

750 kV 套管缺陷导致变压器突发故障问题的分析与建议

李 伟¹, 王 建², 罗文华², 公多虎², 石 倩², 丁 扬²

(1. 贵州理工学院电气工程学院, 贵阳 550003; 2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 电力设备缺陷直接威胁电网运行安全, 文中通过对新疆 750 kV 变压器故障的 DGA 数据进行分析 and 故障诊断, 并结合变压器解体检查证实诊断结论, 再从套管结构分析探索 and 发现该设备的结构设计缺陷, 确定诱发故障的真实原因并提出有效的消缺措施建议。

关键词: 电力设备; DGA 数据; 结构分析; 设计缺陷; 消缺措施

Analysis and Suggestion to Unexpected Fault Problem Resulted from 750 kV Bushing Defect in Transformer

LI Wei¹, WANG Jian², LUO Wenhua², GONG Duohu², SHI Qian², DING Yang²

(1. Electrical Engineering College, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Company Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China)

Abstract: Electric equipment defects directly threaten the running safety of power grid, and DGA data in this paper are analyzed and diagnosed to the faults happened in Xinjiang 750 kV transformer. Associated with the factory check the conclusion is validated, and the bushing design defect is explored and found from the structure analysis of this bushing to decide the real reason induced the fault in transformer, while the efficacious suggestion to de-defect way is proposed.

Key words: electric equipment; DGA data; structure analysis; design defect; de-defect way

0 引言

随着国家能源战略布局转移, 新疆已定位为中国重要的能源输送基地, 以其丰富的化石能源及风电和光伏新能源为主的混合生产和外送格局雏形显现并快速发展, 构建了以 750 kV 电压等级为骨干网架的超/特高压交直流混联电网, 将发展成为以 750 kV 网架为纽带、以 750、±800、±1 100 kV 电压等级“疆电外送”能源通道的送端系统, 占据中国能源跨区域输送的重要位置, 因而保障 750 kV 电力设备安全运行至关重要。

变压器作为电网输变电设备分布中的核心元件, 其健康状态直接决定着电网的运行效率^[1]。在通常的设备运检思维观念中, 几乎都集中重点监护变压器本体运行状态, 从在线监测到带电检测的工作方法, 从溶解气体分析(DGA)故障检测法、超声/特高

频法到离线的绕组变形法、短路阻抗法等故障诊断的检测技术, 围绕变压器的状态检修一直活跃在生产领域和学术领域^[2-8]。然而, 针对变压器高压套管开展的状态检测和状态评价工作却较少, 高压套管承担着变压器本体与外部线路间连接和绝缘的重要任务, 对高压套管的重视程度不够势必会带来对变压器正常工作的潜伏性威胁, 因此, 有必要对高压套管开展运维研究^[9-17]。

文中通过新疆 750 kV 乌北变电站 500 MW 单相变压器事故, 分析其故障原因, 剖析套管结构, 找出导致这次大事故的真实根源, 对丰富变压器故障原因分析视角、指导套管制造商产品设计和消缺具有重要价值。

1 事件回顾

2014 年 4 月 16 日晚 22 点 55 分, 新疆电网 750 kV 乌北变电站 1 号主变 C 相变压器 (ODFPS-

收稿日期: 2015-11-17; 修回日期: 2015-12-20

基金项目: 国家电网公司 2013 年科技资助项目 (5230DK14000H)。

Project Supported by State Grid 2013 Research Project (5230DK14000H).

500 000 kVA/750 kV)发生故障跳闸。事故前,2号主变处于检修状态,乌昌电网与西北主网通过2号主变单点联络,1号主变跳闸导致乌昌电网与西北主网解列,经过约18 s后,乌昌孤网频率降至最低48.96 Hz,

乌昌电网损失负荷约24.82万kW,见图1。该设备故障发生,直接导致重大的社会影响和巨大的经济损失,主变返厂检修,影响恶劣,构成《国家电网公司安全事故调查规程》规定的五级电网事件。

