

联合检测技术在换流变压器乙炔异常中的应用

周 秀¹, 周利军², 马飞越¹, 李秀广¹, 闫振华¹, 田 禄¹, 徐玉华¹, 何宁辉¹, 李奇超¹, 牛 勃¹

(1. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011;

2. 国网宁夏电力公司宁东供电公司, 宁夏 宁东 750411)

摘 要: 针对一起特高压直流输变电工程调试阶段换流变压器乙炔超标问题,对现有检测技术进行全面分析,提出一种基于油色谱检测、高频局部放电检测、特高频局部放电检测、超声波局部放电检测的联合检测技术。应用结果表明:该联合检测技术能高效、准确地查找出换流变压器的故障数量、故障类型及故障部位。

关键词: 特高压; 换流变压器; 乙炔超标

中图分类号: TM 855 文献标志码: B 文章编号: 1672-3643(2017)04-0038-07

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2017.04.008>

The combined detection technology on acetylene abnormality fault of the convertor transformer

ZHOU Xiu¹, ZHOU Lijun¹, MA Feiyue¹, LI Xiuguang¹, YAN Zhenhua¹,

TIAN Lu¹, XU Yuhua¹, HE Ninghui¹, LI Qichao¹, NIU Bo²

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

2. Ningdong Power Supply Filiale of State Grid Ningxia Power Co., Ningdong Ningxia 750411, China)

Abstract: Aiming at the acetylene content out of limit problem of convertor transformer during a UHV DC transmission and transformation project debugging phase, analyzes deeply available detecting technology, puts forward a combined detecting technology based on oil chromatography detecting method, high frequency partial discharge, ultra high frequency partial discharge and ultrasonic partial discharge detecting method. The application result shows that this combined detecting technology can effectively and accurately detect the number, types and locations of the fault in convertor transformer.

Keywords: UHV; convertor transformer; acetylene content out of limit

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2017.04.008

收稿日期: 2017-05-13

作者简介: 周秀(1984),男,工程师,从事高电压试验研究工作。

换流变压器在调试过程中,会因为产品自身质量、安装调试等可能因素造成换流变压器内部产生放电和过热现象。当换流变压器出现过热现象时,温度不同产生的气体不同,但随着温度的升高,最终伴有乙炔气体(C_2H_2)产生;当换流变压器出现放电现象时,一般情况下均有 C_2H_2 产生。换流变压器产生的 C_2H_2 值超过规程中的注意值时,可引起换流变压器故障,甚至威胁电网的安全稳定运行。因此,当换流变压器的 C_2H_2 值超过规程注意值时,试验人员将通过油色谱法及带电测试等多种检测手段综合分析判断换流变压器的故障类型,甚至准确查找到换流变压器故障部位。

1 问题的提出

2016年6月28日,某 ± 800 kV特高压换流变电站极Ⅱ高端Y/Y-C相换流变压器试运行,约12 h后油色谱在线监测系统显示该换流变压器有乙炔产生,含量为 $1 \mu L/L$ 。6月30日,10:00左右再次对该相换流变压器开始试运行,空载状态运行大约10 h后,在线监测及离线油色谱数据显示乙炔含量超过注意值且增长速度较快,在线监测油色谱乙炔含量为 $3.5 \mu L/L$ 。

2 现状分析和需要解决的问题

2.1 现状分析

该换流变压器在试运行阶段,12 h后即有乙炔产生,不排除出厂及现场交接问题,判断可能因为换流变压器铁轭处存在导体接触不良或断线、金属接触不良(如螺帽接触不良)、金属异物等。

在检测过程中,试验人员分别单独采用了油色谱分析技术、脉冲电流法、高频局部放电检测法、特高频局部放电检测法、超声波局部放电检测法。

油色谱分析技术检测出换流变压器乙炔含量最高为 $3.5 \mu L/L$,由于该检测是对故障部位生成的特征气体在换流变压器油中扩散一定时间后进行检测的,难以检查出故障的数量及部位。

脉冲电流法检测灵敏度高,通过该方法对换流变压器网侧及阀侧套管末屏进行检测,但由于换流变压器周围电磁环境的影响,无法准确标定局放量,不能准确检测换流变压器运行状况,难以发现换流变压器异常状况。

通过高频局部放电检测法在换流变压器铁心及夹件的接地引下线检测高频局部信号,但由于仅有部分故障部位产生的异常高频信号可耦合到铁心及夹件的接地引下线,难于准确判断故障数量。

