

一起 110 kV 变压器绕组变形故障分析判断及解体验证

吴波¹, 丁登伟², 唐铭¹, 王静¹, 张军强¹, 唐琳凯¹

(1. 国网四川省电力公司绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:介绍了一起 110 kV 三绕组变压器停电后例行检查过程中发现缺陷的过程情况, 为变压器的精确诊断提供了典型案例。通过试验过程中的电气试验和油化试验数据以及带电振动测试数据对变压器进行了综合分析, 最终得出变压器中压侧(35 kV 侧)遭受电流冲击导致绕组变形的结论, 并解体得到了验证。通过对该变压器的精确诊断, 有效地避免了一次变压器潜伏性事故的发生, 并给出了变压器日常例行检查及带电检测工作中的注意事项和检修建议。

关键词: 变压器; 绕组变形; 频率响应; 短路阻抗; 振动测试

中图分类号: TM403.2 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2018)01-0039-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.009

Analysis of One 110 kV Transformer Winding Deformation Fault and Disassembly Validation

Wu Bo¹, Ding Dengwei², Tang Ming¹, Wang Jing¹, Zhang Junqiang¹, Tang Linkai¹

(1. State Grid Mianyang Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The defects found in the routine inspection of 110 kV three-winding transformer after power failure are introduced, which provides a typical case of precise diagnosis for transformer. According to the data of electrical test and oilification test as well as the live vibration test, a comprehensive analysis is carried out for the transformer. The results show that the medium voltage side (35 kV side) of transformer suffers from the current shocking resulting in winding deformation, and it is verified after disassembly. The accurate diagnosis of the transformer avoids a potential transformer accident, and the suggestions and maintenance experiences for the routine inspection and live testing are also given.

Key words: transformer; winding deformation; frequency response; short-circuit impedance; vibration test

0 引言

电力变压器是电力系统中最重要设备之一, 变压器的安全稳定运行, 关系到整个电网的稳定工作。而随着中国城市化进程的加快, 电动汽车、以电代煤等政策概念的推广, 也使社会对电力负荷的需求急剧增加。由于复杂的负荷情况, 变压器本身时刻承受着各种冲击, 如何利用有限的停电时间, 精准对变压器进行诊断, 对电网的稳定运行有着重要意义。

据统计, 绕组变形故障在变压器故障中占有相当大的比例^[1-2]。根据《国家电网公司十八项电网

重大反事故措施(修订版)》要求, 110(66) kV 及以上电压等级变压器在出厂和投产前, 应用频率响应法和低电压短路阻抗测试绕组变形以留原始记录。国家电网公司企业标准 Q/GDW 1168-2013《输变电设备状态检修试验规程》在变压器的诊断性试验项目中也对频率响应及短路阻抗试验做出了要求^[3-4]。

1 异常主变压器情况简介

该主变压器参数如表 1 所示, 2008 年 5 月出厂, 2009 年 1 月 13 日投入运行, 2015 年 5 月 13 日例行检查工作中发现试验数据异常, 其中压侧频率响应、短路阻抗、变压器绕组电容量等数据均出现了

异常,经判断绕组发生了变形的情况。

表1 主变压器主要铭牌参数

名称	参数
型号	SFSZ10-40000/110
联接组别	YNyn0d11
冷却方式	ONAF
额定容量	40/40/40 MVA
额定电压	110/38.5/10.5 kV
额定电流	209.9/599.8/2199.4 A
空载电流	0.14%
负载损耗	228.63 kW
空载损耗	51.25 kW

1.1 频率响应试验

频率响应试验使用 HV-RZBX 型试验设备进行,测试信号选取 1~1000 kHz 范围内。根据电力行业标准 DL/T 911-2004《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》计算的相关系数分析,对相关系数 R 与变压器绕组变形程度关系做出规定如表 2 所示,同时规定 1~100 kHz 为低频段,100~600 kHz 为中频段,600~1000 kHz 为高频段。

