

变电站电气设备介质损耗的测试分析

王金丽¹, 张爱云², 王玉国², 徐腊元¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100085; 2. 山东菏泽供电公司, 山东 菏泽 274012)

Test and Analysis of Substation Electric Equipment Dielectric Loss

WANG Jin-li¹, ZHANG Ai-yun², WANG Yu-guo², XU La-yuan¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;

2. Shandong Heze Power Supply Corporation, Heze 274012, China)

摘要: 介绍了变电站电气设备介质损耗测试中的主要影响因素及相应的解决办法; 对现场最常用的两种测试仪器进行了比较。对变电站主要电气设备介质损耗测试方法进行了探讨, 并利用实例依据测试的介质损耗值对电气设备的绝缘状况进行了相关分析和总结, 有助于现场工作人员快速准确地发现绝缘缺陷, 及时检修或更换电气设备, 以确保电力系统的安全稳定运行。

关键词: 电气设备; 介质损耗; 测试; 绝缘分析

中图分类号: TM8

文献标识码: B

Abstract: The main effect factors and relevant solutions in testing dielectric loss of substation electric equipments was instructed, and two kinds of instruments frequently used for dielectric loss measurement were compared. The measurement methods for dielectric loss of main electric equipments in transformer substation were discussed. According to dielectric loss value, insulation status of electric equipments was analyzed and summarized with examples. It is helpful to find insulation faults quickly and exactly in fieldwork, and the electric equipments can be overhauled or replaced in time, hence the electric power system be ensured to run safely and stably.

Key words: electric equipment; dielectric loss; test; insulation analysis

0 引言

变电站高压电气设备绝缘介质损耗测试^[1-2]是绝缘试验中的主要项目之一, 根据介质损耗角正切值 \tan (又称为介质损耗因数) 的大小、电容量的变化能有效地发现设备绝缘缺陷。随着变电站高压电气设备电压等级的不断提高, 现场大量试验结果表明, 如果不能正确地进行介损测量和分析, 容易造成误判断, 会危及高压电气设备的安全运行, 或造成不

必要的检修和更换。通过对电气设备介质损耗 \tan 测量的深入研究, 给出有效的测试分析方法, 增加测试与判断的准确性, 进一步提高了测试工作质量和工作效率。

1 影响介损测试的主要因素及解决方法

在对电气设备介质损耗测试过程中, 自然环境条件对设备本身及精密测量仪器内部器件的影响, 直接关系到对设备测试结果的准确性, 进而影响到对设备绝缘状况的正确分析判断, 因此测试中的各种影响因素^[1, 3]不容忽视。

在现场测试中, 电磁场干扰是不可避免的。一般情况下, 电气设备所处的环境中存在大电流母线、电抗器、阻抗器等漏磁较大的设备, 这些设备会产生很强的干扰磁场, 容易在测量仪器内部回路产生感应电动势, 引起测量误差^[4-5]。消除磁场干扰常采用移动测量仪器, 使其处在强干扰磁场之外, 或转动测试仪方向, 使干扰减到最小程度。对电场干扰的主要消除办法有倒相法、选相法和移相法 3 种。如果在测量时, 被试设备周围有其他物体, 则存在的分布电容就会影响电场分布, 进而改变被试设备本身的电容, 造成测量误差。分布电容的大小无法估计, 因此进行测试时尽量将设备周围的杂物清理干净。

电气设备绝缘测试受温度和湿度的影响更为普遍。温度在介损测试过程中的影响程度随设备材料和结构的不同而异。运行中高压电气设备常以瓷套作为外绝缘, 当空气湿度较大时, 容易在瓷套表面形成水膜, 致使介质损耗角正切值 \tan 偏大; 对容量较小的设备的影响尤为显著。为消除湿度引起的测量误差, 一般采用加装屏蔽的方法, 屏蔽环的装设应尽量靠近被试品的加压端, 尽量减小其对原电场分布的影响, 以保证试验的精度。

