

一起主变压器高压绕组损坏事故检测与分析

罗 杨,杨红权,刘彦琴,刘 鑫,李 波,周 波,高 峻,姜飞宇

(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘要:对一起线路短路故障导致主变压器高压绕组损坏事故进行了分析。通过油化试验和高压电气试验,初步确定烧蚀部位位于主变压器高压侧 C 相主绕组靠下部位,并通过吊罩检查得以验证。

关键词:主变压器;短路冲击;绕组损坏;油中溶解气体

中图分类号:TM 406 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2021)05-0059-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210512

Detection and Analysis on HV Winding Damage of A Main Transformer

Luo Yang, Yang Hongquan, Liu Yanqin, Liu Xin, Li Bo, Zhou Bo, Gao Jun, Jiang Feiyu

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:A case of HV winding damage of main transformer caused by short-circuit fault of transmission line is analyzed. Through the oil test and electric test, it is demonstrated that the damaged area is located in the lower part of main winding of phase C in high voltage side of main transformer, and it is confirmed through the overhaul of transformer cover.

Key words:main transformer; short-circuit impact; winding damage; gasses dissolved in transformer oil

0 引 言

近年来,随着工业和经济快速发展,电网规模也日趋增大,各电压等级的短路电流以及系统短路故障对设备的冲击损害越来越大。变压器作为电网系统的核心,其健康状态直接影响整个电网运行的安全稳定。变压器抗短路能力是衡量变压器性能优良的重要参数,如绕组抗短路能力不足,则极易在短路电流冲击作用下发生变压器绕组变形或损坏^[1-3]。下面以一起 35 kV 线路短路故障导致 110 kV 主变压器高压绕组损伤为例,通过试验手段分析了主变压器高压绕组损毁的抗短路能力的重要性。

1 事故前运行方式

事故前,变电站运行方式如图 1 所示,全站电源由 152 线路主供,151 线路作为备用电源,其断路器处于分位。1、2 号主变压器并列运行(130 断路器处于合位),35 kV 侧合环运行(330 断路器处于合

位),10 kV 侧分列运行(930 断路器处于分位),322 断路器处于合位运行状态。

事故主变压器型号为 SFSZ10-50000/110,于 2008 年 3 月生产,联结组别为 YN/Yn0/d11,其有载开关型号为 CMIII-600Y/63C-10193W。

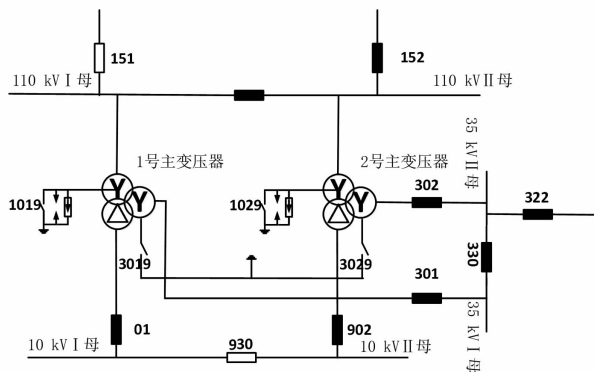


图 1 某站故障前的一次接线

2 事故分析

2.1 保护动作情况

2020 年 8 月 22 日 20:10:35:822,该变电站

35 kV 322 线路发生 B 相接地故障;310 ms 后,B 相故障发展为三相故障(录波文件显示故障电流约 3800 A),线路保护装置启动,但 322 断路器未跳开;2.483 s 后低电压 I、II 段动作,322 断路器跳开。

20:10:36:145,2 号主变压器差动保护启动,437 ms 后比率差动动作,跳开 152 断路器、110 kV 分段 130 断路器、35 kV 302 断路器与 10 kV 902 断路器。844 ms 后 2 号主变压器本体重瓦斯动作;4.925 s 后,2 号主变压器本体轻瓦斯发出信号。

2.2 主变压器设备检查

现场检查主变压器外观无异常,本体瓦斯继电器内部有少量气体,主变压器各处均无放电及渗漏油痕迹且油位正常。

2.3 油化试验

故障发生后,分别于 8 月 22 日和 8 月 23 日对主变压器中部及底部取样口取样,油化分析油中溶解气体浓度见表 1。故障特征气体经过 24 h 扩散,23 日油样特征气体含量明显比 22 日高,三比值编码为 102,为电弧放电故障特征,即线圈匝间、层间短路、相间闪络、分接头引线间油隙闪络、引起对箱壳放电、线圈熔断、分接开关飞弧、因环路电流引起电弧、引线对其他接地体放电等^[4]。同时,表 1 中数据还显示两次取样试验结果均发现主变压器底部油样特征气体含量远大于中部,由于故障特征气体在绝缘油中存在扩散现象,气体总是从高浓度部位向低浓度部位扩散,而且离故障点越近特征气体浓度越高,因此初步推断该主变压器内部发生过放电,且放电位置靠近变压器底部。

