

变配用电设备 电气试验与 典型故障分析及处理

BIANPEI YONGDIAN SHEBEI
DIANQI SHIYAN YU
DIANXING GUZHANG FENXI JI CHULI



变配用电设备电气试验与 典型故障分析及处理

赵永生 主编

彭玉槐 唐亚笛 王先存 胡灵荣 参编

机械工业出版社

前 言

随着电力系统变、配、用电设备技术水平的不断发展，先进的设备管理方法和维修技术在变、配、用电设备单位的普及，特别是以状态为依据的维护方式推广普及后对从事相关工作的技术人员业务水平也提出了更高的要求——如何通过科学的试验方法对设备进行全面检测，如何通过对检测的数据进行可靠、准确的分析、判断来评估设备的状态，如何对相关的设备故障进行处理，确保变、配、用电设备安全、可靠、长周期经济运行是每个相关企业所追求的管理目标之一。

本书详细介绍了变、配、用电设备的试验项目、试验方法、试验设备的使用、接线及如何通过试验结果分析、判断设备的状态，发现问题后如何处理，并详细介绍了变、配、用电设备典型故障的现象、分析处理方法及经验教训。

电气设备的故障类型、现象各不相同，从事相关工作的技术人员不可能一一掌握，我们希望通过介绍相关知识后启发读者，让读者真正掌握变、配、用电设备故障诊断、处理的方法，掌握变、配、用电设备知识的学习方法，使读者在实际工作当中能够应对不同的技术问题，能够通过各种现象去发现问题、解决问题。

本书由赵永生主编，参加编写的还有彭玉槐、唐亚笛、王先存、胡灵荣。另外，参加本书资料收集整理及部分内容编写的还有邓华、谭方伟、熊英、李敏、周海波、周进多、刘健、黄大成、杨光华、卞惠泉、龚靖宇，在此表示感谢。

书中不妥之处，敬请各位读者批评指正！

作 者

目 录

前言

第 1 章 电气设备的绝缘特性及击穿机理	1
1.1 电介质的基本知识	1
1.2 固体介质的击穿	6
1.3 液体介质的击穿	8
1.4 气体放电	10
第 2 章 电气设备试验的基本知识与基本方法	25
2.1 电气设备试验的意义及试验人员应具备的素质	25
2.2 电气设备试验的基本规定	27
2.3 测量绝缘电阻和吸收比的方法步骤及注意事项	29
2.4 直流泄漏电流试验及直流耐压的试验方法步骤及注意事项	34
2.5 介质损失角 $\tan\delta$ 试验方法及注意事项	41
2.6 交流耐压试验的一般方法步骤及注意事项	49
第 3 章 变压器的试验方法及其结果分析与判断	54
3.1 变压器绝缘电阻和吸收比试验的目的、试验方法和结果分析	54
3.2 变压器泄漏电流试验的目的、试验方法和结果分析	56
3.3 变压器介质损耗因数试验的目的、试验方法和结果分析	57
3.4 变压器直流电阻试验的目的、试验方法和结果分析	59
3.5 变压器交流耐压试验的目的、试验方法和结果分析	63
3.6 变压器电压比试验的目的、试验方法和分析判断	65
3.7 变压器接线组别和极性的测定	69
3.8 变压器空载和短路试验	76
3.9 变压器绝缘油试验和色谱分析的基本知识	82
第 4 章 高压断路器的试验方法及其结果分析与判断	88
4.1 高压断路器绝缘电阻及泄漏试验及结果的分析与判断	88
4.2 高压断路器导电回路直流电阻试验及结果分析判断	89
4.3 高压断路器特性试验的目的、方法	90
第 5 章 互感器的试验方法及其结果分析与判断	94
5.1 互感器的试验项目、周期和标准	94
5.2 互感器绝缘试验的目的、方法及其结果分析	96
5.3 互感器的特性试验的方法及其结果分析	106
第 6 章 电力电缆的试验方法及其结果分析与判断	111
6.1 电力电缆绝缘电阻的试验方法及注意事项	112
6.2 电力电缆直流耐压试验和泄漏电流试验的试验方法及结果分析	113
6.3 电力电缆的故障探测	115

