

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.09.030

一起 550 kV 瓷柱式断路器绝缘拉杆的事故及分析

王 栋, 谢 伟, 付海金, 黄兴泉

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

摘要: 介绍了一起 550 kV 瓷柱式断路器绝缘拉杆事故。通过现场一、二次设备的详细检查,故障后试验和返厂试验,以及对该主绝缘事故的缜密分析,发现造成该事故的主要原因为该断路器 B 相绝缘拉杆存在绝缘缺陷,由此引发局部放电并逐渐造成绝缘劣化,最终导致故障发生。进一步加快推进绝缘拉杆中存在气隙及气隙数量、大小的检测、判断标准的制定和实施十分必要。

关键词: 断路器; 局部放电; 主绝缘; 绝缘拉杆

Analysis on an Accident of Insulated Pull Rod of 550 kV Porcelain Column Circuit Breaker

WANG Dong, XIE Wei, FU Haijin, HUANG Xingquan

(State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: An accident of an insulated tension pole of 550 kV porcelain column circuit breaker is introduced. After the accident, the primary and secondary equipments were checked, and tests both on site and in the manufacturing company were conducted for the circuit breaker to analyze the accident. It was found that the insulation defect of B-phase insulated pull rod resulted in partial discharge to gradually degrade the insulation of the circuit breaker, eventually leading to this accident. Therefore, it is necessary to draw up standard and put in practice for detection and judgment of number and size of air gap in insulated pull rod of a circuit breaker.

Key words: circuit breaker; partial discharge; major insulation; insulated pull rod

0 引言

目前,常见的充 SF₆ 气体的电力设备中需要固体绝缘件作为支柱绝缘^[1-3]。典型的 SF₆ 高压断路器灭弧室通过支持绝缘筒、棒(拉杆)固定在壳体上^[4-5]。在 SF₆ 沿面绝缘结构中,除了电极系统会影响电场分布外,固体介质对电场分布也可能会有明显的影响。要求电场分布尽量均匀,否则即使增加沿面距离,闪络电压也提高很少^[6-12]。由于断路器产品绝缘件尺寸普遍很小,因此设计时应特别注意绝缘件两端电极形状及尺寸,注意它周边高电位或地电位零部件的相互关系。如果真空浸渍环氧绝缘拉杆中含气泡多,会造成电强度不高,严重情况则会造成局部

放电以及绝缘老化故障^[13-22]。

文中通过一起 550 kV 瓷柱式断路器绝缘拉杆事故引起的断路器主绝缘故障,并通过现场一、二次设备的详细检查,故障后试验和返厂试验,以及对该主绝缘事故进行分析,找出了发生故障的主要原因。

1 事故经过

1.1 故障前变电站运行方式

2013 年 2 月 18 日,河南电网某 500 kV 变电站 5061 断路器发生爆炸,500 kV I 母失压。5061 开关 B 相损坏严重,C 相受波及并损坏,A 相基本完好,周围部分隔离开关、避雷器等设备不同程度受损。

该 500 kV 变电站母线为 3/2 接线方式,故障前 500 kV 侧 6 条出线(SM 线、SJ I 回线、SJ II 回线、XS I 回线、XS II 回线、LS I 回线)及 I、II 母运行,1 号、2 号

收稿日期:2015-03-12; 修回日期:2015-04-26

基金项目:国家电网公司重大科技项目(17KJ160101F1002920100)。

Project Supported by State Grid Major Scientific and Technological Projects(17KJ160101F1002920100).