2.4 高压电气试验

2.4.1 低电压短路阻抗测试

低电压短路阻抗试验过程中,C 相高压绕组在 1 挡、9b 挡、17 挡均无法通流(即 C 相电流为 0),且电压约为 A、B 两相的 $\sqrt{3}$ 倍,说明 C 相高压绕组已呈高阻或断线状态。各挡位与 C 相高压绕组相关的短路阻抗数据异常,高压对低压、高压对中压短路阻抗值已达数千,远超试验值,见表 2;中压对低压短路阻抗最大相对互差为中压(1 挡)3.71%、中压(3 挡)2.5%、中压(5 挡)3.4%,超过规程要求的“容量 100 MVA 及以下且电压等级 220 kV 以下的变压器三相之间的最大相对互差不应大于 2.5%”,但是与历史值相比(2015 年 1 月 5 日检测时,高压对低压初值差 4.1%,中压(3 挡)对低压相间互差 3.3%),所测中压对低压短路阻抗的最大相对互差与历史值基本一致,各相短路阻抗值也无明显变化。

同时,为验证 C 相高压绕组为彻底断线还是呈高阻状态,在现场逐渐提高试验电压,当试验电压升至 700 V 左右时,电流表指针左右摇摆厉害,数据极不稳定,说明 C 相绕组上的高阻态结构在较高电压作用下,高阻部位被间隙性电击穿,导致电压指针左右摇摆;另外,在高压试验大厅对一实训用 110 kV 变压器(无缺陷)开展模拟高阻试验,即在实训变压器高压侧 C 相绕组上串接 1 k Ω ~1 M Ω 的电阻,之后开展低电压短路阻抗试验,测试结果与上述故障变压器一致,C 相高压绕组在低电压下无法通流,且 C 相电压约为 A、B 两相的 $\sqrt{3}$ 倍。因此可初步推断主变压器高压 C 相绕组中某一部位存在高阻态结构。另外,高压侧 1 挡、9b 挡、17 挡均出现无法通

表 1 主变压器油化试验数据

特征气体	油中溶解气体浓度/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)			
	2020-08-22(中部)	2020-08-22(底部)	2020-08-23(中部)	2020-08-23(底部)
氢气 H ₂ (<150)	52.6	107.9	225.6	490.7
一氧化碳 CO	413.1	457.9	548.9	794.5
二氧化碳 CO ₂	4 252.0	4 082.7	3 865.6	4 349.8
甲烷 CH ₄	46.5	71.0	91.8	166.3
乙烯 C ₂ H ₄	23.4	71.9	89.5	189.7
乙烷 CH ₄	13.6	10.1	17.1	9.1
乙炔 C ₂ H ₂ (<5)	21.2	76.4	106.2	233.0
总烃(<150)	104.7	229.4	304.6	598.1
结论	乙炔、总烃超标	乙炔、总烃超标	氢气、乙炔、总烃超标	氢气、乙炔、总烃超标

表 2 主变压器低电压短路阻抗试验数据

测试部位	挡位	相别	U/V	I/A	U _k /%	平均值/%	铭牌值/%	相对互差/%	初值差/%	
高-中	高压 1 挡-中压 3 挡	A	215.63	10.459	10.541					
		B	214.04	10.415	10.481					
		C	373.06	0.041	4 582.2					
	高压 9b 挡-中压 3 挡	A	215.84	8.643	10.319			10.26		
		B	213.79	8.598	10.275					
		C	373.16	0.049	3 118.2					
高-低	高压 1 挡	A	221.00	3.99	18.885					
		B	217.00	3.95	18.822					
		C	337.00	0.05	2 479.2					
	高压 9b 挡	A	219.40	4.86	18.639			17.82		
		B	217.70	4.83	18.606					
		C	377.40	0.03	4 337.4					
	高压 17 挡	A	216.37	5.80	19.017					
		B	214.91	5.77	19.011					
		C	373.98	0.04	4 546.6					
	中-低	中压 1 挡	A _m	17.412	10.232	6.62				
			B _m	17.466	10.175	6.71	6.73		3.71	
			C _m	17.537	9.956	6.87				
中压 3 挡		A _m	19.191	10.232	6.38					
		B _m	19.142	10.118	6.38	6.43		6.42	2.5	
		C _m	19.292	9.942	6.54				0.16	
中压 5 挡		A _m	22.878	10.53	6.36					
		B _m	22.738	10.366	6.42	6.45			3.4	
		C _m	22.815	10.167	6.58					