第 7 章 异步电动机的试验方法及其结果分析与判断	122
7.1 异步电动机直流电阻的试验方法及其结果分析	122
7.2 异步电动机的绝缘试验方法及其结果分析	123
7.3 异步电动机的极性试验方法及其结果分析	125
7.4 异步电动机的空载特性试验方法及其结果分析	127
第 8 章 电力电容器的试验方法及其结果分析与判断	129
8.1 电力电容器的试验项目、周期和标准	129
8.2 电力电容器绝缘电阻的试验方法及其结果分析	131
8.3 电力电容器 $\tan\delta$ 和电容量测量的方法及其结果分析	131
8.4 电力电容器交流耐压试验和冲击耐压的试验方法及其结果分析	134
第 9 章 避雷器的试验方法及其结果分析与判断	136
9.1 避雷器的试验项目和要求	137
9.2 避雷器绝缘电阻的试验方法及其结果分析	139
9.3 避雷器电导电流及串联元件非线性系数的试验方法及其结果分析	140
9.4 避雷器工频放电试验及其结果分析	143
9.5 管型避雷器的试验方法及其结果分析	145
9.6 氧化锌避雷器的试验方法及其结果分析	147
第 10 章 接地电阻的试验方法及其结果分析与判断	150
10.1 接地电阻试验要求	150
10.2 接地电阻土壤电阻率的测量方法及其结果分析	152
10.3 接地电阻的测量方法及其结果分析	155
第 11 章 变压器典型故障诊断及处理	160
11.1 变压器常见故障的直观判断	160
11.2 变压器瓦斯保护动作的原因、分析判断及处理	161
11.3 变压器进水受潮的原因、诊断方法及处理方法	166
11.4 变压器铁心多点接地故障的检测及临时处理	170
11.5 变压器绕组短路和断线的检查及处理	172
11.6 变压器有载调压分接开关箱渗油故障的处理	173
11.7 变压器套管引线故障的原因及处理	174
11.8 用气相色谱法检测变压器潜伏性故障的分析	175
11.9 气相色谱法检测变压器潜伏性故障实例	180
11.10 变压器绕组变形的原因、诊断方法和防止措施	181
11.11 变压器铁心过热的分析及过渡措施	182
11.12 变压器铁心故障的原因及处理	185
11.13 小型配电变压器喷油和油箱炸裂的原因及防止措施	185
11.14 变压器干燥处理的方法	186
11.15 大型电力变压器围屏爬电故障的原因、诊断方法及防止措施	187
11.16 变压器局部放电故障检测分析及处理	190
11.17 变压器油枕内空气未排出导致变压器假油位事故的发生	191
11.18 变压器有载分接开关过渡电阻断路导致其触头烧坏	192
11.19 变压器分接开关接触不良导致油温上升	193
11.20 变压器外壳接缝焊接不牢导致渗油	194

第 12 章 高压断路器典型故障分析与处理	196
12.1 高压断路器常见故障的处理	196
12.2 高压断路器运行中的维护和检查	197
12.3 高压断路器误跳的原因及其故障处理	199
12.4 高压断路器拒分、拒合的原因及其处理	203
12.5 高压断路器的事故处理原则	211
12.6 高压断路器运行中特别注意的 5 个问题	213
12.7 真空断路器常见故障分析及处理	214
12.8 油断路器故障时的试验项目及方法	217
12.9 少油断路器绝缘受潮的原因及处理	218
12.10 高压断路器拒分、拒合和误动故障的预防技术措施	219
12.11 高压断路器机械损伤预防的技术措施	220
12.12 预防高压断路器灭弧室烧损、爆炸的技术措施	221
12.13 高压断路器套管、支持绝缘子和绝缘提升杆闪络、爆炸预防的技术措施	222
12.14 常见断路器操作机构的故障及其原因	223
12.15 直流操作电源故障引起的断路器拒动、烧损的预防技术措施	226
12.16 高压油断路器缺油导致其爆炸	227
12.17 操作箱接线端子受潮导致断路器拒绝合闸	227
12.18 开关柜内接线头碰壳导致断路器跳闸	228
第 13 章 电力互感器典型故障分析与处理	230
13.1 电压互感器常见故障分析及处理	230
13.2 电磁式电压互感器引起谐振的原因及处理措施	231
13.3 串级式电压互感器发生事故的原因及其预防措施	233
13.4 电容式电压互感器产生故障的原因及其预防措施	235
13.5 运行中的 10~35kV 电压互感器熔断器熔断的原因及处理	237
13.6 电压互感器二次侧电缆接错造成短路	237
13.7 电压互感器二次极性接反导致二次电压不对称	239
13.8 误接二次线导致电压互感器烧坏	240
13.9 电压互感器高压侧熔断器熔丝熔断导致电压指示值偏低	240
13.10 电压互感器二次回路上工作导致电压互感器烧坏	241
13.11 水分太高导致 SF ₆ 电压互感器爆炸	242
13.12 电压互感器中性点未接地导致发电机多次误报接地故障信号	245
13.13 电压互感器二次侧主、辅绕组接错导致母线电压指示不正确	246
13.14 单相接地故障导致电压互感器二次侧断路器多次跳闸	247
13.15 电压互感器二次接线错误导致相电压指示异常	248
13.16 电流互感器常见异常分析、判断及处理	249
13.17 LB 系列电流互感器常见故障、原因及其预防措施	250
13.18 电容型电流互感器的干燥处理	251
13.19 电容型电流互感器爆炸的常见原因及其预防措施	253
13.20 电流互感器二次回路引起火灾事故	256
13.21 产品工艺质量差导致 220kV 电流互感器爆炸	257
13.22 110kV 电流互感器的局部放电缺陷分析及处理	259
13.23 差动保护用电流互感器未核算 10% 误差曲线引起保护误动的分析	261