主变并列运行。具体接线图见图1。220 kV侧为双母单分段接线方式, I、II、III母并列运行,共7条出线。

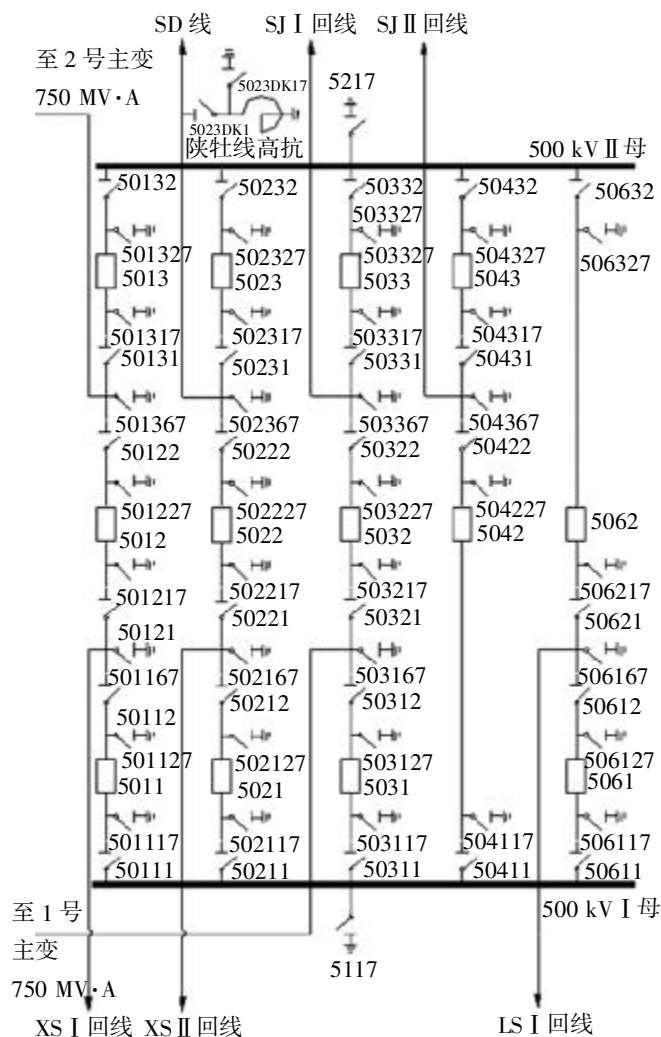


图1 500 kV SZ站主接线图

Fig. 1 500 kV SZ substation main wiring diagram

故障前,河南电网处于封网运行状态,该500 kV变电站无操作,无设备异常信号。500 kV LS线潮流200 MW(送SZ站),SJ双回线2×70 MW(送JH站)、XS双回线2×210 MW(送SZ站),SM线80 MW(送MD站),SZ站下网2×190 MW。其中SZ为该事故分析的500 kV站,JH站和MD站为其他关联的500 kV站。

事故发生时及之前,500 kV SZ站与5061断路器有关的I、II母和LS I回线均在运行,且5042、5031、5021、5011、5061及5062等6台断路器也在合闸工作状态。故障时,站区为阴天、微风,气温0℃左右。

1.2 保护动作情况

由保护装置动作报告及录波分析:2013年2月18日07时37分56秒,该500 kV变电站I母双套保护B相动作,故障点单相对地一次电流约22 kA。双套母差保护分别于故障后5.0、7.5 ms出口。55 ms

正常跳开5042、5031、5021、5011断路器三相,正常跳开5061断路器A、C相,B相持续有流,5061断路器失灵保护296 ms出口。跳开5062断路器并发远跳信号跳LS线对侧断路器,359 ms 5061断路器B相故障电流消失。故障录波图见图2,电流波形通过II母和LS I回侧的电流互感器获得。

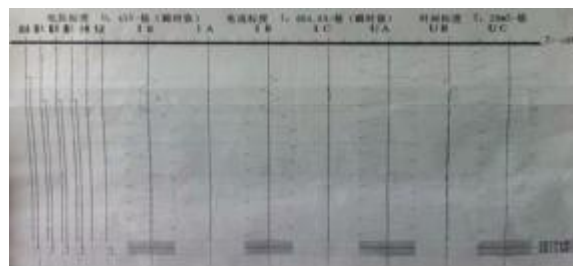


图2 5061断路器故障录波图

Fig. 2 Fault oscillograph of circuit breaker No. 5061

该次故障保护动作逻辑正确。故障后,5061断路器转检修。该5061断路器可分相操作,设定为电气三相联动。

1.3 现场检查情况

故障现场检查显示,5061瓷柱式断路器B相和C相损坏严重,A相基本完好,故障现场周围部分隔离开关、避雷器等设备不同程度受损,断路器瓷瓶碎片散落最远约300 m,见图3。



图3 5061断路器故障现场

Fig. 3 Accident scene of circuit breaker No. 5061

B相具体情况见图4。其中本体与操动机构箱完全脱离,灭弧室瓷套和支持瓷瓶完全破碎,三联箱与上支持瓷瓶连接处有过热痕迹,见图4(a);拉杆传动箱断裂并与分闸弹簧脱落至支架底部,下支持瓷瓶根部法兰有过热痕迹,见图4(b);灭弧室呈合闸状,触头及灭弧室瓷套内表面无电弧和金属颗粒痕迹,见图4(c)。整个绝缘拉杆炸为两截,散落在地上,两截分别处于正常绝缘拉杆的下段和上段。其中,下段占总长2/5左右,表面基本炭化、呈黑色粉末状。该段的端部呈灰黑色爆竹状,中部有两处炭化严重;上段占总长3/5左右,一侧完全炸开、呈灰黑色稻草状,见图4(d);另一侧表面有明显树枝状沟槽,贯穿上段的大部分绝缘,沟槽底部为绝缘拉杆的中间层

