

ICS 29.040.10

E 38

备案号: 63156-2018

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

**DL/T 474.2 — 2018**

代替 DL/T 474.2 — 2006

## 现场绝缘试验实施导则

### 直流高电压试验

**Guide for insulation test on site**

**DC high voltage test**

2018-04-03 发布

2018-07-01 实施

**国家能源局 发布**

## 目 次

前言	13
1 范围	14
2 规范性引用文件	14
3 术语和定义	14
4 对直流试验电压的要求	14
5 直流高电压的产生	15
6 测量系统	18
7 直流高电压试验方法	21

## 前 言

DL/T 474《现场绝缘试验实施导则》共包括下列 5 个部分：

- 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验；
- 直流高电压试验；
- 介质损耗因数  $\tan\delta$  试验；
- 交流耐压试验；
- 避雷器试验。

本部分是 DL/T 474《现场绝缘试验实施导则》的第 2 部分。

本部分是对 DL/T 474.2—2006 的修订。与 DL/T 474.2—2006 相比，主要修改内容如下：

- 整体格式编写参照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》的要求，修改了部分排序，增加“术语和定义”。
- 更新引用的标准。
- 增加容许偏差。
- 将“测量系统”整合为一章。
- 将“直流高压成套装置的校验”单独成章。

本部分由中国电力企业联合会提出。

本部分由电力行业高压试验技术标准化技术委员会（DL/TC 14）归口。

本部分起草单位：华北电力科学研究院有限责任公司、国网湖北省电力有限公司电力科学研究院、苏州华电电气股份有限公司、苏州海沃科技有限公司。

本部分起草人：龙凯华、李昊扬、蔡巍、马继先、张致、邓春、郭绍伟、王劲松、牛铮、邢海瀛、孙云生、毛婷、李大卫、马鑫晟、侯力枫、李凤海、余青、葛凯。

本部分代替 DL/T 474.2—2006。

本部分历次版本发布情况为：

- DL/T 474.2—1992、DL/T 474.2—2006。

本部分在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

## 现场绝缘试验实施导则

### 直流高电压试验

#### 1 范围

本部分规定了现场直流高电压试验所涉及的试验电压的产生、试验接线、主要元件的选择和试验方法等技术细则和注意事项。

本部分适用于在变电站、发电厂现场和在修理车间、试验室条件下对高压电气设备绝缘进行直流耐压试验和直流泄漏电流试验。

#### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

GB/T 16927.2 高电压试验技术 第2部分：测量系统

#### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

##### 3.1

**试验电压值 value of the test voltage**

试验电压的算术平均值。

##### 3.2

**纹波 ripple**

相对于直流电压算术平均值的周期性偏差。

##### 3.3

**纹波幅值 ripple amplitude**

纹波的最大值与最小值之差的一半。

##### 3.4

**纹波因数 ripple factor**

纹波幅值与试验电压值之比。

##### 3.5

**容许偏差 tolerance**

测量值与规定值之间的允许差值。

#### 4 对直流试验电压的要求

##### 4.1 电压值和极性

直流电压是指单极性（正或负）的持续电压，它的幅值用算术平均值表示。在现场直流电压绝缘试验中，为了防止外绝缘的闪络和易于发现绝缘受潮等缺陷，通常采用负极性直流电压。

根据不同试品的要求，试验电源应能满足试验的电压值、极性和容量要求。

## 4.2 纹波

由高压整流装置产生的电压包含有纹波的成分。在输出工作电流下，直流电压的纹波因数  $S$  应按式 (1) 计算，且  $S$  应不大于 3%，如图 1 所示。

$$S = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2U_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$U_{\max}$  —— 直流电压的最大值；

$U_{\min}$  —— 直流电压的最小值；

$U_d$  —— 直流电压的平均值。

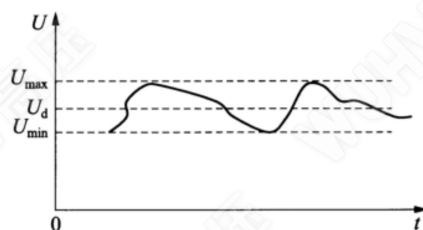


图 1 纹波波形

## 4.3 容许偏差

如果试验持续时间不超过 60s，在整个试验过程中试验电压的测量值应保持在规定电压值的  $\pm 1\%$  以内，当试验持续时间超过 60s 时，在整个试验过程中试验电压的测量值应保持在规定电压值的  $\pm 3\%$  以内。

