

[变压器]

一起500 kV自耦变压器雷电冲击试验故障分析

文/保定天威保变电气股份有限公司, 河北省输变电装备电磁与结构性能重点实验室
黄炫磊 马 斌 张冠军 王海硕 秦 伟 邢 帅

介绍了变压器雷电冲击试验内容、试验方法以及试验时注意事项, 对变压器雷电冲击试验常见故障的判断方法做了总结, 对一起500 kV电压等级自耦变压器雷电冲击试验故障进行了分析, 找出了故障点, 验证了判断方法的正确性。

电力变压器在电力系统中挂网运行时, 雷电波入侵产生的冲击过电压通过系统回路作用于变压器上。为保证变压器的可靠运行, 只有设计足够的绝缘强度, 才能够承受冲击过电压的作用。当变压器制作完成后, 制造厂在变压器的例行或型式试验中要对产品进行雷电冲击试验, 考核产品的冲击绝缘质量。如果产品在进行雷电冲击试验时出现内部绝缘故障, 需要在厂内对产品进行维修, 这个过程往往耗时比较长。如果能够通过对试验现象及试验结果的分析, 对故障点的位置进行准确的判断, 有利于快速完成产品的维修工作, 同时对产品绝缘结构的优化设计也有一定的意义。

变压器雷电冲击试验方法

电力变压器雷电冲击试验测试原理: 由冲击电压发生器产生标准雷电冲击波形, 由冲击分压器、示波器和峰值电压表组成测量系统进行电压和波形的测量。雷电冲击试验中, 通过对比50%试验电压与100%试验电压下的试验数据、波形的差异, 判断产品是否能耐受住试验电压, 其中主要对冲击电压和中性点电流的波形进行比对。

1. 冲击电压发生器

常见的冲击电压发生器由电容器及电阻组成。试验时首先通过试验变压器和硅堆组成的整流电压

对多级电容器进行并联充电, 随后通过球隙点火使多级电容串联放电实现高压脉冲波的输出。

2. 冲击电压测量系统

试验测量系统由冲击分压器、高压引线、高压端阻尼电阻、同轴电缆和冲击数字测量系统(或数字示波器、峰值电压表)组成。常见的冲击分压器有电阻分压器、电容分压器和阻容分压器三种类型。电阻分压器由无感电阻组成, 由于冲击电压是一种变化速率很快的波形, 在此波形作用下, 波形频率越高, 电阻越大, 杂散电容越大, 测量误差也越大, 因此适用范围较小。因为单个高压标准电容成本高、测量容易出现振荡及不适配低压臂电容等原因, 纯电容分压器适用范围也较小。为了阻尼测量回路中的振荡, 在多级串联电容的基础上, 给各级电容器上并联一个合适的电阻, 组成阻容分压器, 这种分压器方波响应好, 热容量大, 因此适用范围广。

3. 变压器雷电冲击试验

国标GB 1094.3—2017《电力变压器第3部分: 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙》规定, 设备最高电压值 $U_m > 72.5$ kV, 变压器的雷电冲击试验为例行试验, 设备最高电压值 $U_m \leq 72.5$ kV, 全绝缘变压器产品雷电冲击试验为型式试验。

(1) 试验前准备工作

试验需在变压器完成装配、注油、静放和放气

等工序，并且按照国标要求的试验顺序已完成规定试验项目后进行。试验时需注意将变压器油箱与地面绝缘，油箱的接地端子一点可靠接地，当铁心和夹件分别引至油箱外接地时，也应将其接地端子可靠接地。

(2) 冲击波形及试验接线

国标GB 1094.3—2017规定的标准雷电冲击全波为 $1.2 \pm 30\%/50 \mu s \pm 30\%$ 。对不同的变压器，其雷电冲击试验接线是不同的，本次试验变压器为自耦变压器，雷电冲击试验接线（高压A相试验为例）如图1所示。

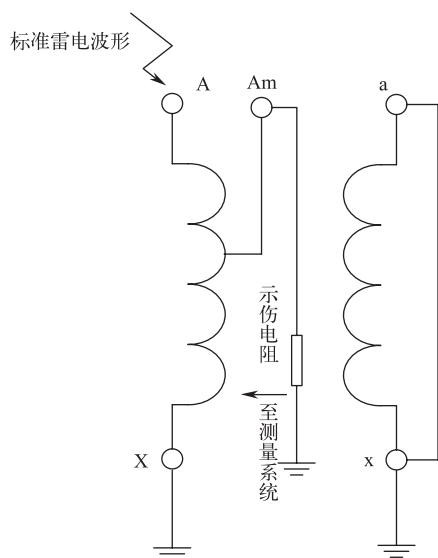


图1 自耦变压器（高压A相雷电冲击）试验接线

雷电冲击试验故障原理及判断方法

在变压器雷电冲击试验中，用冲击数字测量系统（或数字示波器、峰值电压表）记录试验电压和电流两种波形。

雷电冲击试验的故障判断是一个比较复杂的问题，当变压器发生以下情况时，可以明确地判定发生了故障。

- 1) 试验时变压器油箱中有异响。
- 2) 变压器油箱内有烟和气体冒出。
- 3) 雷电冲击试验后，变压器的空载电流和空载损耗明显增加。

但是，如果在变压器冲击试验中，被试产品的绝缘仅发生了比较小的损伤，未形成严重的击穿，则上述特征可能就不会出现，所以还必须用更灵敏

的方法来判断产品故障。

1. 冲击电压波形法

借助测量系统采集的电压波形，比对低电压下和100%电压下雷电全波电压波形，如果发生绝缘故障，100%电压下电压波形会发生畸变。不同类型的故障对应不同类型的波形畸变。