第 14 章 电力电缆的典型故障分析与处理	263
14.1 纸绝缘电力电缆在运行中发生故障或击穿的原因及其预防措施	263
14.2 电缆中间接头绝缘击穿的原因及预防措施	267
14.3 交联聚乙烯电缆在运行中发生事故的原因及其预防措施	268
14.4 交联聚乙烯电力电缆进水的原因及预防措施	270
14.5 电力电缆发生火灾事故的原因及防火措施	271
第 15 章 异步电动机的典型故障分析与处理	273
15.1 三相异步电动机的常见故障、原因及处理	273
15.2 电动机发生火灾的原因及其预防	275
15.3 电动机运行时有噪声和振动过大的原因	276
15.4 异步电动机“扫膛”原因及处理	277
15.5 转子铁心支架电焊渣导致电动机故障	277
15.6 电动机单相运行的原因及处理	278
15.7 电动机接线端子锈蚀导致电动机三相电压不平衡运行	278
15.8 接线盒内接线铜鼻断裂导致电动机断相运行	279
15.9 电动机基础建筑与电动机共振造成的短路故障	279
15.10 绕线式电动机并头套之间击穿短路的处理与预防	280
15.11 绕线式电动机集电环过热和火花过大的原因及处理	281
15.12 高压电动机常见的定子故障分析及处理方法	281
15.13 高压电动机转子笼条断裂的原因及处理方法	285
参考文献	289

第 1 章 电介质的绝缘特性及击穿机理

在电力系统中常常由于某一部分或某一电气设备的绝缘遭到损坏而引起事故，破坏了系统工作的安全性和可靠性，给国民经济造成重大损失。为确保恰当的系统绝缘水平，保证电气设备绝缘的安全运行和电气工作人员的安全，必须对绝缘材料（常称为电介质，它包括气体、液体和固体介质）和绝缘结构的耐电性能进行研究。

1.1 电介质的基本知识

电介质在电场作用下，主要有极化、电导、损耗和击穿四种物理现象。

1.1.1 电介质的极化

1. 电介质的极化和介电系数

电介质在外加电场作用下，在相对电极的两个面上出现正、负电荷，使电介质呈现极性的现象，称为电介质的极化。极化现象如图 1-1 所示。

图 1-1 所示的平行板电容器，先放在密闭的容器内将极间抽成真空，而在极板上施加直流电压 U ，这时极板上积聚有正、负电荷，其电荷量为 Q 。然后把一块厚度与极间距离相等的固体介质放在极板之间，施加同样的电压，就会发现极板上的电荷量增加到 $Q_0 + Q$ （见图 1-1b）。这是由于电介质极化现象造成的：即外加电场作用下，此固体介质中原来极板上另外吸住了一部分电荷 Q' 。所以极板上电荷增移，并造成电容量也增大，平行板电容器在真空中的电容量为