表2 相关系数 R 与变压器绕组变形程度关系

绕组变形程度	相关系数 R
严重变形	$R_L < 0.6$
明显变形	$0.6 \leq R_L < 1.0$ 或 $R_M < 0.6$
轻度变形	$1.0 \leq R_L < 2.0$ 或 $0.6 \leq R_M < 1.0$
正常绕组	$2.0 \leq R_L$ 和 $1.0 \leq R_M$ 和 $0.6 \leq R_H$

注: R_L 为曲线在低频段内的相关系数; R_M 为曲线在中频段内的相关系数; R_H 为曲线在高频段内的相关系数。

测试数据显示,高压侧各频段曲线吻合度较高,中频段曲线吻合度稍差,但是仍在合格范围内,如图 1 所示。

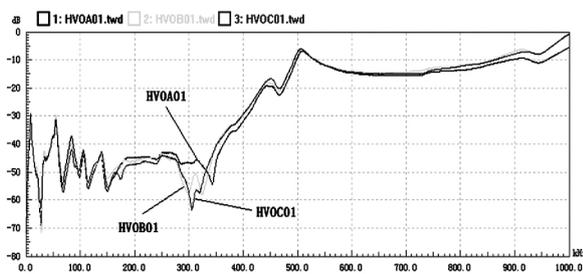


图1 高压侧绕组频率响应曲线

表3 高压侧频率响应曲线相关系数

相关系数 R_{xy}	R_{21}	R_{31}	R_{32}
低频段 R_{LF}	1.539	1.283	1.385
中频段 R_{MF}	1.728	1.611	2.205
高频段 R_{HF}	2.176	2.036	2.420

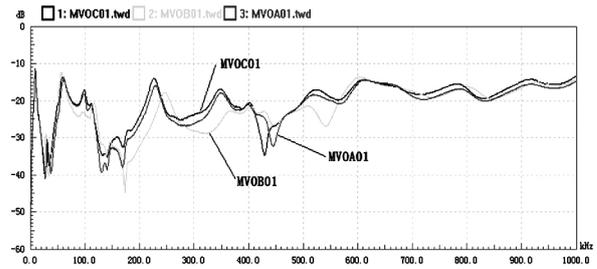


图2 中压侧频率响应曲线

中压侧频率响应曲线显示,整个中低频段三相曲线的吻合度较差,通过相关系数的计算值发现,低频段相关系数 R_{21} 小于 1.0,中频段相关系数 R_{21} 、 R_{23} 均小于 0.6,即在中压侧绕组的中、低频段均存在明显变形的迹象,如图 2 所示。

表4 中压侧频率响应曲线相关系数

相关系数 R_{xy}	R_{21}	R_{31}	R_{32}
低频段 R_{LF}	0.911	1.651	1.152
中频段 R_{MF}	0.520	1.091	0.360
高频段 R_{HF}	0.759	0.902	0.735

低压侧曲线显示,在曲线的 50~400 kHz 及 550~700 kHz 部分吻合度较低,分布于曲线的低频段、大部分中频段和高频段的小部分。通过相关系数的计算显示,低频段 R_{21} 小于 1,有明显变形现象;中频段 R_{21} 、 R_{31} 、 R_{32} 均小于 1,有轻度变形现象,如图 3。

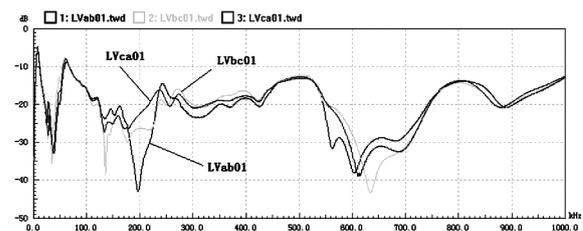


图3 低压侧频率响应曲线

表5 低压侧频率响应曲线相关系数

相关系数 R_{xy}	R_{21}	R_{31}	R_{32}
低频段 R_{LF}	0.950	1.510	1.401
中频段 R_{MF}	0.645	0.642	0.914
高频段 R_{HF}	1.145	1.850	1.326

低频段出现异常,通常表明该绕组电感量发生了明显变化,可能存在匝间或饼间短路情况;中频段则反映出绕组分布电感和电容的变化,如出现异常通常预示绕组发生扭曲和鼓包等局部变形现象。