绝缘,呈黑色炭化状,见图 4(e)。操动机构箱外壳受损,内部元件基本完好,操动机构处于分闸位置。



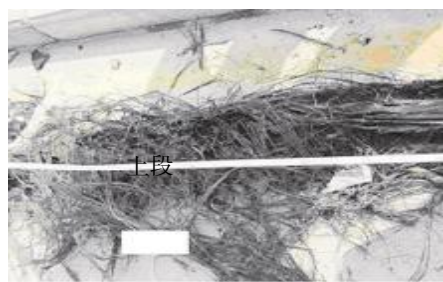
(a) B 相三联轴下部过热痕迹



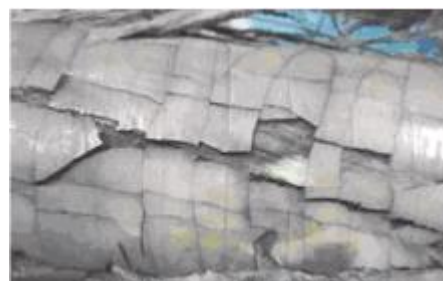
(b) B 相支持瓷瓶根部法兰过热痕迹



(c) B 相灭弧室瓷套内表面



(d) B 相绝缘拉杆上段



(e) B 相绝缘拉杆上段树枝状痕迹

图 4 5061 断路器 B 相故障后具体情况

Fig. 4 B phase specific situation after accident of circuit break No. 5061

C 相具体情况: 支持瓷瓶和一个灭弧室瓷套破碎, 分析应为受到 B 相产生的爆炸碎片飞溅而造成;

另一个灭弧室仍通过绝缘拉杆与操动机构箱相连, 操动机构箱完好且显示分闸状态; 触头基本完好、无电弧痕迹。

5061 断路器型号为 HPL550B2, 为国内某合资高压开关设备公司 2009 年产品, 同年投入运行。该断路器雷电冲击耐受电压为 1 675 kV/(1 550+450) kV, 工频耐受电压为 860 kV/(519+479) kV, 额定电流为 4 000 A, 额定开断电流为 63 kV。

2 相关检查和试验情况

2.1 例行试验

2012 年 5 月, 5061 断路器按周期进行例行试验: 绝缘电阻、机械特性、并联电容电容量、介损、微水检测、SF₆ 分解产物, 结果均未见异常。

2.2 运行记录

运行记录显示, LS I 回线避雷器故障前后计数器次数无变化。

2 月 13 日运行记录显示, LS I 回线避雷器 A、B、C 相计数器次数分别为 6、4、4 次。

2.3 故障后现场试验

故障后现场对 5061 A 相和 5062 的 A、B、C 相进行了微水、SF₆ 分解物和纯度检测, 结果未见异常。

2.4 返厂试验

5061 断路器 A 相返厂进行试验, 项目包括: 工频耐压试验及红外测温、SF₆ 分解物和纯度检测、绝缘拉杆局部放电测量等, 结果未见异常。

1) 在试验电压 740 kV(1 min) 下工频耐压试验通过, 红外测温、SF₆ 分解物检测未见异常。

2) 对完整形态的 5061 A 相绝缘拉杆进行局部放电测量, 并同时观察紫外电晕放电。受试验条件所限, 不加试品空试时试验回路放电信号水平在 6~8 pC 之间(标准规定绝缘拉杆放电量应小于 3 pC)、背景干扰大于 100 pC。故试验中以 6~8 pC 为准, 并采取开窗技术读取测量值。试验电压不高于 $1.1 \times 550 / \sqrt{3} \approx 350$ kV, 绝缘拉杆放电量均小于 8 pC, 未超过基准值, 并未观察到紫外电晕放电。

根据调查显示, 该型号 550 kV 断路器所使用的绝缘拉杆为国外某公司生产的进口部件, 长度 4.5 m, 为空芯结构, 由外向里分别为聚酯/环氧层、芳纶纤维/环氧层和聚酯/环氧层, 装配前进行烘干处理, 工艺文件等未见异常。

2.5 绝缘拉杆材料特性分析

分别对 5061 C 相绝缘拉杆的完好部分和 5061 B 相绝缘拉杆的烧蚀部分进行了绝缘拉杆材料特性分析。结果显示:

1)5061 C相正常绝缘拉杆中外侧聚酯/环氧层—芳纶纤维/环氧层之间存在较多的气隙,其气隙直径约为10~400 μm ,且成区域性聚集,密度较大处直径20 μm 及以上的气孔密度可达196个/ cm^2 ;

2)5061 B相绝缘拉杆上段部分外侧聚酯/环氧层表面存在明显的滑闪放电痕迹,且深入芳纶纤维/环氧层,显微观测显示其外侧聚酯/环氧层—芳纶纤维/环氧层界面存在的气孔较少,直径较小,且存在疑似放电通道和疑似放电点。分析认为这是由高温下聚酯/环氧发生熔融,重新填充气孔所致;

3)5061 B相绝缘拉杆下段部分被严重烧蚀,显微观测显示其芳纶纤维层中存在疑似放电击穿点。

3 故障原因分析

根据保护动作、现场检查和试验情况确认:

1)5061断路器故障由B相放电从而引发爆炸,C相受B相爆炸碎片机械外力波及并损坏;

2)故障发生前,5061断路器无 SF_6 压力报警、闭锁等信号;

3)故障发生时5061断路器保护动作信号未见异常,5061断路器为合闸状态;

4)5061断路器B相灭弧室未发现动/静触头及瓷套内表面有放电和金属颗粒痕迹;

5)5061断路器B相未发现灭弧室瓷套和支持瓷瓶外绝缘闪络痕迹;

6)故障发生时变电站无操作、无雷电天气、避雷器未动作;

7)5061断路器操动机构未见异常;

8)5061断路器例行试验未见异常;

9)5061 A相返厂试验试验未见异常;

10)5061开关C相绝缘拉杆的完好部分和B相绝缘拉杆烧损部分外侧聚酯/环氧层—芳纶纤维/环氧层之间均存在区域性聚集的气隙,密度约196个/ cm^2 、直径10~400 μm 。

综合分析认为:

1)绝缘拉杆在制造过程中存在内部气隙缺陷,由此引发局部放电并逐渐造成绝缘劣化,最终导致绝缘拉杆击穿、支持瓷瓶损坏。检测表明,绝缘拉杆外层与中间层间绝缘存在区域性聚集的气隙,特别是位于绝缘拉杆上段电场集中区域存在的气隙,在运行中出現局部放电^[23-24];绝缘拉杆树枝状痕迹表明外层与中间层间的局部放电发展至绝缘拉杆表面,并逐渐形成了向下延伸的滑闪放电;当滑闪放电发展至下段,绝缘拉杆承受的电压超出其耐受电压能力时,发生击穿,形成电弧并造成下段绝缘拉杆严

重烧蚀,电弧产生的高温导致上段拉杆炸开,同时气体压力急剧升高造成支持瓷瓶爆裂。

2)不排除制造过程中绝缘拉杆外侧表面与中间层间以及中间层芳纶纤维/环氧层绝缘内部受潮并产生局部放电的可能。

4 结论

1)2013年3月国内某500 kV变电站550 kV断路器C相发生一起同类型故障,故障设备采用和文中相同型号同批次绝缘拉杆组件,两起故障现象基本相同。故障原因初步判定为该断路器绝缘拉杆由于材料和工艺原因存在纤维被污染或集中分布的气泡等质量缺陷,在电场长期作用下造成绝缘劣化,最终发生绝缘拉杆击穿,支持瓷套爆裂。

2)作为一起典型的由于绝缘拉杆引起的550 kV断路器主绝缘故障,文中对于其他同类型事故可以作为参考。目前国内外尚无瓷柱式断路器用绝缘拉杆中存在气隙及气隙数量、大小的检测、判断标准,该类标准由厂家进行控制,笔者认为进一步加快推进相关判断标准的制定和实施十分必要。

参考文献:

- [1] 朱德恒,严璋.高电压绝缘[M].北京:清华大学出版社,1992.
ZHU Deheng, YAN Zhang. High voltage insulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [2] 张红军,王文文,张强.断路器绝缘拉杆的动力学仿真分析与试验研究[J].高压电器,2012,48(10):83-87.
ZHANG Hongjun, WANG Wenwen, ZHANG Qiang. Dynamics simulation analysis and experimental study of circuit-breaker's insulation pull rod[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 83-87.
- [3] 黎斌. SF_6 高压电器设计[M].北京:机械工业出版社,2003.
LI Bin. SF_6 high voltage apparatus design [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [4] 徐国政,张节荣,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breakers [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [5] 张颖瑶,刘志远,耿英三,等.采用全武合金触头材料真空断路器灭弧室的绝缘特性[J].高电压技术,2009,35(8):1914-1919.
ZHANG Yingyao, LIU Zhiyuan, GENG Yingsan, et al. Dielectric performances of vacuum interrupter using a new contact material-quanwu alloy[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1914-1919.

