

500 kV 变压器多维状态监测与故障诊断

张霖,杨超,李诗勇,张丽娟,申峻

(贵阳供电局, 贵州 贵阳 550081)

摘要:为提升变压器故障诊断水平并有效实现状态检修,通过一起 500 kV 主变压器内部潜伏性故障案例介绍了利用多种在线监测、离线检测等手段与故障诊断方法快速准确查找出变压器故障原因及位置。它通过采用油色谱检测、变压器振动及声音检测、容性设备在线监测、变压器局部放电检测、带电测试等多维状态监测技术开展变压器状态评价及故障诊断,并帮助实现对主变压器内部故障的准确定位和制定状态检修策略。该主变在通过状态监测及故障诊断后实现隐患故障快速准确定位,并通过紧急处理重新恢复正常运行状态,从而避免一起重大设备事故发生。结果表明,应用变压器油溶解气体色谱分析检测技术,可通过排除法准确地判断变压器故障性质和严重程度。它是早期发现变压器潜伏性故障特别有效的方法。同时,采用基于交叉小波的变压器振动信号特征量提取方法分析评价结果表明,变压器铁芯发生接地故障后其振动信号存在大量 50 Hz 谐波分量。借助振动及声音检测技术,能够有助于变压器故障诊断及准确定位,提高设备状态检修效率。

关键词: 变压器; 状态监测; 故障诊断; 振动; 声音; 油色谱分析

文章编号:2096-4633(2018)02-0067-07 中图分类号:TM7 文献标志码:B

目前,运行中变压器检测及故障诊断主要方法有油色谱检测法、振动检测法、声波检测法、局放检测法等^[1-8]。针对一起变压器故障案例介绍运用多维状态监测及故障诊断方法来有效开展状态分析与评估,实现设备故障准确定位,采取适当检修策略来保证其运行更经济、安全,提升了设备健康运行水平。