## 5 直流高电压的产生

### 5.1 产生直流高电压的回路

产生直流高电压，主要是采用将交流高电压进行整流的方法，普遍使用高压硅堆作为整流元件。现场搭建的直流高电压回路，需要测量纹波，满足其对纹波因数的要求。

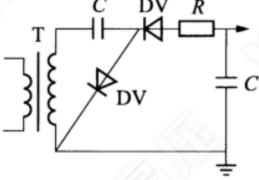
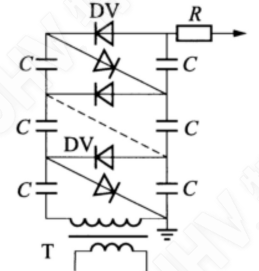
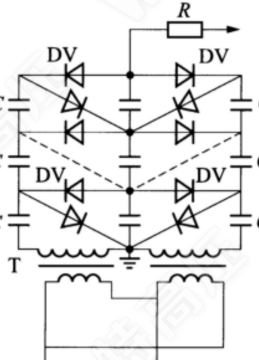
电源一般使用工频电源；对于电压较高的串级整流装置，为了减轻设备的重量，也广泛采用中频电源。

获得直流高电压的回路很多，可根据变压器、电容器、硅堆等元件的参数组成不同的整流回路。现场常用的基本回路有半波整流回路、倍压整流回路、串级整流回路和对称整流回路。表 1 给出这些回路的接线图、直流电压及其纹波因数。

表 1 产生直流高电压的回路

整流型式	接线图	直流电压	纹波因数	符号说明
半波整流		$U_d = U_m - \frac{I_d}{2Cf}$	$S = \frac{I_d}{2CfU_d}$	

表 1 (续)

整流型式	接线图	直流电压	纹波因数	符号说明
倍压整流		$U_d = 2U_m - \frac{3I_d}{2Cf}$	$S = \frac{I_d}{2CfU_d}$	<p>T —— 试验变压器;  C —— 滤波电容;  DV —— 整流硅堆;  R —— 保护电阻;  <math>U_d</math> —— 直流电压 (平均值);  <math>U_m</math> —— 整流电压峰值;  <math>I_d</math> —— 被试品直流电流 (平均值);  <math>f</math> —— 电源频率;  <math>S</math> —— 电压纹波因数;  <math>n</math> —— 发生器串接级数</p>
串级整流		$U_d = 2nU_m - \frac{I_d}{6Cf}(4n^3 + 3n^2 + 2n)$	$S = \frac{n(n+1)I_d}{4CfU_d}$	
对称整流		$U_d = 2nU_m - \frac{I_d}{12Cf}(4n^3 + 3n^2 + 2n)$	$S = \frac{nI_d}{4CfU_d}$	

注：纹波因数  $S$  的计算式只适用于正弦波电源。

## 5.2 主要元件的选择

### 5.2.1 保护电阻器

为了限制试品放电时的放电电流，保护硅堆、微安表及试验变压器，高压侧保护电阻器的电阻值可取

$$R = (0.001 \sim 0.01) \frac{U_d}{I_d} \quad (2)$$

式中：

$R$  —— 高压侧保护电阻器的电阻值， $\Omega$ ；

$U_d$  —— 直流试验电压值，V；

$I_d$  —— 试品电流，A。

$I_d$  较大时，为减少高压侧保护电阻器发热，可取式中较小的系数。高压侧保护电阻器的外绝缘应能承受幅值为  $U_d$  的冲击电压，并留有适当裕度。推荐参照表 2 所列的数值选用。

表 2 高压保护电阻器参数

直流试验电压 kV	电阻值 MΩ	电阻器表面绝缘长度不小于 mm
60 及以下	0.3~0.5	200
140~160	0.9~1.5	500~600
500	0.9~1.5	2000
800kV (5mA)	4	1500 (电阻器直径 $\phi 75$ , 外带硅橡胶伞裙)
800kV (10mA)	2	1500 (电阻器直径 $\phi 75$ , 外带硅橡胶伞裙)
1200kV (10mA)	3	3000 (电阻器直径 $\phi 75$ , 外带硅橡胶伞裙)