采用特高频局部放电检测法在换流变压器网侧升高座、大M升高座检测特高频局放信号,由于该检测法的脉冲序列相位分布谱图、局部放电相位分布谱图仅对故障的类型敏感,难以确定故障部位。

采用超声波局部放电检测法对换流变压器网侧升高座、大M升高座及本体检测,仅在换流变压器本体检测出一个异常的超声波局放信号,但由于换流变压器体积大且结构复杂,距换流变压器外壳一定距离的故障难以被检测,不能判断此异常信号为引起换流变压器乙炔超标唯一因素。

2.2 需要解决的问题

由于该高端换流变压器造价昂贵且结构复杂,常规的单一检测手段无法完成对换流变压器故障数量、故障类型及故障位置确定,急需一种新的检测方法来解决问题。

综上所述,特高压换流变压器乙炔超标检测需解决3个问题:

- (1)引起换流变压器乙炔超标的故障点数量;
- (2)引起换流变压器乙炔超标的故障类型;
- (3)引起换流变压器乙炔超标的故障位置。

3 换流变压器乙炔联合检测技术

针对油色谱分析技术、脉冲电流法、高频局部放电、特高频局部放电、超声波局部放电检测具有的优点和不足,本文提出了一种联合检测技术。

3.1 换流变压器乙炔异常联合检测步骤

Y/Y-C相换流变压器乙炔异常综合检测步骤如图1所示。

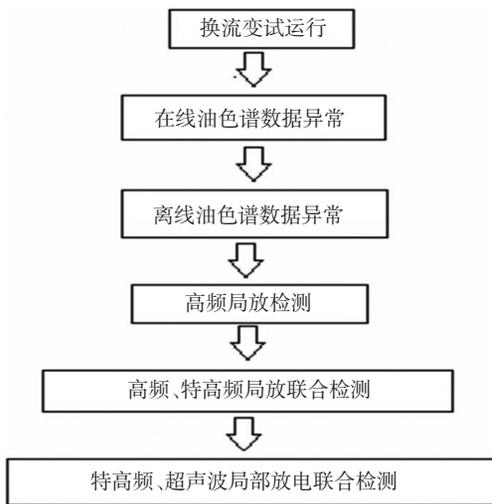


图1 换流变压器乙炔异常联合检测流程

(1)利用油色谱分析技术可对换流变压器存在的发热或放电性故障进行确定。

(2)通过高频局部放电技术对换流变压器的铁心及夹件接地引下线进行测试,确认由油色谱异常引起的局放信号可在换流变压器铁心及夹件处产生高频局部放电信号。

(3)利用高频、特高频局部放电联合检测技术确认高频异常信号和特高频异常信号为同一个故障引起并确认故障数量,通过特高频局部放电信号的脉冲序列相位分布谱图和局部放电相位分布谱图确认故障类型。

(4)联合特高频、超声波局部放电联合检测技术的相位图谱、脉冲图谱确认故障类型,利用示波器特高频和超声波图形联合确认故障位置。

3.2 现场应用

3.2.1 油色谱检测

(1)乙炔含量。

2016年6月28日,±800 kV特高压某换流变电站极Ⅱ高端换流变压器压器进行试运行,大约12 h后在线监测出现乙炔;6月30日10:00左右开始试运行,空载状态运行大约10 h后20:10停止,在线监测及离线油色谱数据显示乙炔含量明

显超出注意值;7月1日,19:30-22:00极Ⅱ高端换流变压器压器再次进入试运行,试运行后,7月2日取油样进行色谱分析。在线监测油样选取1个点,部位为换流变压器中部。在线监测乙炔油样数据如图2所示,在线油色谱显示乙炔含量在4天里从0 μL/L迅猛增长到7.6 μL/L^[1]。

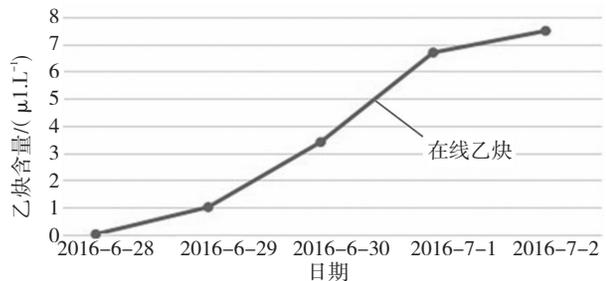


图2 在线乙炔的发展趋势

离线油样选取10个点,部位分别为换流变压器顶部、中部、底部、网侧A升高压座、中性点升高座、阀侧升高座a、阀侧升高座b、油载调压箱1号、油载调压箱2号、油载调压箱3号^[2-3]。离线乙炔油样数据如图3所示,Y/Y-C相换流变压器内部乙炔含量上升速度很快,且网侧A升高座取样位置乙炔含量最高,为17.9 μL/L。

