

序

这本小册子自1958年1月出版以后，迄今已近四年。从各单位来信询问再版的讯息和某些企业以油印方式分发使用种种情况看来，这本书确如初版序言中所述，是能够供电力系统各局、厂、线路工区试验及维护检修人员参考的。

今年在贯彻党的调整、巩固、充实、提高的八字方针之下，我们认为应将本书修订后加以再版。此次修订中，书中的第六章更动较大；这是因为在1959年我国石油工业部颁布了“石油产品试验方法”，其中有石油产品取样法(SYB2001-59)及变压器油耐电压(应称为击穿强度)试验法(SYB2653-59)与本书第六章有关，此外我局于1960年拟定了变压器油工频介质损失($\text{tg}\delta$)和介电常数(ϵ)的测量方法草案，这些新材料都包括在修订后的第六章内。

虽然经过一番努力，想把本书存在的所有错误加以订正，但可能还有疏忽遗漏及限于水平而未能发现之处，希读者不吝指正。

目 录

第一章 絕緣搖表試驗.....	1
第一节 概論.....	1
第二节 試驗步驟.....	4
第三节 注意事項.....	5
第四节 各种因素对絕緣电阻的影响.....	5
第五节 吸收試驗反映B級絕緣和A級絕緣局部缺陷及 其受潮程度的作用.....	7
第二章 泄漏电流試驗.....	8
第一节 概論.....	8
第二节 几种試驗接綫的比較.....	9
第三节 試驗步驟.....	19
第四节 注意事項.....	20
第五节 影响試驗結果的因素.....	21
第三章 介質損失角試驗.....	23
第一节 概論.....	23
第二节 介質損失角与頻率及溫度的关系.....	27
第三节 試驗方法.....	28
第四节 測量介質損失角的一般注意事項.....	38
第五节 介質損失角試驗与設備局部缺陷的关系.....	39
第四章 电容比試驗.....	43
第一节 概論.....	43
第二节 試驗方法.....	45
第三节 影响測量結果的因素.....	48
第四节 用电容比法試驗A級絕緣受潮的效能.....	49
第五章 交流耐压試驗.....	59

第一节	概論	50
第二节	試驗方法及接綫	51
第三节	操作步驟	54
第四节	注意事項	55
第五节	直流耐压試驗及其在旋轉电机預防性試驗中的作用	60
第六节	匝間絕緣的感应工頻耐压試驗	61
第六章	絕緣油試驗	62
第一节	概論	62
第二节	取样	63
第三节	击穿强度試驗	64
第四节	絕緣油的工頻介質損失角和介電常數試驗	66
第五节	絕緣油的劣化及其介質損失角增高的原因	69
附录	介質損失角溫度換算係數表	71

第一章 絕緣搖表試驗

第一节 概 論

外電場作用于电介质所发生的基本特性过程，是产生介质的极化，即介质中固有的相互制約的电荷发生位移，或使介质中的偶极子轉动。当作用电压并不太大时，电介质的束縛电荷按其所受作用力的方向发生位移，电压愈高，即电場强度越强，位移就越大。正电荷沿电場方向位移，負电荷則沿反方向位移。这种极化过程极为短暫，在一般电气测量中可看成是瞬間完成的。因这种极化而生的电流普通称为几何电流，其对時間的变化曲綫，如图1-1所示。

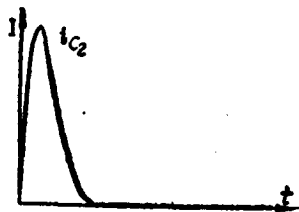


图 1-1 在直流电压下固体介质內几何电流对時間的变化

电介质中的偶极子在外电場作用下将沿电場的方向而轉动，其极化的時間依偶极子的电矩、分子的热运动以及介质的粘度而不同，但比上述的那种极化時間要长。

在外电場作用下，电介质中的束縛离子将随电場的方向发生彈性位移。

如果絕緣是由不同介质复合而成，因为两种介质的介质常数和导电率的不同，电压的分布开始决定于其电容量(即介质常数)，經過一段足够长的時間以后，就决定于其导电率。当电压从第一种分布，过渡到第二种分布时，在两种不同介质常数的介质的交界面上的电荷必須移动，以适应电压的重

