

一起变压器绕组变形故障的检测及分析

李林¹, 谢茜²

(1. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:针对一起在运 110 kV 变压器的绕组变形故障进行检测与分析。首先,通过电容量、短路阻抗、频响曲线检测初步分析变压器绕组变形情况;然后,通过变压器解体检查及绕组材质检测分析了造成事故的原因;最后,针对该故障提出了针对性的整改措施。

关键词:变压器;绕组变形;电容量;短路阻抗;频率响应;屈服强度

中图分类号:TM 406 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)05-0091-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230515

Detection and Analysis of Winding Deformation of A Transformer

LI Lin¹, XIE Qian²

(1. State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China;

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

Abstract: A winding deformation of 110 kV transformer in operation is detected and analyzed. Firstly, the situation of winding deformation are preliminary analyzed through capacitance, short circuit impedance and frequency response detection, and then the causes of the accident are analyzed through transformer disassembly inspection and winding material detection. Finally, the corresponding rectification measures are proposed.

Key words: transformer; winding deformation; capacitance; short circuit impedance; frequency response; yield strength

0 引言

变压器是电力系统中重要的电气设备,对电网安全稳定运行起着重大的作用。变压器在运行过程中,遭受到近区短路故障时,绕组内会流过很大的短路电流,在最严重时通过的短路电流可达额定数值的 15~20 倍^[1]。由于绕组承受的电力与电流平方成正比,如果绕组自身强度不高、压紧结构不良、绕制工艺不佳,则可能造成变压器绕组发生机械变形甚至损坏。因此,对变压器绕组状态进行评价具有重要意义。绕组变形诊断检测通常是在出厂前或现场安装后对绕组进行检测,运行期间也会进行一系列常规检测,通过对相关特征量的测量分析判断绕组是否有变形、位移等异常现象发生。

目前,诊断变压器绕组变形比较成熟的检测

方法有短路阻抗法、电容量法和频响法。在实际工作中需要结合这 3 种方法进行综合分析。下面介绍了一起 110 kV 主变压器绕组变形的故障案例,通过电气试验综合分析、绕组材质检测以及解体检查,分析了造成事故的原因,提出了相应的整改措施。

1 故障简述

2019 年 7 月,某 110 kV 变电站 10 kV 母联断路器开关柜内相间绝缘挡板放电,发生相间短路,因 10 kV 母线分列运行,1.30 s 后过流 II 段保护动作,切断故障电流,试验诊断为主变压器绕组变形。之后该主变压器返厂检修,发现中低压 B、C 相绕组变形。按照原设计方案重新绕制中低压 B、C 相绕组,经出厂试验后重新投入运行。

2021年3月,该主变压器停电进行例行试验,发现主变压器中压侧A相试验数据异常。该变电站负荷较轻,最大负载率为50%,无冲击性负荷。在2020年11月,由于35kV用户变电站进线柜穿柜套管故障,导致该站35kV供用户变电站的出线跳闸,故障电流为423A,该主变压器遭受短路电流冲击后色谱试验仍正常。该变压器型号为SSZ11-50000/110,于2011年5月出厂,于2012年8月首次投入运行。

2 检测情况

对该变压器进行电气试验和油色谱试验,其中主变压器电容量、短路阻抗、绕组频响曲线均异常,其余试验正常。

2.1 电容量测试

设高压绕组对中、低压绕组及地的电容为 C_{X1} ,中压绕组对高、低压绕组及地的电容为 C_{X2} ,低压绕组对高、中压绕组及地的电容为 C_{X3} ,高、中、低压绕组对地的电容为 C_{X4} ,高、中压绕组对低压绕组及地的电容为 C_{X5} 。2019年主变压器返厂大修后电容量交接试验值、2021年主变压器例行试验的电容量测试值如表1所示。

表1 电容量测试值

测试项目	2019年 电容量/nF	2021年 电容量/nF	偏差/%
C_{X1}	14.64	14.05	-4.199
C_{X2}	22.60	25.86	14.425
C_{X3}	20.06	23.97	19.492
C_{X4}	14.47	14.58	0.760
C_{X5}	14.92	18.73	25.536

使用集中参数建模的方法对变压器各部分电容量进行简化计算:令高压绕组对地电容为 C_1 ,中压绕组对地电容为 C_2 ,低压绕组对地(铁芯)电容为 C_3 ,高压绕组与中压绕组间电容为 C_{12} ,中压绕组与低压绕组间电容为 C_{23} ,高压绕组与低压绕组间电容为 C_{13} 。由于 C_{13} 数值较小,常被忽略。

通过电容量实测值的5组数据简化建模,计算得到的电容量如表2所示。

$$\begin{cases} C_{X1} = C_1 + C_{12} \\ C_{X2} = C_2 + C_{12} + C_{23} \\ C_{X3} = C_3 + C_{23} \\ C_{X4} = C_1 + C_2 + C_3 \\ C_{X5} = C_1 + C_2 + C_{23} \end{cases}$$