- 1) 当靠近绕组端部绝缘对地故障时，电压波形将在极短时间内发生跌落。
- 2) 当绕组本身沿着绕组发生绝缘故障时，电压波形是阶段性的。
- 3) 当绕组本身一部分发生绝缘故障时，电压波形的波尾会变短。
- 4) 当小部位击穿（如匝间击穿）时，电压波形没有变化。

2. 中性点电流法

借助串联在被试绕组中性点与大地间的示伤电阻，可以采集到试验时流过变压器绕组的电流。比对低电压下和100%电压下雷电全波电流波形，如果发生绝缘故障，则100%电压下电流波形也会发生畸变。

- 1) 电流波形发生重大振荡变化，说明产品对地电位发生了绝缘故障。
- 2) 电流波形电流值出现显著增大，表明被试绕组内部出现绝缘故障。
- 3) 电流波形电流值显著减小，说明绕组与相邻绕组之间绝缘出现故障。

故障问题描述及记录波形

按照国标规定试验程序对本次被试产品进行试验工作，依次完成电压比测量、联结组标号检定、绕组电阻测量和操作冲击试验等，在进行雷电冲击试验时高压A相、中压Am和低压x相试验结果均合格且试验过程无异常。随后进行低压a相雷电冲击试验时，进行第1次50%电压雷电全波试验时，雷电冲击波形无异常，波形图如图2所示。进行第1次100%电压雷电全波试验时，雷电冲击波形发生变化，波形图如图3所示，试验监护人员听到变压器油箱内有异常声响。低压x相与a相为同一绕组首尾端，x端雷电冲击试验1次50%雷电全波试验、3次100%电压雷电冲击全波试验，雷电冲击电压波形均无异常。

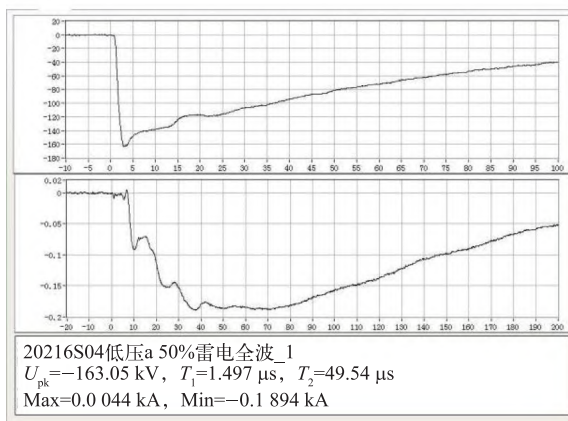


图2 低压a端50%雷电全波电压波形

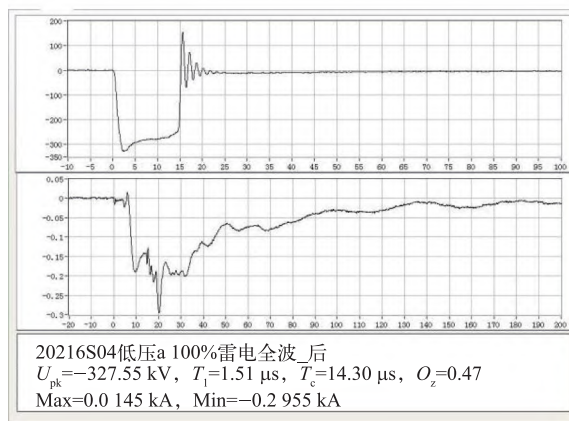


图3 低压a端第1次100%雷电全波试验波形

结果分析

依据上述雷电电压波形法、中性点电流法的测试原理并结合试验时的现象,可以判断产品内部发生了绝缘故障,电压波形发生了快速跌落,电流波形上电流值振荡明显,绕组尾端x相雷电全波试验无异常,综合上述情况可以判断本次故障位置发生在绕组首端对地位置。随后对变压器吊罩进行检查,重点检查低压绕组a端部引线部分,发现低压a端线端出头部位与变压器铁心屏蔽筒接地引线包扎绝缘纸破损,有明显故障现象,剥开击穿位置的绝缘,能够看到击穿明显的故障痕迹,如图4所示,其他位置检查未见异常。随后对该位置进行修理,复试雷电冲击试验为合格,验证了本次判断的正确性。



图4 低压绕组故障部位实拍图

结束语

本文分析了一起500 kV电压等级变压器雷电冲击试验故障原因,总结了该类型变压器雷电冲击试验原理及试验方法,最终确定该故障位于低压a线端出线对地的位置。根据器身检查,结合试验情况初步分析,低压a击穿点位置处引出线折弯处局部凸起,形成尖角,导致雷电冲击试验时局部场强集中,进而引发与屏蔽板接地部位击穿故障。验证了本次判断的准确性,同时为今后类似问题的判断方法提供了一定的借鉴作用,具有较高的工程实践意义。**EA**

参考文献

- [1] 张仁豫,陈昌渔,王昌长.高电压试验技术[M].2版.北京:清华大学出版社,2008:145-164.
- [2] 胡启凡.变压器试验技术[M].北京:中国电力出版社,2010:166-219.
- [3] 黄小华,孔宪国,姚艺新,等.一起接地变压器雷电冲击试验故障分析[J].变压器,2020,57(1):79-83.
- [4] 万欣,马小娜.浅谈高压电动机热过负荷保护原理、整定计算及试验方法[J].电气应用,2020,40(4):78-82.
- [5] 王磊,程鹏,杨艳,等.一种集约型电器设备试验引线集成技术研究及应用[J].电气应用,2020,40(5):55-60.

(收稿日期:2021-12-08)