行分布；同时，介质内部因此而产生电流。由以上三种极化所产生的电流称为吸收电流，它也随加压时间的增长而减小，但比充电电流慢得多，并决定于介质的不均匀程度和介质的结构形态。其对时间的变化曲线如图1-2所示。

通常工程上所用的介质，并非纯粹的绝缘体，里面还有极少数的束缚很弱的或自由的离子。当电压作用在介质上时，正负离子就分别向两极逐步移动。

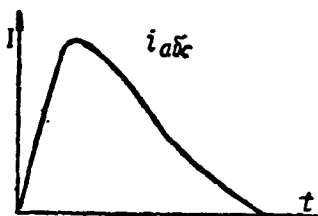


图 1-2 在直流电压下固体介质内吸收电流对时间的变化

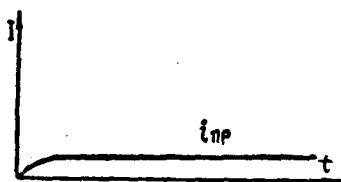


图 1-3 在直流电压下固体介质内传导电流对时间的变化

这些离子移动所产生的电流称为传导电流，它在经过一定时间的加压后即趋于恒定，其值决定于介质在直流电场内的导电率。传导电流对时间的变化曲线如图1-3所示。

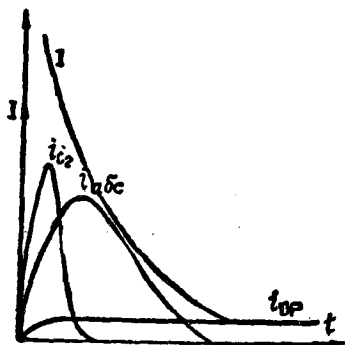


图 1-4 直流电压下固体介质内所产生的电流的总和

综合上述，当直流电压作用于任何介质上时，通过的电流可分为三部分：传导电流往往与介质表面的清洁情况及受潮有关，它是瞬变现象完结以后仅存在的电

流；吸收电流和几何电流与受潮也有关系，是一个暂态现象，施加直流电压以后，电流升至定值，然后随时间的增长而逐渐减小，在相当长时间的加压后，趋近于零。这三个电流的总和，如图1-4所示。

所谓绝缘电阻试验，就是用绝缘电阻来表示与时间无关的传导电流。当介质受潮、脏污或开裂以后，介质内的离子增加，因而传导电流剧增，绝缘电阻当然就小了，所以由绝缘电阻的大小，可以初步了解绝缘的情况。

在绝缘摇表试验中，一方面可以求得加压到一定时间后的绝缘电阻值，同时还可以求得绝缘电阻与加压时间的关系。表示这一关系的曲线称为吸收曲线。由吸收曲线的衰减情况，可以判断绝缘的受潮情况以及绝缘内部有无局部缺陷存在。这可以从下面的关系式中看出来，

$$R_{\infty}/R_0 = 1 + \frac{I_{a0}}{I_{np}}$$

式中 I_{np} ——传导电流；

I_{a0} ——几何电流加吸收电流的起始值；

R_0 ——加压瞬间(即 $t_1 \rightarrow 0$)时的绝缘电阻值；

R_{∞} ——测量过程終了(假设 $t_2 \rightarrow \infty$)时的绝缘电阻值。

绝缘受潮程度增加时，传导电流经常比吸收电流的起始值增长得快，因此在测量潮湿绝缘时， R_{∞}/R_0 的比值经常小些，而其极限为1。应用这一原理，由吸收试验所得的结果，就可以很好的判断出绝缘的情况。显然，在绝缘的吸收试验中， $R_{1.5}/R_{1.5}$ 的数值一定比 R_{∞}/R_0 的值要小一些。但 $R_{1.5}/R_{1.5}$ 的比值和受潮程度的关系，基本上仍然和 R_{∞}/R_0 的比值和其受潮程度的关系一样，实际上要测出 R_{∞}/R_0 。