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (1-1)$$

式中 A ——极板面积 (m^2)；

d ——极间距离 (m)；

ϵ_0 ——真空的介电系数，为 $1/36 \times 10^{-9} \text{F/m}$ 。

极板间插入固体介质后，电容量增为

$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1-2)$$

由上面两式可得

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0} \quad (1-3)$$

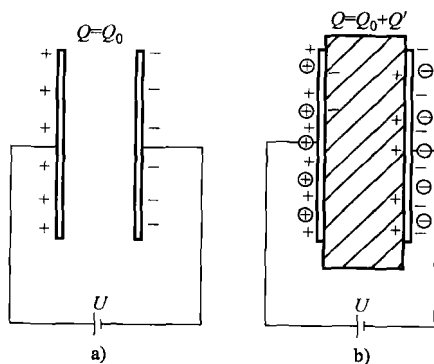


图 1-1 极化现象

a) 电极间为真空 b) 电极间有固体介质

ϵ_r 称为介质的相对介电系数。各种电气的 ϵ_r 均接近于1,而常用的液体、固体介质的 ϵ_r 则各不相同,大多数在2~6,而且各种介质的 ϵ_r 与温度、电源频率的关系也不一致,且与极化形式有关。

2. 极化种类

介质的极化种类很多,其最基本的形式为电子式、离子式和偶极子极化三种,另外还有夹层介质界面和空间电荷极化等。

1) 电子式极化如图1-2所示,当物质原子中的电子轨道受到外电场的作用时,它将相对于原子核产生位移,这就是电子式极化。这时原子中正、负电荷作用中心不再重合,其极化强度与正、负电荷作用中心的距离 d 成正比,且随着外电场的增加而增大。

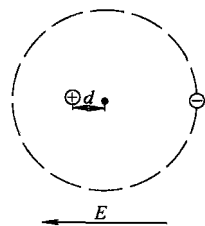


图1-2 电子式极化

电子式极化存在于一切气体、液体及固体介质中。它有两个特点:①形式极化所需的时间短(因电子质量极小),约为 10^{-15} s,即它在各种频率范围内均能产生,故其 ϵ_r 不随频率而变化;②它具有弹性,当外电场去掉后,依靠正、负电荷间的吸引力,其作用中心又重合而呈中性,所以这种极化没有损耗。

温度对电子式极化影响不大,温度升高时,电子与原子核的结合力减弱,极化略有加强,但温度升高使介质密度变小,导致极化减弱。在上述两种相反的作用中,后者略占优势。一般 ϵ_r 有很小的负温度系数,工程上可以忽略不计。

2) 离子式极化如图1-3所示。固体无机化合物多数属离子式结构,如云母、陶瓷材料等。无外电场时,每个分子的正、负离子作用中心是重合的,故不呈现极性,如图1-3a所示。在外电场作用下,正、负离子发生偏移,使整个分子呈现极性,如图1-3b所示。离子式极化也属弹性极化,几乎没有损耗,极化过程所需时间也很短,约为 10^{-13} s,所以在一般使用的频率范围内,可以认为 ϵ_r 与频率无关。

温度对离子式极化的影响,存在着相反的两种因素:①离子间结合力随着温度升高而降低,使极化程度增加;②离子的密度会随温度升高而减小,使极化程度降低。通常以前一种因素影响较大,所以其 ϵ_r 一般具有正温度系数。

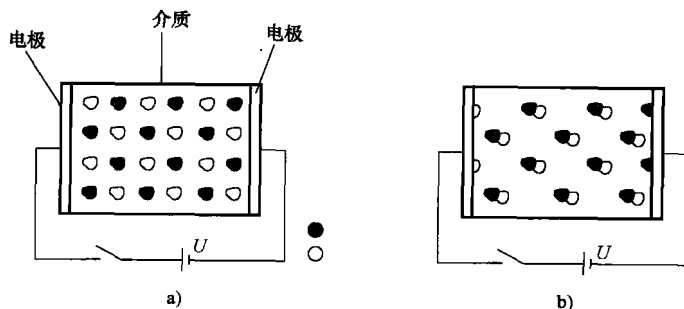


图1-3 离子式极化

a) 无外电场时 b) 有外电场时

3) 偶极子极化如图1-4所示。偶极子是一种特殊的分子。它的正、负电荷作用中心不重合,因而形成一个永久的偶极矩。具有这种永久性偶极子的电介质为极性电介质。例如蓖麻油、橡胶、胶木和纤维素等均是常用的极性绝缘材料。

当没有外电场时, 单个的偶极子显然具有极性, 但各个偶极子处在不停的热运动之中, 分布非常杂乱, 对外的作用互相抵消, 整个介质对外并不呈现极性, 如图 1-4a 所示。在外电场作用下, 原来杂乱分布的极性分子顺电场方向定向排列, 因而显示出极性, 如图 1-4b 所示。