表2 电容量计算值

项目	2019年 电容量/nF	2021年 电容量/nF	偏差/%
C_1	3.480	3.460	-0.578
C_2	1.185	1.210	2.110
C_3	9.805	9.910	1.071
C_{12}	11.160	10.590	-5.382
C_{23}	10.255	14.060	37.104

从表1可以看出,两次测量值发生明显变化,偏差最大达到25.536%,远远超过了《输变电设备状态检修试验规程》中3%的警示值^[2]。

从表2可以看出,中压绕组与低压绕组之间的电容量,增加了37.104%,高压绕组与中压绕组之间电容量减小了5.382%,中压绕组对地的电容量增加了2.110%。分析认为中压绕组在电力作用下向铁芯收缩,导致中压绕组与低压绕组间的距离大幅度减小,高、中压绕组之间的距离小幅度增大,导致电容量测试值出现明显异常。

2.2 短路阻抗测试

2019年主变压器返厂大修后短路阻抗交接试验值、2021年主变压器例行试验的短路阻抗测试值如表3所示。两次均采用三相法进行测量。

表3 主变压器短路阻抗值

测试部位	变压器 档位	短路阻抗/%		偏差/%
		2019年	2021年	
高压绕组对 中压绕组	极限正分接 (1挡)	10.347	10.573	2.184
	主分接 (9挡)	9.844	10.181	3.423
	极限负分接 (17挡)	9.828	10.149	3.266
高压绕组对 低压绕组	极限正分接 (1挡)	18.480	18.475	-0.027
	主分接 (9挡)	18.010	18.008	-0.011
	极限负分接 (17挡)	18.020	18.005	-0.083
中压绕组对 低压绕组	主分接 (9挡)	6.499	6.161	-5.486

从表3可以看出:1)2021年的测试值与2019年的测试值最大偏差达到5.486%,不满足《电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则》相对变化不超过 $\pm 2\%$ 的要求^[3];2)高压绕组对低压绕组短路阻抗值的偏差很小;3)高压绕组对中压绕组短路阻抗值增加了约3%,认为高压对中压的漏电抗增加了,即高压与中压的漏磁通增加,高、中压绕组之间的距离增大;4)中压绕组对低压绕组短路阻抗值减小

了 5.486%,认为中压对低压的漏电抗减小了,即中压与低压的漏磁通减小,中低压绕组之间的距离减小。

之后,对主变压器采用单相法进行短路阻抗值测量,得到的结果如表 4 所示。

表 4 短路阻抗单相测试值

测试部位	变压器挡位	短路阻抗/%			相间偏差/%
		A 相	B 相	C 相	
高压绕组对 中压绕组	极限正分接 (1 挡)	11.510	10.310	9.890	16.380
	主分接 (9 挡)	10.990	9.775	9.774	12.441
	极限负分接 (17 挡)	10.960	9.735	9.753	12.583
高压绕组对 低压绕组	极限正分接 (1 挡)	18.410	18.540	18.470	0.706
	主分接 (9 挡)	17.990	18.030	17.990	0.222
	极限负分接 (17 挡)	18.000	18.010	17.990	0.111
中压绕组对 低压绕组	主分接 (9 挡)	5.454	6.487	6.540	19.912

从表 4 可以看出,中压绕组对低压绕组短路阻抗值相间偏差最大,其中 A 相的短路阻抗值与其余两相偏差最大,分析认为 A 相绕组可能发生了严重变形。

2.3 频响法绕组变形测试

利用频响法对变压器进行测试,发现高压、低压绕组三相频响曲线相似度较高,中压绕组三相频响曲线差异较大,其频响曲线如图 1 所示。黄色曲线为 A 相,绿色曲线为 B 相,红色曲线为 C 相。相关系数分析结果如表 5 所示,表中 R_{21} 表示 A、B 两相的相关系数, R_{31} 表示 A、C 两相的相关系数, R_{32} 表示 B、C 两相的相关系数。

根据《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》中相关系数与变压器绕组变形程度的关系,低频段相关系数 $R_{LF} < 0.6$,为严重变形;低频段相关系数 $0.6 \leq R_{LF} < 1.0$ 或中频段相关系数 $R_{MF} < 0.6$,为明显变形;低频段相关系数 $1.0 \leq R_{LF} < 2.0$ 或中频段相关系数 $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$,为轻度变形。从图 1 和表 5 可以看出,在低频段(1~100 kHz)3 条曲线重合性较好,相关系数 $1.0 \leq R_{LF} < 2.0$;在中频段(100~600 kHz)3 条曲线一致性很差,峰值和频率变化较大,A 相曲线的谐振峰值点向低频方向偏移,相关系数 $R_{21} < 0.6, R_{31} < 0.6, R_{32} \geq 1.0$;在高频段(600~1000 kHz)