的比值是有困难的。因此，在預防性試驗中采用 $R_{60}"/R_{15}''$ 的比值，这样并不会影响其实用价值。

第二节 試驗步驟

1. 拆除被試物的电源及一切对外联綫后，应将被試物接地放电，放电時間至少1分钟，电容量較大的被試物至少2分钟。

2. 用干燥、清洁的柔軟布，擦去被試物表面的污垢。

3. 将搖表放在水平位置，并在額定轉速下調整指針到“∞”。

4. 将被試物接地綫接于搖表的“地”（“E”或“3”）柱上，被試物引出綫接于搖表的“綫”（“L”或“H”）柱上。如被試物接綫端可能产生表面泄漏电流时，应加遮蔽，接于搖表的“保护”（“G”或“9”）柱上。如图1-5所示。

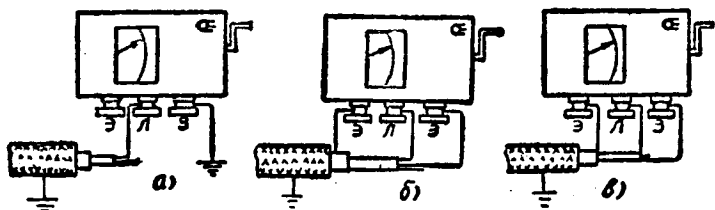


图 1-5 用搖表測絕緣电阻的接綫图

a—測对地絕緣；b, c—測相間絕緣，加以保护。

5. 以恆定速度轉动搖表把手（約每分鐘120轉），搖表指針逐漸上升，待1分鐘后，記錄其絕緣电阻值。

6. 在录制吸收曲綫时，为了在开始計算時間时，就能在絕緣上加上全部試驗电压，应于搖表接地側裝一絕緣良好的刀閘。当搖表达額定轉数后合上刀閘，同时开始計算時間，

在1分钟內，每15秒钟记录一次讀数。

7.試驗完毕或重复試驗时，必須将被試物对地充分放电，至少2分钟。

8.记录被試物温度和气候情况。

第三节 注意事項

1.双回路架空送电綫或母綫当一路带电时，不得測另一路的絕緣电阻，以防止感应高压、损坏仪表或危害人身安全。在下列极个别情况下，可考虑带电測絕緣电阻，并采用带电作业的措施。

(1)不可能全部停电的双回路架空輸电綫路或母綫，当确认为被試綫路感应电压不高时。

(2)短路干燥发电机的电压不高时。

2.搖表接綫端及接地端的引出綫不要靠在一起，如接綫端引出綫必須經其他支持物才能和被試物接触时，必須用絕緣良好的支持物。

3.轉动速度应尽可能保持額定值，并維持均匀轉速，不得低于額定值的80%。

4.測量电容量較大的設備如大容量的发电机、較长电纜或电容器的絕緣时，最初充电电流很大，因而搖表指示数很小，但这并不表示被試物絕緣不良，必須經過較長時間，才能得到它的正确結果。

