

# 变压器绕组变形的综合诊断分析

梁博渊<sup>1</sup>, 刘宏亮<sup>2</sup>

(1.华北电力大学,河北保定 071003;2.河北省电力研究院,河北石家庄 050021)

**摘要:**电力变压器遭受短路冲击后,应尽快判别绕组损坏情况。利用频响分析法、短路阻抗法、绕组电容量法,结合绝缘油色谱分析、绕组直流电阻测试和电压变比测试等试验对一遭受短路冲击后的变压器绕组变形情况进行综合诊断分析。经验证,综合分析结果与实际情况一致。

**关键词:**变压器;绕组变形;故障诊断

**中图分类号:**TM407

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2011)01-0016-04

随着电力系统装机容量日益增长,系统内的短路容量和短路电流也随之增大,系统中运行的电力变压器就难免发生近距离出口的各类短路事故。电力变压器遭受短路冲击时,绕组内短路电流产生的强大动力将使绕组绝缘和机械性能受到不同程度的损坏,严重时可使变压器损毁。变压器近距离出口短路会引发绕组变形、绝缘损坏、绕组烧毁。短路事故一般会造成变压器掉闸,退出运行,给电网造成较大的损失。近年来,变压器近区或出口短路故障的发生,严重影响了电力系统的安全稳定运行。

## 1 诊断分析绕组变形的状态量

目前,国内外检测绕组变形比较成熟的方法有频响分析法、短路阻抗法、绕组电容量法等。频响分析法目前已在国内外变压器运行和生产部门广泛应用,并取得成效。但由于该方法测试结果受很多不确定性因素的影响,且仅依靠频响曲线相似度诊断绕组变形不能充分保证诊断结论正确性,因此该方法通常配合常规电气实验或吊罩检查。

运行中变压器遭受短路冲击后绕组是否变形,与变压器的抗短路能力及其承受的短路电流大小直接相关,变压器发生出口短路的直接后果是引起绕组几何位置发生改变,用电气方式检测变压器绕组几何尺寸改变的状态量主要有频率响应、低电压短路阻抗和绕组间电容量。绕组严重变形的变压器可能引起变压器绝缘损坏或绕组断股,检测变压器绝缘损坏状况的主要方法为绝缘油色谱分析,检测绕组断股状况的主要方法为绕组直流电阻。

低压短路阻抗法在实测中有比较统一的接线方式,有确定的判断标准,IEC和国标标准规定了较为可行的建议性判据,测试结果偏离规定数值时,能可靠地暴露故障,评价故障的危险程度,其测试和判断过程相对简单<sup>[1]</sup>。但是由于试验电源容量大、试验设

备沉重、花费时间较长等因素影响,短路阻抗法在现场使用中受到了限制。

频率响应法判断绕组变形灵敏度高,能反映出整体电感影响不大的变形,但其测试结果往往会受到各种干扰因素的影响,在现场使用时对环境因素的要求较高,该方法目前尚未形成明确的判据,对现场操作人员的专业水平要求较高<sup>[2]</sup>。

变压器绕组的电容,可在测量绕组介质损耗的同时测得,绕组电容量在变压器绕组严重变形时会产生明显变化,绕组电容量法的灵敏度比频响分析法要低,不能有效反映绕组局部轻微变形<sup>[3]</sup>。

绝缘油色谱分析能反映变压器故障的性质,但不能直接确定故障部位。

直流电阻和变比测试结果主要反映绕组的连通及匝间饼间短路情况,不能直接确定绕组变形情况。

对变压器绕组变形诊断时,需考虑各状态量对变压器绕组变形的反映情况,进行综合分析判断。

## 2 实例分析

2009年7月,某220kV变电站进行3224手车柜消缺工作,35kV II母线停电配合。18时02分,运行人员在进行3221开关由试验至运行位置操作时,3221开关柜内发生短路故障,35kV母差保护动作跳开35kV II母线所有开关。随后,2号主变2套主变保护动作,2号主变三侧开关掉闸。故障录波显示变压器35kV侧故障电流13kA,持续60.8ms。故障发生后,检修部门对该变压器进行了试验。

### 2.1 频响分析试验

主变交接时,曾保存有各绕组的频响特性曲线,将故障后的频响特性曲线与交接时存留的“指纹”进行比对,高压绕组与中压绕组A、B、C三相频响曲线的差别不大,吻合得较好,而低压绕组三相频响曲线的差别比较明显,相关性差。低压绕组幅频响应曲线如图(1—3)所示,低压绕组频响特性曲线低频段的

