

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.032

一起 500 kV 断路器均压电容器故障分析

吴德贯, 周 禹, 黎卫国, 李红元, 许 毅, 夏 辉

(中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 昆明 650217)

摘要: 对某换流站一起 500 kV 断路器均压电容器在断路器分闸时发生放电击穿故障进行分析, 依据现场检查情况、故障录波情况、返厂解体检查情况及相关试验数据, 对均压电容器击穿原因展开判断分析, 并对绝缘筒击穿及碳化的原因进行了探讨。经分析, 该次故障发生的原因因为在断路器分闸的过程中的操作过电压及较大的放电电流引起了均压电容器的击穿; 此外, 对直流站控系统存在的逻辑问题提出了处理意见。针对该故障, 提出改进措施, 以提高设备的运维可靠性。

关键词: 均压电容器; 击穿; 操作过电压; 液电效应; 改进措施

Analysis on a Fault of Grading Capacitor for 500 kV Circuit Breaker

WU Deguan, ZHOU Yu, LI Weiguo, LI Hongyuan, XU Yi, XIA Hui

(Test & Maintenance Center of CSG EHV Transmission Company, Kunming 650217, China)

Abstract: A discharge breakdown fault of grading capacitor of 500 kV circuit breaker in a converter station, which occurred in breaker opening process, is analyzed. According to the field inspection record, the fault waveform record, the recall-checking record and the test data, the cause of the breakdown of grading capacitor, as well as the cause of the breakdown and carbonization of the insulating cylinder, is investigated. The results show that the operating overvoltage and discharge current in the process of breaker opening resulted in the breakdown fault. Some countermeasures against the logical problem in DC station control system are put forward, and some improvement approaches are suggested in order to improve the reliability of operation and maintenance of the electrical equipment.

Key words: grading capacitor; breakdown; operating overvoltage; electro-hydraulic effect; improvement approach

0 引言

断路器均压电容器主要用于并联在工频交流高压断路器的断口上, 起到改善电压分布, 降低恢复电压上升率, 均匀电压的作用。断路器均压电容器作为改善断路器断口间电压分布的元件被广泛应用于提高断路器整体耐压水平, 它的工作可靠性对整个电力系统的安全运行具有非常重要的意义。均压电容器击穿故障情况虽然不多, 但在实际运行中确有发生, 文中既是对一起 500 kV 断路器均压电容器故障进行分析^[1-5]。

1 事件概述

某换流站自调试以来, 发生了 2 起断路器均压

电容器放电故障。在第 1 次故障发生后, 该站对全站 22 组断路器均压电容器(共 132 支)外绝缘伞裙进行检查, 发现每支均压电容器均存在外绝缘棒接不到位而产生缝隙的现象(采用硅橡胶伞裙粘接工艺进行装配, 该工艺为已淘汰的十年前工艺)。故障发生后, 厂家对该类型断路器所有的均压电容器进行了更换, 更换后的电容器在运行过程中又出现了放电击穿故障^[6-12]。

1.1 故障发生时运行状态

故障发生时, 该换流站(同塔双回)处于停运消缺状态, 直流控制系统处于正在升级的过程中, 500 kV 第 1、2、4 大组交流滤波器处于母线检修状态, 500 kV 第 3 大组交流滤波器 582、584 小组滤波器处于检修状态, 581、583、585 交流滤波器处于热备用状态。

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2015-11-21

1.2 事件经过

故障发生前,该站正在进行乙线极一极控系统程序升级工作。17:29:14 该换流站双回协调控制系统 STC 收到乙线直流站控 DDC 上送的乙线极一运行、直流功率 921.8 MW 的信号,导致无功控制功能按绝对最小滤波器投切策略,投入 500 kV 581、583、585 3 组滤波器,故障录波显示该换流站交流母线电压由 534 kV 上升至 552.6 kV,电厂电压由 535 kV 上升至 549 kV,17 时 34 分手动切除 3 组交流滤波器后,电压恢复正常。在断开 500 kV 583 断路器时现场听到异常响声。分析 583 交流滤波器的故障录波图,在切除 583 断路器时,出现一个 4.535 kA 的尖峰电流,故障发生时断路器断口之间的电压最大为 876.8 kV。

1.3 现场检查情况

故障发生后站内对 583 交流滤波器间隔一次设备进行了外观检查,发现故障均压电容器位于 583 断路器 B 相母线侧,见图 1。对故障均压电容器进行检查发现其第 34 片和第 35 片伞裙(共 68 片)有放电痕迹,放电部位存在一个小凹痕,并伴有油状液体渗出,见图 2。



