

# 一起变压器低压绕组介损及电容量异常分析

赵胤,李华丹,董典帅  
(无锡供电公司,江苏无锡 214072)

**摘要:**变压器试验中,本体电容量及  $\text{tg}\delta$  为变压器状态判别的重要参考量。文中针对某 110 kV 主变由于铁心接地不良引起低压绕组电容量及  $\text{tg}\delta$  超标的案例,通过建立变压器绝缘等效电容图,计算分析了产生异常数据的原因。说明根据变压器绝缘等效电容图进行理论计算,可以较准确地分析变压器线圈电容量超标原因,为排查缺陷提供依据。最后对比了该变压器铁心接地良好与接地不良条件下频率响应曲线,曲线差异明显,该试验结果对判别铁心接地状况有一定的启发意义。

**关键词:**变压器;铁心;电容量;介质损耗;频响曲线;绝缘等效电容图

**中图分类号:** TM406

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)06-0016-04

变压器电容量与介质损耗正切角  $\text{tg}\delta$  的测试值可以灵敏地发现油浸式电力变压器整体是否受潮、油或纸绝缘是否劣化,并可以作为判别变压器绕组是否变形的辅助手段。查找变压器电容量与介质损耗正切角数据超标原因,需要依据变压器自身结构、试验历史数据、变压器等值电路参数、变压器油色谱等进行综合判断。依据变压器绝缘等效电容图进行理论计算,可以较准确的查明缺陷的大致部位,为排除隐患提供理论依据。本文针对某 110 kV 主变低压绕组电容量与  $\text{tg}\delta$  超标,依据该变压器绝缘等效电容图进行理论计算,并结合现场试验,成功查明数据超标原因为变压器铁心接地不良。

## 1 主变试验过程及试验数据

2013年10月,对某变电所 110 kV 主变进行例行性试验。型号 SFSZ8-50000/110,额定电压  $110\pm 3\times 2.5\%/38.5\pm 5\%/10.5$  kV,额定电流 264.2/749.8/2749 A,连接组别 YN,yn0,d11。试验时环境温度 23℃,环境湿度 70%,主变上层油温 35℃,有载调压开关在第一档位,中压无载调压开关在第三档位,拆除主变各侧连接导线后,按照频响法测绕组变形、直流电阻、低电压短路阻抗、绝缘电阻、介损及电容量测试的项目顺序进行试验,异常数据如表 1 所示。

表 1 某 110 kV 主变介损及电容量试验异常数据

测试部位	1993-09 交接数据		2013-10 例行试验数据		
	$\text{tg}\delta/\%$	$C_x/\text{pF}$	$\text{tg}\delta/\%$	$C_x/\text{pF}$	$\Delta C/\%$
高一中低地	0.3	11 466.5	0.32	11 680	1.86
中—高低地	0.3	17 816.6	0.28	18 180	2.04
低—高中地	0.4	18 211.3	5.04	17 160	-5.77

表 1 中,  $\Delta C\%$  为 2013 年 10 月与 1993 年 9 月电容量相比的偏差百分数。低—高中绕组及地电容量为 17 160 pF 与原始数据偏差为 -5.77%,低—高中绕组

及地介质损耗为 5.04%,根据江苏省电力公司《输变电设备交接与状态检修试验规程》等标准的要求,低—高中绕组介损和电容量数据不合格(规程值电容量与初始值偏差警示值为  $\pm 5\%$ ,介损警示值为 0.8%)。

## 2 试验现场故障查找过程

现场更换试验电桥,重新测量,“低—高中绕组及地”介损和电容量测试值无明显变化,由此可排除仪器影响因素。由于该主变“低—高中绕组及地”电容量与原始数据对比减小明显,因此可知测试回路中有额外的电容串入。本试验“高—中低地”、“中—高低地”的试验数据正常,因此重点怀疑低压与铁心间的绝缘存在问题。