高压保护电阻器通常采用水电阻器，水电阻管内径一般不小于 12mm。采用其他电阻材料时应注意防止放电短路。

### 5.2.2 硅堆

高压硅堆上的反峰电压使用值不能超过硅堆的额定电压，其额定整流电流应大于工作电流，并有一定的裕度。

在利用硅堆整流而其单个的电压不够，需要采取多只串联的办法时，必须注意使其电压分布均匀。为此，通常宜采用并联电阻和电容的方法。从现场易于实现的观点来看，也可以仅并联均压电阻，其数值一般为硅堆反向电阻的 1/3~1/4。如因电阻值过高而不易达到时，可取 1000MΩ。

### 5.2.3 滤波电容器

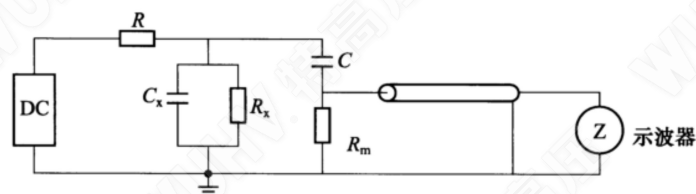
试验小电容量的试品并要求准确读取电流值时，例如测量带并联电阻的阀型避雷器电导电流时，应加滤波电容器。滤波电容器一般取 0.01μF~0.1μF。对于电容量较大的试品，如电缆、发电机、变压器等，通常不用滤波电容器。目前常见的直流高压成套装置已将滤波电容器装设在倍压筒内。

对泄漏电流很小，并仅作粗略检查性的试验，如测量断路器支持瓷套及拉杆的泄漏电流，也可不用滤波电容器。

## 5.3 纹波的测量

### 5.3.1 用示波器测量纹波

图 2 中高电压电容器  $C$  隔离直流成分，应使  $R_m \geq 1/\omega C$ ，则纹波成分全部出现在  $R_m$  上，示波器显示  $R_m$  上的纹波。如果纹波成分比较大，可以在  $R_m$  抽头，按一定比例将一部分纹波送至示波器。



元件：

- DC —— 高压整流装置；
- $C_x$ 、 $R_x$  —— 被试品电阻、电容；
- $C$ 、 $R$  —— 电容、保护电阻；
- $R_m$  —— 测量电阻。

图 2 用示波器测量纹波

### 5.3.2 用标准电容器和整流电路串联测量纹波

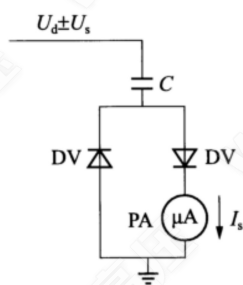
将标准电容器与全波整流器及微安表串联，接到被测电压的两端（如图 3 所示），纹波幅值  $U_s$  与流过标准电容器的整流电流平均值  $I_s$  的关系为：

$$U_s = \frac{I_s}{2Cf} \quad (3)$$

式中：

$C$ ——标准电容器的电容量；

$f$ ——纹波的基波频率。



元件：

PA——微安表。

图 3 用电容器和整流电路测量纹波

## 6 测量系统

### 6.1 直流高电压的测量

对测量系统的一般要求和现场测量，应符合 GB/T 16927.1 和 GB/T 16927.2 的要求。

### 6.2 直流泄漏电流的测量

#### 6.2.1 对微安表的要求

微安表的测量元件应装设在金属屏蔽壳内，壳体应防电晕。例如，微安表的表壳用轻金属材料压制表面光滑的球形或椭球形；表壳显示窗口用导电玻璃；表壳顶部设置屏蔽线插座，使屏蔽线的芯线接微安表测量元件的正极，屏蔽线的屏蔽层接微安表的负极（外壳）。

微安表应具备 0~200~2000 微安量程自动换挡功能。

为方便试验人员在安全距离进行读数，微安表通常采用较大显示屏，也可配置红外线发射功能，将读数同步传递到控制箱上。

#### 6.2.2 微安表的接法

现场电气设备的绝缘有一端直接接地的，也有不直接接地的，微安表的接线位置视具体情况可有下列数种接线（见表 3）。

表 3 中序号 1 和 2 接线图测量准确度较高，宜尽量采用。序号 3 测量误差较大，宜尽量不采用，只有在测量条件受到限制时才采用。

表3 微安表的接线方式

微安表位置	序号	试验接线	符号说明
微安表接在高压侧	1		DC——高电压整流装置； R——保护电阻； C——滤波电容； R <sub>v</sub> ——高值电阻； PA1——毫安表； PA2——微安表； C <sub>x</sub> ——被试品
微安表接在低压侧	2		
	3		