1 变压器油色谱分析及故障诊断

1.1 变压器油色谱分析及故障诊断

2017年2月15日,某变电站1号500 kV C相主变油色谱在线监测数据超标并发布一级报警。监测平台显示该相主变油色谱气体在线数据趋势图见图1。

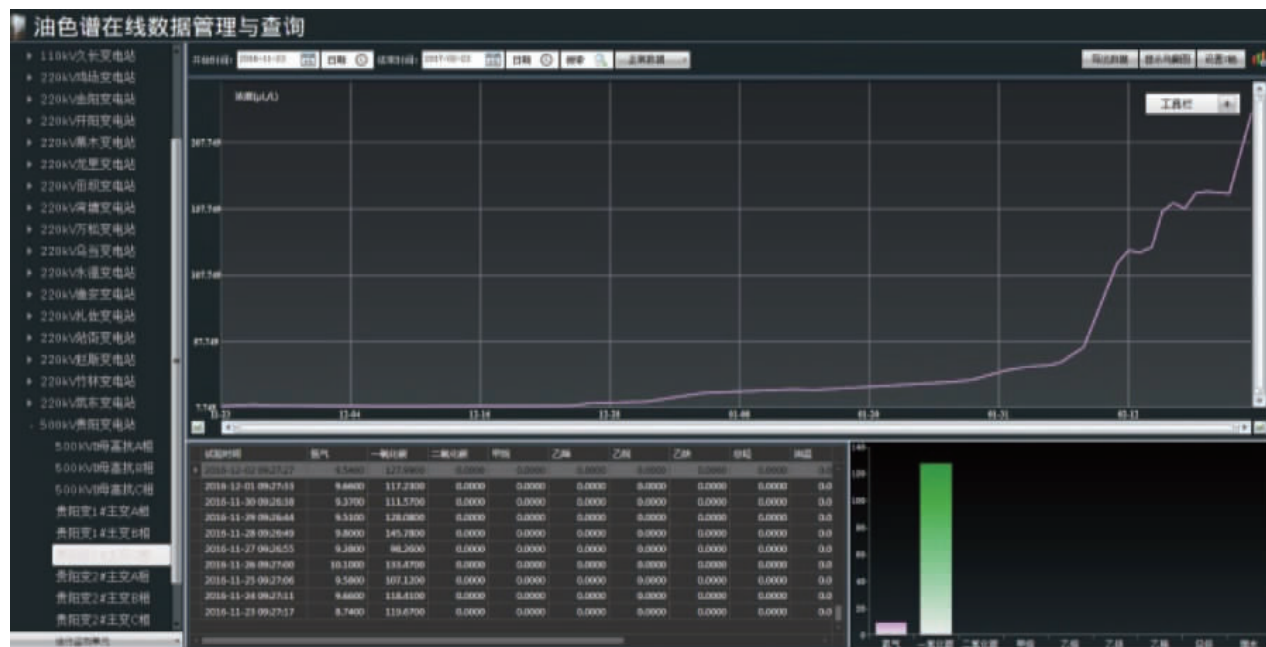


图 1 1 号 C 相主变油色谱气体在线数据趋势图

Fig. 1 No. 1 C phase main transformer oil chromatogram gas online data map

图中显示该相主变油色谱在线数据在两个月期间增长趋势明显。通过分析绝缘在线监测数据,图 2 可清楚显示出该相主变内部近两年期间仅存在少量的局部放电,且并未出现增长趋势,不是此次造成

