

集合式电容器套管接头发热缺陷分析与改进措施

郑振峰, 陈上义, 陈承相, 李萌锋, 卢清棋, 李瑞红
(国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000)

摘要: 集合式电容器作为变电站内重要的无功补偿设备,其本体发热缺陷严重影响了电网的安全平稳运行。本文对一种集合式电容器套管接头典型发热缺陷进行解体检查,发现套管接头结构设计存在多处不合理,如套管法兰凹槽浸水,铝质防雨罩参与一次通流,与套管法兰及导流螺杆接触不良,长期通流造成接触面严重氧化,导致套管接头发热。针对此类发热缺陷,本文提出了有效的防范措施和日常检修建议,以提高电网无功系统的可靠性和安全性。

关键词: 集合式电容器; 套管接头; 发热缺陷

Analysis and Improvement Measures of Heating Defect in Bushing Joint of Assembling Capacitor

ZHENG Zhenfeng, CHEN Shangyi, CHEN Chengxiang, LI Mengfeng, LU Qingqi, LI Ruihong
(Quanzhou Power Supply Company of Fujian Electric Power Co., Ltd.,
Fujian Quanzhou 362000, China)

Abstract: The assembling capacitor is an important reactive power compensation equipment in substation and its heating defects seriously affect safe and stable operation of the power grid. In this paper, a disassembly inspection on a typical heating defect in the bushing joint of assembling capacitor is conducted. It is found that there are a few unreasonable designs in structural design of the bushing joint, such as water immersion in the groove of bushing flange, primary involvement of aluminum rain cover, weak contact with bushing flange and guiding screws, serious oxidization of contacting surface due to long term flow, leading heating of bushing joint. As for such heating defect, the effective preventive measures and daily maintenance and suggestions are proposed in this paper so to improve reliability and safety of the reactive system of the power grid.

Keywords: assembling capacitor; bushing joint; heating defect

0 引言

并联电容器是变电站中重要的无功补偿设备,具有提高功率因数、改善电能质量、降低线路损耗等作用,对电网的安全稳定运行有着重要意义^[1-6]。并联电容器按结构形式可分为框架式、集合式和箱式等^[7],其中集合式电容器箱体内充注绝缘和传热的液体或气体介质,在有限的容积内可“集合”一个及以上的电容器单元,具有单台容量大、安装方便、日常维护简单、占地面积小、引出套管数量少、耐污秽等特点^[8-13]。

据统计,泉州地区集合式电容器本体发热缺陷占本体总缺陷的 69.7%,其中 43.3% 的本体发热缺陷为套管接头处发热。电容器本体接头发热将加速套管导电杆处的密封圈老化,易造成套管顶部渗漏油,破

坏本体密封,进而引发电容器内部受潮、闪络等绝缘事故^[14-18],对电力系统的安全稳定运行构成严重威胁,因此对该类设备缺陷成因展开分析具有重要意义。

本文对集合式电容器套管接头发热缺陷展开调查,通过对套管接头的解体检查综合研判了缺陷原因,并提出了相应的技术改进措施,为同类型产品的检修维护提供经验借鉴。

1 缺陷简况

2023 年 6 月 18 日,运维人员对迎峰度夏期间的高负荷变电站开展特殊巡视,通过红外测温发现 35 kV 某变电站 10 kV 电容器 II 组 672 本体靠电抗器侧 C 相套管接头发热 76.8℃,其中 A 相 38.6℃,B 相 38.1℃,环境温度 30.4℃,负荷电流 112.9 A,如图 1

所示。该电容器型号为 BAMX-11/ $\sqrt{3}$ -2100-3 W, 自 2012 年 12 月 10 日投运以来,首次出现此类套管接头发热缺陷。

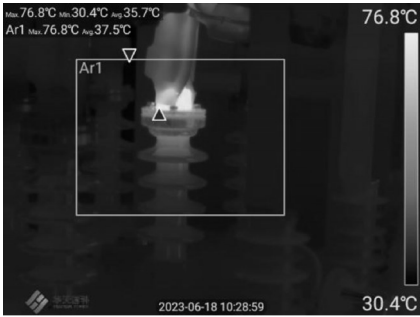


图 1 10 kV 电容器 II 组 672 本体套管接头发热红外图谱
Fig. 1 Infrared spectrum of bushing joint of 10 kV capacitor group II 672