### 6.2.3 微安表的保护

为了防止试验过程中损坏微安表，微安表必须有可靠的保护，要求直流高压成套装置在额定高压下直接对地放电3次后微安表仍能正常工作。图4为一种传统的保护接线图。 $L$ 、 $C_m$ 和 $C$ 用来延缓试品击穿放电的电流陡度，防止微安表活动线圈匝间短路或对磁极放电。其中串联电阻 $r$ 为：

$$r = \frac{U_F}{I_{dH}} \times 1.2 \quad (4)$$

式中：

$r$ ——串联电阻， $M\Omega$ ；

$U_F$ ——放电管放电电压， $V$ ；

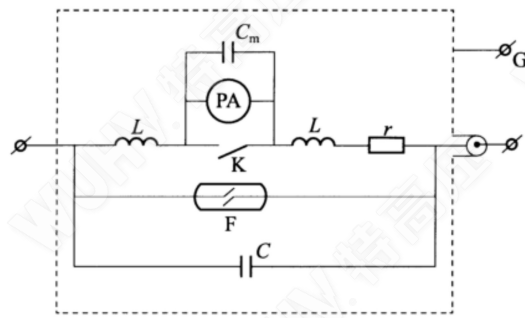
$I_{dH}$ ——微安表满刻度值， $\mu A$ 。

如果采用外接短路开关，一般只在读表时方才断开开关。

短路开关和微安表的接线必须正确，泄漏电流的引线必须先接到短路开关上，然后再用导线从短路开关上引到微安表，以避免试品击穿时，烧坏微安表（如图5所示）。

### 6.2.4 直流泄漏电流的测量方法

当直流电压加至被试品的瞬间，流经试品的电流有电容电流、吸收电流和泄漏电流。电容电流是瞬时电流，吸收电流也在较长时间内衰减完毕，最后逐渐稳定为泄漏电流。一般是在试验时，先把微安表短路1min，然后打开进行读数。对具有大电容的设备，在1min还不够时，可取3min~10min，或一直到电流稳定才记录。但不管取哪个时间，在对前后所得结果进行比较时，必须是相同的时刻。



元件：

$r$  —— 串联电阻；

F —— 放电管；

K —— 短路开关；

$L$  —— 电感（约 10mH）；

$C$  —— 旁路电容（0.5 $\mu$ F）；

G —— 屏蔽端子；

$C_m$  —— 保护电容（0.1 $\mu$ F）；

PA —— 微安表。

图 4 微安表的保护接线图

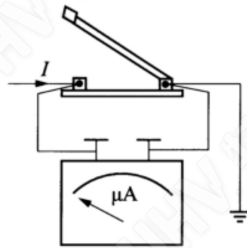


图 5 短路开关和微安表的接线

### 6.2.5 消除杂散电流的方法

绝缘良好的试品，内部泄漏电流很小。因此，绝缘表面的泄漏和高压引线的杂散电流等都会造成测量误差，必须采取屏蔽措施。

对处于高压的微安表及引线，应加屏蔽。

试品表面泄漏电流较大时，应加屏蔽环予以消除。

如果采用的微安表接在表 3 序号 3 的位置，试验装置本身泄漏电流又较大时，应在未接入试品之前记录试验电压各阶段的泄漏电流，然后在试验结果中分别减去这些泄漏电流值。