变压器中影响低压线圈介损及电容量的部位和部件,主要是低压线圈与中压线圈及铁心间的绝缘结构,由此在现场增加了“铁心—地”、“低压—中压绕组”、“低压绕组—铁心”的电容量与介质损耗测量,其测试结果如表 2 所示。

表 2 铁心相关部位介损及电容量测试数据

试验部位	试验接线方法	$\text{tg}\delta/\%$	$C_x/\text{pF}$
铁心—地	反接线,铁心加压 500V,高、中、低压 线圈接屏蔽	5.3	24 720
低压绕组— 中压绕组	正接线,低压加压 10 kV,中压接信号 线,高压、铁心接地	0.21	8036
低压绕组— 铁心	正接线,低压加压 10kV,铁芯接信号 线,高、中压接地	-0.76	7681

由表 2 可见“低压绕组—中压绕组”数据正常;“铁心—地”介质损耗数据偏大;“低压绕组—铁心”介质损耗数据异常,这 2 个数据均与铁心有关。所以重点对铁心回路进行排查,并最终发现了数据异常原因。试验人员分别使用万用表、2500 V 兆欧表对接地引下线与变压器外壳间进行测量,发现万用表测试数据为 600

kΩ, 而用 2500 V 兆欧表测量其对外壳的绝缘电阻是 0.3 MΩ, 由于变压器外壳接地良好, 由此可知变压器铁心接地引下线接地不良。通过现场开挖, 发现该变压器接地引下线埋在鹅卵石下的部分已经锈断。

将该变压器铁心正确接地后, 重新进行变压器常规试验, 其全部试验数据合格, 其中整体电容量与介质损耗数据如表 3 所示。

表 3 铁心正确接地后的整体电容量与介质损耗测试数据

试验日期	1993-09(交接)		2013-10 例行试验数据		
测试参数	tg δ / %	C <sub>x</sub> / pF	tg δ / %	C <sub>x</sub> / pF	ΔC / %
高一中低地	0.3	11 466.5	0.32	11 680	1.86
中—高低地	0.3	17 816.6	0.28	18 140	1.82
低—高中地	0.4	18 211.3	0.44	18 580	2.02

表 3 中 ΔC% 为 2013 年 10 月与 1993 年 9 月电容量相比的偏差百分数。对比表 1 和表 3 可知, “低—高中绕组及地”的数据合格, “高一中低绕组及地”的数据无显著变化, “中—高低绕组及地”只有电容量小了 40 pF, 即说明在本例中, 在进行介损及电容量试验时铁心是否接地对低压线圈的影响是巨大的, 而对高中压线圈影响微小。

### 3 应用等效图分析数据异常原因

根据该主变结构, 进行绝缘试验时主变各主要部件间绝缘的等效电容图如图 1 所示<sup>[1]</sup>。

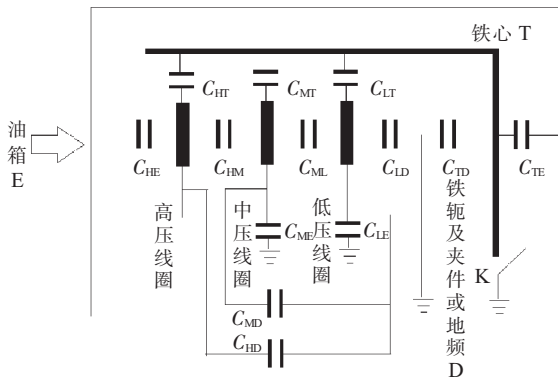


图 1 某 110 kV 变压器主绝缘等效电容图(忽略电阻)

图 1 中,  $C_{HE}$  为高压绕组对箱体电容;  $C_{HT}$  为高压绕组对铁心电容;  $C_{HM}$  为高压绕组对低压绕组电容;  $C_{HD}$  为高压绕组对铁轭及夹件或接地地屏 D 电容; 中、低压绕组相关部位电容量命名原则与此一致;  $C_{TE}$  为铁心对箱体电容;  $C_{TD}$  为铁心对铁轭等接地部件电容; K 为铁心接地引下线示意虚拟开关(K“合位”则铁心接地良好, K“分位”则铁心接地不良)。