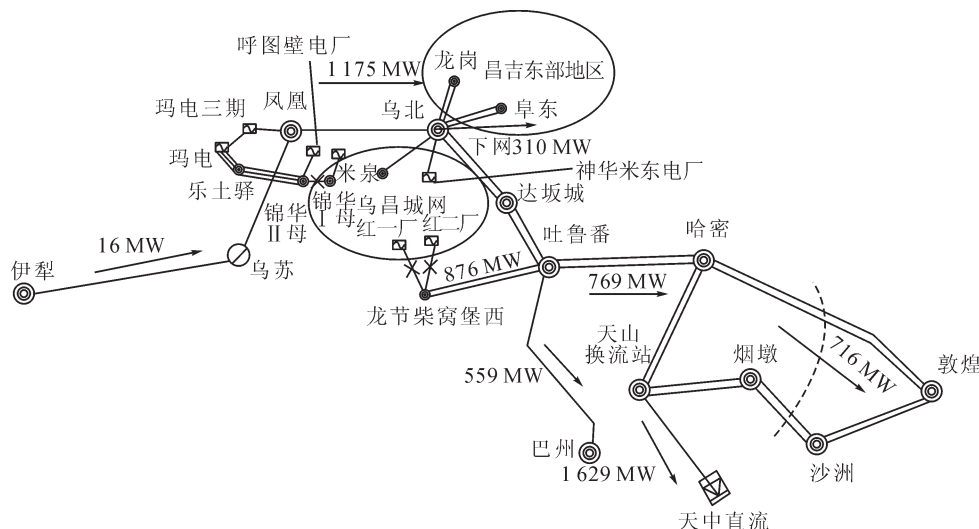


图 1 故障时电网主要断面运行图

Fig. 1 Working way of main grid section on occurrence

2 变压器故障诊断

2.1 油色谱特征气体分析

事件发生后,分析生产管理系统(PMS)中在线监测数据见图2。很显然,故障时间点特征气体量骤增,在4月17日达到最大值,数据显示时间滞后主要为在线监测数据分析延迟及数据上传推送设置(4 h)所致。在4月16日前特征气体数据值几乎为零或很低,均未超过标准要求值,设备运行状态正常,无故障发生预兆。从事故发生后特征气体含量陡增推断设备故障产生为突发情形,不存在特征气体异常发展过程,不能通过在线监测或带电检测手段提前检测到该设备的异常信号,从而不能进行动态的状态评价。因此,该故障发生突然,防不胜防,设备状态检修策略失效。

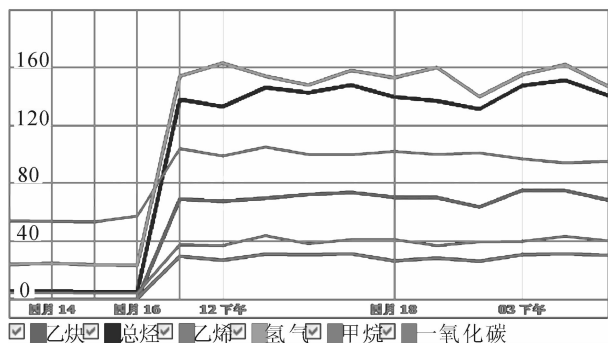


图 2 特征气体在线监测数据曲线

Fig. 2 Online monitoring data curves of characteristic gases

获取故障后油色谱特征气体量,其中主要几个分析数据见表1(时间为2014-04-17T10:14:22)。根据《变压器油中溶解气体分析和判断导则》DL/T 722—2000进行故障判断,故障编码为“201”,故障类型判断为低能放电;采用大卫三角形法判断,故障判断点(☆)落在黑色区域,见图3,判断结果为低能量放电,与三比值法判断结果一致。综合判断,该设备故障极有可能为放电原因所致。

表 1 主要特征气体量

Table 1 Main characteristic gas levels					μL/L
H ₄	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	总烃
154.00	37.60	1.53	29.60	69.22	137.93