5.如所測絕緣电阻过低，应分部試驗，找出絕緣电阻最低部分。

第四节 各种因素对絕緣电阻的影响

1.湿度对絕緣电阻的影响

絕緣物的吸潮量，随湿度的变化而变化。当空气相对湿度大时，絕緣物由于毛細管作用，吸收較多水分，致使导电率增加，降低了絕緣电阻值，尤其是对表面泄漏电流的影响更大。

2. 温度的影响

絕緣物的絕緣电阻，是随着温度的变化而变化的，其变化程度又随絕緣的种类而异。富于吸湿性的材料，受温度的影响最大，一般絕緣电阻随温度的上升而减少。这是因为温度升高，加速了介质内部分子和离子的运动，同时絕緣內的水分，在低温时和絕緣物相結合的緣故。当温度上升时，水分即向电場两极伸长，这样在纖維物质中呈細长綫状的水分粒子伸长，因而增加其导电性。此外，水分中含有溶解的杂质或絕緣物內含有盐类、酸性物质，被水分解，亦会增加导电率，而降低絕緣电阻值。例如，发电机当温度每变化 $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 时，絕緣电阻降低一倍。

在預防性試驗中，为了便于比較不同温度下的試驗結果，对于发电机絕緣以 75°C 为标准时，应按下列經驗公式进行換算。

$$M_{\Omega_{75}} = \frac{M_{\Omega_t}}{2^{\frac{t-75}{10}}}$$

式中 $M_{\Omega_{75}}$ ——温度在 75°C 时之絕緣电阻 (兆欧)；

M_{Ω_t} ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时所測得的絕緣电阻值 (兆欧)；

t ——測定时之温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

对于 A 級絕緣的絕緣电阻換算式为：

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

式中 R_1 ——温度为 t_1 时所测得的絕緣电阻值；
 R_2 ——換算至温度为 t_2 时的絕緣电阻值；
 α ——絕緣的温度系数，它随絕緣材料的种类而异，对于 A 級絕緣材料 $\alpha=1/40$ 。

第五节 吸收試驗反映 B 級絕緣和 A 級絕緣 局部缺陷及其受潮程度的作用

1. 吸收試驗，反映 B 級和 B 級浸胶絕緣的旋轉电机的局部缺陷和受潮程度最为灵敏。

由于近代的高压旋轉电机的靜子主絕緣，主要是采用連續云母带，而云母带是用胶将紙或綢布与薄片云母粘合而成的，其结构极不均匀，与純云母性质不同。因而用云母带絕緣的电机，其吸收現象非常明显。发电机靜子絕緣在制造过程中，已經过多次真空浸漬处理，其内部几乎无气泡和空隙，而云母本身又具有不易吸潮的特性，即使受潮，潮气亦不易深入，主要是沿着电場等位面分布(云母层之間)；除有局部缺陷，如絕緣发生裂紋等外，潮气夹杂物沿电力綫方向并无伸长現象，因而 B 級和 B 級浸胶絕緣的电机受潮后，除非特別严重时，其吸收曲綫基本上不改变。当局部缺陷及絕緣結合部分严重受潮时，将大大增加其傳导电流，致使其吸收曲綫改变。根据这一原理，对 B 級和 B 級浸胶絕緣的电机进行吸收試驗，由其吸收比 $R_{60}"/R_{15}"$ 的变化，可以反映絕緣的情况。

2. A 級絕緣的設備(如变压器等)的吸收現象并不显著。

纖維质絕緣物的电气設備，如变压器等，其 $R_{60}"/R_{15}"$ 的数值和受潮程度的关系比較不显著。这是由于这类絕緣，当其受潮程度增长时，不单是傳导电流增长，吸收电流亦同

时增长。此外，沒有受潮的变压器的吸收电流本来就小。又由于变压器的固体絕緣物是用棉紗、電纜紙等絕緣材料，而這些固体絕緣，仅为变压器絕緣的一小部分，其主要部分是由絕緣油組成，絕緣油是沒有吸收特性的(合成油除外)。同时沒有受潮的变压器等的纖維絕緣，是相当均匀的，即使浸入絕緣油后，也相差不大，因而吸收現象不显著。所以吸收試驗在判断变压器等纖維质絕緣的綫圈受潮上，不太灵敏(与B級絕緣相比較)，但仍具有相当的反映能力，因此，变压器的整体試驗中，利用吸收比的大小能有效的发现絕緣紙板、套管及綫圈上的油泥等局部缺陷。因为当这些部分有局部弱点存在时，其傳导电流大增，吸收比也就减小。虽然它在反映絕緣受潮程度方面較差，但能有效地发现局部缺陷，故在預防性試驗中仍应进行吸收試驗。