图 1 中地屏 D 是某些变压器为了屏蔽铁心的棱角, 在其外用金属带将其包裹, 以达到均匀电场的目的, 该金属带应与铁心或夹件连接接地<sup>[2]</sup>。本文中该 110 kV 变压器虽然没有地屏, 只有铁心引出接地, 说

明夹件与铁轭都是在变压器内接地, 因此三侧线圈和铁心对接地部件间均存在电容回路。当铁心接地时(开关 K 合位),  $C_{TD}$  被短接; 当铁心失去接地时(开关 K 分开), 铁心处于悬浮电位, 同时  $C_{TD}$  有可能参与到测试回路中。根据图 1 将表 1、表 2、表 3 的有关数据进行整理, 如表 4 所示。

表 4 电容及介损试验实际测试回路表

序号	试验部位	tg δ / %	C <sub>x</sub> / pF	等效电容组合
1	高一中低地	0.32	11 680	$C_{HM}+C_{HE}+C_{HD}+(C_{HT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE}))$
2	高一中低地	0.32	11 680	$C_{HM}+C_{HE}+C_{HD}+C_{HT}$
3	中—高低地	0.28	18 180	$C_{HM}+C_{ML}+C_{MD}+C_{ME}+(C_{MT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE}))$
4	中—高低地	0.28	18 140	$C_{HM}+C_{ML}+C_{MD}+C_{ME}+C_{MT}$
5	低—高中地	5.04	17 160	$C_{ML}+C_{LD}+C_{LE}+(C_{LT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE}))$
6	低—高中地	0.44	18 580	$C_{ML}+C_{LD}+C_{LT}+C_{LE}$
7	铁心—地	5.3	24 720	$C_{TD}+C_{TE}$ (一般 $C_{TD} \gg C_{TE}$ )
8	低压—中压	0.21	8036	$C_{ML}$
9	低压—铁心	-0.76	7681	$C_{LT}$

表 4 中序号 1, 3, 5 为铁心未接地时(即开关 K 断开)的测试数据, 序号 2, 4, 6 为铁心接地时(即开关 K 合上)的测试数据。在 K 分、合 2 种情况下, 由表 4 中序号 7 的数据可知铁心对地电容量有 24 720 pF。将序号 1 和序号 2 对应的电容量及等效电容组合分别相减, 可得  $C_{HT} - [C_{HT} \text{ 串 } (C_{TD} + C_{TE})] = 0$ , 即铁心对地电容量, ( $C_{TD} + C_{TE}$ ) 和  $C_{HT}$  串联后的电容量与  $C_{HT}$  本身的电容量接近, 所以  $C_{HT}$  的电容值很小, 可推算出甚至接近于 0; 同理  $C_{MT}$  的电容量也很小; 所以  $C_{HT}$ ,  $C_{MT}$  对各自线圈的总电容量测试值影响较小可忽略。依据介质串、并联介损公式, 由表 4 序号 5 至 8 联列介损和电容量关系方程组, 可解得:

$$C_{LT} = 6677 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta \% = -28.5\%;$$

$$C_{LT} \text{ 串 } (C_{TD} + C_{TE}) = 5257 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta \% = -21.3\%;$$

$$C_{ML} + C_{LD} + C_{LE} = 11 903 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta \% = 16.7\%;$$

$$C_{LD} + C_{LE} = 3867 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta \% = 50.7\%;$$

上述数据与序号 9 一起构成矛盾的结果, 经过分析可由以下几个因素导致:

(1) 铁心接地状况对三侧线圈电容的影响不同。其中  $C_{HT}$ ,  $C_{MT}$  很小而  $C_{LT}$  较大, 这是因为铁心由低压线圈包围, 铁心与低压线圈之间距离较近, 其电容量较大; 当铁心不接地时该支路串入铁心对地的电容, 致使总电容减小; 而高中压线圈在低压线圈外侧, 辐向与铁心没有直接的电容联系, 因此其与铁心之间的联系主要在端部, 等效极板面积较小, 且距离较远, 其电容量较小, 铁心与地之间电容对该支路的影响可以忽略。

(2) 铁心接地状况对介损测量的影响。铁心接地不良时, 铁心会产生悬浮放电带来测量的不确定性; 铁心硅钢片间的绝缘漆附加电阻, 使测试电流经过铁心

后含有大量阻性分量,导致介损增大<sup>[3]</sup>;当铁心不接地时,接地部件的存在对低压线圈和铁心间测量回路带来的复杂影响,即采用集中参数是无法准确模拟分布参数形成的网络,例如 T 型网络可能会对正接线测量造成负介损的结果所以在不同的接线方式下测得的介损分散性很大。同样由于低压线圈与铁心联系较紧密,故其所受影响较大。在不同的接线方式下这几个因素的影响是不一样的。例如在测量低压线圈对铁心的介损时,分布网络和铁心损耗会起作用。因此在铁心不接地的情况下,测得的这些数据是无效的。

(3) 当铁心接地后(开关 K 合上),铁心与地屏等电位,则它们间的分布影响及悬浮放电就不存在了,此时的数据才能反映绝缘的实际情况。

从以上几个试验项目可见当铁心不接地时,铁心与接地部件间电容及铁心悬浮放电将会影响到部分试验项目的准确性。

#### 4 铁心接地状况对试验数据的影响

为保证试验结果的正确性,在变压器铁心接地良好后,对先前完成的频响、直流电阻、低电压短路阻抗和绝缘电阻试验按照顺序重做一遍,发现频响和绝缘电阻与之前的结果有差异,而直流电阻和低电压短路阻抗由于与主绝缘电容量关系不大,因此没有变化。

##### 4.1 频率响应曲线测试

铁心接地前后的频率响应图如图 2—10 所示。

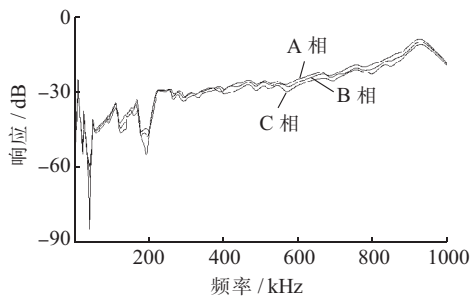


图 2 铁心未接地时高压三相频率响应图

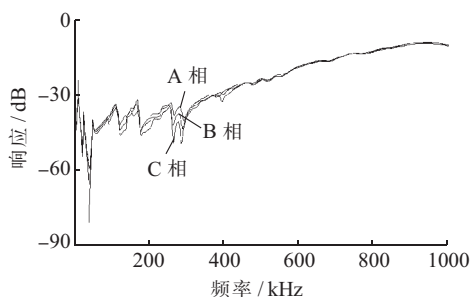


图 3 铁心接地时高压三相频率响应图

根据频响理论,在低频段主要反映感抗,在高频段主要反映容抗,而在中频段反映 2 者的综合作用,从 3 张对比图可清晰的在 200 kHz 以后当容抗作用逐渐增大时,铁心接地前后的频响曲线开始发生较大的分歧,