相关系数分别为 0.67, 1.19, 0.55。由图可见, 低压绕组低频段(1~100 kHz)波峰、波谷的数目和位置已有明显变化, 根据相关系数, 可判定低压绕组 A 相存在异常。200~500 kHz 中频段反应局部绕组变形情况, 该频段内出现了明显的谐振频率偏移, 表明绕组局部的拉伸和压缩造成匝间距离变化以及匝间或层间短路<sup>[3]</sup>。

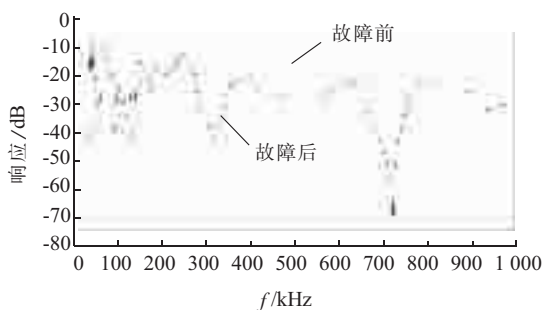


图1 激励为 a 响应为 c 时低压绕组故障前后的频响曲线

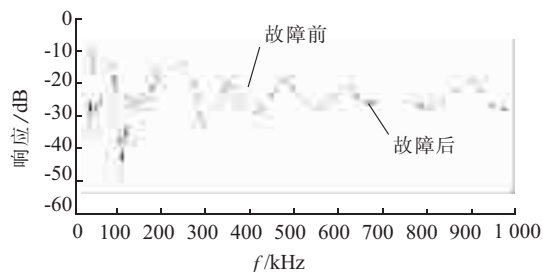


图2 激励为 a 响应为 b 时低压绕组故障前后的频响曲线

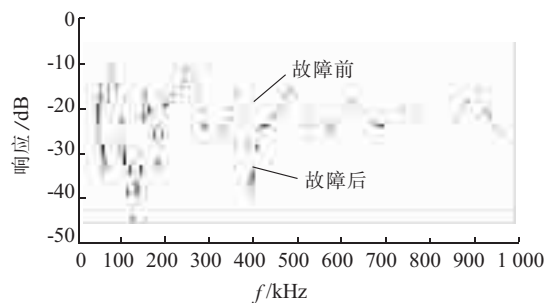


图3 激励为 b 响应为 c 时低压绕组故障前后的频响曲线

## 2.2 短路阻抗试验

2号主变低电压下短路阻抗测试结果如表1所示。由表1可以看出, 高压—中压绕组和高压—低压绕组的短路阻抗测量结果正常, 但测量中压绕组对低压绕组的短路阻抗的结果有异常, 平均值偏差0.862%, 其中A相短路阻抗的纵比偏差达到2.147%, 已经超出判断导则规定的要求值(1.6%), 由此说明低压A相绕组存在异常<sup>[4]</sup>。

## 2.3 绕组电容量测试

三绕组变压器绕组电容等值如图4所示。测试结果显示, 低压绕组对高、中压绕组及地的电容量的初值差达到2.05%, 测试值有异常。为分析究竟是何

表1 2号主变中压对低压短路阻抗

测试部位	故障后 测量值 /%	2009-03-19 测量值 /%	初值差 /%
$U_{kn}$	8.124	8.054	0.862
$U_{ka}$	8.181	8.009	2.147
$U_{kb}$	8.145	8.122	0.298
$U_{kc}$	8.146	8.033	0.150

部位存在异常, 将测量结果换算为绕组间的电容量。其中低压线圈对地的电容量(即  $C_1$ )较出厂增大了3.58%, 说明内线圈受到短路力的挤压, 有向铁芯靠近的趋势, 另外高压和中压绕组的对地电容量也发生了明显变化, 而绕组相互之间的电容量变化不大, 分析结果如表2所示。

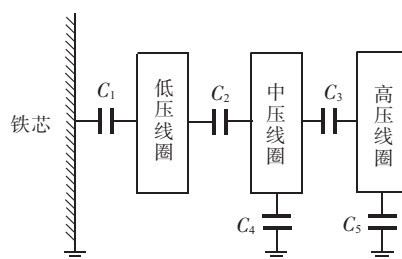


图4 三绕组变压器绕组电容等值图

表2 分解换算为绕组间电容量后与出厂值比较

测试部位	测量值 /nF	出厂值 /nF	变化率 /%
$C_1$	12.91	12.44	3.58
$C_2$	6.965	6.990	-0.64
$C_3$	8.195	8.095	1.24
$C_4$	2.740	2.925	-5.64
$C_5$	5.515	5.455	1.10