流、C 相电压异常现象,说明该高阻态位于高压侧 C 相主绕组上。

2.4.2 频率响应测试

图 2 为高压绕组的频率响应曲线,从图中可知高压绕组低频段与 C 相有关的相关系数均接近极限值 0.6(见表 3),属严重变形,说明绕组的电感改变,即线圈可能存在匝间或饼间短路故障,结合短路阻抗试验,再次验证了高压 C 相绕组存在高阻部位。图 3 为中压绕组的频率响应曲线,其低频段相关系数为 $2.0 > R_{LF} \geq 1.0$,中频段相关系数位于 $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$ 区间,属于轻度变形。低压绕组频率响应曲线三相基本一致,且与原始记录无明显差异,即绕组频响曲线的各个波峰、波谷点所对应的幅值及频率基本一致,低压侧绕组没有变形。中压绕组频率响应相关系数见表 4。

2.4.3 空载试验

表 5 为空载试验数据,从高压绕组加 20 kV 空载试验电压时,两个边相 AB 和 BC 铁芯空载电流和空载损耗差异均不超过 10%;从中压侧加 4.5 kV 时,空载试验不合格,两个边相 A_mB_m和 B_mC_m空载电流差异超过 10%;但是当中压侧加 12.5 kV 空载试验电压时,空载试验数据合格,两个边相 A_mB_m和 B_m

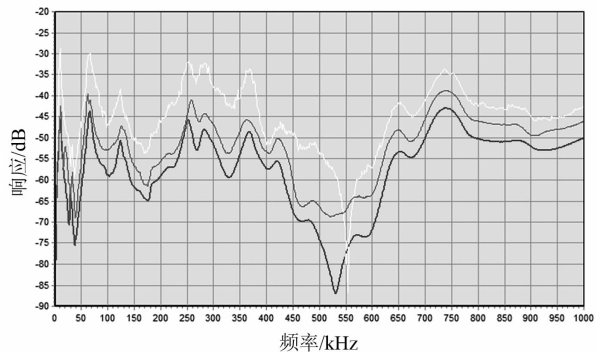


图 2 高压绕组频域响应曲线(1 挡)

表 3 高压绕组频率响应相关系数

相关系数	低频段 (1 ~ 100) kHz	中频段 (100 ~ 600) kHz	高频段 (600 ~ 1000) kHz
R ₂₁	1.19	1.96	2.37
R ₃₁	0.60	0.99	1.93
R ₃₂	0.90	1.07	2.33

C_m空载电流差异不超过 10%。造成这个现象的原因主要有以下几个:1)在低电压短路阻抗试验时已经提到,虽然高压 C 相绕组存在高阻态结构,但当试验电压升高时,高阻态会被逐渐电击穿,因此高压侧加 20 kV 空载试验电压时,高阻态被导通,空载试验数据合格;2)中压侧绕组在低电压(4.5 kV)时空载试验不合格,但是在提高试验电压(约 12.5 kV)后,空载数据合格。同样说明低电压下的不稳定高阻态

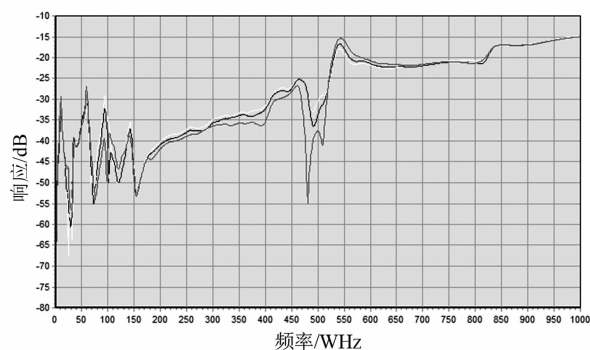


图3 中压绕组频域响应曲线(5挡)