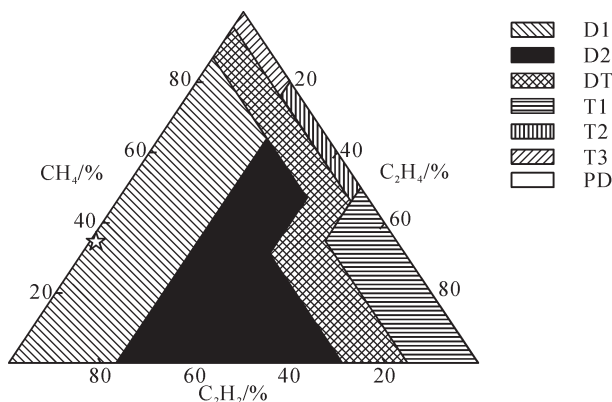


图 3 大卫三角形故障判断

Fig. 3 Fault diagnosis of duval triangle

2.2 变压器返厂解体检查

2014年4月20日,故障变压器返回新疆特变

电工解体检查,确定设备故障原因。将变压器铁心吊出,从外至内逐步解除变压器绕组外围屏,仔细查找设备故障痕迹和位置。

变压器绕组铁心吊出及放油后,发现其底部遗留有部分水污痕迹,见图4。

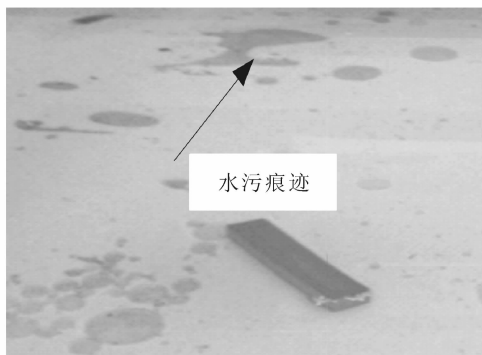


图4 变压器底部遗留水污痕迹

Fig. 4 Water trace on bottom of transformer

在对变压器围屏从外移除至里面第8块时,发现围屏上有明显的灼伤痕迹(呈碳黑色),逐渐移除,靠近里面的围屏灼伤程度更加严重,有两个显著损坏痕迹,处于上下位置,其中一个呈现撕裂状而另一个为不规则穿洞且周边外皮材料翻卷,见图5。在移除所有围屏后,检查变压器铁心绕组外侧,发现两处绕组灼伤变色痕迹,分别处于高压套管出线下方绕组倒数的第14饼和第19饼位置,见图6,且在19饼处,有1股绕组导线断裂。

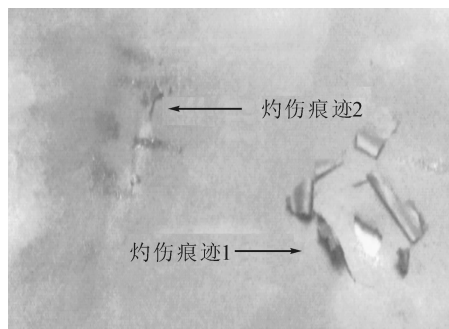


图5 变压器围屏灼伤痕迹

Fig. 5 Burn trace of transformer screen



图6 变压器故障位置和痕迹

Fig. 6 Spots of transformer faults

综合设备解体检查现象,从最外围屏无任何变色或损伤痕迹看,未发生设备主绝缘故障;从跨越5个饼空间的两点灼伤痕迹推断,应发生了饼间短路,即设备纵绝缘故障。结合图4中遗留的水污迹象推断,设备发生纵绝缘故障是完全可能的。

然而,对变压底部的水污问题存疑。从变压器本体检查却未发现任何渗水痕迹,变压器已经运行近4年,结合解体发现故障位置在绕组高压引线正下方近处,不排除沿高压套管有水分进入的可能。有争论的假设直接影响设备故障正确诊断,难以确切定论及设备消缺,因此,有必要从套管问题角度探究故障根源。

3 套管设计结构分析

主变750 kV套管为意大利P&V某公司制造,采取直接载流式结构,未配置均压环,型号为PNO.800.2000.2000.HN,2010年3月投运。按照国内750 kV工程设计要求应配置均压环,该750 kV均压环由国内某变压器厂设计并配置相应的过渡安装法兰。因此,将此套管从以下3个方面进行分析,寻找变压器内积水原因,查找缺陷。

3.1 套管头部结构

该公司套管头部结构见图7。图7中的1均为金属件。在套管出线连接部件与套管油枕壳体之间的过渡衔接位置形成两个密封面,即外侧密封面和内侧密封面。在油枕内部,铝导管端部处与过渡法兰内侧形成内部密封面。因此,套管油枕内部与外界环境形成2个通道,则对通道接触面的密封提出严格要求,以确保套管内不受吸潮或进水。

