大型变压器绝缘件监造典型案例分析

张翰林[1]，李祎春[1]，陈应龙[1]，冉　竹[2]

（1. 国网内蒙古东部电力有限公司物资分公司，内蒙古 呼和浩特 010000；
2. 四川启明星电力装备制造集团有限责任公司，四川 成都 610000）

摘要：对变压器雷电冲击试验时所发生的放电现象进行了分析，得出故障原因是变压器绝缘层压板在生产制造过程中出现裂纹、气隙导致层压板击穿放电。

关键词：变压器；层压板；局部放电；生产工艺

Typical case analysis of large-scale transformer insulation supervision

ZHANG Hanlin[1], LI Yichun[1], CHEN Yinglong[1], RAN Zhu[2]

（1. State Grid East Inner Mongolia Material Supply Compamy, Hohhot 010000, China；2. Sichuan Qimingxing Power Equipment Manufacturing Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: According to the discharge phenomenon of transformer in the lightning impulse test, this paper analyzes that the fault is caused by the breakdown and discharge of the laminated plate caused by the crack and air gap in the production process of the transformer insulating laminated plate.

Key words: transformer; laminate; partial discharge; production process

0　引言

变压器生产制造工艺决定了其电气性能质量。局部放电与设备绝缘材料质量、设备使用时间和绝缘材料发生劣化的情况关系密切，其直接影响设备绝缘的水平。变压器等电力设备由于制造工艺不达标或者是长时间运行，当绝缘介质部分区域内存在气隙、气泡和杂质等缺陷时[1-2]，该区域电场强度高于击穿场强，会发生局部放电和沿固体绝缘表面沿面放电现象。变压器生产过程中绝缘件的微小裂纹会产生气隙，由于气隙中空气的介电常数和压板固体材料的介电常数不同，电场作用下气隙会被击穿，形成局部放电[3-4]。微小缺陷会在运行电压下逐渐发展劣化，导致变压器绝缘故障，甚至形成绝缘系统故障。变压器绝缘层压板在生产部件加工处理过程中，如果处理不当，按工艺流程操作，极易引起层压板裂纹，留下绝缘隐患缺陷。

1　500 kV变压器案例事故概况

现场见证变压器进行雷电冲击试验时，中压线端按试验顺序完成一次降低电压（50%～70%）的负极性全波冲击，一次100%电压的负极性全波冲击，一次降低电压（50%～70%）的负极性截波冲击，两次100%电压的负极性截波冲击，再进行第二次100%电压的负极性全波冲击时变压器出现异响，试验人员结合如图1所示波形图及试验现象初步判断发生绝缘击穿放电，经放油吊芯检查发现绝缘压板对引线发生贯穿性击穿放电，对压板进行检查，发现压板绝缘层表面有裂缝。压钉对压板裂纹放电击穿压板如图2所示，压板内裂纹放电击穿通道如图3所示，压板绝缘件开裂如图4所示。

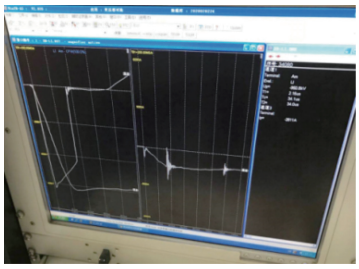

图 1　冲击放电波形图

Fig. 1 Impulse discharge waveform

(a) 击穿压板内侧

(b) 击穿压板外侧

图 2　压钉对压板裂纹放电击穿压板

Fig. 2 Electric breakdown of the pressing plate due to the crack of the pressing pin on the pressing plate

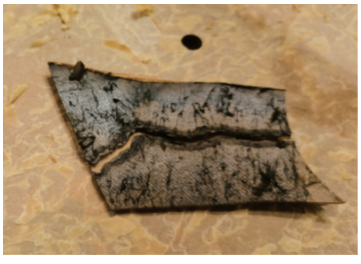

图 3　压板内裂纹放电击穿通道

Fig. 3 Electric breakdown channel of crack discharge in pressing plate

图 4　进行总装的绝缘件

Fig. 4 Insulation for final assembly

2　绝缘件开裂的内部结构及形成放电击穿机理

绝缘层压板中的气隙会产生未贯通电极的放电，这种放电可能出现在固体绝缘的气隙中，也可能在液体绝缘的气泡中，或不同介电特性的绝缘层间。就本文发生的事故来看，由于层压板存在气隙或者裂纹，这时可能会出现介质内部之间的放电，用不同介电常数的绝缘介质的电场分布来说明。