## 2.4 绝缘油色谱分析

2号主变近期油色谱测试结果如表3所示。由表3可以看出, 此次故障之前油色谱数据已有异常。该变压器2009年2月25日的油色谱数据正常, 而2009年5月4日取样时, 油中已含有乙炔, 虽然这时总烃、乙炔和氢气含量均未超过注意值, 但都已明显增长。随后的跟踪监测显示各特征气体并无增长趋势。故障后的油色谱测试结果显示, 乙炔和氢气为主要气体组分, 说明故障时变压器油中已有电弧产生。按照三比值分析法, 编码组合为102, 参考故障类型判断导则及方法故障类型为电弧放电, 可能存在绕组匝间及层间短路、相间闪络、分接开关间油隙闪络, 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<sup>[5]</sup>。

## 2.5 绕组直流电阻测试

故障后, 2号主变直流电阻测试结果如表4所示。表中各绕组电阻值未见明显异常, 中压绕组与低压绕组的电阻值稍有异常, 初步判断可能存在匝

表3 2号主变近期油色谱分析数据

组分	2008-11-07	2009-02-25	2009-05-04	2009-05-18	2009-06-04	2009-07-10	故障后
H <sub>2</sub>	30.7	29.3	46.9	44.1	47.62	53.55	120.25
CO	126.7	154.2	141.8	139.9	166.36	206.37	275.57
CO <sub>2</sub>	1 000	928.5	1 075.2	917.3	1 151.27	1 534.7	2 024.7
CH <sub>4</sub>	2.5	1.8	25.3	24.6	28.38	29	46.08
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2	无	34.6	32.7	38.86	41.28	76.65
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.8	0.5	4.2	3.9	4.37	4.75	8.4
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	无	无	3.3	3.0	3.43	3.67	35.69
总烃	3.5	2.3	67.4	64.2	75.04	78.7	166.82

表4 故障后2号主变直流电阻测试数据

类别	测试相	电阻值/Ω	相间差/%
高压绕组	A-O	0.378 9	
	B-O	0.378 8	0.03
	C-O	0.378 8	
中压绕组	A <sub>m</sub> -O <sub>m</sub>	0.067 99	
	B <sub>m</sub> -O <sub>m</sub>	0.068 33	0.50
	C <sub>m</sub> -O <sub>m</sub>	0.068 14	
低压绕组	a-b	0.045 87	
	b-c	0.045 93	0.64
	c-a	0.045 64	

间短路现象。

## 2.6 电压比测试

2号主变电压比测试数据如表5所示。与理论值相比,A相绕组高对低、高对中以及中对低的电压比偏差分别达到37.19%,19.79%和13.52%,而其他两相结果变化不大,说明与A相低压绕组有关的电压比均存在异常。电压比测试值与理论值相比变大,表明低压绕组内部可能存在匝间或饼间短路。

表5 2号主变故障后电压比测试结果

部分	高压对低压	高压对中压	中压对低压
分接位置	8	16	—
A	测试结果	8.293	2.078
	偏差/%	37.19	19.79
B	测试结果	6.071	1.746
	偏差/%	0.36	0.65
C	测试结果	6.079	1.747
	偏差/%	0.50	0.71

## 2.7 综合分析

综上所述,所有与低压A相绕组相关的测试结果均显示有明显异常,其中绕组频响、短路阻抗、绕组电容量这3项反映绕组结构特性的试验项目,指示低压A相绕组损坏最为严重。从油色谱分析数据可看出,2号主变在遭受出口短路故障后,内部已产生电弧放电。根据以上分析,可认为35kV低压A

相绕组在受到短路电流冲击后,致使部分绕组变形,部分绕组扭曲变形造成匝间、层间短路,并伴随电弧放电。该变压器现场已无法修复,必须返厂处理。

随后在制造厂对该变压器进行解体检查,发现低压侧A相绕组上部1/3处出现了轴向变形,部分线饼下移,部分上移,有的线饼已经上窜到了相邻线饼的内侧,绕组出现多处匝间短路故障,部分自黏性换位导线出现散股现象,如图5和图6所示。而该其他两相低压绕组以及高压、中压和调压绕组完好。返厂检查的结果与综合诊断分析结果一致。



图5 低压A相绕组变形情况



图6 自黏换位导线散股现象

## 3 故障原因分析及建议

设计上宽裕度不足、工艺上没有做到内绕组紧撑以及低压绕组所用的自黏换位导线、垫块材料质量不佳是此次变压器故障的主要原因。统计数据 and 真实案例均表明,有些大型变压器由于设计、材质和工艺的原因,其抗短路能力不能达到国标要求,这是造成变压器遭受短路冲击后发生故障的重要原因。