第二章 泄漏电流試驗

第一节 概 論

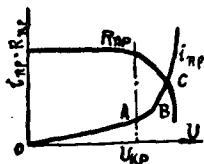
泄漏电流試驗的原理与搖表試驗完全相同。不过泄漏电流試驗中所用的直流电源，一般均由高压整流設備供給，用微安表来指示泄漏电流。它比搖表优越的地方是：試驗电压可随意調节和試驗电压高。对一定电压等級的被試物施以相应的試驗电压，可使絕緣本身的弱点更易显示出来。同时在升压过程中，可随时監視微安表的指数，以了解絕緣情况。另外微安表的讀数較搖表精密。

加直流电压于被試物时，其充电电流(几何加上吸收)会随着時間的增长而逐漸衰减至零，而傳导电流則保持不变。

微安表在加压一定时间后，讀取其数值（一般为加压1分钟后讀数）。对于良好的絕緣物，其傳导电流与一定的外施电压的关系应为一直綫。

但是实际上泄漏电流与电压的关系曲綫，仅在一定的范围内是类似直綫的，超过此范围后，就会显著弯曲。如图2-1

1所示。当电压增加到B点以后，电子活动更加剧烈，此时电流的增长要比电压增长快得多，如图2-1中BC綫段所示。到C点以后，如果电压再增加，則电流急剧增长，产生更多的



損耗，以至絕緣物破坏，发生击穿。图2-1 絕緣电阻和傳导电流与外施电压的关系

在預防性試驗中，泄漏試驗所加的直流电压，大都在A点以下，故对絕緣良好者，其伏安特性应近于直綫关系。当然，絕緣有缺陷（全部或局部）或受潮的現象存在时，則傳导电流将急剧增加，而其伏安特性曲綫就不再成为直綫关系了。因此，泄漏試驗可以分析絕緣有无缺陷和受潮現象存在。在发掘絕緣局部缺陷上，泄漏电流試驗就更具有其特殊的意义了。

第二节 几种試驗接綫的比較

泄漏电流試驗接綫图，根据微安表及整流管所处位置的不同，可有6种接綫方式。但严格的說来只有两种，即按微安表所处位置的不同而分。因为整流管所处位置仅决定于試驗变压器的条件，如試驗变压器为二个高压出头，且一头套管能承受二倍試驗电压而另一头能承受試驗电压时，則可尽量地将高压整流管灯絲接地，因为这样可以降低灯絲变压器的絕緣强度。

下面对各种不同接线的优缺点加以研究：

1. 微安表处于高压端

图 2-2 中的 K 是高压整流管，是发生高压直流电源的主要设备。 TP 是高压试验变压器。 TK 是灯丝变压器，其容量及电压之大小，可根据整流管的灯丝电压及电流而定，其绝缘情况的要求（需承受高压抑或低压），则决定于整个设备线路的设计。 R 是保护电阻，用以限制被试物击穿时的短路电流，来保护高压变压器及微安表，其值可用每伏 10 欧。 C 是稳压电容器，一般需要 0.01~0.1 微法，其耐压强度必须能承受最大直流试验电压。如无合适的电容器，可用几个电压较低的电容器串联，但仍须注意其绝缘强度与电压分布，使不致引起击穿。

