

绝缘综合试验指导书

牛志民 易晓郑 编

焦 作 工 学 院

高压实验室安全工作规则

凡进入本实验室工作或试验前,必须仔细学习并严格遵守本规则,以确保设备及人身安全。

一、未经许可,不得动用实验室的设备、仪表。不熟悉本规则及各项设备操作程序不得进行操作。

二、严格监护制度,任何人不得在无监护人时进行高压试验工作,监护人发现有不熟悉或违反操作程序时有权停止其试验。

三、试验前应明确工作目的和要求,作好分工,指定安全负责人,不允许一人单独进行高压试验。

四、试验人员应首先熟悉试验设备的性能、实验内容、线路及试验方法。然后仔细检查安全措施(包括开关、接地棒、接地线、遮拦和警告牌等)。接线时连接要正确、牢固,不同电位部分要保持足够的安全距离。接好线后应先互相检查,再请教师检查。

五、接线经教师检查无误,拆除高压部件(变压器、电容器等)上的接地线,闭上安全围栏后,按操作程序操作。

六、严格执行信号保安制度,投入高压设备前要先发出高压危险或高呼“注意!合闸!”。

七、实验中出现异常情况应立即拉开电源,万一发生人身事故时,必须立即进行人工呼吸,并赶快请医生或送医院。

八、每次切除高压电源后进入安全围栏时,必须用接地棒将具有电容的变压器、球隙、电容器……等全部进行放电,并加以接地,然后方可触及高压设备。

九、试验完毕,必须将全部高压设备用接地棒放电并接地。并将仪器及设备整理复原,经指导教师检查后,方可离去。

高压实验室

目 录

高压实验室安全工作规则

第一章 电气设备绝缘预防性试验	(1)
第一节 测量绝缘电阻	(1)
第二节 泄漏电流及直流耐压试验	(5)
第三节 测量介质损失角	(8)
第四节 交流耐压试验	(25)
第二章 变压器油绝缘强度试验	(31)
第三章 接地装置试验	(33)
第一节 测量接地电阻	(33)
第二节 测量土壤电阻率	(39)
第四章 电容器的试验	(41)
第一节 测量两极对外壳的绝缘电阻	(41)
第二节 测量电容值	(41)
第三节 交流耐压试验	(44)
第四节 冲击合闸试验	(44)
第五章 阀型避雷器试验	(45)
第一节 测量绝缘电阻	(45)
第二节 测量电导电流及串联元件的非线性系数	(45)
第三节 测量工频放电电压	(48)

第一章 电气设备绝缘预防性试验

电气设备绝缘预防性试验是保证电气设备可靠工作的检验手段。电气设备的出厂试验、安装时的交接验收试验和运行中定期进行预防性试验都是为了这个目的。通过试验,发现电气设备绝缘内部隐藏的缺陷,通过检修加以消除。

电气设备的绝缘缺陷通常可分为两大类,一类是集中性的缺陷:例如悬式绝缘子的瓷质开裂、发电机绝缘局部磨损、挤压破裂、电缆等由机械损伤而变潮或侵入导电物质而造成绝缘集中性缺陷。第二类是分布性缺陷,指电气设备整体绝缘性能下降。例如电机、变压器、套管等绝缘中的有机材料外层受潮或全面受潮,绝缘油的受潮变质,固体有机绝缘材料的老化变质等。

预防性试验方法可分两大类:一类是破坏性试验,或叫耐压试验,这类试验对绝缘的考验是严格的,它是模仿设备绝缘在运行中实际可能碰到的危险的过电压状况,对绝缘加上与之等价的高压来进行试验,从而考验绝缘的耐电强度。显然,破坏性试验对考验电气设备的工作可靠性,发现绝缘缺陷最有效,但就在试验过程中却有可能损坏设备的绝缘,因而称为破坏性试验。为尽可能避免在试验过程中损坏设备,常在耐压试验之前先进行一系列的非破坏性试验作初步判断,发现问题时先进行处理。第二类是非破坏性试验,就是指在较低的电压下或者用其它不会损伤绝缘的办法来测量绝缘的各种特性,从而判断绝缘内部的缺陷,例如:测量绝缘电阻和泄漏电流,测量绝缘的介质损失角等。

第一节 测量绝缘电阻

测量电气设备的绝缘电阻,是检查其绝缘状态最简便的辅助方法,在现场普遍用兆欧表测量绝缘电阻。由所测绝缘电阻能发现电气设备导电部分影响绝缘的异物,绝缘局部或整体受潮和脏污,绝缘油严重劣化,绝缘击穿和严重热老化等缺陷。因此,测量绝缘电阻,是电气检修运行和试验人员都应掌握的基本方法。

一、绝缘电阻和吸收比

绝缘电阻是在绝缘体的临界电压以下,施加的直流电压 V_0 与其所含的离子沿电场方向移动形成的电导电流 I_0 ,应用欧姆定律确定的比值,即

$$R_0 = \frac{V_0}{I_0}$$

式中: R_0 ——绝缘电阻(欧姆);

V_0 ——直流电压(伏);

I_0 ——电导电流(安)。

如果施加的直流电压超过临界值,就会导致产生电子电导电流,绝缘电阻急剧下降。这样,在过高电压作用下绝缘就遭到了损伤,甚至可能击穿。所以一般兆欧表的额定电压不太高,使用时应根据不同电压等级的绝缘选用。

对单一的绝缘体(如瓷质或玻璃绝缘子、塑料等),在直流电压作用下,其电导电流瞬间

即可达稳定值,所以测量这类绝缘体的绝缘电阻时,很快就达到了稳定值。

在高压工程上用的内绝缘,大部分是夹层绝缘(由多层不同材料组成的复合介质),如变压器、电缆、电机等。夹层绝缘在直流电压作用下,会产生多种极化,并从极化开始到完成,需要相当长时间。通常利用夹层绝缘的绝缘电阻,随时间变化的关系,作为判断绝缘状态的依据。下面就结合实际测量对夹层绝缘,作进一步分析。