此次油色谱在线数据超标的原因。可确认该主变绕组近期未发生较严重的局放点,即绕组及绕组周围未有大的局放点和过热现象。

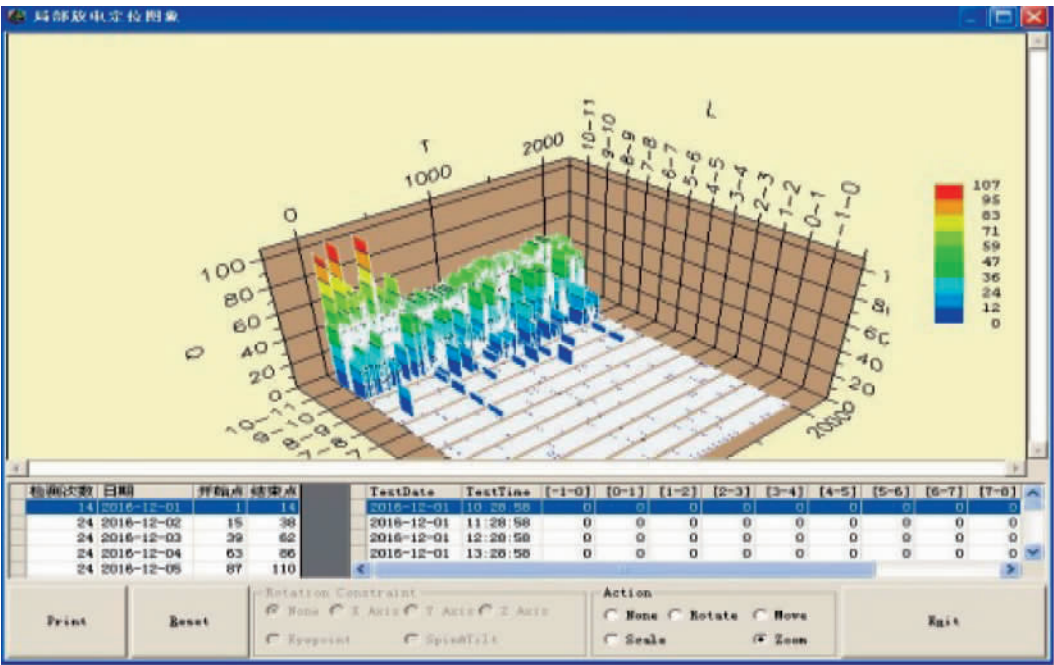


图 2 1 号 C 相主变 CmO 局部放电图

Fig. 2 CmO partial discharge map of NO. 1 C phase main transformer

为进一步对变压器内部绝缘工况分析,确诊故障性质。三次油样抽检油色谱试验结果显示该主变

油中甲烷、乙烯含量增长较快。该主变 6 次油色谱离线试验数据如表 1 所示。

表 1 变压器油色谱数据统计表

Tab. 1 The data statistics of main transformer oil chromatogram

日期/(月/日)	甲烷	乙烷	乙烯	乙炔	总烃	氢气	CO	CO ₂
9/6	2.46	0	5.7	0.3	8.55	2.82	146	1 169
12/7	2.31	0	4.98	0.3	7.29	2.65	147	984
12/23	2.17	0.37	5.1	0.31	7.95	2.19	151	1 082
2/16	28.7	8	48.3	0.7	85.77	14.3	132	1 127
2/21	37.1	10.7	63	0.72	111.5	20.1	164	1 191
2/23	41.3	11.6	67.5	0.75	121.2	20.2	159	1 168

1.2 故障类型初步判断

分别采用特征气体法、改良三比值法和 TD 图法对该变压器故障类型进行判断^[9-12]。根据表 1 中测试数据,对变压器可能故障情况进行分析:

(1)从表 1 中数据可知,气体中总烃含量为 121.2 μL/L、乙炔 C₂H₂ 含量增长至 0.75 μL/L,虽然各组分气体未超注意值,但增长较快。故障主要特征气体为 C₂H₄ 和 CH₄,初步判断故障为过热性故障。

(2)以最后一次测量数据为基准进行改良三比值法分析,计算得出的故障编码为 022,说明该变内部可能存在高于 700 ℃ 的高温过热故障。经四比值法计算,判断可能为磁路故障。

(3)以最后一次测量数据为基准,采用 TD 图法进行判断,由于 C₂H₂/C₂H₄ = 0.11, CH₄/H₂ = 2,根据 (T) 发热 (D) 放电图法可判断故障在高温过热Ⅲ区。

综合以上分析可判断出变压器磁路上存在高温过热故障。

1.3 故障程度分析

为进一步分析评估变压器故障状况,还需要考察产气速率、故障源温度、功率及故障面积等因素。

1.3.1 产气速率计算

由表1中可知,选择变压器异常62天后的数据计算得到:

$$\gamma_a = 212 \text{ mL/d}$$

远超 DL/T 722 标准推荐的变压器绝对产气率注意值 12 mL/d。该主变油中气体组分增长趋势明显,且增长速度较快,同时相对产气率达到 180% 以上。

1.3.2 故障源温度估算

变压器油裂解后的产物与温度有关,如已知故障情况下油中产生的有关各种气体的浓度,可以估算出故障源的温度。据日本月纲、大江等人推荐,进行热点温度估算出的热点温度为 765℃,与三比值法得出的“高于 700℃ 的高温过热故障”判断结果相吻合。

1.3.3 故障源功率估算

已知变压器油热裂解需要的平均活化能约为 210 kJ/mol,若已知单位故障时间内的产气量,则有故障源功率估算公式为:

$$\rho = \frac{Q_i/V}{\varepsilon t} \tag{2}$$

式中: ρ 为故障源的功率 kW; V 为故障时间内产气量 L ; t 为故障持续时间 s ; ε 为热解效率系数;

按照公式(2)进行计算,得故障源功率约为 1.07 kW。根据对故障源温度和功率的估算,知故障源温度在 700℃ 以上,功率大于 1 kW,进一步确定变压器故障为磁回路高温故障。

