, 结构如图 1 所示。

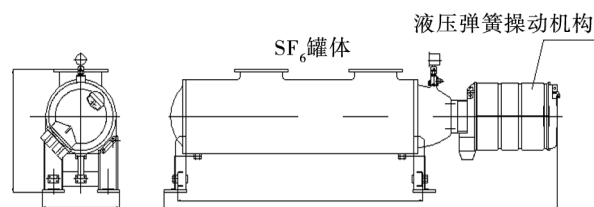


图 1 断路器结构

2 解体情况

对 3321 断路器和 3310 断路器进行返厂解体, 逐步拆除电流互感器、操动机构、罐体等部件, 以及对灭弧室进行拆解, 检查情况如表 1、图 2 所示。

依据上述 2 次故障解体检查及试验情况看:

(1) 2 次故障放电均导致动侧屏蔽罩、绝缘筒有电弧烧蚀痕迹, 且烧蚀程度严重。

(2) 在对绝缘筒进行擦拭处理后, 均未发现有放电通道, 且对绝缘筒分别进行交流 510 kV 耐压试验 1 min, 436 kV 电压下局部放电, X 射线探伤试验, 未发现异常。断路器内部放电原因非直接与绝缘筒有关^[5-7]。

(3) 3321 断路器罐体底部有一处 2~3 cm 烧灼坑迹, 而 3310 断路器罐体无烧灼坑迹, 考虑 3321 断路器一次故障电流 17.6 kA 远大于 3310 断路器的 3.15 kA, 因此认为, 两次事故放电首先发生于绝缘筒导电部分侧均压罩与法兰侧金属接地部分, 当故障电流大于一定值, 电弧导致绝缘筒导电部分侧均压罩对壳体之间形成放电 (导致壳体产生坑迹)^[8-9], 如图 3 所示。

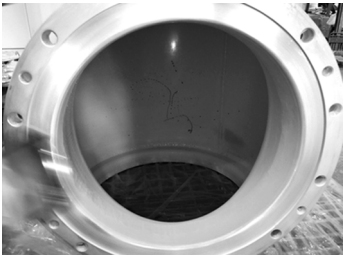
(4) 3310 断路器在动侧屏蔽罩固定螺栓孔处发现金属碎屑, 而 3321 断路器无此现象。

表 1 解体检查情况

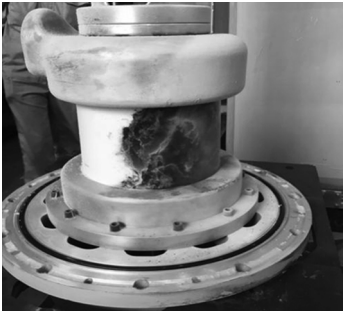
检查部位	3321 断路器	3310 断路器
电流互感器	无异常	无异常
操作机构	无异常	无异常
静侧零部件	表面有少量灰白色放电生成物质附着,无电弧烧蚀痕迹	表面有少量灰白色放电生成物质附着,无电弧烧蚀痕迹
罐体底部	可见一处明显的电弧灼烧坑迹及黑色放电灼烧痕迹,垂直向下偏一侧约 30°左右,如图 2(a)所示	存在黑色喷溅物、放电过热脱色痕迹,但无明显放电灼伤痕迹,表面有少量黑色喷溅物,用擦拭纸可擦除,如图 2(b)
动侧绝缘筒外壁	有明显黑色烧灼痕迹,如图 2(c)所示	下部局部表面碳化,上部有黑色物质附着,如图 2(d)
动侧绝缘筒内壁	无异常	无异常
动侧绝缘筒法兰	有明显黑色烧灼痕迹	有电弧烧蚀痕迹,烧蚀程度严重
动侧屏蔽罩	有明显黑色烧灼痕迹	有喷溅的铝液凝固后形成的颗粒状突起物,主要集中两处
绝缘拉杆	无异常	无异常
其他	无异常	动侧屏蔽罩固定螺孔处存在金属碎屑