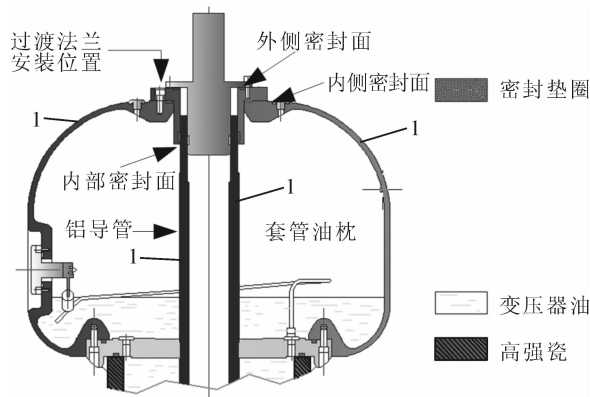


图7 套管头部结构图

Fig. 7 Head frame of transformer bushing

3.2 套管头部结构改造

为了在该公司套管头部安装均压环,满足国内工程要求,设计了一个相应的过渡法兰附件,加装后的整体结构见图8。

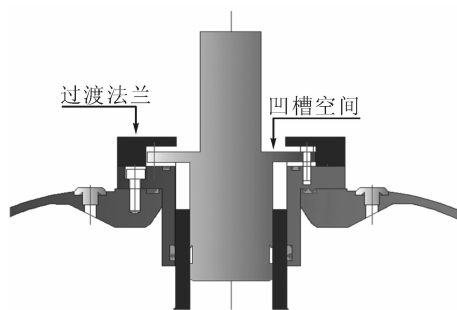


图8 套管头部结构图

Fig. 8 Head frame of transformer bushing

在原套管头部顶端增加过渡圆形连接法兰后,与套管出线圆形导体构成环形凹槽空间,约20~30 cm³。在户外敞开式变电站环境中运行,这个凹槽空间在雨雪天气时易积雨堆雪,给套管或与之联结的变压器运行埋下潜伏性进水或受潮隐患。

3.3 套管缺陷分析

在增加过渡圆形连接法兰后,与均压环构成完整的套管出线联结端,则750 kV 变压器高压侧与出线之间的套管隔离整体结构见图9,由套管底座、套管及相应安装附件构成,实现变压器与出线之间的绝缘安全。

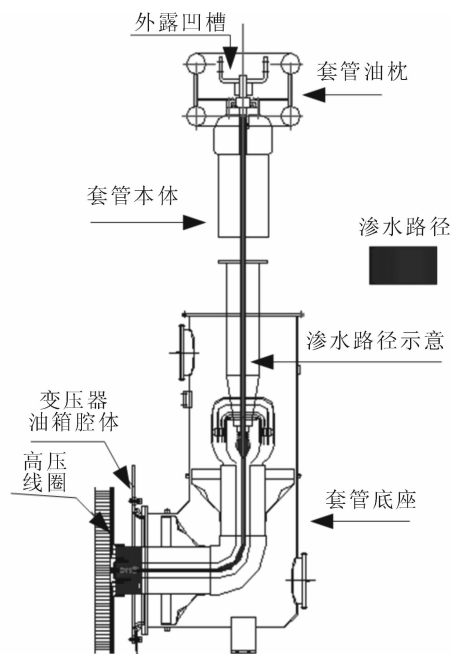


图9 套管隔离整体结构图

Fig. 9 Whole frame of bushing insulation

该套管运行于户外环境,套管头部安装过渡法兰形成的外露凹槽因雨雪天气而积雨堆雪形成积水,且不可能在短时间内外渗或泄漏而消去,结合设备本身的组成结构和安装工艺质量控制问题,套管缺陷在此产生。

综合图9分析,图7中外侧密封面在图8中过

渡法兰结构下形成积水渗漏通道,积水由此进入套管内部形成水污,水污沿着套管导管垂直方向向下移动,最后逐渐进入变压器高压绕组侧引线端处下部,并随着变压器油循环缓慢扩散,形成变压器运行故障的直接诱因。

4 变压器故障原因分析

变压器返厂解体检查发现,两个故障点均位于变压器高压侧出线正下方,第1个放电位置距离出线约有6个饼间距离,见图10,与高压套管底座内侧底部高度相当,第2个放电点在其竖直下方约5个饼间距离。



图10 高压出线与故障点分布

Fig. 10 Distribution of HV conductor and fault spot

从高压套管底座内侧底部进入的水污,沿着套管底座与变压器箱体接缝面入口,伴随变压器油循环,逐步扩散或接近绕组面,该局部区域的主绝缘或纵绝缘强度下降。根据变压器绕组电压分布理论^[18-19],绕组高压端部承受的电压最高、下降梯度最大,则绕组饼两点间电位差相对较大。因此,可以推断,该变压器饼间短路故障,归因为在高压引出线下方由于套管进水导致绕组纵绝缘下降而引发的绕组饼间短路,其故障最终根源在于变压器高压套管头部改造的设计缺陷所致。

5 结论

1)采用不同的故障诊断方法,相互验证以提高故障判断的可靠性,通过返厂解体检查验证了判断结论正确;