2023 年 4 月 27 日,运维人员对 110 kV 某变电站(距离上述 35 kV 变电站 10 km)开展定期巡视,通过红外测温发现 10 kV 电容器 I 组 671 本体靠电抗器侧 C 相套管接头发热 53.2 °C,其中 A 相 30.4 °C, B 相 31.1 °C,环境温度 22.3 °C,如图 2 所示。该电容器型号为 BAMX-11/ $\sqrt{3}$ -4800-3W,自 2009 年 11 月 17 日投运以来,也系首次出现此类套管接头发热缺陷。



图 2 10 kV 电容器 I 组 671 本体套管接头发热红外图谱
Fig. 2 Infrared spectrum of bushing joint of 10 kV capacitor group I 671

2 现场检查情况

因上述两起发热缺陷的电容器本体结构型式、制造厂商及发热部位均一致,故本文以 35 kV 变电站 10 kV 电容器 II 组 672 本体作为论述对象,并将其简称电容器。

该型号电容器通过螺杆导流,为保证其在户外环境下的密封可靠性,制造厂在套管螺杆引出处装设有防雨罩,现场拆除电容器组发热相的一次线夹、过渡螺母及防雨罩后,套管接头部分的结构见图 3。防雨罩底部端面、内表面及螺杆接触面均可见明显的白色氧化层,结合图 1 所示的套管接头发热红外图谱,可判断此次电容器发热的主体部件为

套管接头防雨罩。
防雨罩穿杆处设计与一次导流螺杆相匹配的螺纹,为防止防雨罩内积水,其底部四周加工有 4 个半圆形排水孔;同时,电容器套管法兰上设计与防雨罩外形尺寸相匹配的凹槽,用于防雨罩的定位安装。

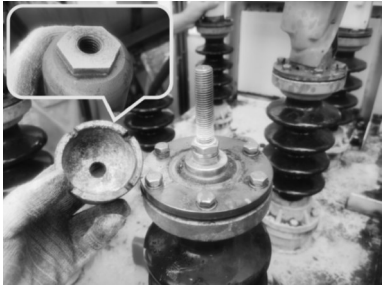


图 3 电容器套管接头
Fig. 3 Bushing joint of capacitor

3 缺陷原因分析

该型号电容器在套管接头装设防雨罩是为了避免外部雨水对密封圈的侵蚀,防止因密封圈老化雨水渗入油箱后引发电容器的内部绝缘故障。从产品设计角度考虑,套管接头防雨罩无需参与一次导流,套管引出螺杆已满足电容器额定载流量下的最小导体截面积要求,但从上述发热图谱及现场解体检修情况来看,防雨罩实际上对一次电流进行了分流。

电容器套管接头结构见图 4,当防雨罩参与一次导流时,电流从下往上先后通过螺杆、套管法兰、防雨罩、螺杆(或过渡螺母)、线夹,与防雨罩导流相关的接触面有 3 个:1)套管法兰接触面;2)螺杆接触面;3)过渡螺母接触面。若在上述接触面中存在有接触不良的情况,防雨罩则会出现发热现象。

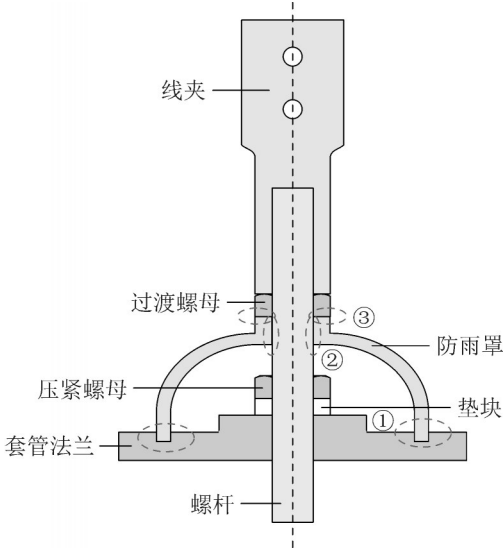


图 4 电容器套管接头结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of bushing joint of capacitor