图 1 故障均压电容器位置示意图

Fig. 1 The position of the fault grading capacitor



图 2 故障均压电容器现场检查

Fig. 2 Onsite inspection of the fault grading capacitor

1.4 保护动作情况分析

事故发生时,该站乙线极一极控系统正在开展程序升级,在 B 套系统升级后,开始升级 A 套系统,并将 A 套系统切换为试验状态,但当时 B 套系统存在异常,无法自动切换为值班状态,于是出现两套极

控系统均不在值班状态的情况。

根据厂家控制逻辑设置,当无值班的极控系统时,直流站控系统直接采用先退出值班系统(极控系统 B)的 CAN 网数据;由于系统 B 在前次退出值班状态后就未更新 CAN 网数据,直流站控实际接收的是极控系统该历史时刻数据(乙线极一运行、直流功率 921.8 MW)。

针对该逻辑问题,对该换流站站控系统程序进行升级,将无值班极控系统时数据选取逻辑改为后退出值班系统数据,防止此次误投交流滤波器问题再次发生。

2 返厂解体检查情况

故障发生后,为了查明故障发生的原因,对故障均压电容器进行了返厂解体检查分析工作^[6-12]。

2.1 外观检查

对故障均压电容器进行外观检查,发现第 34 片和第 35 片伞裙之间(共 68 片)绝缘伞群棒接处存在一个小凹痕,用手触摸,有油状液体渗出,与在站内检查结果一致,见图 3。

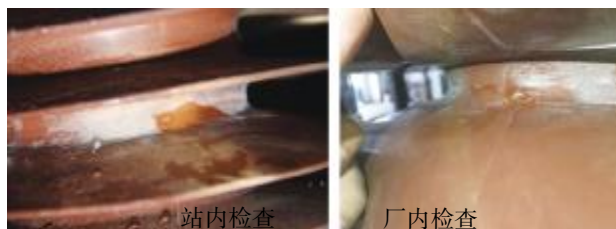


图 3 外观检查

Fig. 3 Visual inspection

2.2 电气性能试验

为进一步检查电容器的电气性能,分别对两只电容器进行了介损和电容量测试、工频耐压试验、耐压后的介损和电容量测试,试验结果合格,电气性能试验^[13-14]数据见表 1。表 1 中的工频耐压试验要求值为 470 kV,1 min,而试验结果为 480 kV,1 min。

表 1 故障均压电容器厂内试验数据

Table 1 Test date of the fault grading capacitor in the factory

试验项目		试验结果	要求值
电容量/pF	耐压前	1 990.000 0	2 000.0×
	耐压后	2 001.000 0	(1±2%)
介损/%	耐压前	0.097 6	0.2
	耐压后	0.007 1	

2.3 解体检查

对故障均压电容器进行解体检查^[15-16]。

2.3.1 结构简介

故障电容器外绝缘材料为硅橡胶,采用分段式

整体硫化工艺注压成形; 主绝缘为环氧树脂玻璃纤维筒(绝缘筒), 厚度为 1 cm; 绝缘筒内充绝缘油; 电容元件为膜纸复合介质, 采用两膜一纸的搭配方式进行卷绕, 再压成扁平状原件; 电容心体由 200 个电容原件按照设计要求串并联组成, 置于绝缘油中, 每片电容约为 $0.4 \mu\text{F}$, 串联后的电容为 $2\,000 \mu\text{F}$ 。

2.3.2 放电点检查

对放电凹痕处的硅橡胶进行切割, 发现硅橡胶上存在明显的放电通道(孔洞), 见图 4; 绝缘筒上有明显的电弧烧蚀变黑痕迹并有油渗出, 见图 5、6。



(a) 硅橡胶上的放电孔洞(外) (b) 硅橡胶上的放电孔洞(内)

图 4 硅橡胶绝缘子上的放电孔洞

Fig. 4 Discharge channel of silicon rubber insulator

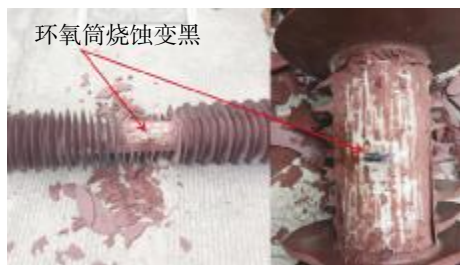


图 5 绝缘筒上的放电痕迹

Fig. 5 Discharge trace of the insulating clingers

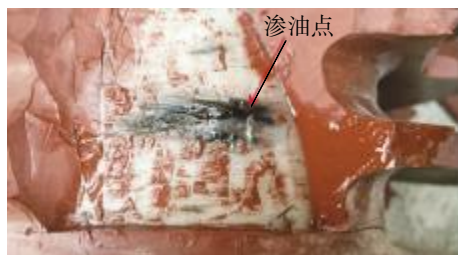


图 6 绝缘筒放电点渗油情况

Fig. 6 Oil leakage condition of the discharge location

2.3.3 抽心检查

将故障电容器放油后进行抽心检查, 取出电容器心子检查其所对应放电位置情况, 发现放电位置电容心子处的包封纸有明显的碳化, 放电处薄膜颜色较其他位置深, 见图 7, 电容器内部其他地方没有放电痕迹。