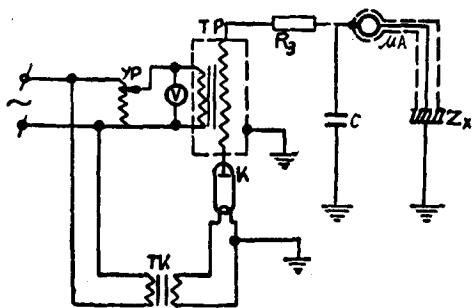


图 2-2 整流管灯丝在低压微安表处于高压时的泄漏试验接线图

在整流装置（尤其是半波整流装置）中若无稳压电容器，而被试物的电容又很小时，输出的直流高压（即加于被试物上的电压）的平均值，一般可能低于根据交流计算的波峰值的 10~40%，使试验结果发生误差，兹略述如下：

设被试物的电容量为 C ，在充电半波时，其两端电压

为 $U_x = \frac{Q}{C}$, Q 为充电电荷量, 在非充电半波时, 若充电电荷毫无逸出, 即 Q 值不变, 则加于被試物上的电压可保持恆定不变, 如图 2-3 实綫所示。

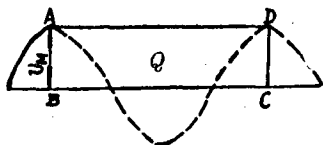


图 2-3 非充电半波时, 充电电荷毫无逸出时的输出电压波形

但事实上充电电荷在非充电半波时, 常常有电荷逸出, 因此被試物承受的电压值随之下降。如图 2-4 所示, 其每周波的平均电压值为 U 。

因 $U_x = \frac{Q}{C}$, 由此可見, 在給定的每周波逸出电荷量条件下, 电容量較小的被試物, 其充电量 Q 也小, 故充电量 Q 的减小, 影响电压值較大。应用并联稳压电容器的目的, 在于减少这种誤差。对于发电机、变压器及长电纜等被試物而言, 因其本身电容量較大, 受此影响較小, 故稳压电容器 C 可省略不用。

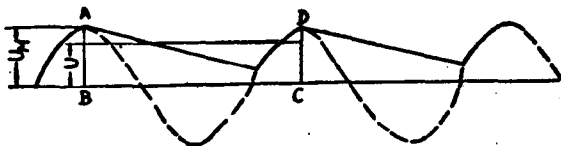


图 2-4 非充电半波时, 充电电荷有逸出时的输出电压波形

图 2-2 的整流装置綫路中, 除去由于半波整流引起的誤差外, 高压試驗变压器的高压綫圈对地电容 C_{mp} 及对地絕緣电阻 R_{mp} 也会引起誤差。今分述如下: 图 2-5 的綫路和图 2-2 完全一样, 只是这里的被試物以 C_x 及 R_x 并联的等值电路

来表示，而高压試驗变压器的高压綫圈对地电容及对地絕緣电阻則以 C_{mp} 及 R_{mp} 并联的等值电路来表示。因为半波整流引起的誤差与被試物的絕緣电阻 R_x 及 R_{mp} 有关，故在理想的情况下，当 $R_x = \infty$ 和 $R_{mp} = \infty$ 时，这种誤差就没有了。而高压試驗变压器的高压綫圈对地电容 C_{mp} 引起的誤差，則与 C_x 和 C_{mp} 的大小有关。

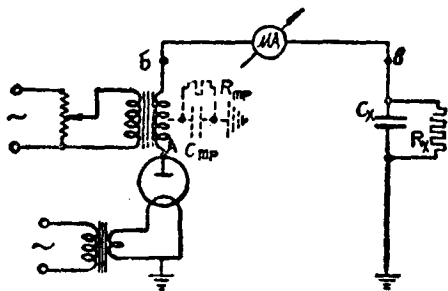


图 2-5 灯絲接地时的整流装置綫路

图 2-5 所示的綫路中，在第一个四分之一周期完了时，A 点的电位几乎等于大地的电位，而 B 点的电位 $U_m = 1.41 U_{\phi\phi}$ ，极性为負。 $U_{\phi\phi}$ 为变压器高压側的电压有效值。