1) 套管法兰接触面

如图3所示,电容器套管接头防雨罩的底部圆环端面覆盖了一层乳白色的氧化物,防雨罩与套管法兰间存在接触不良的现象。究其原因,防雨罩为铝材质,其标准电极电位为 -1.66 V ,而套管法兰的镀层锌的标准电极电位为 -0.76 V ,两者天然存在电位差^[19];再者,防雨罩底部的排水孔虽能有效避免套管接头大量积水,但套管法兰上的凹槽仍存有少量雨水无法排出,其接触面在水分、二氧化碳和其他杂质的作用下易诱发电化学腐蚀^[20-22],从而造成两者连接处的接触电阻增大。

2) 螺杆接触面

从电容器套管接头解体后的现场照片可以发现,在压紧螺母上方 $2\sim 3\text{ cm}$ 的螺牙处嵌满了白色粉状物,通过与解体前的套管接头进行位置比对,得知该部位正好是防雨罩与导流螺杆的接触面。根据白色粉状物的填充量判断,在设备安装初期导流螺杆与防雨罩啮合不是十分严密;由于啮合压力不足,实际载流面积偏小,随着电容器负荷的增大,两者的螺纹接触处易产生温度升高的情况,使螺纹表面氧化加速,接触电阻变大^[23]。

3) 过渡螺母接触面

防雨罩上与过渡螺母的接触面仅在局部发生氧化现象,整体未见有明显的氧化层,其主要原因分析如下:①对于整个电容器套管接头,防雨罩相当于一个分支电流节点,假设套管法兰面为分支电流的流入点,螺杆接触面和过渡螺母接触面则为分支电流的流出点,过渡螺母接触面的实际通流值小于套管法兰面;②防雨罩与过渡螺母通过平面接触,且连接处四周不存在凹槽结构,不易发生积水,其运行环境优于套管法兰面,电化学腐蚀相较不明显。

综上所述,电容器套管接头防雨罩参与一次导流,且防雨罩与套管法兰及导流螺杆接触不良是此次电容器套管接头发热的直接原因。

4 现场处理措施

通过上述缺陷原因分析可知,对防雨罩与套管法兰及导流螺杆的接触面进行氧化物清除便可直接消除此次防雨罩发热缺陷;但受限于电容器的设计制造缺陷(套管法兰与防雨罩通过凹槽面接触、防雨罩内螺纹与导流螺杆外螺纹配合公差大),若仅简单地清理其接触面的氧化物,该设备往后运行10年仍大概率会发生同样的发热缺陷^[24]。

为彻底消除发热缺陷,只有隔断防雨罩的一次

导流通路。已知电容器套管的引出螺杆满足额定电流下的最小导体截面积要求,故防雨罩不参与一次导流并不影响电容器的持续稳定运行。相应的改进措施有以下2种可选方案:

1)在防雨罩安装时,要求防雨罩与套管法兰及过渡螺母间留有空气间隙,使防雨罩处于“悬空”状态,仅通过螺杆接触面进行等电位电气连接。此方案可有效隔断防雨罩的一次导流通路,但由于套管引出螺杆长度固定,稍大的预留空气间隙将会减小线夹与螺杆的实际有效接触面积;再者,“悬空”状态的防雨罩不利于过渡螺母及线夹的紧固安装,在电容器振动运行下易发生松动;

2)在防雨罩与套管法兰及过渡螺母间加装薄层的耐腐蚀绝缘垫片。此方案虽需要增加额外的检修材料,但却能有效避免方案1的改造问题。

此次发热缺陷处理采用了更适合现场的第2种方案。

5 现场处理效果

2023年7月3日,检修人员对防雨罩与套管法兰及导流螺杆的接触面进行氧化物清除,并按照上述第2种方案,在防雨罩的上下两个端面分别加装了薄层的耐腐蚀绝缘垫片。处理之后电容器送电运行1 h,重新进行红外测温发现,原本发热相套管接头处的最高温度降至 $34.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,相间最高温差 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,证明本次处理措施可行有效。