当在夹层绝缘体上施加直流电压后,必然有各种极化与电导现象发生。图1-1画出了在直流电压作用时流过绝缘的电流变化情况。 i_1 为电容电流分量,它由加压瞬间介质中的电子式极化或离子式极化过程所引起的电流,存在时间只有 $10^{-12} \sim 10^{-6}$ 秒,可以认为是瞬间完成的。 i_2 为吸收电流分量,是由夹层级化所产生的电流,它和时间轴所夹的面积即为吸收电荷。吸收电流存在时间达数分钟,一般说来吸收现象主要是由不均匀介质的夹层级化所引起的。 i_3 是泄漏电流或电导电流,它和绝缘电阻值相对应,服从欧姆定律,不随时间变化。于是介质中流过的总电流

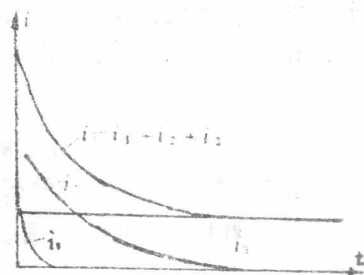


图 1-1 吸收电流曲线

i_1 —电容电流; i_2 —吸收电流; i_3 —电导电流

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

据此可以画出图 1-2 的等值电路。其中 C_0 代表无损极化的纯电容支路,其中流过的电流为 i_1 ; r 与 C_0 串联的支路代表有损极化电流支路,该支路电流为 i_2 ; R 表示介质的绝缘电阻,其中流过的电流为 i_3 。在绝缘试验中,不仅依据稳定时的绝缘电阻值来判断绝缘的优劣,而且还依据吸收现象表现情况来判断绝缘好坏。当绝缘干燥良好时,绝缘电阻数值较大,传导电流很小,电容电流与吸收电流相对地较大,则电流变化曲线衰减较快,如图 1-3 曲线 1 所示。如果绝缘受潮,传导电流增大,则电容电流与吸收电流相对地较小,则电流变化曲线衰减较慢,如图 1-3 曲线 2 所示。

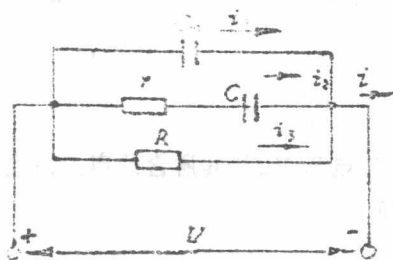


图 1-2 介质等值电路

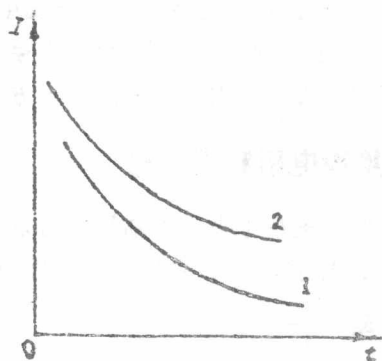


图 1-3 吸收电流曲线

通常用加压后 60 秒和 15 秒时电阻的比值作判断依据,称为吸收比 k ,即

$$k = \frac{R_{60''}}{R_{15''}}$$

k 值大(规程建议为 ≥ 1.3)表明绝缘干燥良好,如果 k 值接近于 1,说明绝缘受潮或者有缺陷。对于大型电机或长电缆等,吸收过程很慢,可采用 10 分钟与 1 分钟电阻比值作为吸

收比。

二、测量设备

绝缘摇表，亦称兆欧表，专门用来测绝缘电阻，其原理接线如图1-4所示。M为手摇直流发电机作为电源，其电压由500伏~2500伏，每500伏为一级。摇表测量机构为流比计。它有两个互相垂直而绕向相反并固定在一起的线圈：电压线圈 L_v 和电流线圈 L_A ，处在同一个永磁磁场中（图中未画出）。当E、L端子接入被试绝缘时，两个线圈就并联在直流电机的两个支路上。在直流电压作用下电流 i_v 、 i_A 分别流过 L_v 和 L_A 。于是在线圈磁场与永磁磁场相互作用下将产生两个方向相反的力矩作用在线圈上。在两力矩差的作用下，线圈带动指针旋转，直至两个力矩平衡为止。指针偏转角度只和两并联电路中电流的比值有关，即

$$\alpha = f\left(\frac{i_v}{i_A}\right)$$

$$\therefore i_v = \frac{U}{R_v}$$

$$i_A = \frac{U}{R_A + R_x}$$

$$\therefore \alpha = f\left(\frac{R_A + R_x}{R_v}\right) = f(R_x)$$

因为并联电路中电流的分配是与电阻成反比的，所以偏转角的大小，就反映出被测电阻的大小。

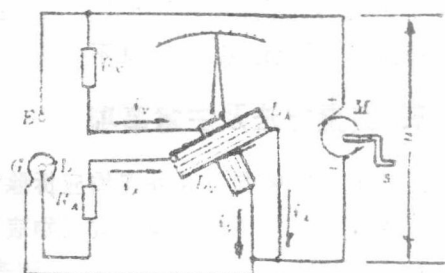


图1-4 兆欧表原理接线图

M—手摇直流发电机；

L_v, L_A —电流和电压线圈；

R_v, R_A —电流和电压支路电阻；

E、L—测试接线端子；

G—屏蔽接线端子

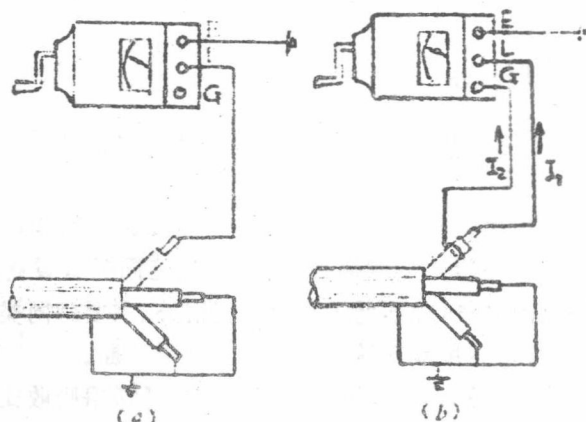


图1-5 用兆欧表测量电缆绝缘电阻接线图

(a)不加屏蔽；(b)加屏蔽

湿度对绝缘的表面电阻影响很大，绝缘表面受潮（特别是表面污秽时）使沿表面的漏流

增大,它流入流比计中将使绝缘电阻读数显著下降,引起错误判断。为此必须很好地清洁被试品表面,并利用屏蔽电极 P 接到摇表的屏蔽端子 G 的接线方式(图 1-5)以消除表面泄漏的影响。从摇表正极 E 出发经过试品内部到摇表端子 L 的体积泄漏电流 i_1 将流过电流线圈 L_a 而回到电源负极,而从正极出发经试品表面的漏流 i_2 则由屏蔽电极经屏蔽端子 G 直接流回电源负极,不流过流比计,就不会带来误差。

