

# 箱式变电站及变压器雷电冲击试验浅析

冉 勇

(甘肃电器科学研究院)

**摘要:** 电力系统中的高压电气设备除了长期承受正常工作的电压外,还要承受雷电在电力设备上可能的雷电过电压,由于此电压幅值大,坡度陡,可能对电力设备造成很大的绝缘损坏。变压器雷电冲击试验是利用冲击电压发生器模拟雷电冲击波,考验变压器遭受雷电冲击时的绝缘强度。本文主要根据多年工作经验,探讨雷电冲击时如何根据不同变压器的类型调节波形。

**关键词:** 全波; 截波; 调波

## 1 雷电冲击试验介绍

雷电是天空放电现象,是一种超长气隙的火花放电,它产生的电流可高达数十甚至几百千安,能使被击物体炸毁、燃烧、使导体熔断或通过电动力引起机械损坏。雷电放电可在电力系统中产生很高的雷电过电压,它能使电力系统中电气设备产生绝缘故障从而影响供电质量。雷电冲击试验是利用冲击发生器模拟真实的雷电波形对试品进行的试验。

根据标准 GB/T1094.3—2017 规定,  $U_m \leq 72.5kV$  时,线端雷电全波冲击试验和线端雷电截波冲击试验属于型式试验。本文主要讨论的是这两个试验。雷电全波冲击试验是用来验证变压器在遭受雷电冲击时耐受强度。与交流电压不同的是,该试验包含有高频电压分量。雷电截波冲击试验与雷电全波冲击试验相比,电压峰值高,频率也更高,它既包括全波冲击又包括利用截断球隙截断的截波冲击。它用来验证变压器在

运行过程中耐受某一些高频电压的能力。

## 2 多级冲击电压发生器

由于高压整流硅堆等因素的影响,使得单级冲击电压发生器的峰值电压最多在 200~300kV。而实际工作中,为了得到更高的冲击峰值电压,常采用多级冲击电压发生器。多级冲击电压发生器的工作原理是利用放电球隙来控制充电电容,使其并联充电,串联放电,从而得到更高的冲击电压峰值<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。

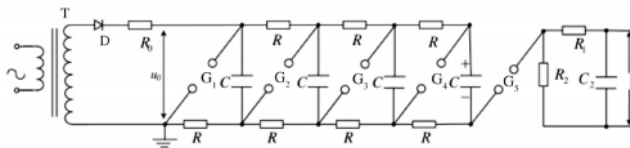


图 1 四级冲击电压发生器的原理电路图

T—充电变压器 D—高压硅整流器 R<sub>0</sub>—保护电阻

G<sub>1</sub>~G<sub>5</sub>—放电球隙

C—充电电容 R—充电电阻 R<sub>f</sub>—波头电阻 R<sub>t</sub>—波尾电阻

基金项目:秦州区均衡性转移支付强科技奖补资金项目(项目编号:2023-SHFZG-3775)。

在图 1 中，首先通过调整球隙的距离，控制各个球隙的放电电压，控制  $G_1$  的放电电压为  $U_0$ ，控制  $G_2 \sim G_4$  的放电电压在  $U_0 \sim 2U_0$  之间，然后对充电电容充电，使得充电电压达到  $U_0$ ，这时  $G_1$  先被击穿，由于并联充电，串联放电，从而使  $G_2 \sim G_4$  依次被击穿，这时在输出端获得接近  $4U_0$  的冲击电压幅值。

### 3 雷电冲击波形

#### 3.1 雷电冲击全波

雷电冲击全波波形如图 2 所示，不为破坏性放电而截断的雷电冲击电压。

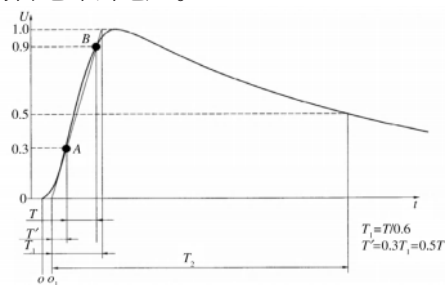


图 2 雷电冲击全波波形

$T_1$  为波前时间，指试验电压曲线在峰值 30% 和 90% 的两点的连线与峰值的交点与视在原点的时间间隔。 $T_2$  为半峰值时间，指试验电压曲线电压下降到峰值电压的一半 50% 时，与视在原点的时间间隔。波形参数为  $T_1 = 1.2\mu s \pm 30\%$ ， $T_2 = 50\mu s \pm 20\%$ 。