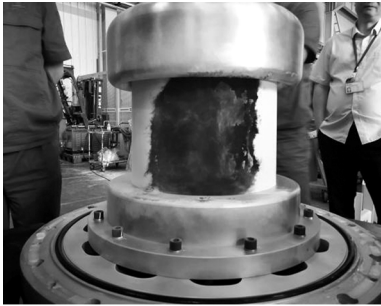
(a)3321 断路器罐体底部



(b)3310 断路器罐体底部



(c)3321 断路器动侧绝缘筒外壁



(d)3310 断路器动侧绝缘筒外壁

图 2 断路器内检查情况

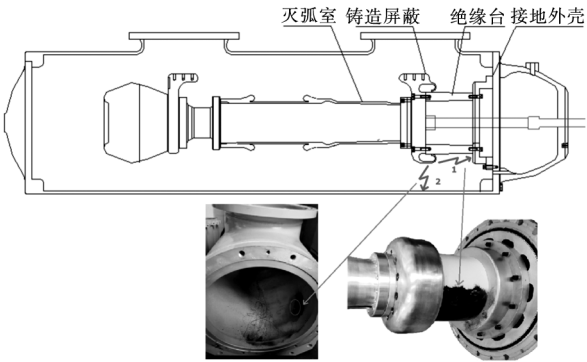


图 3 故障产生部位

3 故障分析

为进一步解释 2 次故障的原因,需先找出:

- (1)解体中发现的动侧屏蔽罩固定螺栓孔处发现金属碎屑是否是故障起因;

(2)该型号断路器属于小型化产品,由双断口演化为单断口,从结构设计考虑是否存在缺陷导致故障。

3.1 螺栓孔金属碎屑

对动侧屏蔽罩固定螺栓和螺母进行显微维氏硬度进行检测,结果显示螺栓的显微维氏硬度值为 265.4 HV0.2,与之配套的螺母显微维氏硬度值为 135.3 HV0.2,两者相差近 1 倍。

根据产品设计的结构工艺性要求,厂家将钢-铝螺纹联接分别设计为螺栓-钢丝螺纹套和螺栓-铝质螺纹 2 种配合结构。灭弧室绝缘筒支撑联接设计的原则主要采用机械强度较高的硬质铝材,且灭弧室为一次性整体安装装配,按少拆卸装配的螺栓-铝质螺纹联接设计,因此螺栓的硬度是螺母硬度的 2 倍。

由于断路器灭弧室内的绝缘筒零件属于一次性整体装配设计(并配有防松胶),所以在该零件进行检修或拆卸作业时,对于此处的螺栓,需在大于其紧固力矩值的情况下进行螺栓松动作业,并将螺栓从嵌件螺纹中退出。在此过程中,螺纹内会产生金属屑,这也是返厂解体时发现大量金属屑的原因。这在厂家工艺要求中是允许的,并且认为在退出螺栓前不会产生金属屑^[10],为此进行了针对螺栓紧固与松解的验证性复原试验。试验结果表明,在松开紧固螺钉前断路器内无金属屑遗落,在全部螺钉松开后,用蘸酒精的擦拭纸擦拭螺纹孔,擦拭纸出现少许黑色,说明有金属粉末产生。

因此,返厂解体时发现的金属屑属于屏蔽罩螺栓松解的正常现象,而不是引起此次事故的原因。但不能排除是其他异物引起,如零部件在制造、装配产生的偏移或尖角毛刺,或是在现场安装过程中引入的沙尘细粒等。

3.2 双断口与单断口电场对比

该型号断路器灭弧室由双断口(额定电流 5 kA,开断电流 63 kA)结构发展至单断口结构,可以满足 50 kA 故障电流的性能需求,结构也大为简化。其传动机构装置由原双断口的两套“T”型传动机构简化至“一”字型直连结构,可动部件

数量和传动环节大幅度减少,传动效率提高,而震动和操作噪音却大为减轻,提高了结构可靠性。另外,单断口断路器取消了均压电容装置,在一定程度上也减少了带给电网系统的不稳定性问题。但该结构的简化是否对罐内电场有所影响,需进行电场仿真比对。

依据真实结构数据,通过 ANSYS 电场仿真,对单断口和双断口施加 1 175 kV 雷电冲击耐受电压^[11-13],其数据如表 2 所示。单断口断路器的电场强度最大值为 24.21 kV/mm,位于动侧屏蔽处,如图 4 所示。双断口断路器的电场强度最大值为 22.09 kV/mm,位于铸件下侧屏蔽处,如图 5 所示。由此可知,虽然双断口到单断口其表面最大场强略有增加,但增加幅值不大,对异物产生的电场畸变影响较小。

表 2 单、双断口断路器的动侧结构电场对比

结构	部位	电场强度最大值/ (kV · mm ⁻¹)
单断口	动侧屏蔽表面	24.21
	绝缘支撑筒表面	8.55
双断口	动侧屏蔽表面	22.09
	绝缘支撑筒表面	6.26