三、测量方法及注意事项

1. 被试物的电源及对外连线应拆除,并充分放电。
2. 用清洁干燥的软布擦去被试物表面的污垢。
3. 将兆欧表放置平稳,摇至额定转速,指针应指 ∞ 。

短接兆欧表的“E”和“L”端头,指针应指另。然后将被试物的接地端接于兆欧表的“E”端头,测量端接于兆欧表的“L”端头。如遇被试品表面的泄漏电流较大时,或对重要的被试品,如发电机、变压器等,为避免表面泄漏的影响,必须加以屏蔽,屏蔽线应接在兆欧表的屏蔽端头“G”上。接好线后,火线暂时不接被试品,驱动兆欧表至额定转速,其指针应指“ ∞ ”。然后使兆欧表停止转动,将火线接至被试品。

4. 驱动兆欧表达额定转速,待指针稳定后,读取绝缘电阻值。

5. 测量吸收比时,先驱动兆欧表达额定转速,待指针指“ ∞ ”时,用绝缘工具将火线立即接至被试品上,同时记录时间,分别读取 15 秒和 60 秒时的绝缘电阻值。

6. 读取绝缘电阻后,先断开接至被试品的火线,然后再将兆欧表停止运转,以免被试品的电容,在测量时所充的电荷经兆欧表放电而损坏兆欧表,这一点在测试大电容试品时更要注意。

7. 在湿度较大的条件下进行测量时,可在被试品表面加等电位屏蔽。屏蔽环应接近加压的火线而远离接地部分。

8. 兆欧表的“L”端与“E”的引出线不混靠在一起,高压接线“L”线不可放在地上。

9. 对大电容量试品,测量完后要进行充分放电。

10. 测量后要记录被试物温度和空气湿度。

四、判断标准和温度换算

1. 被试品绝缘中存在贯穿的集中性缺陷时,反映漏导电流的绝缘电阻明显下降,用兆欧表检查时便可发现。

2. 对许多电气设备,绝缘电阻往往变动甚大,它和被试品的体积尺寸、空气是否潮湿等都有关系,难以给出一定的绝缘电阻判断标准,只能规定同类型设备的允许范围,有的设备甚至根本不作规定。判定的方法,除不低于规定的范围外,主要和同类型、同电压等级的设备相比较,如果显著地降低,则需用其它的试验方法进一步判断。

3. 对于电容量较大的设备,吸收现象才明显,这时可利用吸收比来判断绝缘状态,如 $k < 1.3$ 则可判断为绝缘可能受潮。

4. 绝缘电阻和吸收比都受温度影响,因此测量结果必须换算到同一温度下进行比较,对于变压器类设备可按下列式换算:

$$R_2 = R_1 10^{(t_1 - t_2)}$$

式中: R_1 ——温度为 t_1 时测量的绝缘电阻值;

R_2 ——换算至 t_2 时的绝缘电阻值;

α ——绝缘电阻的温度系数, $\alpha = \frac{1}{40}$ 。

用上式换算大约温度下降 10°C , 绝缘电阻增加 1.5 倍。

对于电机类设备, 则一般换算到 75°C 下进行比较,

$$R_{75} = \frac{R_t}{2^{\frac{75-t}{10}}}$$

式中: R_t ——温度为 t 时测量得的绝缘电阻值;

R_{75} ——换算到 75°C 时的绝缘电阻;

t ——试验时被测物的温度。

必须指出, 以上经验公式, 只是近似的关系。

第二节 泄漏电流及直流耐压试验

泄漏电流试验是测量试品在不同直流电压作用下的直流泄漏电流值。直流耐压试验是被试品在高于几倍工作电压下, 历时一定时间的一种抗电强度试验。

泄漏电流及直流耐压试验的原理与绝缘电阻试验的原理完全相同, 但是试验中所用的直流电源一般均由高压整流设备供给, 并用微安表来指示泄漏电流值。它比绝缘电阻试验的优越之处在于: 试验电压高并可随意调节; 对不同电压等级的被试物, 施以相应的试验电压; 可以更有效地检测出绝缘受潮的情况和局部缺陷; 在试验过程中可根据微安表指示, 随时了解绝缘状况。图 1-6 示出发电机泄漏电流对加直流电压的变化曲线, 绝缘良好的泄漏电流较小, 且与电压的关系按正比例增长, 受潮时则泄漏电流加大, 有集中性缺陷, 升到一定电压后泄漏电流激增, 绝缘集中性缺陷严重, 出现泄漏电流激增点的电压将愈低。因此, 通过试验可以检出被试品绝缘有无缺陷或受潮, 特别是在发掘绝缘的局部缺陷方面, 更有其特殊意义。

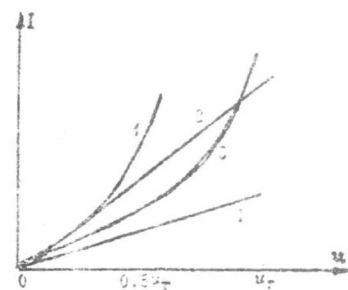


图 1-6 发电机绝缘的泄漏电流
1—绝缘良好; 2—绝缘受潮; 3—绝缘有集中性缺陷; 4—绝缘有危险的集中性缺陷; U_T —直流耐压试验电压

泄漏试验所加电压较高, 对 35KV 及以下设备用 $10\sim 30\text{KV}$, 对 110KV 及以上设备用 40KV 。一般以一分钟时间的微安表读数为依据, 同时也可以把电流与时间关系和电流与试验电压关系的曲线进行全面分析。泄漏电流的判断标准在规程中也作了一些规定, 更重要的是要根据历史记录和同类型的试验结果进行比较判断。