2)通过对意大利某公司750 kV 套管改造结构分析,发现设计缺陷,确定了该变压器故障的真实原因,为类似变压器故障的查找和发现提供了一个新视角;

3)对套管顶部过渡法兰改造形成的凹槽结构,建议在底部圆周间隙设计积水泄漏小孔,实时排放凹槽积水,消除缺陷隐患。

参考文献:

- [1] 王世阁. 电力变压器组部件故障分析与改进[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 梁小冰, 王耀龙, 黄萍, 等. 基于 DGA 的变压器故障诊断多专家融合策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 80-84.
LIANG Xiaobing, WANG Yaolong, HUANG Ping, et al. Synthetic multi-expert in transformer fault diagnosis based on DGA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 80-84.
- [3] 刘健, 解辰, 蔺丽华. 基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 964-970.
LIU Jian, XIE Chen, LIN Lihua. Automatic detection of oil level of electric power transformers using infrared image[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 964-970.
- [4] DUVAL M. The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and temperature faults in transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(6): 22-29.
- [5] DUVAL M, DUKARM J. Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(4): 21-27.
- [6] 姚森敬, 欧阳旭东, 林春耀. 电力变压器绕组变形诊断分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 95-98.
YAO Senjing, OUYANG Xudong, LIN Chunyao. Analysis on winding deformation diagnosing of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 95-98.
- [7] 王钰, 李彦明, 秦少臻, 等. 变压器绕组变形检测中的故障判定[J]. 高电压技术, 1997, 23(3): 21-24.
WANG Yu, LI Yanming, QIN Shaozhen, et al. The detection of transformer winding deformation[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(3): 21-24.
- [8] GAO Ming, LI Guangfan, LI Jinzhong, et al. Study on insulation characteristics of transformer oil at low temperatures [C]//CIGRE SCA2&D1 Joint Colloquium. Kyoto, Japan: [s. n.], 2011: 1-5.
- [9] 凌慙. 变压器用电容型套管故障简析[J]. 电力设备, 2003, 4(6): 24-28.
LING Min. Fault analyses of oil condenser bushing for transformer[J]. Electrical Equipment, 2003, 4(6): 24-28.
- [10] 董淑建, 何平. 油纸电容式套管的发展与展望[J]. 电瓷避雷器, 2005(5): 5-7.
DONG Shujian, HE Ping. Development of oil-impregnated paper condenser bushing in history and in the future[J]. Insulators and Surge Arresters, 2005(5): 5-7.
- [11] 刘晓亮, 蔡水利, 赵树平, 等. 特高压交流油纸电容式套管的研究[J]. 电瓷避雷器, 2007(2): 1-6.
LIU Xiaoliang, CAI Shuili, ZHAO Shuping, et al. Study on UHV AC oil-impregnated paper condenser bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2007(2): 1-6.
- [12] McNUTT W J, EASLEY J K. Mathematical modeling-A basis for bushing loading guides[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus System, 1978, PAS-97(6): 2393-2404.
- [13] JOHSSON L, MAGNUSON B, RIFFON P. Loading capability of HVDC transformer bushings with restricted oil circulation for use in HVDC valve halls[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1607-1614.
- [14] ZENG Daxiong. An improved for estimating temperature rise of a bushing loading above nameplate rating[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 986-995.
- [15] 张淑珍, 傅锡年, 朱建新. 500 kV 变压器、电抗器套管事故及障碍分析[J]. 电力设备, 2002, 3(4): 7-10.
ZHANG Shuzhen, FU Xinian, ZHU Jianxin. Analysis to accidents and obstacles of 500 kV transformer and reactor[J]. Electrical and Equipment, 2002, 3(4): 7-10.
- [16] YOUSSEF H K, ABDEL M M, HACKAM R. Steady state temperature distribution of high voltage bushing analysis and measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(1): 278-185.
- [17] JYOTHI N S, RAMU T S, MANDLIK M. Temperature distribution in resin impregnated paper insulation for transformer bushings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 931-938.
- [18] 胡文堂, 李思南, 万启发. 变压器绕组的陡波电压分布特性[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 57-60.
HU Wentang, LI Sinan, WANG Qifa. Step-front impulse voltage distribution characteristic of transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 57-60.
- [19] 陈乐平. 变压器绕组纵绝缘强度分析方法[J]. 变压器, 1998, 35(1): 1-5.
CHEN Leping. Analysis on series insulation of transformer winding[J]. Transformer, 1998, 35(1): 1-5.

李伟(1973—),男,博士,高级工程师,从事高电压与绝缘技术方面的研究。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。