1.3.4 故障源面积估算

通过日本月冈、大江、田村等人研究故障源面积经验公式估算^[13-18],根据油裂解产气速率与温度的关系,可推断出该故障源面积约为 2.02 mm²。

2 基于振动及声音信号的变压器故障诊断

在设备故障发生前、后两次测试采集到该 1 号 C 相主变压器的振动与声音信号数据。故障前后贵阳变 1 号 C 相主变振动信号波形和频谱如图 3 和图 4 所示。

由图 3、4 可知,故障发生后振动信号时域波形发生显著变化,频谱由原来的分散分布集中在较高频范围内。

采用基于交叉小波的变压器振动信号特征量提取方法对变压器故障前后的振动信号提取幅频特征量^[19-21],结果如图 5 所示。

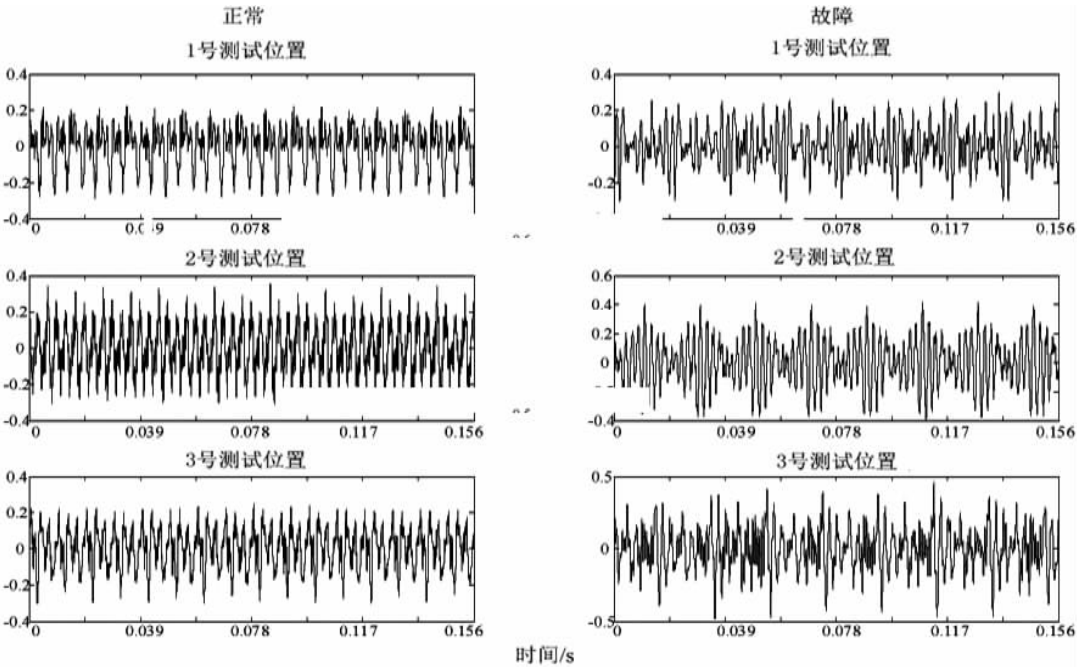


图3 变压器故障前后波形

Fig. 3 Vibration signal waveforms before and after the transformer fault

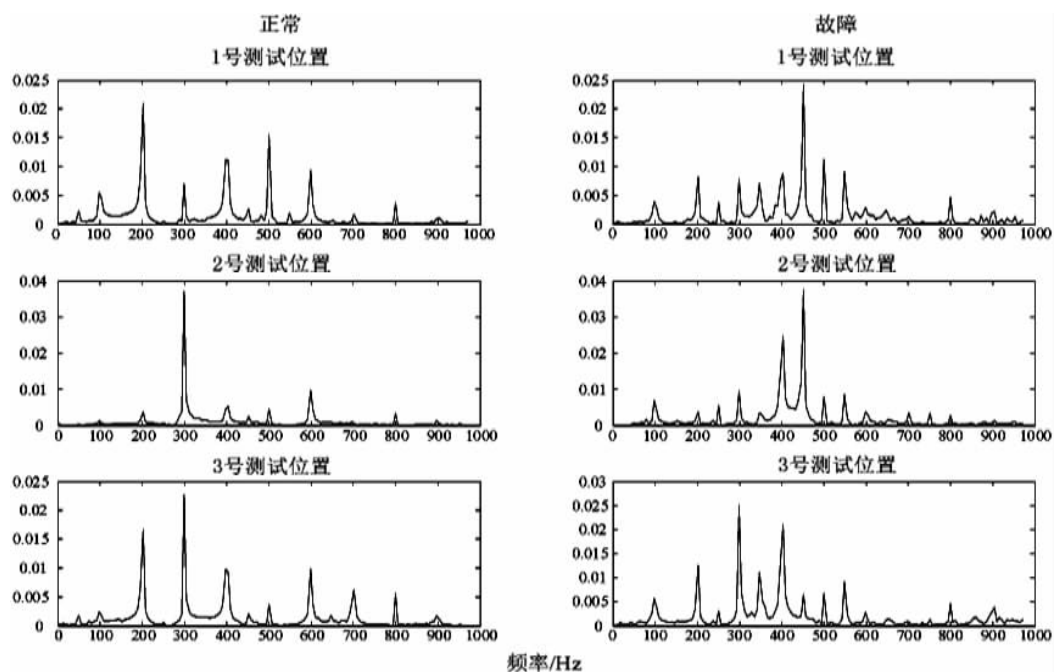


图 4 变压器故障前后频谱

Fig. 4 Frequency spectrum of vibration signal before and after the transformer fault

由图 5 可知,故障前后振动信号幅频特征量集中区域分别为 A 和 B。变压器正常状态下特征频率为 100 Hz,幅值特征量集中在 0.1 ~ 0.15,故障后特征频率为 250 Hz,幅值特征量集中在 0.25 ~ 0.3。变压器故障后,特征幅值增大,特征频率由 100 Hz 转移至 250 Hz。

由于故障后变压器振动信号频谱分布差异大,统计各次频率幅值并统计其占比如表 2 至 4 所示。振动传感器测试位置如图 6 所示。

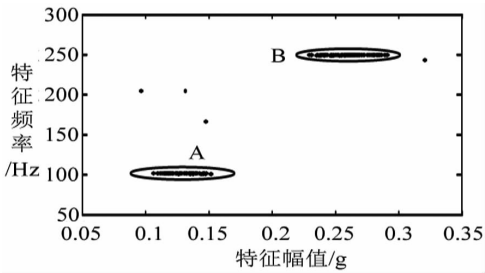


图 5 故障前后振动信号幅频特征量分布

Fig. 5 Amplitude frequency characteristic distribution of vibration signal before and after fault



图 6 振动传感器测试位置分布图

Fig. 6 Test position distribution map of vibration sensor

表 2 故障前后 1 号测试位置振动信号各次频率幅值统计

Tab. 2 Statistics of each frequency amplitude of the 1 test position vibration signal before and after a fault