直流耐压试验是试验绝缘的抗电强度, 其试验电压较高。这种特别适用于大电容的试品, 如电缆、电容器等, 因为进行交流耐压试验时, 试验设备容量往往过大, 而进行直流耐压试验时, 试验设备容易很小。在试品上加上直流高压时, 绝缘内无介质损失, 长时间加直流电压不会使绝缘减弱。和交流耐压相比, 直流耐压试验的缺点是: 对绝缘的考验不如交流接近实际和准确。但在实际中, 如长电缆仍然只作直流耐压试验。

直流耐压的试验电压值,系参考交流耐压试验电压和直流下击穿强度之比,并主要根据运行经验来确定。例如对电力电缆,3、6、10KV者,取5~6倍额定电压。直流耐压的时间可以比交流耐压长些,试验时大都采用5~10分钟加压时间。

直流高电压可以用球隙、静电电压表和高电阻加微安表的方法进行测量。

一、试验方法

1. 试验接线

一般试验接线,是由自耦调压器、试验变压器、高压二极管和测量表计组成半波整流线路或倍压整流线路。根据微安表在试验回路中所处的位置不同,可分为两种基本接线方式,分述如下:

(1) 微安表接在高压侧

如图1-7所示,微安表接在高压端,不受杂散电流影响。这时,只要将微安表和它到被试品的高压引线屏蔽起来,使其处于等电位屏蔽中,而屏蔽应在B点与高压线相连接,屏蔽对地的泄漏电流将不通过微安表,因而不会带来测量误差,但读数必须特别注意安全。当试品电容 C_x 足够大时不需要另接滤波电容,对小电容试品则需接入滤波电容(0.1微法左右)以减小电压波动。

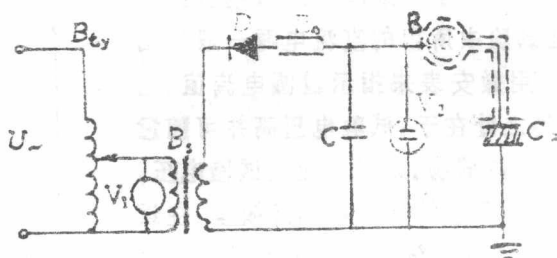


图 1-7 微安表接在高压侧的接线

V_1 —低压电压表; V_2 —高压静电电压表; R —保护电阻; R_0 —自耦调压器; μA —微安表

保护电阻 R ,通常用水阻,它限制当被试品击穿时的电流不超过硅堆和变压器允许的电流值。

(2) 微安表接在低压侧

如图1-8所示,这种接线读数安全、方便,而高压引线的泄漏电流和整流器绝缘支架的泄漏电流都直接流入变压器的接地端,不会流入微安表,不会带来误差。

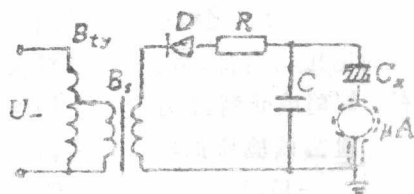


图 1-8 微安表接在低压侧接线

2. 直流高压电源的获得

前述的简单整流电路可以获得直流高压电源,但最大直流输出只能接近试验变压器的峰值电压 $V_{m\max}$,欲获得更高的直流电压,常用串级直流高压装置来实现。

KGF-120 直流高压发生器是一种全晶体化直流高压电源设备,其工作条件是:交流供电电压 $220V \pm 10\%$,频率 $50Hz \pm 4\%$,工作特性是:输出有效电压范围 $0 \sim 120KV$,最大输出电流 $1000\mu A$,额定输出功率 $120W$,运行时间在额定功率不少于 30 分钟。

发生器取得直流高压的原理是：由方波振荡器产生 1KC 左右的方波讯号，经功率放大后加入高压变压器，经倍压整流得到直流高压输出。由于加至功放的直流电压是由桥式可控硅整流得到的连续可调直流电压，所以经功放、升压、倍压整流后的直流高压也是连续可调高压。核机负高压输出。

该机有高压输出电压测量功能。高压侧还接有自动换档微安表以进行高压电流测量。低压侧电流表在试验中是接入低压端，在试验中，杂散电流也将流过低压侧微安表，因此该表的指示值仅供试验参考。

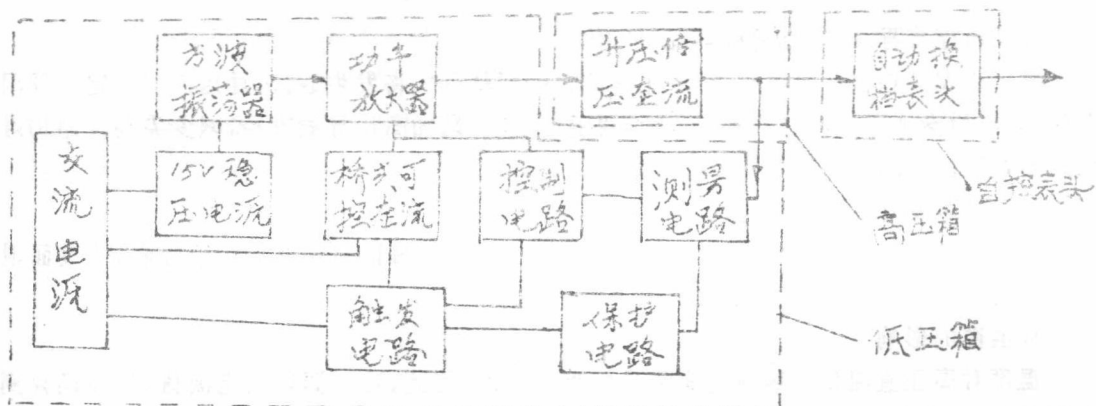


图 1-9 电原理方框图

3. 测量方法(使用 KGF-120 直流高压发生器)