偶极子极化是非弹性的, 极化时消耗的电场能量在复原时不能收回 (极性分子旋转时要克服分子间的吸引力, 可想象为分子在一种黏性的媒质中旋转需克服阻力一样); 极化所需的时间也很长, 约为 $10^{-10} \sim 10^{-2} \text{ s}$ 。因此, 极性介质的 ϵ_r 与电源频率有较大的关系, 频率很高时偶极子来不及随电场转动, 因而其 ϵ_r 减小。

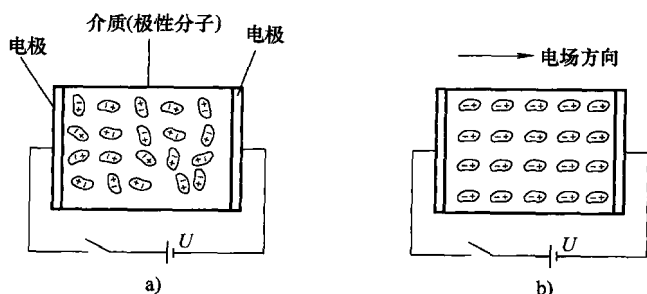


图 1-4 偶极子极化

a) 无外电场时 b) 有外电场时

温度对极性介质的 ϵ_r 有很大的影响, 温度高时, 分子热运动加剧, 妨碍它们沿电场方向取向, 使极化减弱, 所以极性气体介质常具有负温度系数。但对液体、固体介质则情况有所不同, 温度过低时, 由于分子间联系紧, 分子难以转向, 所以 ϵ_r 也变小 (此时剩下的主要是电子位移极化)。当温度高时, 分子间联系减弱, 分子便于取向, 此时 ϵ_r 将随温度的升高而增加, 以后当热运动变得较强烈时, ϵ_r 又随温度上升而减小。

4) 夹层式极化。上面介绍的均是单一均匀介质的情况。实际上设备的绝缘往往由几种不同的介质组成, 或介质是不均匀的。在这种情况下, 还会产生“夹层介质界面极化”现象。这种极化过程十分缓慢, 并且伴随有能量损耗。

5) 空间电荷极化。介质中的正、负自由离子在电场作用下改变分布情况时, 便在电极附近形成空间电荷, 称为空间电荷极化。它和夹层介质界面极化现象一样是缓慢进行的。所以在交变电场, 仅在低频至超低频阶段才有这种极化现象存在, 而在高频时因空间电荷来不及移动, 因此就没有这种极化现象。

1.1.2 电介质的电导 (或绝缘电阻)

任何电介质都不可能是理想的绝缘体, 它们总有一些联系弱的带电质点存在。在电场作用下, 它们可作有方向的运动构成电流, 因而任何电介质都具有一定的电导。电介质在直流电压 U 作用下, 初瞬间由于各种极化过程的发展, 使电介质中流过的电流将随着时间变化而变化。经一定时间后, 极化过程结束, 这时流过电介质的电流趋于一定值 I_g 。与这个稳定电流值 I_g 相对应的电阻称为绝缘电阻 R_∞ 。

$$R_\infty = \frac{U}{I_g} \quad (1-4)$$

介质绝缘电阻可以用来表征介质的绝缘程度。对于固体介质绝缘电阻包括介质的体积泄漏电阻和表面泄漏电阻, 两者可视为并联关系。因表面电阻受外界影响很大 (如潮湿、脏污等), 不能说明介质内部的绝缘情况, 因此, 固体介质必须注意区分体积电阻和表面电阻。

介质绝缘电阻的倒数为介质的电导，它的大小决定着介质中的泄漏电流。泄漏电流大将引起介质发热，加速介质的老化。介质的电导和导体的电子电导不同，它是离子电导，其特点是：

1) 电介质电导与温度有密切关系，温度越高，离子热运动越剧烈，容易改变原有受束缚的状态，因而在电场中运动的离子数和速度都要增加，即电导随温度升高而增大，具有正温度系数。

2) 电介质电导与所加电压有关，通常介质在接近击穿时，电导电流显著增加，绝缘电阻急剧下降。

3) 电介质电导与加压时间有关，在加压初期，因电导电流与可逆性的极化电流同时产生，可逆性极化电流叫吸收电流，它是随介质加压的时间增加而逐渐衰减的。所以要测得绝缘电阻的稳定值需较长时间，实际中规定加压 1min 后测得的电阻值即为绝缘电阻值。