频率/Hz		100	150	200	250	300	350	400	450	500
故障前 测 试	幅值/mg	6. 43	0. 94	15. 8	2. 41	150. 06	2. 16	27. 9	8. 4	16. 05
	占比	2%	0%	4%	1%	41%	1%	8%	2%	4%
故障后 测试正面	幅值/mg	35. 38	4	16. 4	21. 53	37. 14	17. 7	107. 24	140. 5	23. 83
	占比	7%	1%	3%	5%	8%	4%	23%	29%	5%

表 3 故障前后 2 号测试位置振动信号各次频率幅值统计

Tab. 3 Statistics of each frequency amplitude of the NO. 2 test position vibration signal before and after a fault												
频率/Hz		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
故障前	幅值/mg	32.5	0.4	94.1	2.4	28.1	1.5	63.1	11.5	58.8	8.8	33.5
	占比	9%	0%	25%	1%	8%	0%	17%	3%	16%	2%	9%
故障后正面	幅值/mg	23.4	1.3	32.7	13.9	32.7	28.3	46.4	90.5	36.0	30.4	9.8
	占比	6%	0%	8%	4%	8%	7%	12%	23%	9%	8%	3%

表 4 故障前后 3 号测试位置振动信号各次频率幅值统计

Tab. 4 Statistics of each frequency amplitude of the NO. 3 test position vibration signal before and after a fault												
频率/Hz		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
故障前	幅值/mg	13.0	1.9	74.1	2.6	92.8	1.3	53.8	6.5	12.5	0.4	34.4
	占比	4%	1%	21%	1%	27%	0%	16%	2%	4%	0%	10%
故障后正面	幅值/mg	29.9	2.9	51.0	12.5	100.9	44.2	96.9	23.3	24.5	30.4	8.1
	占比	6%	1%	11%	3%	21%	9%	20%	5%	5%	6%	2%