## 6.3 直流高压成套装置的校验

### 6.3.1 高电压测量装置的校验

直流高压发生器输出电压应经认可的直流高压标准测量装置校验，其测量的不确定度应不大于 3%。

### 6.3.2 高压侧电流测量装置的校验

高压侧电流回路中串接一块直流标准电流表进行校验，标准电流表的准确度应比高压侧电流测量

装置标称的准确度高两级，高压侧电流测量装置的测量不确定度应不大于 0.5%。

### 6.3.3 短时稳定度

直流高压发生器在开机 5min 内，输出电压的漂移值应不大于额定输出电压的 1%。

### 6.3.4 校验周期

直流高压成套装置应每年校验一次。

## 7 直流高电压试验方法

### 7.1 试验条件及注意事项

试验宜在干燥的天气条件下进行，环境湿度不应超过 80%。

试品表面应抹拭干净、干燥，试验场地应保持清洁。

试品和周围的物体必须有足够的安全距离。

高压引线不应有较大弧垂。

因为试品的残余电荷会对试验结果产生很大的影响，因此，试验前应将试品对地直接放电 5min 以上。

如果试验回路带保护电阻而且泄漏电流较大时，应接分压器测量电压，分压器应接至保护电阻之后微安表之前。

如果高压试验接线由于长度不足需要接续时，应使用屏蔽线，并在连接部位做好屏蔽。

### 7.2 试验程序

直流耐压试验和泄漏电流试验一般结合起来进行。即在直流耐压的过程中，随着电压的升高，分段读取泄漏电流值，而在最后进行直流耐压试验。

对试品施加电压时应从足够低的数值开始，以防止瞬变过程引起的过电压影响；然后应缓慢地升高电压，以便能在仪表上准确读数，但也不应太慢以免试品在接近试验电压时耐压的时间过长。从试验电压值的 75% 开始，以每秒 2% 的速度上升，通常能满足上述要求。

### 7.3 试验结果判断

将试验电压值保持规定的时间后，如试品无破坏性放电，微安表数字显示没有向增大方向突然摆动，则认为直流耐压试验通过。

温度对泄漏电流的影响是极为显著的，因此，最好在以往试验相近的温度条件下进行测量，以便于进行分析比较。

泄漏电流的数值，不仅和绝缘的性质、状态，而且和绝缘的结构、设备的容量等有关，因此，不能仅从泄漏电流的绝对值泛泛地判断绝缘是否良好，重要的是观察其温度特性、时间特性、电压特性及长期以来的变化趋势来进行综合判断。

### 7.4 放电

试验完毕，切断高压电源，一般需待试品上的电压降至 1/2 试验电压以下，将被试品经电阻接地放电，最后直接接地放电。对大容量试品如长电缆、电容器、大电机等，需长时间放电，以使试品上的充电电荷放尽。另外，对附近电气设备，有感应静电电压的可能时，也应予以放电或事先短路。经过充分放电后，才能接触试品。对于在现场组装的倍压整流装置，应对各级电容器逐级放电后，才能进行更改接线或结束试验，拆除接线。

对电力电缆、电容器、发电机、变压器等，必须先经适当的放电电阻对试品进行放电。如果直接

对地放电，可能产生频率极高的振荡过电压，对试品的绝缘有危害。放电电阻视试验电压高低和试品的电容而定，必须有足够的电阻值和热容量。通常采用水电阻器，电阻值大致上可用每千伏  $200\Omega\sim 500\Omega$ 。放电电阻器两极间的有效长度可参照高压保护电阻器的表面绝缘长度（见表 2）。放电棒的绝缘部分总长度不得小于  $1000\text{mm}$ ，其中自握手护环到放电电阻器下端接地线连接端的长度  $l'$  为  $700\text{mm}$ ，握手部分为  $300\text{mm}$ ，如图 6 所示。

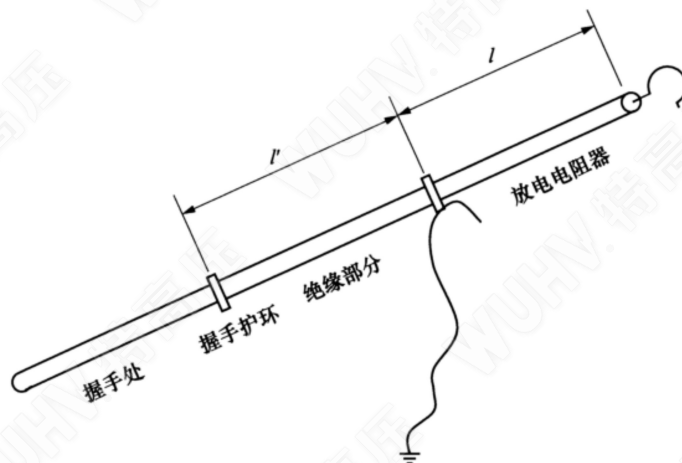


图 6 放电棒的尺寸