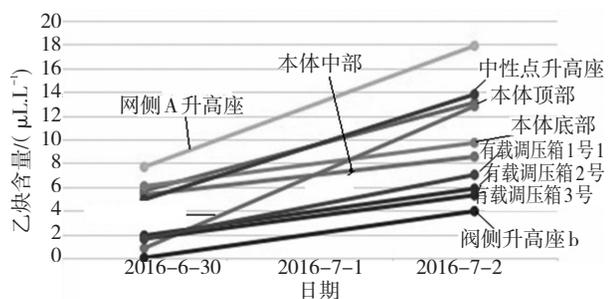


图3 离线各取样点乙炔的发展趋势

(2)其他成分含量。

油色谱数据显示,H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、CO、CO₂含量变化趋势相对不大,增长速度不明显。如表1所示。

表1在线监测油样选取位置为Y/Y-C相换流变压器中部,氢气含量从0 μL/L到4.1 μL/L,总烃含量从1 μL/L到3.4 μL/L。

表1 在线监测油色谱数据

取样时间	H ₂ /(μL·L ⁻¹)	CH ₄ /(μL·L ⁻¹)	C ₂ H ₆ /(μL·L ⁻¹)	C ₂ H ₄ /(μL·L ⁻¹)	Σ总烃/(μL·L ⁻¹)	CO/(μL·L ⁻¹)	CO ₂ /(μL·L ⁻¹)
2016-06-29T1:00	0	0	0	0	1.0	35.2	160.9
2016-06-30T14:30	2.6	0	0	0	1.6	35.2	162.4
2016-06-30T16:30	2	0	0	0	2.0	34.9	165.6
2016-06-30T18:30	4.1	0	0	0	3.4	34.7	167.1

表2 2016-06-30T21:00试运行后离线检测油色谱数据

取样位置	H ₂ /(μL·L ⁻¹)	CH ₄ /(μL·L ⁻¹)	C ₂ H ₆ /(μL·L ⁻¹)	C ₂ H ₄ /(μL·L ⁻¹)	ΣC/(μL·L ⁻¹)	CO/(μL·L ⁻¹)	CO ₂ /(μL·L ⁻¹)
顶部	8.12	2.34	0.06	0.36	8.42	23.7	159.8
中部	7.78	5.08	0.07	0.36	10.84	22.46	186.92
底部	8.34	1.74	0.06	0.35	8.2	25.29	160.25
网侧A升高压座	5.25	4.39	0.8	2.05	14.91	16.09	571.6
中性点升高压座	5.37	6.19	0.18	0.68	11.97	22.64	340.28
阀侧升高压座a	6.64	3.56	0	0	4.37	23.6	567.1
阀侧升高压座b	5.75	4.93	0	0	4.93	13.11	445.89
油载调压箱1号	7.12	5.87	0	0	7.48	14.44	360.07
油载调压箱2号	6.74	6.08	0	0	7.96	19.74	277.73
油载调压箱3号	6.53	3.47	0	0	5.1	20.1	287.45

表3 2016-07-02T10:00试运行后离线检测油色谱数据

取样位置	H ₂ /(μL·L ⁻¹)	CH ₄ /(μL·L ⁻¹)	C ₂ H ₆ /(μL·L ⁻¹)	C ₂ H ₄ /(μL·L ⁻¹)	ΣC/(μL·L ⁻¹)	CO/(μL·L ⁻¹)	CO ₂ /(μL·L ⁻¹)
顶部	15.34	10.23	6.74	2.79	32.84	28.78	180.48
中部	12.67	3.59	0.38	0.59	13.1	27.16	176.15
底部	12.541	1.66	0.09	0.67	12.13	25.12	167.21
网侧A升高压座	17.33	11.45	0.07	0.85	30.26	24.01	551.26
中性点升高压座	16.15	4.52	0.11	0.74	19.418	32.68	371.28
阀侧升高压座a	16.81	3.7	0	1.19	17.65	28.44	576.12
阀侧升高压座b	16.17	2.01	0	0.29	6.24	23.31	470.28
油载调压箱1号	17.85	1.67	0	1.28	8.24	21.22	375.13
油载调压箱2号	15.36	1.93	0	0.96	8.73	27.06	301.27
油载调压箱3号	16.32	4.8	0	0.99	12.8	22.21	291.79