表4 中压绕组频率响应相关系数

相关系数	低频段 (1~100)kHz	中频段 (100~600)kHz	高频段 (600~1000)kHz
R_{21}	1.48	0.92	1.27
R_{31}	1.30	0.90	1.53
R_{32}	1.36	1.44	1.85

随着电压升高逐步形成放电通道而呈现导通状态,电流大小亦由不稳定变为稳定状态;3)高试验电压下空载试验数据合格,说明铁芯没有局部短路或多点接地故障(铁芯绝缘电阻测试显示其绝缘电阻为3000 M Ω)。

表5 空载试验数据

加压	短路	试验电压/kV	空载电流/mA	空载损耗/W
AB	CO	20.0	48.1	625
BC	AO	20.0	46.3	592
CA	BO	20.0	65.0	832
$A_m B_m$	$C_m O_m$	4.5	60.9	—
$B_m C_m$	$A_m O_m$	4.5	76.7	—
$C_m A_m$	$B_m O_m$	4.5	78.8	—
$A_m B_m$	$C_m O_m$	12.5	165.0	—
$B_m C_m$	$A_m O_m$	12.5	164.0	—
$C_m A_m$	$B_m O_m$	12.5	230.0	—

2.4.4 变比测试

对该主变压器开展高压对中压、高压对低压变比测试,在所有挡位均无法测出结果,而中压对低压数据合格,间接说明高压侧主绕组区段存在缺陷。

2.4.5 直流电阻测试

该主变压器高、中、低绕组直流电阻测试数据如表6至表8所示,从表中可以发现该主变压器中、低压侧绕组直阻数据正常,但是高压侧CO绕组在各个挡位均无法通流(测试仪器:变压器直流电阻测试仪),无法测出其直流电阻值,改用万用表测试CO绕组直阻为12.85 k Ω 。之后给CO绕组升高电压至约700 V,当CO相电流指针偏转剧烈后逐渐降

压至0,再用万用表测试CO电阻,其数据明显降低(在0.4~300 Ω 范围内),但一段时间后CO绕组电阻又恢复至10 k Ω 以上(测试仪器:万用表测试)。由于各个挡位的现象一致,说明CO相高阻故障位于主绕组上;同时,鉴于油化试验中变压器底部油中故障特征气体浓度明显比中部油中浓度高,因此推测故障点位于C相主绕组上,并靠近箱体底部,如图4所示。

表6 高压绕组直流电阻试验数据

分接位置	高压绕组直流电阻测试值/ Ω			测试设备
	AO	BO	CO	
8	404.1	404.7	无法通流	直流电阻测试仪
9a	395.9	395.9	无法通流	
9b	395.3	395.5	无法通流	
9c	397.4	398.0	无法通流	
16	448.7	449.2	无法通流	
9b	0.4	0.4	12 850	万用表测量

表7 中压绕组直流电阻试验数据

分接位置	中压绕组直流电阻/m Ω			相间互差/%
	$A_m O_m$	$B_m O_m$	$C_m O_m$	
1	48.56	48.93	49.14	1.19
2	46.84	47.21	47.44	1.27
3	44.83	45.00	45.22	0.89
4	46.78	47.20	47.43	1.38
5	48.46	48.87	49.10	1.29

表8 低压绕组直流电阻试验数据

低压绕组直流电阻测试值/m Ω			线间互差/%
ab	bc	ca	
5.786	5.773	5.842	0.88

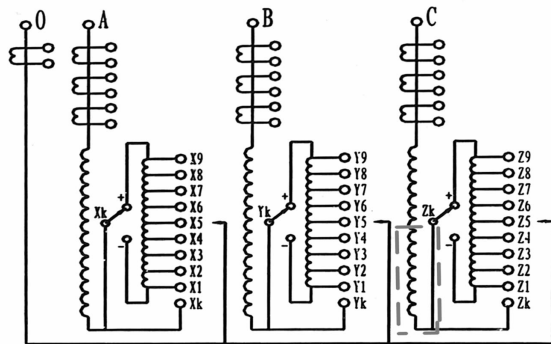
高压绕组联结图
(面向高压侧)