图5为层压板内部含有小气隙的结构图，其等效原理图如图6所示。

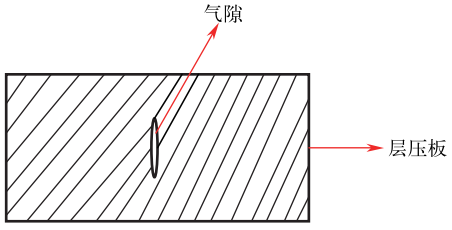

图 5　层压板内含气隙结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of air gap structure in laminate

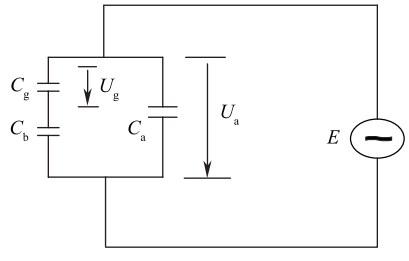

图 6　等效电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of equivalent circuit

图6中，C_g表示气隙电容；C_b表示层压板与

气隙串联部分的电容；C_a表示层压板除气隙以外的电容；U_g为气隙电压；U_a为层压板的外施电压。

当外施电压U_a上升，直到气隙电压U_g达到气隙的击穿电压时，气隙开始放电，即发生局部放电。可设气隙介电常数为ε_g；层压板介电常数为ε_b；气隙场强为E_g；层压板中平均场强为E_{av}。根据电路原理求得

$$E_g = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_g} E_{av} \tag{1}$$

根据式（1）可知，在交流电场下，气隙中分配到的场强等于平均场强的$\varepsilon_b/\varepsilon_g$倍，而在一般绝缘介质中，气隙内部都为空气。因此，认为气隙介电常数ε_g=1，而层压板介质的介电常数ε_b＞2。由此可知，气隙承受的电场强度高，而空气击穿场强又很低，所以当外施电压达到一定值时，气隙首先被击穿，而周围介质在一定时间内仍保持完好的绝缘特性，由此便形成了气隙内部放电。

层压板的结构是当间隙存在时，间隙的方向与电场方向一致，当层压板内部出现间隙时，有时由于层压板外表面胶层加工较好，从外面观察是看不到内部存在间隙的，在变压器真空注油过程中，绝缘油也不能浸入层压板间隙中，这样就在层压板中形成了与电场方向一致的空气隙。当空气隙长度很短时，会在内部形成局部放电；当空气隙长度较长时，会在气隙的固体表面形成沿面放电，这时层压板没有缺陷的部分将承受全部电压，完好部分承受的电场强度超过了其设计阈值，在施加冲击电压时形成气隙沿固体绝缘表面沿面放电，同时层压板绝缘完好部分也会瞬间被击穿。在层压板被击穿后，外表面只是沿层压板胶层有放电迹象，而在内部有树枝形发散通道。

利用多物理场仿真分析，根据该变压器放电击穿处内部结构和实际参数，对500 kV变压器中压套管引线穿过绝缘压板对压钉放电击穿进行建模和仿真分析，内部结构如图7所示，放电击穿路径尺寸如图8所示。

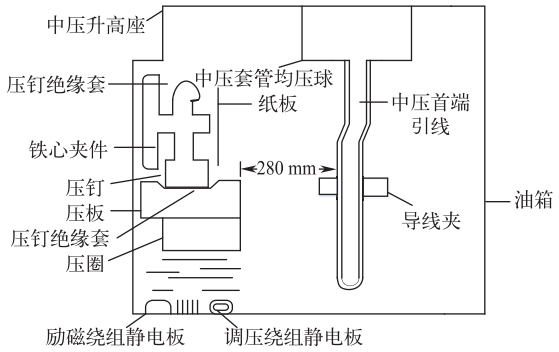

图 7　变压器放电击穿处内部结构图

Fig. 7 Internal structure of transformer discharge and electric breakdown

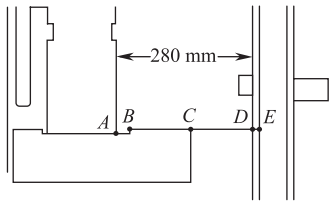

图 8　变压器放电击穿路径尺寸

Fig. 8 Electric breakdown path size of transformer

变压器内部部分实际参数及击穿路径耐受电压值如下表所示。

表　放电部分实际参数及击穿路径耐受电压值

Tab. Actual parameters of discharge part and withstand voltage value of breakdown path