6 结语

此次集合式电容器套管接头发热的主要原因为套管接头结构设计不合理,套管法兰凹槽浸水,铝质防雨罩参与一次通流,两者的接触面在环境水分、空气及杂质的作用下发生电化学腐蚀;另外防雨罩作为辅助保护部件,主要用于防护套管接头处密封圈不受外界雨水的侵蚀,生产厂商忽略了其制造加工精度,导致防雨罩内螺纹与导流杆外螺纹的配合公差偏大,长期通流后螺纹表面严重氧化,进而引发套管接头发热。为避免此类缺陷再次发生,提高设备运行可靠性,提出如下几点建议:

1)制造厂商在设备出厂装配阶段应在防雨罩与套管法兰及过渡螺母间加装耐腐蚀绝缘垫片;或规范防雨罩的固定安装方式,使其“悬空”单点等电位,隔断防雨罩的一次通流路径;

2)结合设备停电例检,检修人员应重点检查防雨罩各导流接触面的氧化情况,使用砂纸打磨、酒精擦拭后接触面应清洁平整、无砂纸粒、无金属粉

末,并涂以薄层导电膏^[25-26];

3)全面梳理相同结构型式、历史发生过套管部位渗漏油的集合式电容器,若运行年限超10年,且近1年未曾停电例检的,建议运行人员缩短红外精确测温周期,以便及时发现同类型套管接头发热缺陷并处理;

4)对于运行年限超10年且近3年未曾停电例检的同类型集合式电容器,建议缩短检修周期,按照上述整改措施和检修工艺及开展健康体检,消除设备发热隐患。

参考文献

- [1] 祖树涛,张宁,李光,等. 35 kV 电容无功补偿装置发热缺陷分析及对策[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(4): 62-66.
ZU Shutao, ZHANG Ning, LI Guang, et al. Heating analysis and countermeasures on 35 kV reactive power compensation installation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(4): 62-66.
- [2] 范国柱,罗微. 35 kV 干式并联电抗器T形双导线局部发热改造[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(6): 83-86.
FAN Guozhu, LUO Wei. Local heating modification on T-shaped double conductor of 35 kV dry-type shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 83-86.
- [3] 徐鹏,薛帅,杨斌,等. 一起油浸式并联电抗器总烃异常问题分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(1): 63-67.
XU Peng, XUE Shuai, YANG Bin, et al. Analysis of abnormal total hydrocarbon in oil immersed shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 63-67.
- [4] 徐鹏,甘强,谭婷月. 一起35 kV 油浸式并联电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(6): 76-80.
XU Peng, GAN Qiang, TAN Tingyue. Fault analysis of 35 kV oil immersed shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 76-80.
- [5] 廖斌,梁晨,陈松,等. 一起35 kV 并联电容器装置故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(5): 1-6.
LIAO Bin, LIANG Chen, CHEN Song, et al. Fault analysis on 35 kV shunt capacitor device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 1-6.
- [6] 尚观远. 高压并联电容器投切特征分析及状态监测传感器设计[D]. 北京:华北电力大学,2022.
- [7] 宋森. 电力行业电力电容器标准化技术委员会. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [8] 倪学锋. 集合式电容器的发展及方向[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(2): 5-7.
NI Xuefeng. Development and its trend of assembling capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 5-7.
- [9] 张波,陈水耀,邹晖,等. 35 kV 集合式电容器保护动作原因分析及整改措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(2): 38-41.
ZHANG Bo, CHEN Shuiyao, ZOU Hui, et al. Analysis of protective action cause and improvement measures for 35 kV assembled capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 38-41.
- [10] 刘水平. 集合式电容器的发展与改进[J]. 电力电容器与无功补偿,2006(1): 1-4.
LIU Shuiping. Development and improvement of assembling capacitor[J]. Power Capacitor, 2006(1): 1-4.
- [11] 朱云. 浅谈集合式电容器在变电站的应用[J]. 江西电力,2005,29(1): 22-25.
ZHU Yun. Simply discussion on application of aggregate type capacitor on substation[J]. Jiangxi Electric Power, 2005, 29(1): 22-25.
- [12] 王永斌,梁红,王耀. 66 kV 大容量集合式电容器在500 kV 变电站的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(5): 44-51.
WANG Yongbin, LIANG Hong, WANG Yao. Application of 66 kV high power integrated capacitor in 500 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5): 44-51.
- [13] 刘文,秦小荣,李萍,等. 一种紧凑型集合式并联电容器装置研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(1): 7-12.
LIU Wen, QIN Xiaorong, LI Ping, et al. A kind of compact integrated shunt capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 7-12.
- [14] 黎卫国,张长虹,杨旭,等. 500 kV 断路器用均压电容器渗漏油故障分析及改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(2): 53-58.
LI Weiguo, ZHANG Changhong, YANG Xu, et al. Fault of oil leakage and improvement measures of grading capacitor for 500 kV circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 53-58.
- [15] 汪力,曾湘隆,唐娟,等. 电力电容器故障统计分析[J]. 电工技术,2019(9): 88-89.
WANG Li, ZENG Xianglong, TANG Juan, et al. Fault statistical analysis of power capacitor[J]. Electric Engineering, 2019(9): 88-89.
- [16] 姜胜宝,倪学锋,林浩,等. 高压电容器极间绝缘耐潮湿性能的试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1): 46-48.
JIANG Shengbao, NI Xuefeng, LIN Hao, et al. Test study on moisture resistance performance between poles of high voltage capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 46-48.