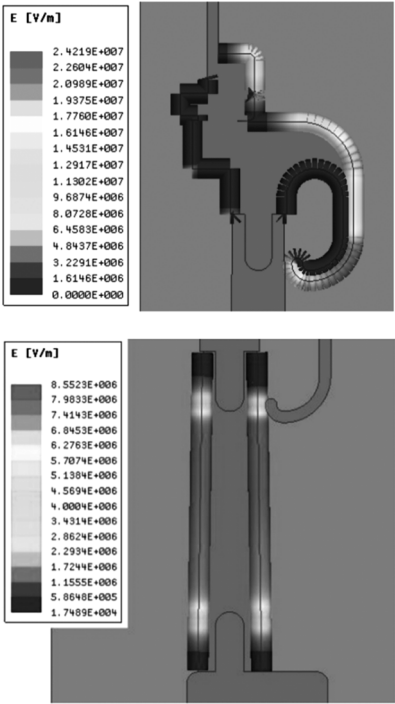


图 4 单断口电场分布

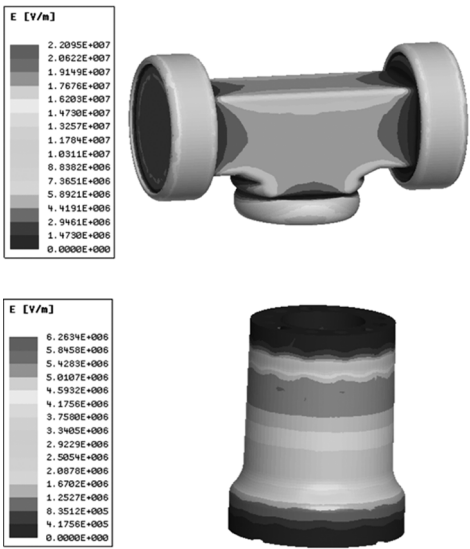


图5 双断口电场分布

3.3 绝缘裕度验证试验

为进一步验证此型号断路器的结构可以符合运行的绝缘裕度,依照国家标准中型式试验的要求进行了绝缘裕度验证试验^[14],试验包括机械操作前的全电压工频耐受电压、雷电冲击耐受电压、操作冲击耐受电压和100次机械操作后的80%工频耐受电压、雷电冲击耐受电压试验。其中全电压工频耐受电压的时间由1 min增加为1.5 min,并在进行雷电冲击耐受电压试验时,补充3次1.1倍雷电冲击耐受电压,进一步对此结构的绝缘裕度进行考核。试验形态按完整单极形态进行,包

含断路器、隔离开关、接地开关、分支母线、套管,如图6所示。

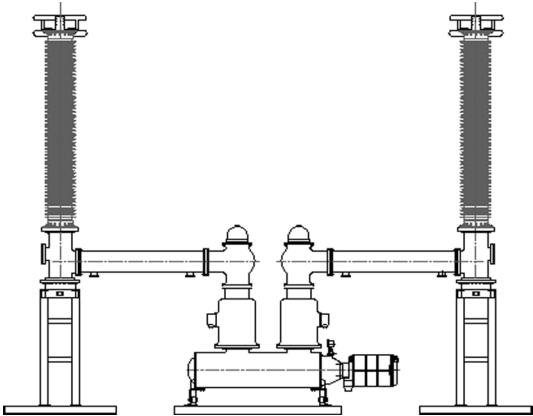


图6 单极整体绝缘试验形态

试验情况如表3所示。各项试验过程均符合国标与技术协议要求,试验结果均为合格。因此认为此断路器结构在正常情况下绝缘裕度满足安全运行条件。

4 结 论

(1)该型号2次事故原因均疑似为罐内异物微屑,附着于动侧屏蔽罩绝缘筒表面,且靠近动侧屏蔽最大场强附近,微屑在电场作用下起举跳动,最终导致局部电场增加而出现击穿,并引起较大电弧。

表3 绝缘裕度验证试验内容

项目	试验顺序	试验电压/kV	次数/次	时间/min	试验方式	结果
工频耐受电压	1	520	—	1.5	合闸对地	合格
	2	±1 175	12	—	合闸对地	合格
		±1.1×1 175	3	—		合格
雷电冲击耐受电压	3	±1 175	15	—	CB断口(静侧高压)	合格
	4	±1175	15	—	CB断口(动侧高压)	合格
	5	±950	15	—	合闸对地	合格
操作冲击耐受电压	6	±950	15	—	CB断口(静侧高压)	合格
	7	±950	15	—	CB断口(动侧高压)	合格
机械操作	8	—	100	—	分合闸	合格
80%工频耐受电压	9	416	—	1	合闸对地	合格
80%雷电冲击耐受电压试验	10	±940	3	—	合闸对地	合格

(下转第70页)