	路径长度/mm	路径耐受电压/kV	路径发生电压降/kV
A–*B* 段层压板开槽	35	546	129.1
B–*C* 段承压长度	106	999	303.1
C–*D* 段油道	140	1 656	491.2
D–*E* 段绝缘纸	15	675	26.6
A–*E* 段	295	3 876	950

结论：击穿路径耐受电压裕度 3 876/950=4.1。

以固体绝缘局部放电机理对层压板内存在气隙或者裂纹故障处作出理论性分析，通过对绝缘层压板中产生的气隙仿真建模，分别计算了将气隙长度从10 mm延伸到100 mm的电场强度分布，气隙的最大场强达到10 kV/mm，当气隙达到30 mm以上时，压板就不能承受所加电压了。在本文案例中，由于是做雷电冲击耐压试验，加压达到了900 kV，那么气隙在瞬间便会被击穿，造成层压板局部碳化，进而发展为贯穿通道，导

致事故的产生。

3 事故诱因分析

事故发生后，对该批变压器的四块压板送样做材料检测，根据X光的验证检测结果，其中三块进行干燥后的样品检测有裂纹，证实了制造工艺上出现了某些缺陷。因此在变压器监造及生产过程中还应进一步加强层压板固体绝缘的检查，严格把控绝缘件干燥过程，防止绝缘件材料及处理工艺引起的局部缺陷[5-6]。

压板及半压板原材料缺陷是造成绝缘压板放电击穿故障的根本原因。压板材料中可能含有杂质、空隙，或存在胶污染等缺陷。具体分析有如下几种问题。

1）压板在储存和使用期间的吸潮：纸板纤维具有容易吸湿的特点，而水分的吸收与存储时间、密封程度和环境湿度密切相关。此台产品压板生产完成至入炉将近两个月时间，在存储和使用过程中吸收环境中的水分，而且进入夏季环境湿度较大，绝缘车间6月份湿度达50%，环境湿度越大、吸湿越严重，纸板吸潮导致层间结合力下降。

2）吸潮后的纸板在干燥过程中，沿厚度方向会存在含水率梯度、温度梯度而产生收缩不均匀，导致沿厚度方向出现开裂、分层，这是层压纸板开裂的主要原因。

3）从现场来看，层压板制作是由纸板与双面上胶纸交错叠积后热压而成，上胶纸胶含量较少，浸入性不如酚醛树脂胶，造成层压纸板再次干燥过程中易开裂，但目前行业上酚醛树脂胶层压纸板电气性能无法与上胶纸层压纸板达到同一水平，因此高电压等级产品层压纸板仍以上胶纸粘接为主。

监造人员和制造人员应进一步加强层压板固体绝缘的检查，严格把控绝缘件干燥过程，防止绝缘件材料及处理工艺引起的局部缺陷。

4 结束语

本文根据500 kV变电站新建工程电力变压器冲击耐压试验故障案例，从变压器放电击穿处出发，对其所发生的局部放电机理进行了分析。结果表明，层压板中由于裂纹产生的气隙会导致变压器绝缘试验局部放电不合格及雷电耐压试验放电击穿。本文的研究分析有助于监造人员和制造人员在变压器制造过程中加强对层压板固体绝缘的检查，严格把控绝缘件生产过程中的干燥工艺，增强因材料和工艺所引起的局部放电的防范意识。变压器制造过程中加强对层压板固体绝缘的材料选择，对电场强度较高的位置应尽量采用绝缘性及耐热性较高的高分子高强度绝缘材料。并将层压纸板绝缘件的X光探伤检测作为抽检措施。**EA**

参考文献

[1] 郑莹莹，吕俊涛，黄锐，等．高压开关柜内部缺陷的局部放电信号特征研究[J]．山东电力技术，2018，45(12)：40-45．

[2] 王秋红．电气设备产生局部放电现象及分析[J]．应用能源技术，2020(11)：10-12．

[3] 李建明，朱康．高压电气设备试验方法 [M]．北京：中国电力出版社，2001．

[4] 黄政．基于单波特征的变压器局部放电特性及类型识别研究[D]．成都：西华大学，2020．

[5] 李建明，张榆，陈少卿．特高压直流换流站调试过电压测试及分析[M]．北京：中国电力出版社，2017．

[6] 王戈，王强，田志刚，等．开关柜局部放电综合在线检测装置的研究与应用[J]．四川电力技术，2012，35(2)：44-48．

作者简介

张翰林

张翰林（1972—），男，高级工程师，主要从事电力设备质量抽检与监造组织管理工作。

(收稿日期：2021-06-25)