

# 冲击电压下大尺寸出线装置模型油中电场特性研究

## Research on Electric Field Characteristics in Model Oil of Large Size Outlet Device under Impulse Voltage

张宇潇

Yuxiao Zhang

贵州电网有限责任公司铜仁供电局 中国·贵州 铜仁 554300

Tongren Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Tongren, Guizhou, 554300, China

**摘要:** 换流变压器在特高压输电工程中发挥着重要作用。而冲击电压对换流变压器的危害较大, 体现在投运前的雷电冲击和操作冲击的例行测试, 产生的内部缺陷引起绝缘损坏; 或者投运后在运行期间内部绝缘发生故障, 受到外部短路冲击、雷电冲击发生绝缘击穿、闪络等损害。现有的空间电场特性的研究仅仅局限于简单、小尺寸平板等效模型, 而对换流变压器大尺寸油纸绝缘结构研究很少; 且现有研究多针对纯油中电场特性研究, 缺乏对大尺寸模型多层油纸绝缘结构在冲击电压下油中电场实测研究。

**Abstract:** Converter transformers play an important role in UHV transmission projects. However, the impact voltage has great harm to converter transformers, which is reflected in the routine test of lightning impact and operation impact before operation, resulting in internal defects causing insulation damage. Or internal insulation failure during operation after operation, insulation breakdown, flashover and other damage caused by external short-circuit impact, lightning impact. The current research on spatial electric field characteristics is limited to simple and small-size flat plate equivalent model, while the research on large-size oil-paper insulation structure of converter transformers is rare. In addition, most of the existing studies focus on the electric field characteristics in pure oil, and the field measurement of multi-layer oil-paper insulation structure in large size model under impulse voltage is lacking.

**关键词:** 换流变压器; 冲击电压; 大尺寸

**Keywords:** converter transformer; impulse voltage; large size

**DOI:** 10.12346/peti.v5i3.8432

### 1 测量原理

**Kerr 效应:** 一些特定的液体电介质在外施电压的作用下会呈现单轴晶体的特性, 当光束经过该电介质时, 会产生平行于电场方向与垂直于电场方向的两光矢量, 两矢量的相位差  $\Delta\theta$  与液体电介质的 Kerr 常数以及其他物理量成正比<sup>[1]</sup>, 如式 (1) 所示。

$$\Delta\theta = 2\pi BLE^2 \quad (1)$$

式 (1) 中,  $B$  为液体电介质的 Kerr 常数; 对于变压器油, Kerr 常数为  $3.0 \times 10^{-15} \text{ m/V}^2$ ;  $E$  为电场强度, 单位为  $\text{V/m}$ ;  $L$  为光束在电场区域的有效长度, 单位为  $\text{m}$ 。

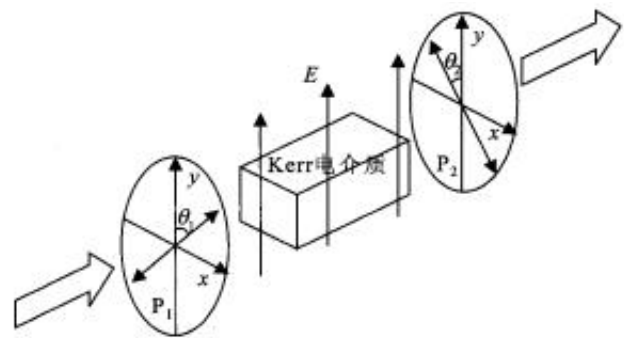


图 1 实验原理图

根据 Kerr 效应, 实验平台的搭建如图 1 所示, 当激光

【作者简介】张宇潇 (1997-), 男, 蒙古族, 中国贵州铜仁人, 本科, 助理工程师, 从事变电运行、变电智能化研究。

平行腔体入射时, 光束与  $y$  轴垂直, 使两光学偏振器的偏振方向与  $y$  轴的夹角  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 。根据该关系, 再进行光强的归一化。当某点光强与最小光强的差值和最大光强和最小光强的差值相比时, 比值与两相互正交的光矢量差存在一定的函数关系: 由于激光经过两次偏振, 从而满足关系式 (2):

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 \frac{\Delta\theta}{2} \quad (2)$$