(1) 波头时间的近似计算

$$T_1 = \frac{T_f \ln 7}{0.6} \quad (1)$$

$$T_f = R_f \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

(2) 半峰值时间的近似计算

$$T_2 = T_f \ln 2 \quad (3)$$

$$T_f = C_1 R_1 + C_2 (R_1 + R_f) \quad (4)$$

式中， $T_f$  为波头时间常数； $T_t$  为波尾时间常数； $C_1$  为冲击电容； $C_2$  为负荷电容； $R_1$  为波尾电阻； $R_f$

为波头电阻。

(3) 过冲

指峰值电压附近因回路引起的阻尼震荡而产生的幅值增大，过冲和剩余曲线如图 3 所示。

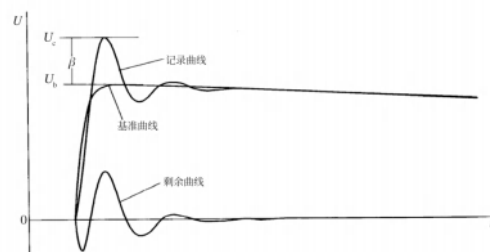


图 3 过冲和剩余曲线

基准曲线：没有叠加震荡的雷电冲击全波的估算曲线<sup>[2]</sup>，剩余曲线：记录曲线和基准曲线的差。

#### 3.2 雷电冲击截波

由破坏性放电导致的电压突然跌落至零点的雷电冲击电压，跌落可发生在波前，波峰或波尾。波前截断雷电冲击波如图 4 所示，波尾截断雷电冲击波如图 5 所示。

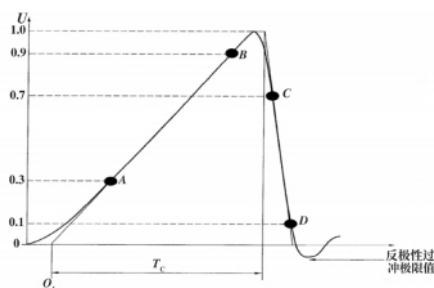


图 4 波前截断雷电冲击波

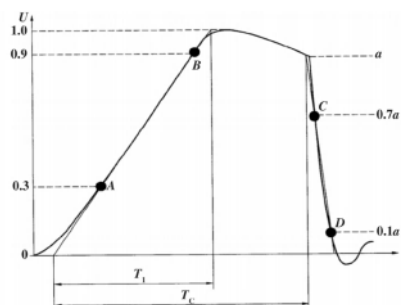


图 5 波尾截断雷电冲击波

截断瞬时：电压曲线跌落的部分 10% 和 70% 两点连接直线与电压跌落曲线的交点。

截断时间 ( $T_c$ )：截断瞬时和视在原点的时间间隔。 $T_c=2\sim 5\mu s$ 。

过冲和峰值附近的震荡是允许的，但最大过冲幅值不能超过 10%<sup>[3]</sup>。

#### 4 雷电冲击波形调波

依据 GB / T 1094.3—2017 要求，如果分接范围超过  $\pm 5\%$  或变压器额定容量大于 2500kVA，则除非经过同意，否则雷电冲击试验应在变压器两个极限分接和主分接进行，如图 6 所示。由于在宇宙射线、紫外线、微量元素辐射、雷击闪电等作用下<sup>[4]</sup>，空气分子会失去一部分围绕原子核旋转的外层电子，使空气发生电离，逃逸原子核束缚后的电子称为自由电子，带负电荷，当自由电子和其他中性气体分子结合后，就会形成带负电荷的空气负离子<sup>[5]</sup>，故变压器雷电冲击试验通常在负极性下进行，以防止试验线路中出现外部闪络的情况。