在绝缘预防性试验中，通常采用测量绝缘电阻及泄漏电流来判断绝缘是否受潮、有无其他劣化现象。

1.1.3 电介质的能量损耗

1. 介质损耗及其形式

由前所述的极化和电导可以看出，电介质在电压作用下有能量损耗：一种是由电导引起的损耗；另一种是由某种极化引起的损耗，如极性介质中偶极子转向极化、夹层极化等。电介质的能量损耗称为介质损耗。

电导损耗为电场作用下由泄漏电流引起的那部分损耗。泄漏电流与电场频率无关，故这部分损耗在直流、交流下都存在。气体电介质以及绝缘良好的液、固体电介质，电导损耗都不大。液、固体电介质的电导损耗随温度升高而按指数规律增大。

极化损耗为偶极子与空间电荷极化引起的损耗。在直流电压作用下，由于极化过程仅在电压施加后很短时间内存在，与电导损耗相比可忽略。而在交流电压作用下，由于电介质随交流电压极性的周期性改变而做周期性的正向极化和反向极化，极化始终存在于整个加压过程之中。极化损耗在频率不太高时随频率升高而增大。但频率过高时，极化过程反而减弱，损耗也减小。极化损耗与温度也有关，在某一温度下极化损耗达到最大。

2. 介质损失角正切 $\tan\delta$

在直流电压作用下，由于无周期性极化，因损耗只是由电导引起的电导损耗，用体积电导率和表面电导率两个物理量已能够表达，所以直流电压作用下不需要再引入介质损耗这个概念。

在交流电压作用下，除电导损耗外，还有由于周期性的极化而引起的能量损耗，因此需要引入一个新的物理量来表示，这个物理量就是 $\tan\delta$ 。

电介质两端施加一交流电压 U 时，应有电流 I 流过介质。 I 由 3 个电流分量组成

$$I = I_c + I_g + I_a \quad (1-5)$$

式中 I_g ——电导过程的电流，为阻性电流，与 U 同相位；

I_c 、 I_a ——无损极化和有损极化时的电流。

对应的等值电路如图 1-5a 所示，此等值电路可进一步简化成如图 1-5b 所示的由 R 和

C_p 相并联的等值电路。此并联等值电路的相量图如图 1-5c 所示。我们定义功率因数角 θ 的余角为 δ 角。由相量图可见, 介质损耗功率越大, I_R 越大, δ 角也越大, 因此 δ 角称为介质损失角。

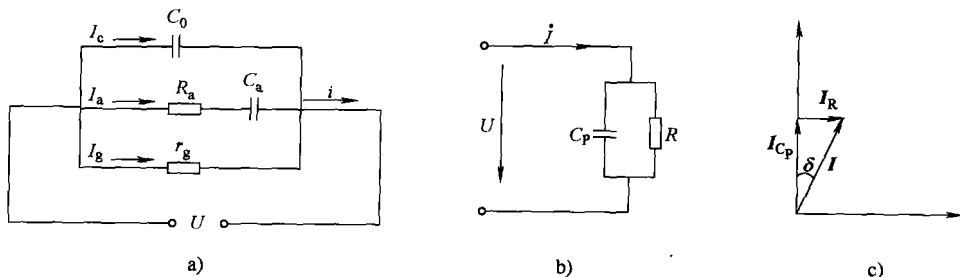


图 1-5 交流电压下电介质的等值电路及相量图
a)、b) 等值电路 c) 相量图

对此并联等值电路, 可写出介质损耗功率 P 的计算公式:

$$P = UI_R = UIC_p \tan \delta = U^2 \omega C_p \tan \delta \quad (1-6)$$

上述等值电路只有计算上的意义, 并不能确切反映其物理过程。

讨论介质损耗的意义在于:

1) 在电工中使用的电介质, 要求它的 $\tan \delta$ 越小越好。尤其在高频下使用的绝缘材料, $\tan \delta$ 大, 介质发热, 可使介质老化或者导致击穿。

2) 在绝缘预防性试验中, 测 $\tan \delta$ 是一个基本项目。当绝缘受潮或劣化时, $\tan \delta$ 剧烈上升。对绝缘内部是否普遍发生局部放电, 也可以通过测 $\tan \delta = f(u)$ 的曲线加以判断。