而  $E_m$  为光强最大时对应的电场强度, 其值与电介质中的 Kerr 常数  $B$ 、光矢量在电场中的有效区域  $L$  有以下函数关系:

$$E_m = \frac{1}{\sqrt{2BL}} \quad (3)$$

联立式 (1)、式 (3) 可得:

$$\Delta\theta = 2\pi BLE^2 = \pi(E/E_m)^2 \quad (4)$$

由以上式子可知, 当示波器上能够记录光强波形时, 即可计算出光强最大时油中电场强度  $E_m$ , 而当光强度处于第  $n$  个极值点时, 其相应电场强度为:

$$E_n = E_m \sqrt{n} \quad (5)$$

当光强逐渐增大至极大值时, 有以下关系:

$$E = E_m \left[ n - 1 + \frac{2}{\pi} \arcsin(I_o / I_i)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

当光强逐渐减小至极小值时, 有以下关系:

$$E = E_m \left[ n + \frac{2}{\pi} \arcsin(I_o / I_i)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

在该实验中, 由于所运用的测量原理是 Kerr 效应, 其测量精度主要取决于外施电压的大小, 当外施电压足够大时, 测量精度较高。同时, 由于参与测量的物理量是光学量, 与被测设备没有直接的电的联系, 故受到外界干扰较小。

## 2 测量平台

### 2.1 测量平台总体介绍

测量平台由冲击电源、He-Ne 激光发生器、起偏器、1/4 波片、大尺寸阀侧出线装置模型、检偏器、光电探测器以及与其相连的示波器组成, 所有元器件均放置在气浮隔振光学平台上, 该平台能够隔绝外界振动所带来的干扰<sup>[2]</sup>。

### 2.2 光路部分

He-Ne 激光发生器产生波长为 633nm 且直径为 0.7mm 的椭圆偏振激光, 消光比约为 1000:1, 具有上下、左右、俯仰、旋转四个自由度, 上下和旋转两个方向上还具有微调功能, 底座具有螺纹孔, 可用螺丝将器身固定在实验平台上, 确保实验平稳进行, 且该激光器输出强度稳定, 方向平直且聚焦度较高。

偏振器在该实验中分为起偏器和检偏器, 起偏器放在激

光器之后, 第一块 1/4 波片之前, 用于使出射光具有线性偏振; 检偏器放在第二块 1/4 波片之后, 光电探测器之前, 用于检测出射光的线性偏振程度<sup>[3]</sup>。起偏器和检偏器都具有上下、左右、俯仰、旋转、偏振角五个自由度, 在两偏振器上都有微调以及固定旋钮, 可以使得测量精度保持在较高的水平 ( $< 0.1^\circ$ )。

### 2.3 试验模型

模型的高度 267mm, 宽度 247mm, 长度 500mm, 内部均压环使用 2mm 铝管导角, 外包 2mm 的纸浆板, 中间有  $3 \times 5$ mm 的油道, 纸筒间撑条端部每边缩短 10mm, 防止爬电, 每个油道之间使用 2mm 绝缘纸筒, 最外层下半圆柱采用 0.1mm 的铜箔端部导角, 电极剖面如图 2 所示。

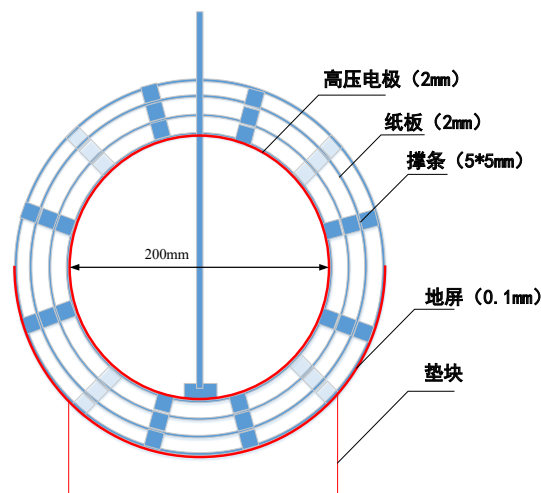


图 2 电极剖面示意图

为了模仿大尺寸阀侧出线装置的油纸层级结构, 则需要将该电极放入盛有变压器油的长度 600mm, 宽度 300mm, 高度 300mm 的长方体容器中, 由于变压器油 Kerr 系数较小, 可通过较长的腔体增大 Kerr 效应的作用。容器四壁由有机玻璃组成, 上表面的中心处有直径 5mm 的孔, 便于插入电极; 上表面右上角处设有盛装干燥剂的容器, 用于吸收容器中多余的水分; 容器两侧表面另装有两块有机玻璃, 由螺丝固定, 便于光束穿过该腔体; 容器底部表面四角处各装有一个圆形底座, 起稳固作用<sup>[4]</sup>。容器中的变压器油需将电极模型浸没 (约 30L), 从而形成出线装置的模型。