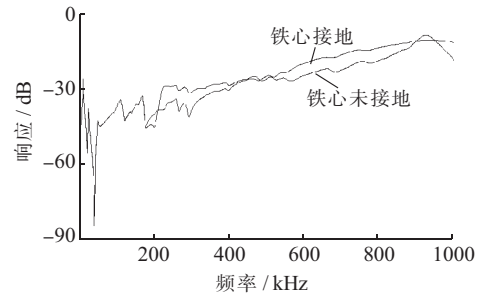


图 4 高压 A 相在铁心未接地及接地 2 种情况下频率响应对比图

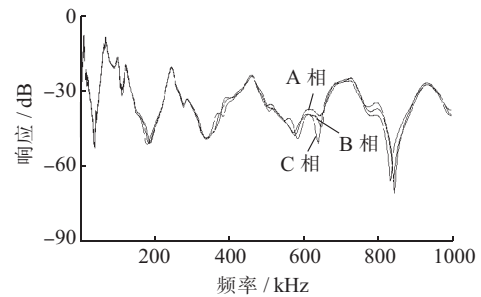


图 5 铁心未接地时中压三相频率响应图

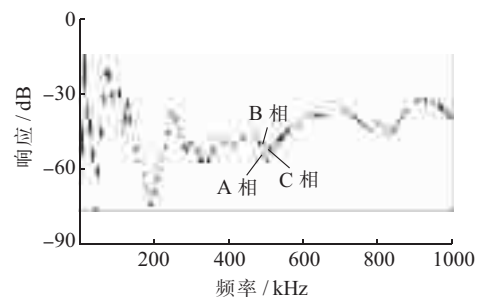


图 6 铁心接地时中压三相频率响应图

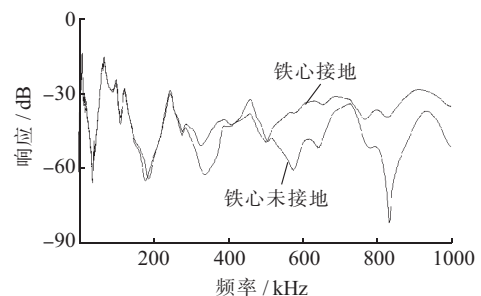


图 7 中压 A 相在铁心未接地及接地 2 种情况下频率响应图对比图

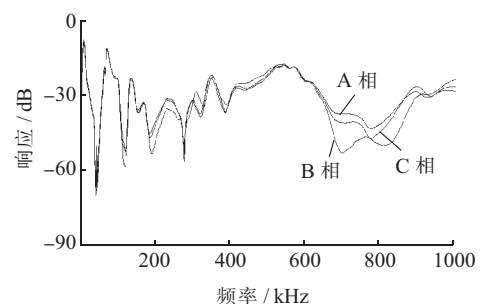


图 8 铁心未接地时低压三相频率响应图

即说明铁心接地是否可靠将通过电容效应的形式反映在频响曲线上。铁心接地状况对频率响应曲线的影响明显,通过本文的对比,可以给出如下启示:若同一台



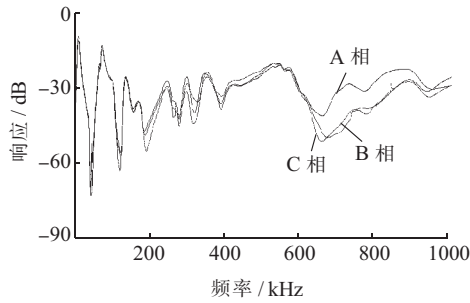


图9 铁心接地时低压三相频率响应图

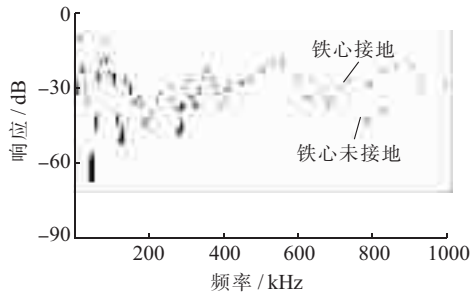


图10 低压ab相在铁心未接地及接地2种情况下频率响应对比图

主变三相频响曲线一致,而同历史数据相比有较大差别(排除试验仪器的影响),则可查找铁心的接地状况。

#### 4.2 绝缘电阻

与介损及电容量试验类似,铁心接地情况主要是对“低—高中地”的绝缘电阻测试数据有影响,其原因为铁心不接地时低压线圈与铁心间的电容又串联了铁心对地的电容,使该支路的绝缘电阻增大,又由于铁心对接地部件支路较多,某些支路电容较小,导致吸收比减小<sup>[4]</sup>。如表5所示。