表2、表3为Y/Y-C相换流变压器试运行后离线检测^[4-5]油样色谱数据,共选取10个点,从上到下依次为换流变压器顶部、中部、底部、网侧A升高压座、中性点升高压座、阀侧升高压座a、阀侧升高压座b、油载调压箱1号、油载调压箱2号、油载调压箱3号,氢气最大含量为17.85 μL/L,总烃最大含量为32.84 μL/L。

(3)三比值法定性故障类型。

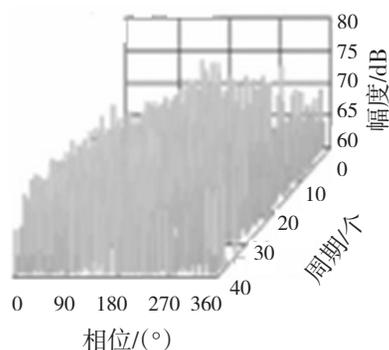
以7月2日离线试验数据为例,如表3所示。运用三比值法对故障进行分析及定性,故障类型为“低能放电”,可能原因为“换流变压器铁轭处存在导体接触不良或断线、金属接触不良(如螺帽接触不良)、金属异物等^[6-9]。”

3.2.2 局部放电带电检测

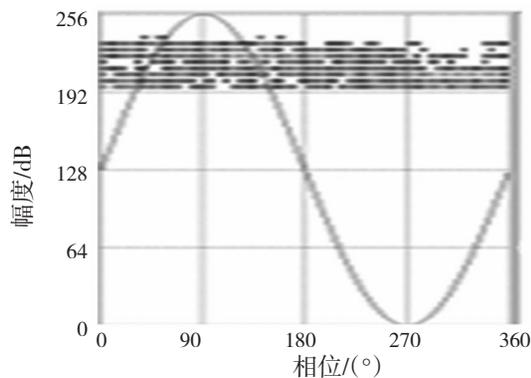
(1)高频电流局部放电带电检测。

对Y/Y-C相及Y/Y-B相换流变压器铁心接地引下线进行高频电流局部放电检测,并在Y/Y-C相换流变压器铁心接地引下线处检测到异常高频局放信号,现场测试数据如图4、图5所示。由图4

可知, Y/Y-C相换流变压器高频局放异常,具有悬浮放电特征。



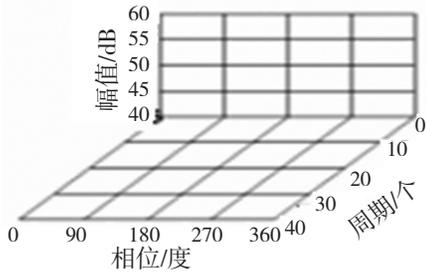
(a) Y/Y-C相换流变压器PRPS图谱



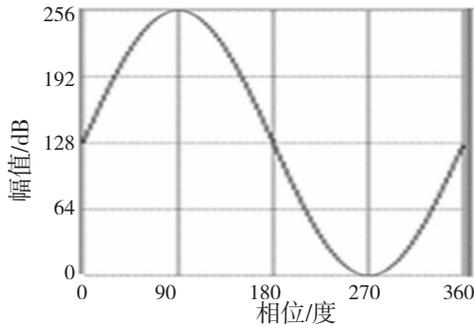
(b) Y/Y-C相换流变压器PRPD图谱

图4 Y/Y-C相换流变压器高频测试数据

由图5可知,Y/Y-B相换流变压器未出现异常的高频信号,与Y/Y-B相换流变压器高频测试数据相比,Y/Y-C相换流变压器高频局放异常,幅值为74 dB,具有悬浮放电特征。



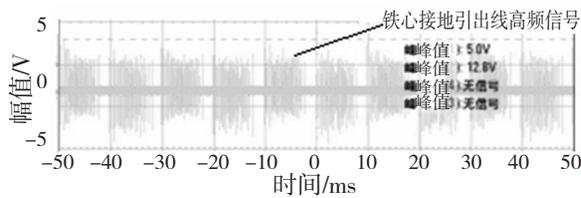
(a) Y/Y-B相换流变压器PRPS图谱



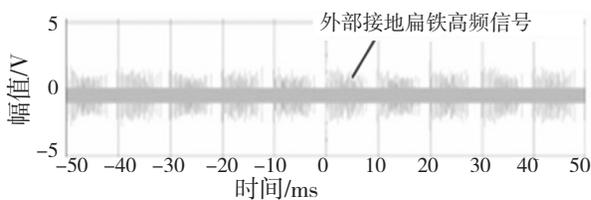
(b) Y/Y-B相换流变压器PRPD图谱

图5 Y/Y-B相换流变压器高频测试数据

为进一步确定该异常信号是否来自Y/Y-C相换流变压器本体,利用示波器和高频传感器,分别对Y/Y-C相换流变压器铁心接地引下线及外部接地扁铁进行测试,测试结果如图6所示。从图6中可知:示波器显示每周期20 ms呈现出多根组成的两簇信号,呈现悬浮电位放电特征,铁心接地引出线高频信号幅值明显高于外部接地扁铁高频信号幅值。