对于减少变压器因抗短路能力不足而造成事故或缺陷,建议注意以下几点。

(1) 变压器新品采购时,应优先选用经突发短路试验通过的产品;向制造厂索取做过突发短路试验变压器的试验报告和抗短路能力动态计算报告。

(2) 在订购变压器时,可适当提高短路阻抗,对于短路频繁的网络可加装限流电抗器。

(3) 变压器制造时应采用内屏连续线圈、线圈整体套装、导线采用硬导线等措施,加强变压器整齐机械强度,提高抗短路能力的水平。

(4) 在变压器的外部设备上,采取措施降低变压器出口和近区短路故障的几率,如用热缩套覆盖

低压母线以防止小动物短路和其他意外短路,加强对变压器低压母线所连接设备的维护管理,防止误操作、开关拒动和非同期合闸等。

(5) 将变压器短路时间控制到尽量短。如配备可靠的直流电源和保护系统,并保证保护动作的正确性等。

(6) 对新投运的变压器和没有做过变形测试的变压器做一次变形测试,保留测试数据。在变压器遭受出口短路冲击后,可以此作为基础数据判断变压器变形程度,确定变压器能否继续运行。

#### 4 结束语

变压器在遭受近区短路电流冲击后,应对其做绕组变形试验以判断绕组的变形情况。由于变压器绕组变形具有很大的隐蔽性,频率响应、低电压短路阻抗与绕组电容测试结果又具有一定的不确定因素,仅依据频率响应、绕组电容、低电压短路阻抗测试结果,给出变压器是否变形的结论具有一定的技

术难度,因此,需要结合油中溶解气体分析、绕组直流电阻测试、电压变比测试等相关试验结果进行综合分析,并且对变压器绕组变形情况做出更加准确的判断。

#### 参考文献:

- [1] 黄华,周建国.阻抗法和频响法诊断电力变压器绕组变形[J].高电压技术,1999,25(2):70-73.
- [2] 何平,文习山.变压器绕组变形的频率响应法综述[J].高电压技术,2006,32(5):37-40.
- [3] 刘海峰,刘宏亮.变压器绕组变形的诊断与分析[J].变压器,2008,45(6):61-64.
- [4] DL/T 1093—2008,电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则[S].
- [5] DL/T 722—2000,变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].

#### 作者简介:

梁博渊(1986-),男,河北石家庄人,硕士研究生,从事变压器状态评估与故障诊断方面的研究工作;

刘宏亮(1980-),男,河北定州人,工程师,从事输变电设备试验检测与故障诊断技术工作。

## Comprehensive Diagnosis of Transformer Winding Deformation

LIANG Bo-yuan<sup>1</sup>, LIU Hong-liang<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Electric Power Institute, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** After suffering the impact of short-circuit, the damage of power transformer windings should be judged as soon as possible. In this paper, we take a comprehensive analysis on a transformer winding which has suffered the impact of short-circuit by using frequency response analysis (FRA), short-circuit impedance method, winding capacitance test combined with the DGA, winding DC resistance test and voltage transformation ratio test, etc. The comprehensive analysis verified the results with the practical situation

**Key words:** transformer; winding deformation; fault diagnosis

(上接第 15 页)

性的效果,反而会导致双电源全部失电。采用双节点遥信或辅助接点信号来判断开关的分合闸位置,可有效消除因跳闸(合闸)线圈烧坏而产生的误遥信,弥补各自投逻辑中的缺陷,避免各自投的误动,增强供电可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 李文书,姜宁.构建供电生命线积极应对极端灾害天气[J].供用电,2008,25(4):1-3.

- [2] DSA2361/2362/2363/2364/2365,各自投装置技术说明书[S].

#### 作者简介:

李文书(1976-)男,江苏淮安人,工程师,从事电网调度管理工作。

## Analysis of Mal-operation Occurred in Busbar Automatic Transfer Switch for the Breaking Coil Burned

LI Wen-shu

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In order to ensure the reliable power supply for VIP customers, busbar automatic transfer equipments are generally used in terminal substations. If the busbar automatic transfer switch is not configured properly, its mal-operation may cause the whole substation power-off. After analyzing the reasons for mal-operation accident occurred in the Lukou substation, it is brought forward that using double-node remote communication to replace the single-node, or using the auxiliary node of breakers to distinguish the switch position, which may avoid mal-operation caused by the breaking coil burned.

**Key words:** busbar automatic transfer switch (BATS); remote communication; trip position