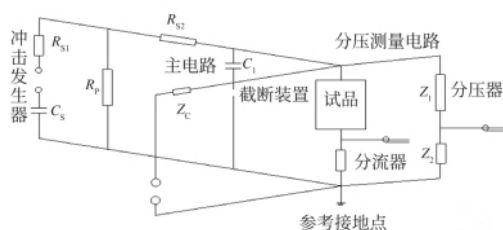


图 6 雷电冲击试验图

$C_g$ —发生器电容  $C_1$ —负荷电容  $C_t$ —试样等值电容

$L_t$ —试样等值电感  $R_{s1}$ —串联电阻 (波前电阻)

$R_{s2}$ —外部串联电阻 (或波前电阻)

$R_p$ —并联电阻 (波尾电阻)  $Z_c$ —截断电路中的附加阻抗

$Z_1$ —分压器高压臂阻抗  $Z_2$ —分压器低压臂阻抗

示伤电流采用中性点电流法采集。

根据式 (2) 和式 (4)，在负荷电容和冲击电容一定的情况下，波头时间和波尾时间与波前电阻和波

尾电阻大小有关，可以近似认为波头电阻和波尾电阻增大，波头时间增大，半波时间增大<sup>[6]</sup>；反之亦然。

在对大型变压器进行雷电冲击时，由于其绕组电感小和 / 或冲击电容大，往往不可能得到满足规定的波形，此时应允许有较大的偏差。由于被试变压器的冲击电容已定，为了得到符合要求的波前时间和上升率，只能减小串联电阻，但往往在减小后，在回路电感的影响下，又会使电压过冲增大，以致可能超过要求值 5%。此时，应该波前电阻和峰值过冲同时兼顾。通常，应尽量使振荡峰值过冲不大于 10%，使波前时间不大于  $1.56\mu s$ ，对于  $U_m \leq 800kV$  的变压器，波前时间不应超过  $2.5\mu s$ 。为克服这一矛盾，唯一有效的途径是减小整个试验回路的电感。雷电冲击试验回路的电感包括冲击电压发电器的电感及连接被试品的外部引线回路电感<sup>[7]</sup>。由于冲击电压发生器在出厂时，电容电感已定，常见的处理方法是，在弱阻尼电容分压器引线上加负荷电容，来抵消回路电感值，而达到减小峰值过冲的问题。

对于截波试验，截断时各种规定参数，如波前时间、半峰值时间、截断时间、反极性过冲幅值等与截断电路的布置，截断电路的阻抗和试品的阻抗有关。对截断瞬时时间不作为规定的试验参数，只要求截断时间符合规定要求  $2\sim 6\mu s$  的范围。但是，在对波形进行比较和判断时，必须是在截断瞬时时间几乎相同的情况下才可以进行<sup>[8]</sup>。如统一是波尾截断。依据 GB 1094.3 中规定，反极性过冲应不大于 30%，但当反极性过冲应不大于 30% 时，可以在截断电路中接入阻抗使反极性过冲控制在 30% 以内。接入阻抗可以加在弱阻尼电容分压器引线处和截断球隙引线之间<sup>[9]</sup>。并且尽可能地缩短截断装置和分压器之间接线的长度，以便得到更短的截断持续时间，增大电压骤降陡度。为防止截波试验时，截断装置发生自截现象，可以适当地减小截断球隙球距电压比，而增大截断球隙球距，使

截断球距明显地大于冲击发生器球距，而避免自截现象。

对于大型变压器进行雷电冲击时，由于其绕组电感小和 / 或冲击电容大，雷电冲击截波调波试验往往很困难，首先调节全波的波头时间，过冲是否超过限值，待调整完后再调节截断时间，调整截断球隙，防止自截的同时，要控制截断时间在规定的范围内。如图 7、图 8 在调节全波波头波形符合要求的情况下，截波反极性过冲超过 30%，由于截断时间不太稳定，增加截断球隙的级数，对于反极性过冲问题，在增大波头电阻的同时，在试品和分压器之间增加串联电阻，发现反极性过冲变化很小，调节电阻阻值后发现还是没有降到要求值，这时可以在充电电阻两侧并联电容器，来减小整个试验回路的电感，经过调节发现反极性过冲减小到要求值，如图 9、图 10 所示。