在第三个四分之一周期完了时，A 和 B 之间的电压为 U_m ，其极性和第一个四分之一周期完了的极性相反。全部过程如图 2-6 所示，图中左面表示第一个四分之一周期的情况，右面表示第三个四分之一

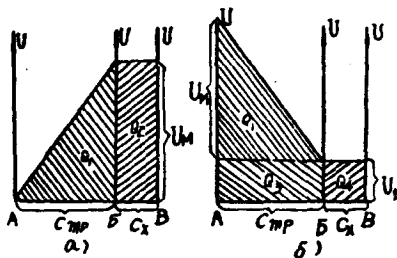


图 2-6 电位变化图

a—充电时；b—未充电时。

周期的情况。

在电压波经过零时，电容 C_x 和 C_{mp} 总的电荷为 $Q_1 + Q_2$ ，并且保持恒定不变，电荷又不可能由 A 点经整流管到地跑掉，变压器两套管间的电压为零。假定由于半波整流引起的泄漏电流（经电阻 R_x 及 $R_{p,p}$ ）的误差，可以略去不计，则由图2-6可得：

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 = Q_1 + Q_3 + Q_4 = 0.5U_x C_{mp} + U_x C_x \\ &= (0.5C_{mp} + C_x)U_x, \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中 Q_1 ——在第一个四分之一周期完了时，电容 C_{mp} 的电荷；

Q_2 ——同上一时间内的电容 C_x 上的电荷；

Q_3 ——第三个四分之一周期完了时，电容 C_{mp} 的电荷；

Q_4 ——同上一时间内的电容 C_x 上的电荷。

电荷 Q_3 以频率为50赫芝来回流动于电容 C_x 到电容 C_{mp} 之间，形成回路中的电容电流，然而这个电流并不致引起电磁式微安表指针的摆动。此电流的大小和 C_x 与 C_{mp} 的比值及其绝对值以及 U_x 的大小有关。

此外，电荷 Q_3 的来回流动，会引起电容 C_x 负电位的脉动，如图2-7所示。如果在第一个四分之一周期完了时它的电位等于 U_x ，那么在第三个四分之一周期完了时就减小到 U_1 。



图2-7 被试物上电压波形图

因为电容 C_x 电位的波动，所以在电容 C_x 上一个周期内电位的平均值为：

$$U_{c,p} = \frac{U_m + U_1}{2},$$

式中
$$U_1 = \frac{Q_1 + Q_2}{C_{mp} + C_x} = \frac{Q_2}{C_{mp} + C_x} = \frac{U_m C_x}{C_{mp} + C_x},$$

由此
$$U_{c,p} = 0.5 \left(1 + \frac{C_x}{C_{mp} + C_x} \right) \cdot U_m. \quad (2-2)$$

以 K_c 代表 $\left[0.5 \left(1 + \frac{C_x}{C_{mp} + C_x} \right) \right]$ ， K_c 为此种线路

的误差系数。

则
$$U_{c,p} = K_c \cdot U_m.$$

即一极接地的整流线路中，电容 C_x 的平均电位小于变压器两端最大值的 K_c 倍。由于平均电位的减小，当然流过电阻 R_x 的平均泄漏电流也减小了。

如果电阻 R_x 的伏安特性曲线是直线性的，则下列关系是正确的。

$$I = \frac{U_{c,p}}{R_x} \text{ 及 } I_m = \frac{I}{K_c},$$

式中 I ——电磁式仪表测得的一周期内电容 C_x 绝缘的泄漏电流的平均值；

I_m ——假定没有电容 C_{mp} 的影响，通过电容 C_x 绝缘的泄漏电流。

这样预先用高压电桥测出电容 C_x 和 C_{mp} 的数值，并按图 2-8 的曲线找出 K_c 加以校正，就可以大大的减少这种接线所引起的误差。在实际工作中，并不应用这种校正，而是增加稳压电容值 $(C + C_x)$ 。很明显，如果 $C_x > C_{mp}$ ，那么 $K_c \approx$