(1)将直流高压发生器的高压箱连接好，接入限流电阻，接入高压侧自动换档表头，并打开表头电源开关。

(2)用专用电缆将高低压箱连接好，在低压箱面板标有“⊥”的接线柱上接入可靠的地线，插上电源电缆。

(3)空载试验：

打开电源开关，指示灯(白)应亮，反时针旋动“调节 I”至零位磁及微动开关工作指示灯(绿)应亮，顺时针旋动“调节 I”和“调节 II”电压表应有指示。

若试验电压最好用到 30KV(或 60KV)，旋动“调节 I”到最终位置时，若指示电压不到 30KV，可顺时针旋动“调节 II”到 30KV，若超过 30KV，应反时针旋动“调节 II”到 30KV，即在“调节 I”最终位置时，应刚好输出为 30KV(或 60KV)。其它电压也是如此。

当空载输出电压选择完成后，“调节 II”的位置应保持不变，将“调节 I”调回到零位，然后关机，(在调节中应注意“调节 II”是十圈电位器)

(4)正式试验

将输出夹子与试品良好接触，开机，只使用“调节 I”旋钮，每次增加 0.25 倍试验电压，升压过程中，在 0.25、0.5、0.75、1.0 倍试验电压各停留一分钟，读取相应的电流值。

升到规定试验电压后，进行直流耐压试验，耐压时间为 5 分钟，并记录 5 分钟泄漏电流值。如果发现泄漏电流有迅速上升的现象或其它异常现象，应立即停止试验。

(5)试验完毕，应先将“调节 I”退回零位，切断电源，还应将被试品用放电棒先与放电

器,然后拆除。

4. 注意事项

(1)接地要牢靠。

(2)合闸前“调节1”必须处于零位。

(3)对能分相试验的设备必须分相试验,当试验一相或一相线卷时,其他相或线卷应短路接地。

(4)试验时应注意安全距离,以保生命安全。

二、影响因素和试验结果的分析

1. 高压连接导线对地泄漏电流的影响

采用微安表在低压接线时,沿高压连接线表面的空气将发生游离,对地产生一定的泄漏电流,并经微安表形成回路,影响测量结果的准确性。增加高压导线直径,减少尖端及增加对地距离,缩短连接长度,都可减少这种影响。

2. 空气湿度对表面泄漏电流的影响

当空气湿度大,表面泄漏电流远大于体积泄漏电流,被试品表面脏污于吸潮,使表面泄漏电流增加,所以必须擦净表面,并应用屏蔽电极。

3. 温度的影响

温度对高压直流试验结果的影响是极为显著的,因此,对所测得的电流值,均需换算到相同的温度,才能进行分析比较。

对于电机绝缘可采用下式换算

$$I_{75} = I_t \times 1.6^{\frac{75-t}{10}}$$

式中: t ——试验时被试物的温度;

I_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的泄漏电流;

I_{75} ——换算到 75°C 时的泄漏电流。

对于变压器和电缆绝缘,可用下式换算

$$I_{t_2} = I_{t_1} e^{\alpha(t_2 - t_1)}$$

式中: α ——温度系数,约为 $0.05 \sim 0.06/^\circ\text{C}$

I_{t_1} ——被试物在温度为 t_1 时的泄漏电流;

I_{t_2} ——被试物在温度为 t_2 时的泄漏电流。

试验表明,在温度为 $30 \sim 80^\circ\text{C}$ 的范围内,泄漏电流的变化最明显,所以最好在这个范围内测量。

4. 测量结果的判断

将试验结果和规程上的参考值相比较,特别是和以往的数据或同类型的设备的数据相比较,来判断绝缘的好坏。对于重要设备(如主变压器、发电机等)可作出电流随时间变化的关系曲线 $I=f(t)$ 和电流随电压变化的关系曲线 $I=f(u)$ 进行分析。

第三节 测量介质损失角

绝缘中的介质损耗是以介质损失角的正切值 $\tan\delta$ 表示的。实践证明,介质损失角试验是

评价高压电气设备绝缘状况的有效方法之一,目前已得到广泛应用。通过介质损失角试验可以发现绝缘受潮、绝缘中含有气体以及浸渍物和油的不均匀或脏污等缺陷。

为进一步说明测量介质损失角正切值 $\tan\delta$ 在绝缘试验中的作用,对有关介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的一些基本概念介绍如下。

1. 介质损失角正切值的物理意义及等值电路

如前节所述,电介质在施加直流电压时,将产生三种电流,其中吸收电流将随加压时间的增长很快消失,不产生介质损失,只有传导电流引起介质损失。电介质在施加交流电压时,虽也产生对应的三种电流,但其介质损失不仅由传导电流产生,而且还决定于吸收电流。这是因为不均匀介质在交流电压作用下,其吸收电流是持续变化的,即在介质边界面上的电荷是时而消失时而积累的,因此也要产生能量损失。由此看出,在同样电压作用下,交流在介质中产生的损失比较直流在介质中产生的损失要大。

关于介质在交流电压作用下的情况,可用等值电路说明,如图 1-10 所示,其等值向量图如图 1-11 所示。

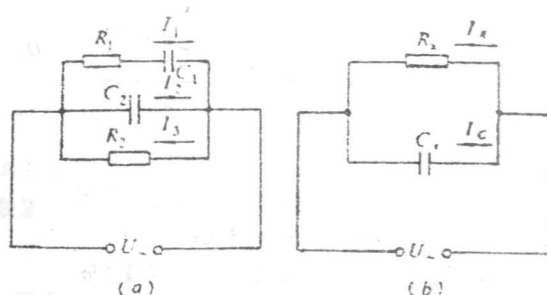


图 1-10 介质的并联等值电路

(a)详细的, (b)简化的

R_1 —相当于产生吸收电流损失的等值电阻, R_2 —介质绝缘电阻, C_1 —相当于产生吸收电流的电容;