(a) 铁心接地引出线高频信号



(b) 外部接地扁铁高频信号

图6 高频局部放电测试信号

图7表明:铁心接地引出线高频信号超前于外部接地扁铁高频信号,表明悬浮电位信号来自于Y/Y-C相换流变压器本体非外部干扰^[10-11]。

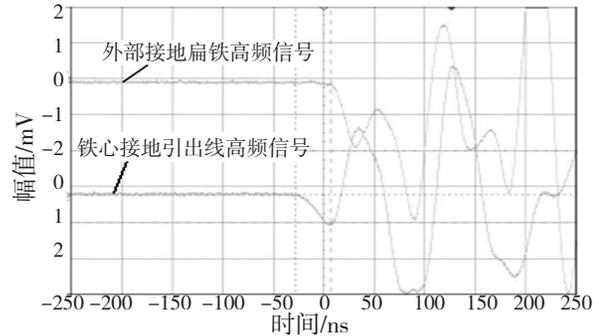


图7 高频局放测试信号

通过对Y/Y-B相、Y/Y-C相换流变压器铁心接地引下线及Y/Y-C相换流变压器外部接地扁铁高频电流测试结果,确定该异常高频局放信号来自Y/Y-C相换流变压器本体^[12-13]。

(2)特高频局部放电带电检测

通过局部放电定位仪对换流变压器大M升高座柱2、3、网侧A升高座及换流变压器铁心接地引下线处布置传感器,从图8特高频及高频测试结果可知,以高频局放信号为触发源,定位分析大M升高座柱2特高频信号、网侧A升高座特高频信号均超前大M升高座柱3特高频信号,并且大M升高座柱2特高频信号与网侧A升高座特高频信号较接近,确定信号源位于柱2与柱3之间^[14-15]。

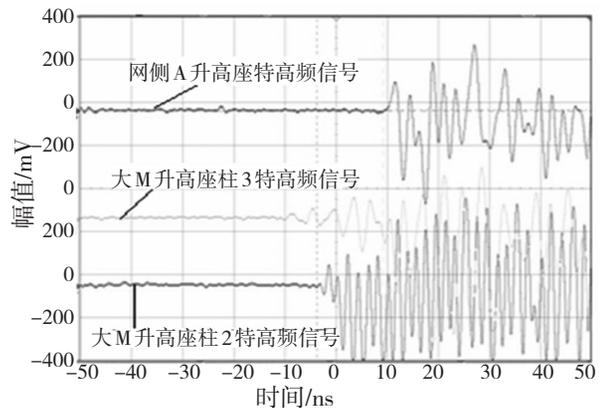


图8 特高频局放测试信号

(3)超声波局部放电带电检测

将超声波传感器布置在大M升高座柱2处,未检测到超声波局放信号。由于超声波局放信号衰减速度较快,当测试点与故障点超过一定距离信号会迅速衰减^[16-17]。随后利用超声波局放检测

法对换流变压器升高座及顶部进行测试,最后在换流变压器柱2两侧均检测到超声波局放信号,且在柱2与柱3之间换流变压器顶部且距柱2约30 cm处检测到最大超声波局放信号,信号最大处如图9所示。

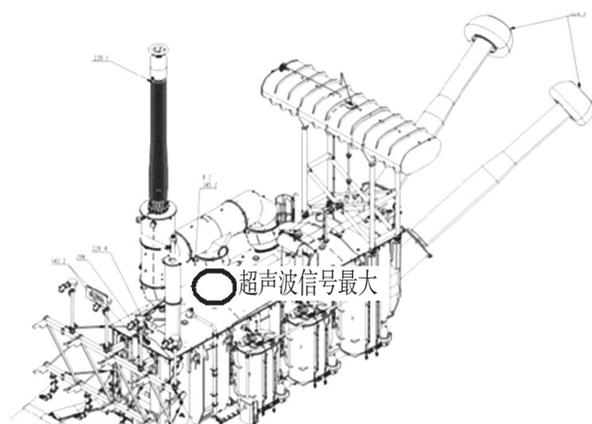


图9 超声波局放信号最大处型式

在对换流变压器进行超声波局放测试过程中,在换流变压器顶部柱2与柱3之间有异常超声波局放信号,由图10超声波局放连续图谱可知:超声波连续图谱幅值较大,仅有频率2成分量,疑似悬浮放电信号。