1.2 低压短路阻抗试验

高压对中压短路阻抗测试值为 10.516%,出厂铭牌值为 10.04%,初值差(铭牌值为初值,下同)为 4.74%;高压对低压短路阻抗测试值为 18.106%,

出厂铭牌值为 18.38% ,初值差为 -1.49% ;中压对低压短路阻抗测试值为 5.916% ,出厂铭牌值为 6.65% ,初值差为 -11.20% 。高压对中压以及中压对低压测试数据与铭牌值误差已经大于 $\pm 2%$,超出国家电网公司企业规程要求警示值。鉴于有中压侧参与的数据均出现异常,可初步判断中压侧应存在变形情况。数据如表 6 所示。

表 6 主变压器短路阻抗测试数据

测试部位	铭牌值	测试值	误差
高-中	10.04%	10.52%	4.74%
高-低	18.38%	18.11%	-1.49%
中-低	6.65%	5.91%	-11.20%

注:短路阻抗测试数据已经换算至 75℃。

1.3 本体电容量及介损测试

相较于 2010 年 6 月测试数据,电容量变化较大,超过 $\pm 5%$ 时应该引起注意,而介损值变化率很小,基本可以忽略,详见表 7、表 8。测试数据表明中、低压侧绕组出现了绕组位移现象,但是变压器绕组并未出现能引起变压器油过热现象。

表 7 主变压器绕组电容量测试数据

测试项目	2010 年测试值 /pF	2015 年测试值 /pF	变化率 /%
高对中低地	12 610	12 590	-0.16
中对高低地	25 100	23 630	-5.86
低对高中地	25 300	23 780	-6.01

表 8 主变压器绕组介损测试数据

测试项目	2010 年测试值 /%	2015 年测试值 /%	变化率 /%
高对中低地	0.22	0.25	+0.03
中对高低地	0.24	0.30	+0.06
低对高中地	0.23	0.31	+0.08

1.4 中、低压侧直流电阻试验

该变压器中、低压侧的直流电阻值见表 9。中压侧直流电阻三相线间互差小于 2% ,低压侧直流电阻三相相间互差小于 1% ,未见异常。

表 9 中、低压侧直流电阻试验数据

测试部位	测试值 /mΩ	不平衡率 /%	
中压侧	AO	60.500	0.93
	BO	60.230	
	CO	60.790	
低压侧	ab	7.398	0.43
	bc	7.401	
	ca	7.430	

1.5 振动测试

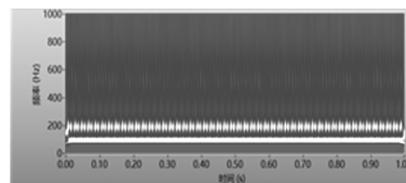
振动测试中,在变压器的两面布置了 28 个测点,检测点避开加强筋,垂直分布在 1/3 和 2/3 的位

置,见图 4。利用变压器振动检测系统,分别采集 1 s 内的振动信号进行分析,发现在测点 5、6、测点 11、12 以及测点 19、20、测点 25、26 的振动声纹特征存在明显异常。

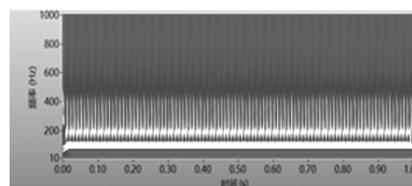
通过振动检测分析,在异常测点所测信号频谱的高频分量增多,图 5 为变压器表面正常测点和异常测点的时频分布差异,图中可见,正常测点持续存在的为 100 Hz 和 200 Hz 分量;异常测点,除了 100 Hz 和 200 Hz 分量以外,还持续存在 300 Hz 和 400 Hz 分量,高频分量增多且长时间持续存在。图 6 为变压器表面正常测点和异常测点的声学指纹差异,可见正常测点变压器的声学振动指纹只有规则的两圈,而异常测点,除了规则的两圈之外,在外围还有更多的指纹分布,差异明显。由此可见,变压器内部绕组存在一定程度的变形或松动,导致变压器表面的振动声学特征明显异常。