收稿日期: 2005-11-08; 修回日期: 2005-12-18

作者简介: 王金丽(1972-), 女, 工程师, 硕士, 从事高电压试验工作, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

另外，试验电压和试品电容对测量也有一定的影响。绝缘良好时 \tan 不随试验电压的升高而升高，若绝缘内部有缺陷， \tan 数值会随着电压的升高而明显增大。对电容量较小的设备测量 \tan 能有效地发现局部集中性和整体分布性的缺陷。但对电容量较大的设备， \tan 测量只能发现绝缘的整体分布性缺陷，最好的解决方法是配合其它绝缘试验综合分析判断，准确定位。

2 介质损耗测试比较

在某供电公司所属的 220 kV 赵楼变电站春防予试中，对某些设备在相同的环境条件下，分别使用 2518B 型介质损测试仪和 QS1 交流电桥测试^[6]，对所测得数据作了统计分析，具体见表 1：

表 1 介损测试数据统计分析

| 设备名称 | 2518B 测试仪 | | QS1 交流电桥 | | | 环境条件 |
|-----------------------------------|-----------|----------|------------------------|--------|----------|-----------------------------|
| | \tan | C_x/pF | \tan | $R_3/$ | C_x/pF | |
| 110 kV 5210 母联线 CT, A, B, C 三相 | 10.7 | 89 | 0.2 | 1838 | 86.6 | 空气湿度较大, 设备外表面受潮, QS1 电桥加屏蔽。 |
| | 11.8 | 90.6 | 0.3 | 1784 | 89.2 | |
| | 12.6 | 87.4 | 0.3 | 1848 | 86.1 | |
| 110 kV 5214 赵东线电容式 CT, A, B, C 三相 | 0.23 | 795.5 | 在不采取其他措施的情况下, 均无法调试平衡。 | | | 在运行设备区进行试验, 电磁场干扰较大。 |
| | 0.23 | 803.5 | | | | |
| | 0.24 | 791.5 | | | | |
| 220 kV 荷赵线电容式 CT, A, B, C 三相 | 0.41 | 806.5 | 0.4 | 197 | 808.1 | 在无电磁场干扰, 天气情况良好, 湿度较小条件下。 |
| | 0.28 | 790.9 | 0.3 | 201 | 792.0 | |
| | 0.30 | 788.4 | 0.3 | 202 | 788.1 | |

由表 1 的比较对照可以得出以下结论：

(1) 2518B 型介质损测试仪抗干扰能力强，在变电站高压区，电磁场干扰很大，使用它能迅速准确地测试出数据，而 QS1 电桥在不采取附加措施的情况下则很难调试平衡。

(2) 2518B 型介质损测试仪测试速度快，且电容值无须换算，直接测出最终数值。用 QS1 交流电桥测试花费工时长，若遇天气状况不好，或加屏蔽，或需正极、反极测试两次，测试数值需进行手工换算，工时需要加倍。

(3) 在天气状况不好，湿度较大，设备外表受潮、脏污的情况下，2518B 型介质损测试仪无法加装屏蔽，测试不准。QS1 交流电桥在这种情况下便可加装屏蔽测出较为准确的数值。

另外，2518B 型介质损测试仪试验接线简单明了，集调压测试于一体，方便又安全。QS1 交流电桥试验接线复杂，高压线较长，特别是采用反接线方式时，电桥处于高压电位，操作不安全。

3 测试与绝缘分析

按照有关电气试验规程规定，进行介质损耗试验时，被试品温度应不低于 +5℃，空气相对湿度一

般不高于 80%，户外试验应在良好的天气下进行。研究中主要对 35 kV 及以上大、中型变压器绕组及其电容型套管、电容式电压互感器、电磁式电压互感器、电流互感器等电气设备进行介质损耗 \tan 测量，测试周期为 3 年。测量的介质损耗 \tan 值应在允许值范围内，否则可判定电气设备绝缘不合格，即存在绝缘缺陷。