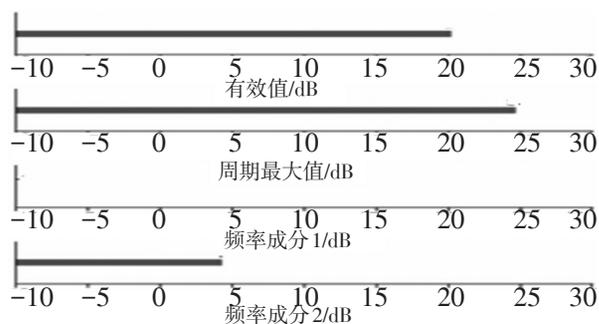


图10 超声波连续图谱

超声波局放连续图疑似悬浮放电信号,为进一步对该信号进行确认,对该信号在超声波相位图谱模式下进行测试,由图11超声波局部放电相位图谱可知:相位呈现两簇聚集,疑似悬浮放电信号^[18-19]。

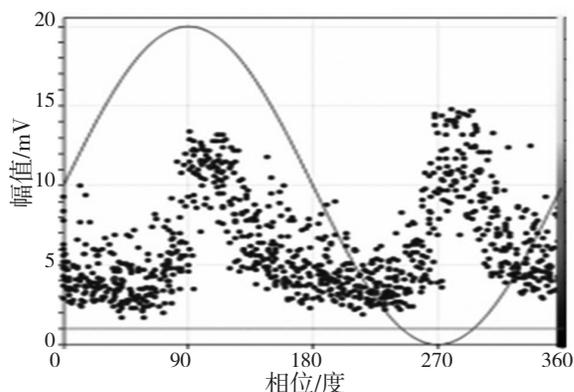


图11 超声波局部放电相位图谱

由图12超声波局部放电时域图谱可知:每周期(即20 ms)呈现2个波峰。该放电信号具有典型悬浮电位放电特征^[20-21],并结合超声波连续图谱、相位图谱可知该异常超声信号为悬浮放电信号,与之前的特高频信号结果一致。

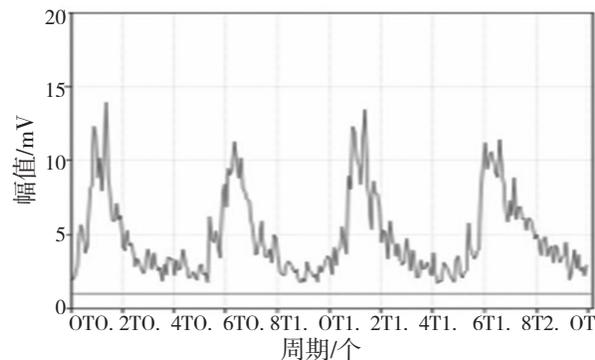


图12 超声波局部放电时域图谱

3.2.3 放电点定位

在线及离线油色谱数据、高频信号、特高频信号、超声波信号综合判断换流变压器内部存在放电现象后,开始对放电点的具体位置进行检测,通过高频、特高频、超声波等综合定位手段,定位疑似放电点。

极II高端Y/Y-C相换流变压器内部存在悬浮电位放电现象,综合分析判断异常信号来源于换流变压器内部,并且位于换流变压器柱2与柱3之间靠近变压器顶部。

3.2.4 内检情况

7月3日~4日,厂家在换流站现场对Y/Y-C相换流变压器采取拆除网侧套管及大M升高座方式进行检查,采用内窥镜检查发现换流变压器铁心的柱2 AC侧拉板与上轭末级片导通,并且存在放电痕迹,检查结果如图13、图14所示。



图13 缺陷定位内窥镜检查结果

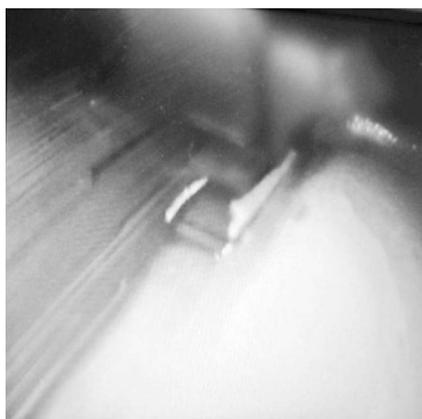


图14 拉板与上轭末级片导通

4 效果评价

(1)本次换流变压器在线油色谱乙炔含量最高为 $7.6 \mu\text{L/L}$,针对换流变压器乙炔含量小的问题,联合检测技术对换流变压器的局放信号检测和分析,得到缺陷类型和位置。