1.1.4 电介质的老化与击穿场强

当施加于电介质的电压增加达到某一临界值 U_j (击穿电压) 时, 通过电介质的电流剧增, 电介质被击穿。电介质击穿后, 完全丧失它固有的绝缘性能, 转变成为导体 (对气体、液体介质, 外施电压除去后, 绝缘还可能恢复)。电介质被击穿时的电场强度 E_j 称为击穿电场强度或抗电强度。 U_j 与 E_j 间存在如下简单关系:

$$E_j = \frac{U_j}{d} \quad (1-7)$$

式中 d ——击穿处电介质的厚度 (cm);

U_j ——击穿电压 (kV);

E_j ——击穿电场强度 (kV/cm)。

有关气体、液压和固体电介质的击穿, 将在本章后几节中介绍。

在电介质中, 由于电场、热、化学、机械等的作用, 其绝缘性能逐渐变坏, 这一过程可能是可逆的, 即在电压消除后, 可恢复到原来的绝缘状态; 也可能是不可逆的, 即在电压消除后, 介质不再恢复它原来的绝缘特性。可逆过程称为介质疲劳, 不可逆过程则称为介质老化。

使介质发生不可逆的老化过程可能有下列原因:

1) 过热。过热的原因有：①由其他热部分传来的热量；②介质损耗或不均匀介质的局部损耗产生的局部过热（在高频下可能性大）。

2) 化学作用。由于高温及强电场作用使电极和电介质接触处的空气间隙或介质内部气泡发生局部放电，产生臭氧、氮的氧化物等腐蚀电介质。

3) 机械损伤。由于机械碰撞及温度系数不同造成的应力引起的机械损伤，或介质不均匀及电极边沿处电场集中形成局部过电压，也会引起机械损伤。

以上各种原因可能在介质中同时存在，也可能在一定条件下，从一种形式过渡到另一种形式。例如，过热过渡到化学作用和机械损伤；化学作用过渡到机械损伤等。

1.2 固体介质的击穿

在高压电气设备中常用的固体介质有陶瓷、云母及其制品、大理石、混合浸渍过的木材及一些人工合成的材料（如塑料、橡胶、纤维等）。在实际应用中，固体介质是同时在电气作用下和机械力的作用下工作的，这会使其抗电强度大大降低，故研究固体介质电气特性时，还应注意机械力的影响。固体介质在电场作用下绝缘性能的破坏，表现为它的电导大大增加，固体介质击穿后，出现烧焦或熔化的通道、裂缝等。其击穿具有不可逆性，即介质击穿后，除去外加电压，其绝缘性能也不能恢复到击穿前的水平。

固体介质的击穿常见的有电击穿、热击穿及电化学击穿等形式。固体介质击穿场强与电压作用时间的关系如图 1-6 所示。

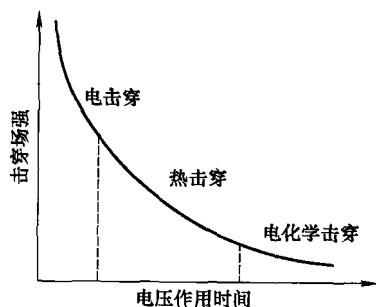


图 1-6 固体介质击穿场强与电压作用时间的关系

1.2.1 固体介质的击穿理论

1. 电击穿理论

电击穿理论是以考虑在固体介质中产生碰撞游离为基础，它不包括由边沿效应、介质劣化引起的击穿。

在电场作用下，固体介质中的自由电子若获得较大的动能，就可能使固体晶格上的原子或离子游离，在固体介质中出现很多带电质点，形成电子崩，当电子崩足够强时，可使固体介质击穿。

电击穿的特点是：电压作用时间短、击穿电压高、电介质温度不高、击穿场强不高；击穿场强与电场均匀度有密切关系，而与周围环境几乎无关。

2. 热击穿理论

热击穿是在电压作用时间较长的情况下发生的。在电压作用下，介质中有电流流过，而引起介质损耗。由于介质损耗使介质内部发热，温度上升，而介质的电阻具有负温度系数，即温度上升时，电阻较小，这又会使电流进一步增大，损耗所产生的热量也随之增大。如果介质中产生的热量比散发的热量大，介质的温度就会不断上升，引起介质分解、炭化等，致使介质击穿。

当介质中有局部缺陷时，特别是贯通性缺陷，局部的损耗增大，该处温升显著增高，击

穿就将发生在这局部缺陷的地方。热击穿电压与环境温度、电压作用时间、电压频率、周围媒质的散热能力和散热条件以及绝缘本身的导热系数、 $\tan\delta$ 、电阻率、介质厚度等因素有关。