故障前,振动频谱分布符合正常分布,由100 Hz 及其谐波分量组成,50 Hz 及其奇数倍谐波幅值占比均在 10% 以下。

故障后变压器背面的测试结果,振动信号低频部分与故障前有一定相似度,但是出现了较多

50 Hz 谐波分量等非正常幅值分布;而变压器正面测试数据与故障前差异较大,有较大 350 Hz、450 Hz 幅值占比,有较为明显的 50 Hz 及其谐波分量。表 5 为两次测试中 50 Hz 及其谐波的幅值占比。

表 5 故障前后测试中 50 Hz 及其谐波的幅值占比

Tab. 5 The amplitude ratio of 50 Hz and its harmonics in the test before and after the fault									
测点	故障前测试			故障后测试(正面)			故障后测试(侧面)		
	1 号点	2 号点	3 号点	1 号点	2 号点	3 号点	1 号点	2 号点	3 号点
占比	4%	7%	5%	46%	44%	25%	38%	31%	28%

综上,信号频谱没有出现高频分量(大于 600 Hz)的突增,但是 50 Hz 及其奇数倍谐波含量的显著增大,表明该 1 号 C 相变压器铁心存在故障隐患。原因可能由于铁心松动后,压紧力不对称,磁滞回线等级不严格正负,致使铁心受力不均匀,铁心中正负两个半周期内的交变磁通总是存在差异,引起 50 Hz 及其奇数倍谐波含量的显著增大。

3 变压器故障诊断及处理

针对该主变在线监测数据异常,开展 1 号三相主变铁芯及接地电流带电测试、红外测温工作,红外测温测试结果显示对比其它两相运行工况,该 C 相主变温度无明显异常。该相主变铁心接地电流达 527 mA,表明该相主变铁芯存在多点接地故障。

经过铁芯接地电流带电测试,变压器铁芯存在多点接地故障。根据故障源面积估算金属屑颗粒或异物导致变压器两点接地可能性较大。

考虑到该主变在电网安全运行的重要性及故障处理紧迫性、经济性,对此次变压器铁芯接地故障应紧急处理按以下方案并予以实施。

(1)采用大电流冲击法冲击接地点。待主变停电后冲击试验处理结果效果不明显,冲击试验中铁芯对地绝缘曾短暂恢复绝缘,但随着变压器轴流油泵的运行而导致铁芯对绝缘数据反复偏低,铁芯对地绝缘未恢复正常范围。

(2)采用铁芯引出串接小电阻接地限流方案,接地电流要求限制在 100 mA 以下,持续监测油色谱在线监测数据,铁芯接地电流装置见图 7 所示。

该项方案实施后,该 1 号 C 相主变铁芯接地补偿装置投运过程中,铁芯接地电流一直稳定在 55 mA 左右(投补偿电阻 115 Ω)。同时,该主变故障紧急处理结束并投运半年以来的油色谱在线监测数据也保持稳定,无继续增长趋势,油色谱离线试验数据也验证在线监测数据准确可靠稳定。

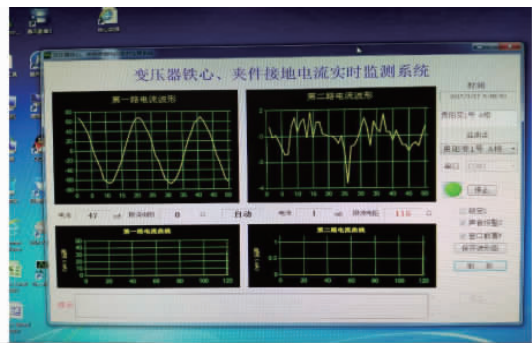


图7 1号主变铁芯接地电流补偿装置及监测图

Fig. 7 No. 1 main transformer core grounding current compensation device and monitoring chat