3 条曲线的走向基本一致,三相曲线间的相关系数 $R_{HF} \geq 0.6$ 。分析认为变压器 A 相绕组的分布电感、电容发生变化导致绕组发生局部变形现象。

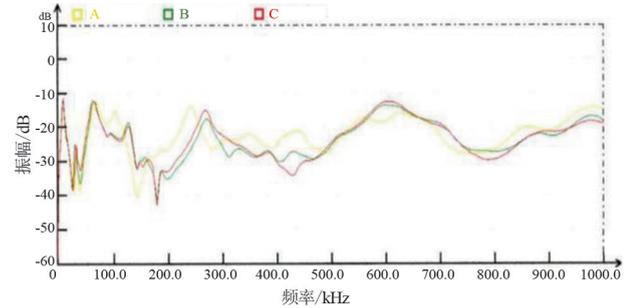


图 1 中压绕组频响曲线

表 5 中压绕组相关系数分析结果

相关系数	低频段 (1~100 kHz)	中频段 (100~600 kHz)	高频段 (600~1000 kHz)
R_{21}	1.24	0.27	0.81
R_{31}	1.20	0.28	0.75
R_{32}	1.37	1.19	1.77

电容量和短路阻抗分析的结果一致性较高,认为中、低压绕组之间的电气距离缩小了。从频响曲线和短路阻抗测试分析认为 A 相绕组变形可能性极大。综合电容量、短路阻抗、频响曲线测试结果,认为变压器中压 A 相绕组在电动力作用下向铁芯收缩,发生严重变形。

3 解体检查及电磁线材质检测

该主变压器再次返厂后进行解体检查,发现:主变压器中压 A 相绕组向铁芯收缩严重变形;低压绕组受挤压无法吊出;中压 B 相绕组其中一匝稍微变形凹陷。各绕组解体检查情况如图 2 所示。

随机截取了变压器中、低压侧 A、B、C 三相若干段绕组进行屈服强度检测,检测结果见表 6。中压侧三相绕组屈服强度检测值均小于设计值 180~200 MPa,低压侧三相绕组屈服强度检测值均小于设计值 220~240 MPa。根据测试结果,判定中、低压线圈电磁线为软态铜。

表 6 中低压绕组屈服强度检测结果

相别	低压电磁线屈服强度/MPa	中压电磁线屈服强度/MPa
A	90	88
B	93	89
C	91	89



(a) 中压A相绕组



(b) 中压B相绕组

图2 主变压器解体检查情况

4 结 论

综上所述,变压器发生绕组变形故障的主要原

(上接第6页)

- [14] 黄华,陈璐,吴天逸,等.城市轨道交通动态运行对交流电网变压器偏磁直流的影响[J].电网技术,2022,46(11):4524-4533.
- [15] 王爱民,林圣,李俊逸,等.城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J].高电压技术,2020,46(4):1379-1386.
- [16] LIN Sheng, WANG Aimin, LIU Mingjie, et al. A multiple section model of stray current of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2021, 36(3): 1582-1593.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [18] 谷应科,李俊龙,方毅平,等.220 kV 变压器高压侧直流电阻超标原因分析及处理[J].变压器,2020,57(1):84-87.
- [19] WANG Aimin, LIN Sheng, HU Ziheng, et al. Evaluation model of DC current distribution in AC power systems caused by stray current of DC metro systems[J]. IEEE

Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 114-123.

因是变压器承受短路冲击后绕组变形。返厂大修重绕绕组后,在遭受较小的短路电流的情况下,由于变压器电磁线屈服强度不满足要求而再次发生变形。

为了保证变压器安全运行,提出以下措施:1)在变压器生产阶段,严格按照取样要求对绕组线进行抽检;2)实时监测变压器遭受近区短路情况,当短路次数超过标准要求后,对变压器停电进行诊断性试验;3)通过在主变压器中、低压侧增加快速保护,减少短路冲击时间,同时完善主变压器中低压侧绝缘化改造,做好防近区短路措施。

参考文献

- [1] 梁振光.大型电力变压器绕组的短路强度问题[J].变压器,2003,40(8):9-12.
- [2] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会.输变电设备状态检修试验规程:DL/T 393—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.
- [3] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则:DL/T 1093—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.

作者简介:

李 林(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事变电检修管理工作。(收稿日期:2023-06-28)

- [20] 中国电力企业联合会标准化管理中心.交流电气装置的接地设计规范:GB/T 50065—2011[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [21] 李欢,傅闯,辛清明,等.高压直流输电系统直流谐波阻抗的解析计算及谐振分析研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(19):67-79.
- [22] 俞翔,鲁江,董云龙,等.适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):174-180.

作者简介:

李小鹏(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为交流混联电网控制保护技术;

张华杰(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制工作;

吴嘉煜(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制;

周文越(1989),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护运行、检修、研发相关工作。

(收稿日期:2023-04-13)