- [17]钟锦群. 集合式电容器的缺陷分析处理[J]. 广东输电与变电技术, 2004(2):43-44.
ZHONG Jinqun. Analyze/deal the objection of aggregative-type capacitor[J]. Guangdong Power Transmission and Substation Technology, 2004(2):43-44.
- [18]王振河, 陈天, 咸日常, 等. 电力电容器常见故障分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2):42-46.
WANG Zhenhe, CHEN Tian, XIAN Richang, et al. Analysis of common faults and preventive measures for power capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2):42-46.
- [19]张天胜. 缓蚀剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [20]张小平, 刘小波, 苏文字, 等. 电容器组连接件发热故障分析及解决措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5):16-20.
ZHANG Xiaoping, LIU Xiaobo, SU Wenyu, et al. Heat fault analysis and solution on capacitor connections banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(5):16-20.
- [21]檀英辉, 金海望, 李振动, 等. 变电站电容器组连接处发热的处理与改进[J]. 电气技术, 2017(6):123-127.
TAN Yinghui, JIN Haiwang, LI Zhendong, et al. The treatment and improvement of connection point heating of the transformer substation capacitor group[J]. Electrical Engineering, 2017(6):123-127.
- [22]刘强, 梁清云. 电容器连接件过热试验研究[J]. 电工电气, 2016(6):44-46.
LIU Qiang, LIANG Qingyun. Experimental study of overheating on capacitor fittings[J]. Electrotechnics Electric, 2016(6):44-46.
- [23]王肃朝, 白宏伟, 刘玉超. 电力电容器常见故障分析及预防研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(3):112-115.
WANG Suchao, BAI Hongwei, LIU Yuchao. Research on common faults, causes and preventive measures of power capacitor[J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(3):112-115.
- [24]马勇, 范忠, 张照辉, 等. 江苏电力电容器缺陷统计分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3):16-20.
MA Yong, FAN Zhong, ZHANG Zhaohui, et al. Statistical analysis of capacitor defects in Jiangsu electric power company[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3):16-20.
- [25]李积捷, 郑晓婷. 变电站 10 kV 并联电容器发热故障分析及防范措施[J]. 电力学报, 2012, 27(5):481-483.
LI Jijie, ZHENG Xiaoting. Heating fault analysis and prevention measures for 10 kV shunt capacitor of substations[J]. Journal of Electric Power, 2012, 27(5):481-483.
- [26]胡帅, 马涛, 王辉. 电容器组连接件过热的模拟试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1):80-83.
HU Shuai, MA Tao, WANG Hui. Simulation test study on overheating of connection elements of capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1):80-83.

作者简介:

郑振峰(1992—), 男, 工程师, 主要从事变电一次设备检修工作。E-mail:xiangshu124@163.com。

陈上义(1995—), 男, 助理工程师, 主要从事变电一次设备检修工作。

陈承相(1995—), 男, 助理工程师, 主要从事变电一次设备检修工作。

李萌锋(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事变电一次设备检修工作。

卢清棋(2000—), 男, 主要从事变电一次设备检修工作。

李瑞红(2000—), 女, 主要从事电气试验化验工作。