2024.04.DQGV 14

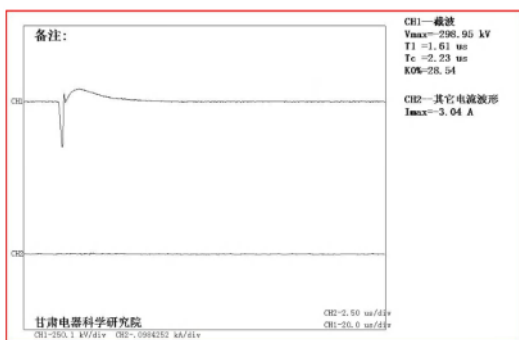


图 7 截波 302kV 反极性过冲试验图 1

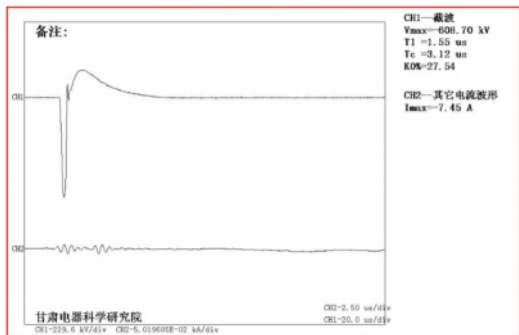


图 8 截波 605kV 反极性过冲试验图 1

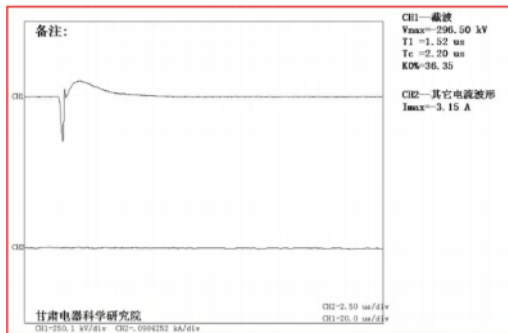


图 9 截波 302kV 反极性过冲试验图 2

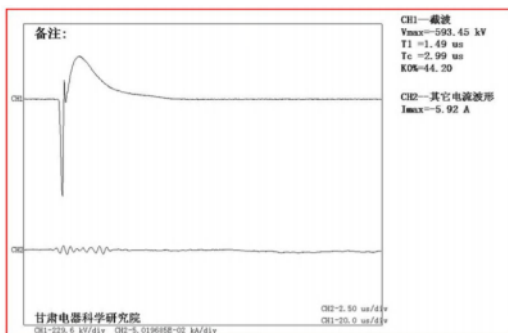


图 10 截波 605kV 反极性过冲试验图 2

### 5 结束语

本文主要对变压器的雷电冲击试验进行简析，通过波前时间和波尾时间计算公式，结合自身工作经验和所学知识，联系标准，通过探讨增加附加阻抗，并联负荷电容等方式，来抵消电感，减小过冲幅值。对大型变压器的冲击全波和截波试验的波形调试有一定的借鉴作用。

### 参考文献

- [1] 胡启凡. 变压器试验技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 166-171.
- [2] 杨敏青, 朱士全. 大型变压器雷电冲击试验波形的改善 [J]. 变压器, 1999 (3): 14-18.

(下转第 65 页)

(上接第14页)

- [3] 王承, 何志伟. 电力变压器雷电冲击试验波形的电阻调节 [J]. 电机电器技术, 2001 (1): 15-17.
- [4] 张彩霞. 临汾市不同功能区空气负离子浓度变化的研究 [J]. 云南化工, 2019, 46 (8): 66-67.
- [5] 王浩洋. 冲击电压发生器的同步和特殊负载下的输出特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [6] 曹建新, 张宝贵, 张友杰. 海滨、森林环境中空气负离子分布特征及其与环境因子的关系 [J]. 生态环境学报, 2017, 26 (8): 1375-1383.
- [7] 谢锡汉, 陶祥海, 庞圣养, 等. 一种新型 35kV 输电线路自脱离灭弧防雷装置 [J]. 电瓷避雷器, 2023 (4): 96-103.
- [8] 陈磊, 张亚杰. “U”形双层低压绕组的应用及雷电冲击特性 [J]. 变压器, 2023, 60 (6): 1-5.
- [9] 黄炫磊, 马斌, 陈光, 等. 变压器暂态电压传输特性试验技术研究 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12 (12): 170-172, 176.

**(收稿日期: 2023-12-07)**