3.1 变压器绕组及其电容型套管的 \tan 测量与分析
电力变压器外壳都是接地的，故变压器绕组介质损耗 \tan 测量应采用反接线法。所测绕组的 \tan 值均要换算至 20℃ 下数值，以便与历史数据纵横比较。

变压器绕组介质损耗 \tan 只在交接与大修时测试，预试中只进行电容型套管的 \tan 测量。变压器电容型套管的 \tan 测量一般采用正接线法^[1]，与被试套管相连的所有绕组端子连在一起加压，其余绕组端子均应接地，末屏接入电桥。测量时需记录环境温度及变压器顶层油温。

电容型套管的介质损耗测试值，一般不进行温度换算^[2]。当 \tan 值与出厂值或上一次测试值比较有明显增长或接近最大允许值时，应综合分析 \tan 与温度、电压的关系。当 \tan 随温度增加明显增大或试验电压由 10 kV 升到 $U_N/\sqrt{3}$ 时， \tan 增量超过 ±0.3%，设备不能继续运行，要采取处理措施。

3.2 电压互感器的 \tan 测量与分析

电压互感器有两种，一种是电磁式电压互感器，一种是电容式电压互感器 (CVT)。

电磁式电压互感器介质损耗测量方法比较多，最常用的有常规法，末端屏蔽法两种，由于常规法在二次接线板受潮的情况下，测试结果 \tan 偏大，使用末端屏蔽法可不受二次接线板的影响，测试的 \tan 值较为准确。

末端屏蔽法^[1]是在一次接线端施加电压，末端接地，正接线测量。由于 X 端处于地电位，不参与电桥平衡，此时处于屏蔽状态。该测量方法的优点主要有：与运行状态一致，测量真实；能避免端子板脏污、受潮对测量值的影响；能分开端绝缘与绝缘支架的介质损耗，便于判断内部绝缘状况。但这种测量方式在试品电容量较小时易受杂散电容的影响。测量时，瓷套表面要清洁干燥，避免在潮湿天气测量，高压引线与瓷套表面夹角要尽量大，以减少杂散耦合的影响，从而获得准确的测量值。由末端屏蔽法检查出的绝缘缺陷实例见表 2。

CVT 低压出线盒内 N 端子在互感器用作载波通讯时，经滤波器接地，当互感器不用作载波通讯时，一般 N 端子直接接地，测试 AN, EN 间 \tan 应采用反接线法^[6]。

3.3 电流互感器 \tan 测量与分析

电流互感器的 \tan 测量试验接线较为简单，一

表 2 绝缘缺陷实例

| 设备型号 | 线圈端绝缘 tan /% | 支架绝缘 tan /% | 缺陷判断 | 检查结果 |
|-----------|-------------------|-------------|------|-----------|
| JCC1- 220 | 3.5 | 24.6 | 支架不良 | 支架分层 |
| JCC1- 220 | 10.8 | 24.9 | 器身受潮 | 器身下部有水 |
| JCC1- 220 | 15.2 (干燥后 0.3) | 2.0 | 器身受潮 | 上部油柜及低部有水 |

一般采用常规的反接线法, 加压 10 kV, 所测 tan 值应符合绝缘试验规程规定。当 tan 值与出厂值或上一次试验值相比较有明显变化, 或试验电压由 10 kV 升到 $UN/\sqrt{3}$ 时, tan 增量超过 $\pm 0.3\%$, 设备不应继续运行。

电容式电流互感器一般测量一次对末屏间的 tan 值, 加压为 10 kV。当末屏对地绝缘低于 1 000 M 时, 则需测量其末屏对地的 tan 值, 加压 2 kV, 所测值不应大于 2%。当主绝缘电容量与初始值或出厂值差别超过 $\pm 5\%$ 时, 应查明原因。如所测 tan 值超过最大允许值, 存在的缺陷很可能是由于胶垫老化、龟裂及螺丝应力不均, 造成密封不良而引起的绝缘受潮、劣化。