- [6] LIAO Minfu, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Dielectric strength and statistical property of single and triple-break vacuum interrupters in series[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3): 600-605.
- [7] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩. 单断口和三断口串联真空灭弧室绝缘击穿统计特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 97-102.
- LIAO Minfu, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan. Dielectric strength and statistical property of single and triple breaks vacuum interrupters in series[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(12): 97-102.
- [8] 吴高波, 阮江军, 黄道春, 等. 多断口真空断路器均压电容研究综述[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 77-81.
- WU Gaobo, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Review of grading capacitors of multi-break vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 77-81.
- [9] IDE N, TANAKA O, YANABU S, et al. Interruption characteristics of double-break vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 1065-1072.
- [10] SHIBA Y, IDE N, ICHIKAWA H, et al. Withstand voltage characteristics of two series vacuum interrupters [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(4): 879-884.
- [11] 徐文多, 张 伟, 李晓峰. 降低 66 kV 变电所用变压器的局部放[J]. 变压器, 2013, 50(6): 10-13.
- XU Wenduo, ZHANG Wei, LI Xiaofeng. Reduction partial discharge of 66 kV substation transformer[J]. Transformer, 2013, 50(6): 10-13.
- [12] 彭 倩, 聂德鑫, 刘 凡, 等. 特高压换流变压器现场局部放电检测抗干扰技术[J]. 变压器, 2013, 50(7): 50-52.
- PENG Qian, NIE Dexin, LIU Fan, et al. On-site partial discharge test anti-interference technology of UHV converter transformer[J]. Transformer, 2013, 50(7): 50-52.
- [13] DENIS V, LANDRY M, MICHEL R, et al. A 3D calculation method for assessing the voltage distribution across breaks of HV circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 954-959.
- [14] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩, 等. 基于 JPCG 算法的真空灭弧室三维电场有限元计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 108-111.
- LIAO Minfu, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Application of jpeg algorithm in the three dimensional electric field calculation of vacuum interrupters[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(4): 108-111.
- [15] LIAO Minfu, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Application of JPCG algorithm in the three dimensional electric field calculation of vacuum interrupters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 108-111.
- [16] 黄道春, 阮江军, 吴高波, 等. 模块化多断口真空断路器电位和电场分布研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 124-130.
- HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WU Gaobo, et al. Potential and electric field distributions of modular multi-break vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 124-130.
- [17] KATO K, KANEKO S, OKABE S, et al. Optimization technique for electrical insulation design of vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 1456-1463.
- [18] OKAWA M, SHIOIRI T, OKUBO H, et al. Area effect on electrical breakdown of copper and stainless in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 23(1): 77-81.
- [19] 赵永志, 刘克民, 冯争人, 等. 用变频电源完成 1 000 kV 特高压发电机变压器感应耐压及局部放电试验[J]. 变压器, 2013, 50(8): 29-31.
- ZHAO Yongzhi, LIU Kemin, FENG Zhengren, et al. Completion of induced overvoltage withstand test and PD test for 1 000 kV UHV generator transformer with variable-frequency power source[J]. Transformer, 2013, 50(8): 29-31.
- [20] 彭 搏, 肖登明. 断路器电寿命的在线监测[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(12): 38-41.
- PENG Bo, XIAO Dengming. Online monitoring of the breaker's electrical life[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(12): 38-41.
- [21] 张华赢, 杨兰均, 李良书, 等. 投切电容器组专用真空断路器性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 38-44.
- ZHANG Huaying, YANG Lanjun, LI Liangshu, et al. Study on the performance of special vacuum breaker for switching capacitor banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32, 32(3): 38-44.
- [22] KATO K, HAN X, OKUBO H. Insulation optimization by electrode contour modification based on breakdown area/volume effects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 162-167.
- [23] GB 1984—2003 高压交流断路器[S]. 2003.
- GB 1984—2003 High-voltage alternating-current circuit breakers[S]. 2003.
- [24] 党向东. 断路器绝缘拉杆的可靠性验证[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 63-65.
- DANG Xiangdong. The reliability verification of the insulation pull rod in circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 63-65.

王 栋(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事高压开关设备状态评价工作。