#### 5 结束语

从以上4个试验项目可见与电容量关系密切的所受影响较大,与电容量关系不大的则几乎不受影响。因此当铁心不接地时,铁心与接地部件间电容及铁心悬浮放电将会影响到部分试验项目的准确性。变压器电容量与介质损耗超标原因较为复杂,需要综合分析判

表5 绝缘电阻数据对比

铁心状态	未接地			接地			
	读取时间	$R_{15s}/M\Omega$	$R_{60s}/M\Omega$	吸收比	$R_{15s}/M\Omega$	$R_{60s}/M\Omega$	吸收比
高一中 低地		14 000	21 000	1.50	14 000	21 000	1.50
中—高 低地		12 000	18 000	1.50	12 000	18 000	1.50
低—高 中地		12 000	16 000	1.33	6000	85 000	1.42
铁心—地		5000	5000	5000	5000	5000	5000

断才能找出故障原因。通过变压器绝缘等效电容图模拟,并经过电容量与介质损耗理论计算,结合现场测试,查明某110 kV变压器“低—高中绕组及地”电容量与介质损耗数据超标原因为变压器铁心接地不良。

(1) 变压器等效电路理论计算法并结合现场测试,可以较准确地查找各种变压器电容量、介质损耗超标原因、缺陷部位,为电气试验提供理论依据;

(2) 测量了该变压器铁心接地良好与接地不良条件下频率响应曲线,曲线差异明显,该试验结果对判别变压器电容、介质损耗超标有一定的启发意义;

(3) 铁心接地不良影响电容量与介质损耗测试、频率响应测试、绝缘电阻,但对短路阻抗、直流电阻几乎无影响。

#### 参考文献:

- [1] 丁伟,丁天祺. 变压器绕组电容量异常变化实例分析[J]. 变压器, 2012, 49(2): 71-74.
- [2] 杨星,朱建新. 变压器的等电位屏结构工艺特点及其故障特征分析[J]. 变压器, 2007, 44(1): 63-67.
- [3] 赵坚. 变压器绕组介损及电容异常分析[J]. 变压器, 2010, 33(1): 14-17.
- [4] 洪贞贤. 变压器铁心接地断线时绝缘水平的测量误差[J]. 广东输电与变电技术, 2006(2): 38-39.

#### 作者简介:

赵胤(1977),男,江苏江阴人,工程师,从事电气试验工作;  
李华丹(1976),男,江苏无锡人,技师,从事电气试验工作;  
董典师(1978),男,山东烟台人,工程师,从事电气试验工作。

### Analysis on the Abnormal Condition of Transformer Low-voltage Winding Dielectric Loss and Electrical Capacity

ZHAO Yin, LI Huadan, DING Dianshuai

(Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214072, China)

**Abstract:** In transformer trials, the capacity and  $\text{tg}\delta$  are important references for determining the status of transformer. For studying the excessive low-voltage winding electrical capacity and  $\text{tg}\delta$  of a 10 kV transformer due to poor grounding, we established the transformer insulation equivalent capacitance map and analyzed the causes of abnormal data. The study shows that the calculation based on the transformer insulation equivalent capacitance map is accurate for analyzing the causes of excessive capacity, which provides the basis for the investigation of defects. Finally, the paper compared the transformer frequency response curves in the conditions of transformer well-grounded and poor-grounded and found that the two curves are significantly different. The test has some instructive meanings for future transformer grounding fault detection.

**Key words:** transformer; core; capacity; dielectric loss; frequency response curve; insulation equivalent capacitance map