通过该相主变半年运行工况状态监测及评估证明此次方案处理措施得当,成功避免了一起主变因重大缺陷造成设备跳闸、甩负荷、甚至危及电网运行安全的事故发生。

(3)加强油色谱在线监测,尤其色谱数据发生波动时,将色谱数据与同期限流电阻投切数据变化曲线进行比较分析。

4 结论

针对一起500 kV变压器油色谱异常故障案例,利用油色谱检测、振动及声音检测、容性在线监测、主变局放在线监测等多维状态监测技术有效实现对主变压器状态监测及故障诊断,并对变压器的故障进行了正确的处理。其中,应用变压器油中溶解气体色谱分析,可以准确地判断变压器故障性质和严重程度,它是早期发现变压器潜伏性故障特别有效的方法。借助振动及声音检测技术,采用基于交叉小波的变压器振动信号特征量提取方法分析评价设备内部绝缘状况能够有助于变压器故障诊断及定位准确性,进一步提升设备状态检修的效率^[22]。

参考文献:

- [1] 郭建龙,蓝小萌. 一种新型的变压器运行状态监测与诊断方法[J]. 变压器,2010,48(1):40-43.
GUO Jianlong, LAN Xiao meng. A new method of monitoring and diagnosis for operation condition of transformer[J]. Transformer, 2010,48(1):40-43.
- [2] 赵世钦,周健. 变压器铁芯多点接地故障诊断与处理[J]. 贵州电力技术,2015,18(12):47-49.
ZHAO Shiqin, ZHOU Jian. Multi-point grounding failure diagnosis and treatment for the transformer core[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2015,18(12):47-49.
- [3] 陆杨. 大型变压器绕组状态的振动监测方法研究[J]. 变压器,2010,47(s1):9-11.

- LU Yang. Research on Vibration Detection Method of winding condition of large transformer[J]. Transformer, 2010,47(s1):9-11.
- [4] 姚陈果,赵仲勇,李成祥. 基于暂态过电压特性的电力变压器绕组变形故障在线检测[J]. 高电压技术,2015,41(3):873-880.
YAO Chenguo, ZHAO Zhong yong, Li cheng xiang. Online detecting winding deformation power transformer based transient overvoltage [J]. High Voltage Engineering, 2015,41(3):873-880.
- [5] Bagheri M, Naderi M S, Blackburn T. Advanced transformer winding deformation diagnosis: moving from off-line to on-line [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2012,19(6):1860-1870.
- [6] 马宏忠,耿志慧,陈楷,等. 基于振动的电力变压器绕组变形故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(8):89-95.
MA Hongzhong, GENG Zhihui, CHEN Kai, et al. A new fault diagnosis method for power transformer winding deformation based on vibration[J]. Automation of Electric Power systems, 2013,37(8):89-95.
- [7] 郭创新,朱承治,张琳,等. 应用多分类多核学习支持向量机的变压器故障诊断力法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):128-134.
GUO Chuangxin, ZHU Chengzhi, ZHANG Lin, et al. A fault diagnosis method for power transformer based on multiclass multiple-kernel learning support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(13):128-134.
- [8] 潘亮亮,赵书涛,李宝树. 基于声波信号分析的电气设备故障诊断新方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):87-90.
PAN Liangliang, ZHAO Shutao, LI Baoshu. Electrical equipment fault diagnosis based acousticwave signal analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(8):87-90.
- [9] 范松海,樊文芳,王铭民,等. 变压器油色谱在线检测与故障诊断应用[J]. 电力系统自动化,2015,37(5):60-62.
FAN Songhai, FAN Wenfang, WANG Mingmin, et al. On-line monitoring of transformer oil chromatogram and it application in fault diagnosis[J]. Electrical Automation, 2015,37(5):60-62.
- [10] 王萍. 利用油色谱分析判断变压器故障及处理[J]. 电器工业,2011(5):60-62.
WANG ping. By using chromatographic analysis of transformer