4 结语

随着电网的不断发展, 对供电的连续性、可靠性

提出越来越高的要求。传统的定期停电预防性试验和检修具有一定的盲目性, 存在不能及时发现电气设备潜在绝缘缺陷的不足。设备离线停电试验施加的试验电压最高为 10 kV, 而运行电压远高于此电压, 所以停电试验不能真正反映运行情况下的绝缘状况。在线监测系统[4]逐步得到发展与完善, 利用带电介质损耗测试仪在运行电压下对电气设备进行在线监测, 将是绝缘测试的一个必然发展趋势。在线监测技术已在部分地区开始推广使用, 监测到的实时数据能够为电力设备实现状态检修提供强有力的科学依据。

参考文献:

- [1] 王学勤, 许书燕. 电气试验与油化验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 西南电业管理局试验研究所. 高压电气试验方法 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [3] 湖南电力行业协会. 电力设施试验方法: 输配电部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 龙峰, 王富荣, 李大进, 等. 容性设备介质损耗因数在线监测方法及误差分析研究[J]. 电力科学与工程, 2004(2): 19-21.
- [5] 吕延锋, 钟连宏, 王建华. 电气设备绝缘介质损耗测量方法的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 38-42.
- [6] 一种提高 CVT 绝缘介质损耗及电容量测量准确度的有效方法[J]. 电力设备, 2004, 5(5): 52-55.

(上接第 286 页)

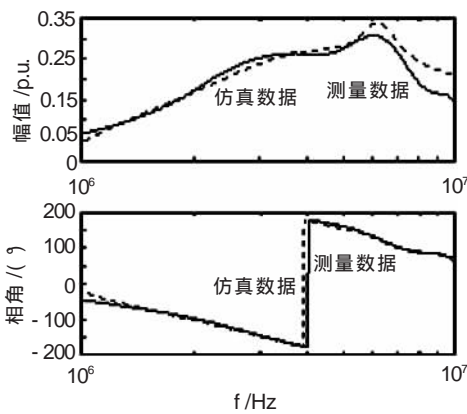


图 8 电流互感器高频段的传输特性

传输函数分成奇、偶两部分, 并将奇函数 y_{11} 或 y_{12} 偶函数转换为 y_{11} 或 y_{12} 参数的函数, 然后采用输入端接电阻的方法对奇函数和偶函数进行了综合, 从而得到了电流互感器不同频段的电路模型。PsPice 的仿真结果表明了该方法的正确性。

参考文献:

- [1] 崔翔. 2002 年国际大电网会议系列报道- 电力系统电磁兼容研究进展[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 1-5.
- [2] 卢铁兵, 崔翔. 变电站空载母线波过程的数值分析 [J]. 中

- 国电机工程学报, 2000, 20(6): 39-42
- [3] 孙竹森, 张禹方, 张广州, 等. 500 kV 变电站电磁骚扰和防护措施的研究(1)[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 16-18
- [4] 孙竹森, 张禹方, 张广州, 等. 500 kV 变电站电磁骚扰和防护措施的研究(2)[J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 26-27
- [5] Wiggins C M, Thomas D E. Transient Electromagnetic inference in substations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(4): 1 869-1 881.
- [6] 吴茂林, 崔翔. 电压互感器宽频传输特性的建模 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 1-5.
- [7] 张重远, 梁贵书, 崔翔. 气体绝缘变电站内 PT 的特快速暂态仿真建模[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 84-87, 111.
- [8] Gustavsen B, Semlyen A. Application of Vector Fitting to State Equation Representation of Transformers for Simulation of Electromagnetic transients [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(3): 834-842.
- [9] HO E C. RLC Transfer Functions Synthesis [J]. IEEE Trans. on Circuit Theory, 1956, 3(9): 188-190.
- [10] Darlington S A History of Network Synthesis and Filter Theory for Circuits Composed of Resistors, Inductors, and Capacitors [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, January 1999, 46(1): 4-13.
- [11] 汪文秉, 邹理和. 网络综合原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [12] 颜绍书. 网络综合原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1985.