C_2 —几何电容, I_1 —吸收电流, I_1' —几何电容电流, I_2 —传导电流, C_3 —等值电容;

R_3 —等值电阻, I_3 —等值电容电流, I_3' —等值传导电流

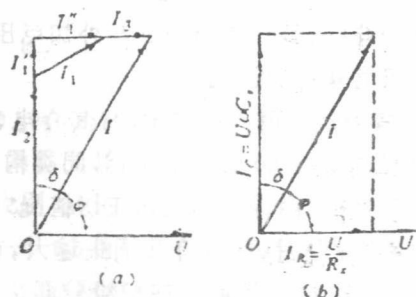


图 1-11 介质的等值向量图

(a)详细的, (b)简化的

I_2 —几何电容电流, I_1 —吸收电流, I_1' —吸收电流的无功分量, I_1 —吸收电流的有功分量;

I_2 —传导电流, I —总电流, I_3 —等值电容电流, I_3' —等值传导电流, δ —介质损失角, φ —介质功率因数角

在交流电压作用下,我们把单位时间内由介质电导所引起的和吸收现象所形成的损耗统称为介质损失 P 。至于这些损失中哪一部分是由电导引起的,哪一部分是由吸收现象形成的,实际上没有明确的区分,也没有必要区分。所以,图 1-10(a)电路可简化为图 1-10(b)电路,即把介质看成由一个等值电阻 R_x 与一个等值理想无损电容 C_x 并联而成,其中电压 U 与电流 I 夹角 φ 的余角 δ 称之为介质损失角,由图 1-11(b)向量关系可得:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R_x}}{U \omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

$$P = UI_R = U \frac{U}{R_x} = U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta$$

同样,介质亦可看成是由一个等值电阻 R_x 与一个等值理想无损电容 C_x 串联而成,其等值电路及向量图如图 1-12 所示。

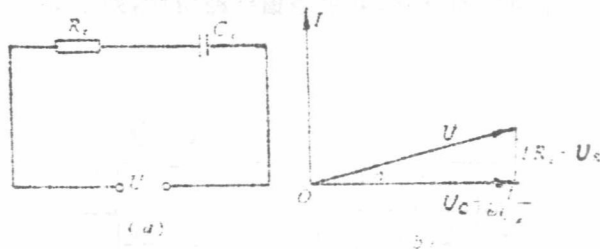


图 1-12 介质的串联等值电路及向量图

(a) 等值电路, (b) 向量图

R_x —等值电阻; C_x —等值电容; δ —介质损失角

由图 1-12(b)向量关系可得:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{IR_x}{\frac{I}{\omega C_x}} = \omega C_x R_x$$

$$I = U_C \omega C_x = U \omega C_x \cos \delta$$

$$P = I^2 R_x = U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta \cos^2 \delta \approx U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta$$

由以上分析可以看出,由于介质损失角 δ 一般很小,所以介质损失 P 无论用并联还是串联等值电路表示,其形式都是一样的,即介质损失 P 与外加电压 U 的平方、电源频率 ω 、被试物电容值 C_x 及介质损失角正切值 $\operatorname{tg} \delta$ 成正比。

对固定形状与结构的被试物来说,因其电容 C_x 与其介电常数 ϵ 成正比,所以当外加电压与频率不变时,介质损失 P 仅与 ϵ 和 $\operatorname{tg} \delta$ 值成正比,对同类构造介质的被试物,其 ϵ 也为定值,所以其绝缘状态的好坏,可以直接由介质损失角正切值 $\operatorname{tg} \delta$ 的大小进行判断。

因介质损失要在绝缘内部产生热量,所以介质损失越大,在绝缘内部产生的热量越多,从而使介质损失进一步增加,如此循环,最后可在绝缘较弱之点形成击穿,故测量 $\operatorname{tg} \delta$ 对于判断绝缘物的绝缘状况有着特别重要的意义。

2. 介质损失角正切值 $\operatorname{tg} \delta$ 的综合值与个别值的关系

通常电气设备总是由各个部件组合而成,其绝缘结构又是由多种绝缘材料构成,因此电气设备绝缘的等值电路实际上应看成为是由许多简单电路串、并联所组成的复杂电路。一般我们所测得的 $\operatorname{tg} \delta$ 值正是许多简单电路串、并联后的复杂电路的 $\operatorname{tg} \delta$ 综合值。下面我们分析

一下简单电路串、并联时 $\tan\delta$ 的个别值与复杂电路 $\tan\delta$ 的综合值的关系。

如图 1-13 所示, n 个简单并联等值电路所组成的并联复杂电路的 $\tan\delta$ 综合值为:

$$\tan\delta = \frac{C_1 \tan\delta_1 + C_2 \tan\delta_2 + C_3 \tan\delta_3 + \dots + C_n \tan\delta_n}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n}$$

如图 1-14 所示, n 个简单串联等值电路所组成的串联复杂电路的 $\tan\delta$ 综合值为:

$$\tan\delta = \frac{\frac{\tan\delta_1}{C_1} + \frac{\tan\delta_2}{C_2} + \frac{\tan\delta_3}{C_3} + \dots + \frac{\tan\delta_n}{C_n}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

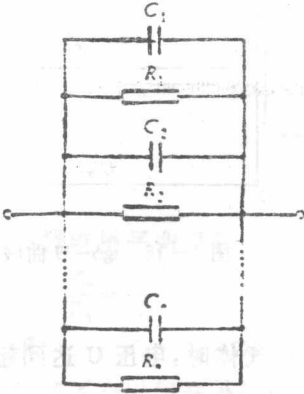


图 1-13 n 个简单并联等值电路所组成的并联复杂电路



图 1-14 n 个简单串联等值电路所组成的串联复杂电路

如图 1-15 所示, 把两个简单并联等值电路串联起来, 其 $\tan\delta$ 综合值为:

$$\tan\delta = \frac{C_1 \tan\delta_1 (1 + \tan\delta_2) + C_2 \tan\delta_2 (1 + \tan\delta_1)}{C_1 (1 + \tan\delta_1) + C_2 (1 + \tan\delta_2)}$$