- fault judgment and treatment [J]. China Electrical Equipment Industry, 2011(5): 60-62.
- [11] 刘辉. 变压器油中溶解气体的分析与故障诊断研究[D]. 湖北:武汉大学, 2004.
- [12] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [13] 俞华, 史红洁, 常英. 一起 220 kV 变压器油色谱异常的判断及故障处理[J]. 变压器, 2012, 49(11): 68-70.
YU Hua, SHI Hongjie, CHANG Ying. Diagnosis and treatment of abnormal chromatographic data of 220 kV transformer [J]. Transformer, 2012, 49(11): 68-70.
- [14] 孔祥凤, 李进. 一台 220 kV 主变色谱异常故障的分析及处理[J]. 变压器, 2012, 49(6): 61-64.
KONG Xiangfeng, LI jin. Analysis and treatment of abnormal chromatographic result fault of 220 kV main transformer [J]. Transformer, 2012, 49(6): 61-64.
- [15] H Wu, B Chang, C Zhu, et al. Gas sensor array system for analyzing fault in transformer[J]. Journal of Xi'an Jiao tong University, 2000, (4): 23-25.
- [16] Gustavsson N. Evaluation and simulation of black-box arc models for high voltage circuit breakers [EB/OL]. <http://www.ep.liu.se/exjobb/isy/2004/3492>, 2012-08-16.
- [17] 徐康健, 钟俊武. 一台 500 kV 变压器油色谱分析数据异常的故障诊断与检查[J]. 变压器, 2010, 47(9): 72-74.
XU Kangjian, ZHONG Junwu. Fault diagnosis and inspection for abnormal oil chromatographic analysis data in 500 kV transformer [J]. Transformer, 2010, 47(9): 72-74.
- [18] VG Arakelian. The long way to the automatic chromatographic analysis of gases dissolved in insulating oil [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(6): 8-25.
- [19] JS Kwak, JB Song. Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals. International Journal of Machine Tools & Manufacture [J], 2001, 41(6): 899-913.
- [20] 颜秋容, 刘欣, 尹建国. 基于小波理论的电力变压器振动信号特征研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 165-168, 184.
YAN Qiurong, LIU Xin, YIN Jianguo. Features of vibration signal of power transformer using the wavelet theory [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 165-168, 184.
- [21] 朱叶叶, 汲胜昌, 张凡, 等. 电力变压器振动产生机理及影响因素研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 115-125, 155.
ZHU Yeye, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Vibration mechanism and influence factors in power transformer [J]. Journal of Xi'an Jiao tong University, 2015, 49(6): 115-125, 155.
- [22] 谢荣斌, 薛静, 张霖, 等. 基于油色谱分析的变压器故障诊断与应用[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 117-121.
XIE Rongbin, XUE Jing, ZHANG Lin, et al. Transformer Fault Diagnosis and Application Based on Oil Chromatography Analysis [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 117-121.

收稿日期: 2017-11-25

作者简介:



张霖(1976), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压试验与在线监测方面的研究。

(本文责任编辑: 龙海丽)

Multi-dimensional state monitoring and fault diagnosis of 500 kV Transformer

ZHANG Lin, YANG Chao, LI Shi Yong, ZHANG Li Juan, SHEN Jun

(Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550001 Guizhou, China)

Abstract: To enhance the level of transformer fault diagnosis and effectively implement the state overhaul, together with 500 kV main transformer internal latent failure case introduced the use of a variety of on-line monitoring, off-line testing methods such as fault diagnosis method is rapid and accurate to find out the transformer fault cause and location. It by adopting oil chromatographic detection, transformer vibration and sound detection, capacitive equipment on-line monitoring, transformer partial discharge detection, multidimensional state monitoring technology such as charged test evaluation and fault diagnosis of transformer state and helps to realize the accurate positioning of the main transformer internal fault and maintenance strategy. The main transformer in the condition monitoring and fault diagnosis after realizing the rapid and accurate positioning, hidden faults and through emergency treatment has resumed normal operation state, so as to avoid the accident of the major equipment. The results showed that the application of transformer oil chromatographic analysis of dissolved gas detection technology, can be accurate to diagnose transformer faults exclusions nature and severity of it is the early detection of transformer latent fault particularly effective method. At the same time, based on cross wavelet transformer vibration signal characteristic extraction methods to analyze the evaluation results show that the transformer core ground fault occurred after the vibration signals exist a large number of 50 Hz harmonic component. By means of vibration and sound detection technology, it can help transformer fault diagnosis and accurate positioning, and improve the efficiency of equipment state overhaul.

Key words: transformer; state monitoring; fault diagnosis; vibration; noise; oil chromatographic analysis