2.3.4 电容单元电容量测量

选取故障点处和故障点两侧的电容单元分别测量其电容值为 0.404 、 0.399 (故障点处)、 $0.410 \mu\text{F}$, 测量值符合单个电容单元电容控制值要求, 未见异常。

正常电容单元 故障点处电容单元 包封纸碳化痕迹



图 7 均压电容器抽心检查情况

Fig. 7 Core-pulling inspection of the grading capacitor

3 故障原因分析

3.1 均压电容器击穿原因

从均压电容器解体观察, 均压电容器存在漏油现象, 解体后发现均压电容器内部绝缘筒已经击穿, 绝缘筒外表面有碳化现象。

当均压电容器承受超过电容器的工频额定电压时(如断路器分合闸的操作过电压), 高压强电场通过电容器油, 巨大的能量瞬间释放于放电通道内, 通道中电容器油迅速汽化、膨胀, 导致在均压电容器内部最薄弱处击穿, 同时瞬间释放出较高的能量, 损伤周围的零部件(液电效应)^[17]。当能量较少时, 膨胀能量击穿均压电容器绝缘筒并导致喷油, 但电容器单元绝缘在较少电能量波及下迅速恢复(该次故障均压电容器情况与此种情况相符); 当能量较大时, 电能量将电容器单元击穿, 同时将均压电容器绝缘筒击穿并喷油。

均压电容器为复合绝缘子油电容器, 在故障状态实际为等容变化, 复合绝缘子与瓷质套管相比, 扰度较大。两端固定水平安装, 当均压电容器发生击穿放电时, 由于等容积结构, 两端固定, 薄弱环节势必在中间, 故发生击穿点一般在均压电容器中部左右, 与故障均压电容器现象相符。

3.2 绝缘筒击穿及碳化原因

按照相关标准^[18]对绝缘筒测试项目包括内压力试验、弯曲试验、干耐受电压、局部放电、爬距测量, 并未对绝缘筒开展轴向和径向电气性能测试。按照相关标准^[19-20]开展绝缘筒电气、机械特性测试。

从均压电容器解体结果可知, 绝缘筒均存在击穿及碳化现象, 造成这种现象的原因可能有两方面:

1) 绝缘筒采用玻璃纤维与环氧树脂混合而成, 玻璃纤维属脆性材质, 采用模压工艺时, 由于工艺控制不当, 如模压过程中残留热力过大或受热不均匀, 导致绝缘筒内部存在砂眼线隙等缺陷, 在断路器操作过电压下出现击穿故障。

2)绝缘筒中纤维与环氧树脂混合材料中若混有金属杂质,当出现超过电容器的工频额定电压时(如断路器分合闸的操作过电压),极易发生电气击穿,且碳化迹象严重。

4 结论

根据上述分析,该次断路器并联电容器爆炸故障的原因是在583断路器断开的过程中产生了一个876.8 kV的操作过电压,在高压强电场作用下,电极间形成放电通道,由于放电电阻很小,产生了较大的放电电流(4.535 kA)。放电电流加热绝缘筒内电容器油,使油汽化并迅速向外膨胀,导致均压电容器击穿。但由于放电能量不足以对电容单元绝缘造成破坏,所以故障均压电容器返厂电气性能试验合格。

为了确保设备安全稳定运行,针对该次故障提出以下改进措施:

1)进行绝缘筒试验。鉴于该型号均压电容器使用的绝缘筒未进行轴向和径向电气性能测试,应抽取相同生产线、相同工艺流程的绝缘筒进行试验,以确定其性能是否符合技术要求。

2)加强运行巡视。采用紫外成像仪对运行中交流滤波器全部断路器均压电容器进行电晕扫描,及早发现均压电容器缺陷。

3)更换均压电容器。为了彻底解决断路器均压电容器故障的问题,建议制定相应的停电计划,将该复合绝缘子均压电容器更换为网内有着大量运行经验、技术更为成熟的瓷瓶式均压电容器。

参考文献:

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 张明新. 断路器用的均压电容器若干设计问题的探讨[J]. 高压电器,1983,19(6):43-49.
ZHANG Mingxin. Discussion of several design issues of grading capacitor for circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,1983,19(6):43-49.
- [3] 王会涛. 断路器均压电容器测试方法[J]. 云南电力技术,2010,38(5):67-70.
WANG Huitao. Testing method of circuit breaker grading capacitor[J]. Yunnan Electric Power,2010,38(5):67-70.
- [4] 李述冰. 高压断路器均压电容的作用与改进措施[J]. 东北电力技术,2000(11):19-22.
LI Shubing. The functions and improvement measures of equalization condenser of high-tension circuit breakers[J]. Northeast Electric Power Technology,2000(11):19-22.
- [5] 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.
- [6] 孙鹏举,吕洪明. 高压断路器断口均压电容器介质损失角增大原因分析及解决措施[J]. 高压电器,2009,45(2):97-98.
SUN Pengju,LYU Hongming. Analysis of grading capacitor $\tan\delta$ expansion for high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(2):97-98.
- [7] 周莉,童雪芳,文习山,等. 断路器均压电容爆炸原因的仿真分析与研究[J]. 高电压技术,2005,31(9):34-37.
ZHOU Li,TONG Xuefang,WEN Xishan,et al. Simulation analysis of the reason for the explosion of the breaker grading capacitor[J]. High Voltage Engineering,2005,31(9):34-37.
- [8] 孙强. 一起800 kV断路器绝缘故障的原因分析[J]. 高压电器,2009,45(2):132-134.
SUN Qiang. Analysis of insulation accident of 800 kV circuit-breaker in guanting transformer substation[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(2):132-134.
- [9] 唐世宇,孙渝江. 500 kV开关均压电容爆炸事故分析[J]. 高压电器,2005,41(3):231-233.
TANG Shiyu,SUN Yujiang. Accident analysis of grading capacitance explosion in 500 kV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(3):231-233.
- [10] 杨洋,许强,陈安明,等. 某500 kV断路器均压电容器检修试验的安全事故分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2011(6):77-79.
YANG Yang,XU Qiang,CHEN Anming,et al. Accident analysis on grading capacitor of 500 kV circuit breaker in maintenance and test[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2011(6):77-79.
- [11] 彭翔,陈禾,夏谷林,等. 均压电容器介损现场试验的改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(3):50-53.
PENG Xiang,CHEN He,XIA Gulin,et al. Improvement on dielectric loss site measurement of grading capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2011,32(3):50-53.
- [12] 陈锐,王书友,张德广. 110 kV和220 kV变压器中性点过电压及保护分析[J]. 变压器,2013,50(1):33-35.
CHEN Rui,WANG Shuyou,ZHANG Deguang. Overvoltage of 110,220 kV transformer neutral point and its protection analysis[J]. Transformer,2013,50(1):33-35.
- [13] GB/T 4787—2010 高压交流断路器用均压电容器[S]. 2010.
2010 GB/T 4787—2010 Grading capacitor for high-voltage alternating current circuit-breakers[S]. 2010
- [14] Q/CSG 114002—2011 电力设备预防性试验规程[S]. 北

- 京:中国电力出版社,2011.
- Q/CSG 114002—2011 Preventive test code for electrical equipment[S]. Beijing: China Electric Power Press,2011.
- [15] 陈永真,李 锦.电容器手册[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [16] 郭志红,逯怀东,王保利,等.500 kV 断路器并联电容外绝缘击穿几率的分析[J]. 高电压技术,2009,35(10): 2383-2389.
- GUO Zhihong,LU Huaidong,WANG Baoli,et al. Analysis of the breakdown probability of the external insulation for 500 kV breaker's shunt capacitance[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10): 2383-2389.
- [17] 王 兵.液电效应及其应用[J]. 科技创新导报,2009(22): 52-53.
- WANG Bing. Liquid-electric effect and its application[J]. Science and Technology Innovation Herald,2009(22): 52-53.
- [18] GB/T 21429—2008 户外和户内电气设备用空心复合绝缘子定义、试验方法、接收准则和设计推荐[S].2008
- GB/T 21429—2008.Composite insulators.Hollow insulators for use in outdoor and indoor electrical equipment.Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendations[S].2008
- [19] GB/T 1408.1—2006 固体绝缘材料电气强度试验方法工频下的试验[S].2006
- GB/T1408.1—2006 Methods of test for electric strength of solid insulating materials Tests at power frequencies [S]. 2006
- [20] DL/T 376—2010 复合绝缘子用硅橡胶绝缘材料[S]. 2010.
- DL/T 376—2010 General technical requirements of silicone rubber insulation materials for composite insulators [S].2010.
- 吴德贯(1987—),男,助理工程师,本科,研究方向为高电压试验技术。