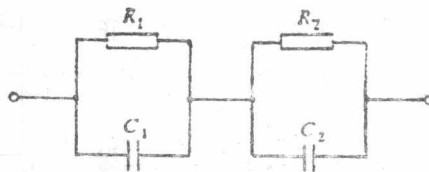


图 1-15 两个简单并联等值电路所组成的串联复杂电路

分析上述三种电路的结果看出, 复杂电路的 $\tan\delta$ 综合值总是小于简单电路中个别 $\tan\delta$ 的最大值, 而大于简单电路中个别 $\tan\delta$ 的最小值。因此在由许多简单等值电路串、并联组成的复杂等值电路中, 当其中有一个 $\tan\delta$ 值较高时, 并不能有效地由综合的 $\tan\delta$ 值中反映出来。

3. 测量介质损失角正切值 $\tan\delta$ 与绝缘内部缺陷的关系

由上述复杂等值电路分析结果可以看到, 对体积较大的、由许多绝缘材料组成的被试物, 测量 $\tan\delta$ 值不易检出绝缘的局部缺陷, 但对严重的局部缺陷和受潮、绝缘老化等整体缺陷是能较灵敏地检查出来的。实际试验表明, 测变压器的 $\tan\delta$ 能较灵敏地检查出绝缘老化、受潮等整体缺陷, 另外对油质劣化、线圈上附着油泥及严重的局部缺陷等, 也有较好的检出效果。

对单一绝缘材料的被试物,测量 $\text{tg}\delta$ 是能很灵敏地检出绝缘缺陷的。例如绝缘油,好油耐压强度约可达 250 千伏/厘米,含有水份或杂质的坏油约为 25 千伏/厘米,好油与坏油的耐压差别约为 10:1。好油的 $\text{tg}\delta$ 值可小至 0.0001,坏油的 $\text{tg}\delta$ 值可达 0.1,二者差别为 1:1000。由此看出, $\text{tg}\delta$ 试验的灵敏度比耐压强度试验的灵敏度要高的多。

若被试物具有分解试验的可能性,可以采取分解试验的办法,以提高检出绝缘缺陷的灵敏度。

对于了解电气设备绝缘的实际情况,一方面是看 $\text{tg}\delta$ 的绝对值,但更有意义的是求出不同试验电压下 $\text{tg}\delta$ 的变化关系曲线,找出游离点。一般在有夹杂气体的绝缘物中,当电场强度未达到使气体发生游离之前,电压的升高可以说对 $\text{tg}\delta$ 值影响不大;但当电场强度到达一定数值后,气体发生游离,则 $\text{tg}\delta$ 值将急剧增加,此点即为游离点。所以通过 $\text{tg}\delta$ 与外加电压的关系曲线可以判断出设备是否存在内部缺陷。如图 1-16 所示的电力电缆介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 与电压 U 的关系曲线,当浸渍完善内部无夹杂气体时, $\text{tg}\delta$ 与 U 的关系曲线为一直线(图中 a);当内部有夹杂气体时,电压 U 达到起始游离电压 U_n 后, $\text{tg}\delta$ 开始剧增(图中 b)。

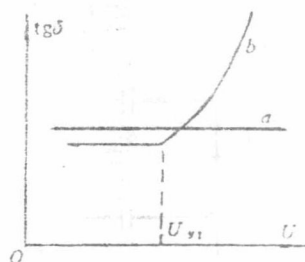


图 1-16 $\text{tg}\delta$ - U 曲线

4. 影响介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 的因素

(1) 频率的影响。在一定的频率范围内,介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 随频率增加而增加,但频率高到一定程度后,由于时间太短,介质极化不完全,因此介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 将随频率增加而减小。因此试验时,使用的电源频率很重要。通常使用的电源频率均为 50 赫芝,所以一般对频率的影响可不考虑。

(2) 温度的影响。介质的构造一般极为复杂,所以介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系随介质温度升高而增加的。图 1-17 所示的是极性液体介质的介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 与温度 t 的关系曲线。

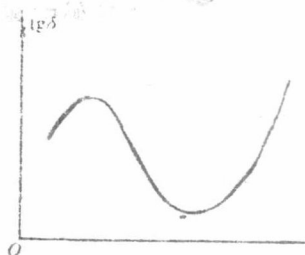


图 1-17 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系曲线

(一) QS1 型交流电桥

测量 $\text{tg}\delta$ 的仪器及方法很多,现场应用较多的有 QS1 型交流电桥及 ZT-1 型介质测量仪可用于带电测量。QS3 型(或 QS10 型、P525 型)交流电桥多用于试验室内的精密测量,如测量变压器油的 $\text{tg}\delta$ 、校验 QS1 型交流电桥等。在测量大电容设备时,也可使用瓦特表法。这里仅对 QS1 型交流电桥进行简单介绍。

1. QS1 型交流电桥的工作原理

QS1 型交流电桥是一种平衡电桥,它的基本工作原理如图 1-18 所示。

在桥臂 AC 间接入被试物,它可看成是一个理想无损电容 C_x 与电阻 R_x 串联,也可以看成是一个理想无损电容 C_x 与电阻 R_x 相并联。在桥臂 BC 间接入标准空气电容器 C_N 。桥臂 BD 由无感电阻 R_4 和可调电容 C_4 组成。桥臂 AD 由可调无感电阻 R_1 构成。对角线 CD 间施加试验电压 U_N ,对角线 AB 间接入检流计 G。A 与 B 两点通过击穿间隙 P 接地。