图 4 变压器的测点分布



正常测点



异常测点

图 5 变压器表面正常测点和异常测点的时频分布差异

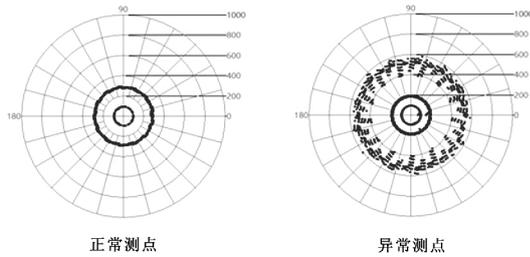


图6 变压器表面正常测点和异常测点的声学指纹差异
从检测结果分析,变压器表面一些部位的振动特征存在明显区别,进一步印证内部绕组存在一定程度的变形。

2 试验数据综合分析

从频率响应的情况来看,中、低压侧绕组均存在变形情况,中压侧绕组变形的程度可能要严重一些,短路阻抗测试的数据也表明,有中压绕组参与的数据均出现了明显异常;结合绕组电容量、介质损耗测试,中、低压侧绕组整体电容量变化较大,而所有介质损耗基本没有变化;变压器振动测试中,变压器表面的振动声学特征明显异常,而变压器表面的振动与变压器绕组及铁心的压紧情况、位移及变形状况密切相关;直流电阻值正常,油化试验的各项例检及跟踪数据中亦无明显异常,各种气体成分产气速率也都正常,可以排除绕组出现匝间或饼间短路及绕组烧损的情况。

综合以上数据分析,可以认定该主变压器绕组在外力作用下发生了比较明显的变形,结合主变压器历史运行负荷较小,主变压器中压侧(也可能有低压侧)绕组应可能是经受一次或数次短路电流冲击,在巨大短路电流产生的电动力影响下,绕组线圈发生了结构上的形变,但未产生绕组过热、短路、烧蚀等现象。

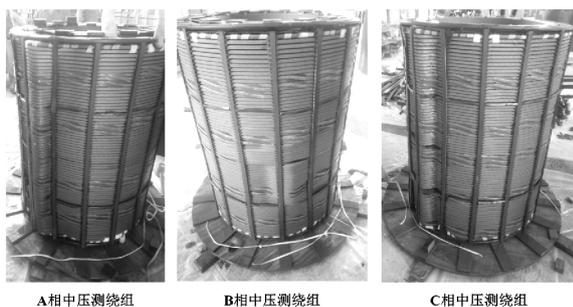


图7 三相中压侧绕组变形情况

3 解体检查

该变压器解体吊罩后发现内部干净程度较好,没有可见的放电烧蚀痕迹,三相绕组及110 kV有载分接开关、35 kV无载分接开关外观状况良好。最外层高压绕组线圈外观良好,绕线线圈洁净,形状规则。高压绕组取下后,发现中压绕组线圈有非常明显的鼓包和扭曲变形,但总体干净,其中A、C相形变较严重,B相略轻,如图7所示。

分离中低压侧绕组时,由于A、C相中压侧绕组变形比较严重,与内部低压绕组互相挤压,致使不能顺利地将中低压侧分离,只有B相分离成功。B相低压侧分离后显示有一些轻微的变形,应是受中压侧挤压所致,如图8所示。

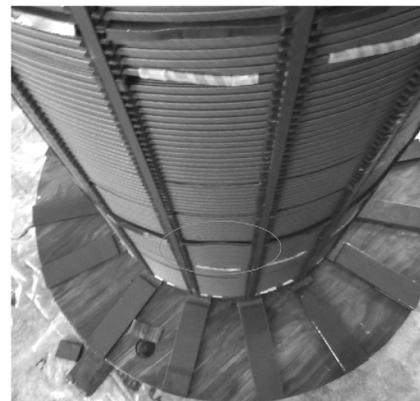


图8 B相低压侧绕组变形情况

解体结果表明,该变压器应该为中压侧绕组遭受短路电流等大电流冲击后,在强大的电动力作用下发生了明显的变形,但是可能遭受冲击电流过程时间较短,未形成短路过热等过程。由于绕组变形存在积累效应,考虑到中低压绕组已经严重变形并且已经互相挤压,设备若继续运行将很可能造成重大的电网事故。