(2)单一采用油色谱分析法仅能确定换流变压器内部存在故障,但不能确定故障类型及故障部位;单一采用高频局放检测技术,仅能确定故障产能的高频信号通过铁心及夹件耦合传播,无法确定故障数量及部位;单一采用特高频局放检测技术虽能确定故障的类型,但无法对故障的数量及部位进行确定;单一采用超声波局放检测技术能确定故障的部位及类型,但无法确定故障的数量;而联合检测技术克服了单一检测方法的不足,利用油色谱及高频局放,快速准确地发现换流变压器存在故障,再利用特高频和高频联合检测技术,确认故障数量及故障类型,最后利用特高频、超声波联合检测再次确认故障类型、故障部位。

(3)以往的油色谱在线监测系统中,因其精度有限、可靠性低,不能作为重要的依据和手段;联合检测技术所获取的在线油色谱数据和离线油色谱数据基本吻合,这对今后设备的安全、稳定运行有积极的意义。

(4)本文采用的换流变压器乙炔异常联合检测技术为换流变压器类设备在运行过程中油色谱异常分析提供了参考方法,保证了换流变压器和电网的稳定安全运行,并且为进一步开展变压器

类设备带电测试提供了方向和指导性数据,节约了换流变压器检修时间,减少了停电造成的各方面损失。

5 结论

(1)常规油色谱分析及单一带电测试方法,难以检测出换流变压器乙炔故障类型及部位,本文采用油色谱检测、高频局部放电、特高频局部放电、超声波局部放电4种测试方法联合检测,成功检测出换流变压器的局部放电故障类型及位置。

(2)针对换流变压器测试现场干扰因素,应针对不同干扰源采用不同的检测手段,取长补短,提高测试的准确性与可靠性。

(3)换流变压器结构复杂,应针对不同结构的换流变压器,采用不同的联合检测技术对故障进行准确定位,为换流变压器的安全运行提供更准确的指导。

参考文献

- [1] 郭铁军,梁晓亮. 66 kV 变电站主变压器油色谱异常原因分析[J]. 科技创新与应用, 2013, 35(4):148.
- [2] 鲁俊兵. 220 kV 变压器乙炔超标原因分析及处理[J]. 水电站机电技术, 2006, 29(2):22-24.
- [3] 刘宏亮,刘海峰. 220 kV 变压器油纸电容式套管乙炔超标分析[J]. 变压器, 2011, 48(5):68-71.
- [4] 廖秀武. 220 kV 主变压器高压出线装置乙炔含量异常的处理[J]. 变压器, 2006, 43(7):52-55.
- [5] 黄勇,胡林. 500 kV 变压器油中乙炔含量超标处理[J]. 变压器, 2006, 43(3):67-70.
- [6] 徐康健. 变压器安装后油中出现乙炔的案例分析[J]. 电工电气, 2011(6):63-64.
- [7] 丁登伟,唐诚,高文胜,等. 变压器油中乙炔含量起伏变化的分析[J]. 供用电, 1996(12):30-31.
- [8] 柳舜水. 变压器油中乙炔气体的产生及处理[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(3):44-49.
- [9] 韩波. 磁屏蔽放电引起的变压器乙炔含量超标故障分析及处理[J]. 变压器, 2014, 51(2):52-54.
- [10] 陈冬茵. 东莞变电站 500 kV 变压器乙炔产生的原因探讨[J]. 安全生产, 2015(4):34-35.
- [11] 周爱东,马永光. 换流变压器有载开关产生微量乙炔气体的工程算法[J]. 变压器, 2013, 50(10):10-13.
- [12] 李守学,司昌健,张春丰,等. 某 500 kV 变压器油色谱异常监测及故障诊断[J]. 吉林电力, 2017, 45(1):44-46.
- [13] 徐基航. 瀑布沟电站 500 kV 变压器乙炔产生的原因