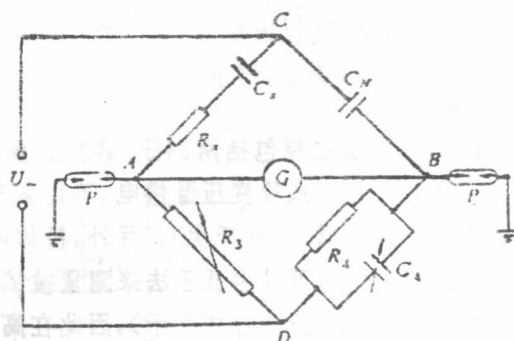


图 1-18 QS1 型电桥基本工作原理图

根据电桥平衡原理可知,电桥平衡时,各桥臂阻抗值应满足如下关系:

$$\frac{Z_x}{Z_1} = \frac{Z_N}{Z_3}$$

即 $Z_1 \cdot Z_x = Z_N \cdot Z_3$

当被试物以串联等值电路表示时,各桥臂阻抗值分别为:

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}$$

$$Z_1 = \frac{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_N = \frac{1}{j\omega C_N}$$

将各桥臂阻抗值代入 $Z_x Z_1 = Z_N Z_3$ 式中,可得:

$$(R_x + \frac{1}{j\omega C_x}) \cdot (R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}) = (\frac{1}{j\omega C_N}) (R_3 + \frac{1}{j\omega C_1})$$

即

$$\frac{R_x \cdot R_1}{j\omega C_1} - \frac{R_1}{\omega^2 C_x C_1} = \frac{R_3 \cdot R_1}{j\omega C_N} - \frac{R_3}{\omega^2 C_N C_1}$$

令上式两端实数部分相等,可得:

$$\frac{R_1}{\omega^2 C_1 C_x} = \frac{R_3}{\omega^2 C_N C_1}$$

$$\text{则 } C_x = C_N \frac{R_1}{R_3}$$

令上式两端虚数部分相等,可得:

$$\frac{R_x \cdot R_1}{j\omega C_1} = \frac{R_3 \cdot R_1}{j\omega C_N}$$

$$\text{则 } R_x = R_3 \frac{C_1}{C_N}$$

将上述结果代入串联等值电路介质损失角正切值 $\tan \delta$ 公式,可得:

$$\tan \delta = \omega C_x R_x = \omega C_N \frac{R_1}{R_3} \frac{C_1}{C_N}$$

则 $\lg \delta = \omega \cdot R_1 \cdot C_1$

由上面 C_2 及 $\lg \delta$ 的计算结果可看出, C_2 表示式中没有 C_1 , $\lg \delta$ 表示式中没有 R_1 , 因此, 为了能分别读取 C_2 与 $\lg \delta$ 值, 调节电桥平衡的方法应当是: 保持 C_N 及 R_1 为定值, 调节 R_2 及 C_1 。

若将被试物以一个理想无损电容 C_x 与电阻 R_x 并联表示时, 其计算结果与串联表示时一样, 故推导过程从略。

2. QS1 型交流电桥的结构

如图 1-19 所示, QS1 型交流电桥主要包括两部分: 装在金属外壳内的测量装置(点划线内所示)及外接标准电容器 C_N 。由外加试验变压器供电, 可用高压法测量被试物的介质损失角及电容量(试验变压器输出电压不低于 10 千伏)。另外, 桥体内还设有一套低压电源及低压标准电容器如图 1-19 左上角所示, 可供用低压法来测量被试物的电容量。电桥内各附件对外壳均设有良好的绝缘及电磁屏蔽(图中虚线所示), 因此在高压法测量中, 根据实际需要可以利用正接线法或反接线法进行。

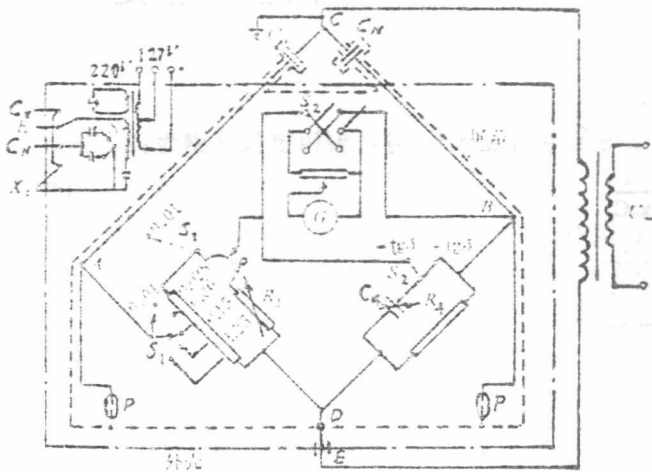


图 1-19 QS1 型交流电桥原理接线图

(1) 桥臂说明。桥臂 DB 间, $R_1 = \frac{10000}{\pi}$ (欧) 为一元感固定电阻。当工作电源频率为 50 赫兹时, $\lg \delta = \omega \cdot C_1 \cdot R_1 = 100\pi \cdot \frac{10000}{\pi} \cdot C_1 = C_1 \times 10^3$ 。如果 C_1 单位用微法, 则 $\lg \delta = C_1$ 。 C_1 是可调的, 在度盘上以 $\lg \delta (\%)$ 来表示, 以便直接读出被试物的 $\lg \delta (\%)$ 值。

桥臂 CB 间, 接标准电容器 C_N , 其最高工作电压为 10 千伏, 电容量为 50 ± 1 皮法, $\lg \delta \leq 0.1\%$ 。常用的标准电容器型号有 BR₁ 型平面型空气电容器、BR-16 型(或 CKB50/13 型)真空电容器二种。使用 CKB50/13 型真空电容器时应注意, 在其玻璃泡上, 高、低压引出线端子间无屏蔽, 壳内空气潮湿时, 表面泄漏电流剧增, 常使介质损失较低的被试物出现负 $\lg \delta$ 值, 因此必须经常更换硅胶, 保持电容器壳内空气干燥。

桥臂 AD 上, 接有可调无感电阻 R_2 。为了扩大被试电容的测量范围, 桥臂 R_2 上并联有分流电阻, 其总阻值包括滑线电阻 p 在内为 100 欧, 其中 p 为 1.2 欧。分流电阻开关 S_1 有 5 个位置, 除 0.01 安档外, 其余四个位置对应的电阻值 R_2 分别为 4、10、25、60 (欧), 如图 1-20 所示(图中两个 S_1 为同一分流电阻开关)。当被试物电容量小于 3000 皮法时, 分流电阻开关