这次通过对变压器试验数据的综合判断,及时判定变压器内部存在绕组变形情况,并对产生变形的情况以及程度进行准确分析,有效避免了一起变压器设备的潜伏性事故。

4 结论

根据频率响应试验、低压短路试验、本体电容及介损试验、中低压侧直阻试验以及振动带电检测

测的实验结果,通过综合分析判断该变压器绕组存在变形,并解体印证。通过上述变压器绕组变形故障的判断处理,发现在试验中对于不合格的试验结果,应从多个方面综合分析,对后期检修工作的开展具有指导意义。对于变压器绕组状态的评估分析试验应重视现场检测试验的数据分析,才能为后期检修工作提供有针对性和有效性的方案,从而降低检修成本,维护设备和电网的健康稳定运行。

参考文献

[1] 国家电网公司. 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168-2013 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[2] 国家能源局. 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393-2010 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[3] 王梦云. 2004年度110 kV及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备, 2005, 6(11): 31-37.

[4] 胡勇, 程蕾. 大型电力变压器故障实例统计分析[J]. 电力安全技术, 2003, 5(1): 20-21.

[5] 于洋, 耿宁, 陈勇强, 等. 一起220 kV变压器绕组变形

缺陷的诊断分析与解体验证[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 172-176.

[6] 汲胜昌, 刘味果, 单平, 等. 变压器缺心及绕组状况的振动测试系统[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 1-3.

[7] 王世山, 汲胜昌, 李彦明. 利用振动法进行变压器在线监测的应用研究[J]. 变压器, 2002, 39(s1): 73-76.

[8] 程锦, 李延沐, 汲胜昌, 等. 振动法在线监测变压器绕组及铁心状况[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 43-45.

[9] 王庆龙. 电力变压器振动监测方法研究[D]. 成都: 西华大学, 2006.

[10] 周建平, 林爱弟, 吴劲晖, 等. 电力变压器振动监测的测点位置选择[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1100-1108.

[11] 杨玥, 汪鹏, 顾宇宏, 等. 利用绕组电容量及短路阻抗试验综合判定变压器绕组变形方法分析[J]. 内蒙古电力技术, 2016, 34(6): 1-5.

作者简介:

吴波(1988), 电气试验技师, 主要从事电气试验方面的工作和研究。(收稿日期: 2017-10-19)

(上接第35页)

[3] 邵丽华, 章竹耀, 张春龙, 等. 储能电池荷电状态与平抑风电出力波动协调运行策略[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 84-88.

[4] 姜素华, 吴耀武, 崔艳昭, 等. 电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 17-22.

[5] Cong-Long Nguyen, Hong-Hee Lee. A Novel Dual-battery Energy Storage System for Wind Power Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6136-6147.

[6] 章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 等. 储能电池平抑风电功率波动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 62-68.

[7] 何川, 刘天琪, 胡晓通, 等. 基于超短期风电预测和混合储能的风电爬坡优化控制[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 782-790.

[8] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10-17.

[9] 程世军. 风电场储能系统的优化配置及运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

[10] 侯婷婷. 含大规模风电的电力系统储能电源优化配置研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

[11] 谢应昭, 卢继平, 翁宗林, 等. 改善风电输出功率特性的复合储能系统优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2052-2058.

[12] 王颖, 张凯锋, 付嘉渝, 等. 抑制风电爬坡率的风储联合优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 17-23.

[13] Zhang X, Yuan Y, Hua L, et al. On Generation Schedule Tracking of Wind Farms with Battery Energy Storage Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 8(1): 341-353.

[14] 杨珺, 张建成, 黄磊磊, 等. 基于改进粒子群算法的独立光伏发电系统储能容量优化配置研究[J]. 华东电力, 2012, 40(8): 1370-1374.

[15] Wang Yi, Jiang Hanhong, Xing Penxiang. Improved PSO-based energy management of Stand-alone Micro-grid under Two-time Scale[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2016: 2128-2133.

作者简介:

戴长春(1973), 硕士、高级工程师, 从事电网调度运行工作;

章怡帆(1994), 硕士研究生, 研究方向为风电系统优化运行与控制。

(收稿日期: 2017-09-12)