图4 高压C相绕组故障部位

2.4.6 绝缘试验

对故障主变压器开展主变压器连同套管的电容量和介损试验,结果无异常;测试绕组绝缘及铁芯绝

缘,也与历史值无明显差异,说明铁芯及绕组未故障接地,佐证了空载试验结论。

3 事故分析及吊罩验证

3.1 事故原因分析

20:10:35:822,322 出线间隔中压侧 B_m 相发生单相接地事故,310 ms 后继而发生三相短路故障,但此时 322 断路器未跳开;直到 760 ms 后比率差动作跳开 2 号主变压器各侧断路器,322 线路故障才被切除。显然,这是一起因为断路器拒动而导致越级跳闸引起的事故。该故障持续时间为 760 ms,电、热应力在此时间段内作用于主变压器高压侧绕组,导致绕组烧损熔融断裂;但其断口间绕组并没有彻底脱开,而是在四周油纸的共同作用下,熔化脱落的绕组金属熔化物与绝缘油纸粘结在一起,最终形成“虚接”状态的高阻结构。电弧高温使得绝缘油分解,产生大量故障气体,导致该主变压器本体重瓦斯动作、轻瓦斯报警。另外,频响法显示高压 C 相绕组低频段明显变化,存在电感量变化,也是由于高压 C 相绕组被大电流熔融烧损,匝间存在故障,绕组电感被改变。

3.2 吊罩检查

2020 年 10 月,该主变压器返厂吊罩检查,发现中压绕组、低压绕组、调压绕组以及高压侧 A、B、C 三相绕组线圈均完好无明显变形,但其高压侧 C 相绕组存在明显放电及烧蚀痕迹,如图 5 所示。在靠主变压器底侧第 26、27 线饼(从下往上数)处存在明显的放电烧蚀部位,两饼线匝烧蚀严重,第 27 饼

线匝直接被熔融烧断,周围聚集大量炭黑、铜粒等粉末物质;同时,整个高压 C 相绕组线圈污染严重,表面分布有大量黑色物质。这可能是由于在该部位存在不连续区域(或弱点),在短路电流作用下,不连续区域(或弱点)严重发热,热量导致附近绝缘损坏,进一步导致绕组匝间击穿,产生电弧,高温导致金属铜绕组熔融、绝缘纸和绝缘油分解。

4 结论

该案例变压器故障前曾遭受数次短路电流,可能导致其线圈产生薄弱点,当再一次遭受短路电流时薄弱点过热并导致匝间放电。变压器作为电力传输、转换、分配的重要设备,对稳定电网供电质量起着重要作用。因此,在日常运行维护中,需加强设备技术监督管理,强化电网和设备稳定、安全。

参考文献

- [1] 电力变压器 第 5 部分:承受短路的能力:GB 1094.5—2008[S],2008.
- [2] 刘旸,韩洪刚,周榆晓,等. 变压器绕组损坏事故分析与有限元计算验证[J]. 变压器,2019,56(5):81—82.
- [3] 曾华荣,刘君,吴湘黔,等. 在运 110 kV 变压器抗短路能力综合评估及防范建议[J]. 变压器,2019,56(12):72—76.
- [4] 变压器油中溶解气体分析和判断导则:DL/T 722—2014[S],2014.
- [5] 国家电网公司. 国家电网公司变电评价管理规定(试行) 第 30 分册 油浸式变压器(电抗器)检修策略[S],2017.
- [6] 王欢. 大型变压器多次短路工况下的电磁特性与绕组累积效应研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [7] 张博. 多次短路冲击条件下的大型变压器绕组强度与稳定性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [8] 王万超,李岩. 多次短路冲击下变压器绕组轴向模式分析[J]. 变压器,2017,54(6):6—9.

作者简介:

罗 杨(1985),男,高级工程师,主要从事高压电气试验及电气设备故障诊断工作。

(收稿日期:2021-05-11)

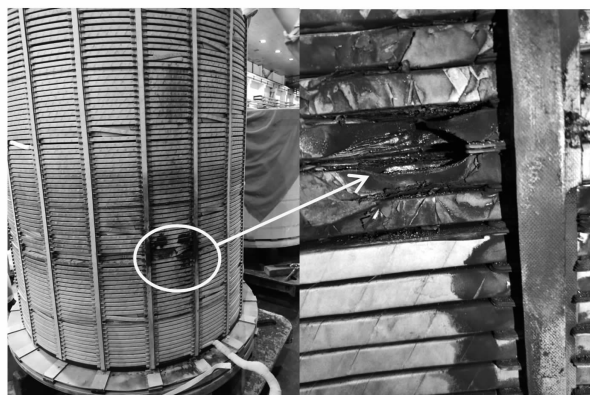


图 5 高压 C 相绕组故障点位置