- [J].四川水力发电, 2016, 35(6):127-129.
- [14] 毕欣颖.热油循环后变压器油中出现乙炔的原因分析及对策彭超[J].水电站机电技术, 2017, 40(1):66-67.
- [15] 王会娟,马书杰,于会民,等.未运行变压器油乙炔超标原因分析及对策研究[J].润滑油, 2015(8):44-47.
- [16] 李小涛.一起变压器乙炔超标故障分析[J].农电技术, 2017, 25(4):35-37.
- [17] 杨泽明,李充,王远游.一起换流变压器器油乙炔超标问题分析及处理[J].高电压技术, 2003,29(3):54-55.
- [18] 赖美云.一起配变变压器油乙炔超标故障分析[J].江西电力职院技术学报,2010, 23(3):37-40.
- [19] 张亚平.一起由油中乙炔含量变化判断变压器内部故障的典型案例分析[J].湖北电力, 2010,34(1):119-120.
- [20] 张晓星,李健,云玉新,等.用于变压器油中乙炔含量检测的红外激光气体传感器的研制[J].高电压技术, 2013,39(11):2597-2599.
- [21] 白涛,李焕友,裴建芸.主变压器乙炔超标原因分析处理[J].变压器, 2012,49(11):73-74.

(上接第37页)

模块后,躲过了二极管导通特性不一致时间,解决了由于分接开关档位跳变而导致调档失败的问题。

4 结论

(1)换流变压器分接开关调档功能优化后,具有较高的运行可靠性,有效地保障了直流系统的安全稳定运行。

(2)换流变压器分接开关调档功能采取改进措施后,减少了分接开关档位不一致事故发生的可能性,降低了运维人员的生产压力。

(3)换流变压器分接开关调档功能优化,充分考虑了工程运行工况和现场环境条件,具有一定的科学性和实用性^[19]。

(4)换流变压器分接开关调档功能优化改进后,不仅完善了有载分接开关的控制逻辑,降低了换流变压器的设计成本,而且提高了有载分接开关的设计自由度^[20],为后续直流输电工程在换流变压器有载分接开关运行、维护、设计等方面提供了参考依据。

参考文献

- [1] 袁清云.特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J].电网技术, 2005,29(14):1-3.
- [2] 刘雪丽,李金忠,高飞,等.±800 kV换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J].中国电机工程学报, 2016, 36(19):5350-5356.
- [3] 韩洪刚,王海宽,杨衡,等.电力变压器分接开关故障及其检测技术[J].变压器, 2004,41(12):35-38.
- [4] 沈大中,KRAEMER A,DOHNALD.真空有载有载分接开关在高压直流换流变压器中的应用[J].变压器, 2007,44(1):58-59.
- [5] 王瑶.特高压直流输电控制与保护技术的研究[J].电力系统保护与控制, 2009,37(15):53-58.
- [6] 浙江大学直流输电教研组.直流输电[M].北京:水利电力出版社, 1985:120-135.
- [7] 张志朝,刘涛,宋述波.云广特高压直流工程换流变分接头切换控制研究[J].电力系统保护与控制, 2010,38(20): 205-208.
- [8] 汪洋,李书勇,宋述波,等.真空有载分接开关在云广特高压直流的应用[J].高电压技术, 2010,36(1):285-289.
- [9] 张国强,李庆民,赵彤,等.电力变压器有载分接开关机械性能的监测与诊断技术[J].变压器, 2005,42(9):33-37.
- [10] 陈灿旭,刘茂涛,张志朝,等.±800 kV云广直流输电系统串联双阀组换流变有载分接开关125℃闭锁调整分析及处理[J].智能电网, 2013,03(1):22-27.
- [11] 国网经济技术研究院.灵州-绍兴±800 kV直流输电工程成套设计书[Z].北京:国网经济技术研究院,2015.
- [12] 余荣兴,张志朝,刘茂涛.云广特高压工程中的有载分接开关状态监视逻辑[J].电网技术, 2012,5(6):18-21.
- [13] DL/T 574—95,有载分接开关运行维修导则[S].
- [14] 刘茂涛,张志朝,余荣兴,等.云广直流工程换流变有载分接开关控制电源回路改进[J].中国电力, 2015,48(7): 35-38.
- [15] 洪乐洲,毛海鹏,吴晗志,等.云广直流与天广直流换流变分接头控制功能对比和运维建议[J].电工技术, 2012,11: 58-59.
- [16] 刘宝宏,殷威扬,杨志栋,等.±800 kV特高压直流输电系统主回路参数研究[J].高电压技术, 2007,33(1): 17-21.
- [17] 刘崇茹,张伯明,孙宏斌.交直流系统潮流计算中换流变压器有载分接开关的调整方法[J].电网技术, 2006, 30(9): 22-27.
- [18] 南瑞继保电气有限公司.Accel2软件程序[Z].南京:南瑞继保电气有限公司, 2015.
- [19] DL/T 5223—2005,高压直流换流站设计技术规定[S].
- [20] 赵婉君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社, 2004.