在实测期间, 由于电极模型在外施电压的作用下, 其油纸界面会积聚大量电荷, 因此在每次施加冲击电压之后, 应将电极模型接地 (30min), 用来释放电极模型内的电荷, 同时, 考虑到腔体本身的绝缘强度, 不宜长时间对腔体施加冲击电压。

### 2.4 冲击电压发生器

冲击电压发生器为四级级联 Marx 发生器, 通过调整点火球隙可提供峰值从 10kV 至 400kV 的冲击电压, 每级最高充电电压为 100kV, 充电时间小于 30s, 通过调整波前、波尾电阻, 可提供标准  $1.2/50 \mu s$  的雷电冲击电压和

250/2500  $\mu\text{s}$  的操作冲击电压, 具体技术参数如表 1 所示。试验腔体通过连接分压电容器顶部引出的导线, 间接与冲击电压发生器相连。由于分压电容的高度与体积与冲击电压发生器相似, 且底部稳固, 因此通过分压电容连接实验腔体可有效缓解冲击电压在触发时对实验平台产生的振动干扰。

表 1 冲击电压发生器技术参数

技术指标	参数值
最小输出电压峰值	10kV
最大输出电压峰值	400kV
级数	4 级
每级最高充电电压	100kV
充电时间	< 30s
极性	正、负 (倒换硅堆可实现)
电压测量精度	$\leq 1\%$

## 2.5 测量部分

试验腔体的电极通过连接分压电容器的引出线从而与冲击电压发生器相连, 以此来接收外施电压。分压电容的衰减倍数约为 736 倍, 从电容分压器底部引出导线, 并通过衰减器接入示波器, 衰减器的衰减倍数是 100 倍。

由于显示在示波器上的外施电压已经被衰减约  $7\text{E}-04$  倍, 故受到的干扰很小, 且因为冲击电压的瞬时性与突变性, 一般受到干扰的可能性较小。而光电探测器由于对光强较为敏感, 所以应用全封闭铝壳将光电探测器密封在其中, 除此之外, 雷电冲击电压产生的巨大电磁辐射也容易耦合到测量回路, 从而对光强信号产生干扰, 因此, 光电探测器采用独立电池供电, 将电池与光电探测器封装在铝制屏蔽壳内, 光电探测器联接示波器的信号线采用双屏蔽线; 同时为了避免电磁干扰耦合到屏蔽线上, 在屏蔽线外侧用铝箔包裹, 从而避免了电磁辐射的干扰, 改善前后的波形。

光电探测器位于检偏器之后, 用来检测光强信号, 同时将光强信号转化为电信号并通过双屏蔽信号线传输到示波器上。实验所用光电探测器在 632.8nm 的响应度为 0.42A/W,

上升时间为 10ns, 远远小于雷电冲击电压的波前时间, 外围电路的响应带宽为 10MHz, 示波器的带宽为 2.5GHz, 大于雷电冲击电压的频率, 满足了测量响应速度的需求。由于光电探测器对光强变化量较敏感, 所以尽管外界光强会对其产生一定影响, 但在激光光强波形的波前、波峰、半峰等变化较为明显的数值处, 也能够保证其测量精度。

## 3 试品的预处理及测量点选取

原始变压器油经过滤处理以滤除油中杂质, 并在 85℃ 真空干燥箱内进行脱水脱气处理 48h, 经该过程后油中水分含量预计在 3ppm~5ppm, 这可以避免过早击穿并提高光学检测精度, 且符合国标对变压器油的要求。原始干纸板通过剪裁后, 经 105℃ 鼓风干燥箱加热处理 48 小时, 再在 85℃ 真空干燥箱中浸油进行脱水、脱气处理 48h, 纸板含水量百分比预计在 0.3%~0.5%, 同样符合国家标准<sup>[5]</sup>。

## 4 结论

基于本次试验所测得的不同电压幅值、不同波前时间的油中电场数据在后期展开分析和仿真计算, 并结合油中电场的仿真与实测差异, 由此分析空间 / 界面电荷对大尺寸阀侧出线装置模型油中电场特性的影响规律, 为换流变压器的绝缘设计提供参考。

## 参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 郑劲. 换流变压器及监造技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [3] 林春清, 周志强. 一起 220kV 变压器雷击损坏事故原因分析[J]. 变压器, 2008(2): 47-50.
- [4] 董家斌. 500kV 主变压器雷击事故分析[J]. 中国电力, 2014(5): 6-10+16.
- [5] 廖瑞金, 孙会刚, 尹建国, 等. 水分对油纸绝缘热老化速率及热老化特征参量的影响[J]. 电工技术学报, 2012(5): 34-42.