3. 电化学击穿理论

电化学击穿一般发生在电气设备运行很长时间以后，且击穿电压较低。其主要原因往往是介质内部局部放电所致。

高压电气设备绝缘内部不可避免地存在缺陷（如固体绝缘中的气隙、液体绝缘中的气泡）和电场分布的不均匀性，这些气隙、气泡或局部固体绝缘沿面上的场强达到一定值时，就会发生局部放电，使固体介质（特别是有机介质）的劣化损伤逐步扩大，甚至可使整个绝缘击穿或沿面闪络。

1.2.2 影响固体介质击穿电压的主要因素

1. 电压作用时间的影响

若外加电压作用时间很短（如0.1s以下），固体介质就被击穿，此时可能是电击穿，一般来说，因为时间太短，热、化学等影响还不明显。当在交流电压作用下时间较长时（如几秒到数十小时）介质击穿，则热击穿往往起决定作用（这还要看介质损耗的大小和散热条件的好坏）。有时也很难分清，如在常用的工频耐压试验中被击穿时，就会有电和热的联合作用。当电压作用时间很长（几十小时到几年）时击穿，则大多数属于电化学击穿范围。如果需要明确区分，还应根据击穿时的现象和介质的情况具体分析，不能仅以加压时间的长短来区分。浸油电工纸板的击穿电压和加压时间的关系（25℃）如图1-7所示，如以其1min工频击穿电压（幅值）作为100%，则在冲击电压作用下的击穿电压约达300%，且在较宽的时间范围内击穿电压与电压作用时间几乎无关，只有在外施冲击电压极短时（几微秒），击穿电压又升高，这与气体在极短冲击电压下的放电电压会升高的原因相似（因外施电压的时间与放电时间相近）。在长期工作电压作用下，击穿电压仅为工频1min击穿电压的几分之一，这说明由于局部放电对介质的损害而出现了电化学击穿。

2. 温度的影响

如图1-8所示为工频电压下电瓷的击穿电压与温度的关系，有一临界温度 t_0 。当温度大于 t_0 时，电瓷的击穿电压迅速下降，属于热击穿性质。临界温度不是一个常数，固体介质的厚度越大，散热越困难，临界温度 t_0 就越低。

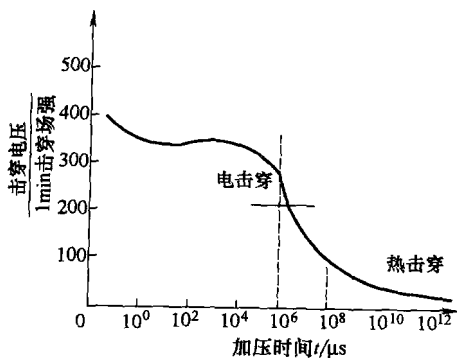


图 1-7 浸油电工纸板的击穿电压和加压时间的关系（25℃）

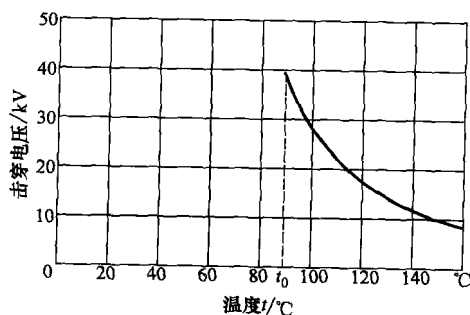


图 1-8 工频电压下电瓷的击穿电压与温度的关系

3. 电场均匀度和电介质厚度的影响

均匀电场中, 在电击穿领域内, 击穿场强与介质厚度几乎无关, 在热击穿领域内, 则厚度越大, 击穿场强就越小。

在不均匀电场中, 即使在电击穿领域内, 随着介质厚度的增大, 击穿时的平均场强仍将减小。

4. 电压种类的影响

同一介质、同一电极布置时, 其直流、交流和冲击电压作用下的击穿电压往往是不相同的。冲击击穿电压和工频击穿电压(幅值)之比称为该介质的冲击系数。介质的冲击击穿电压常大于工频击穿电压, 其冲击系数常大于1; 直流电压下的击穿电压也常比工频击穿电压高得多, 这是因为直流电压下的固体介质损耗小、局部放电又弱的缘故。

当加高频电压时, 固体介质的高频击穿电压比工频击穿电压要低, 这是由于介质损耗更大, 局部放电更强, 因而引起发热严重, 致使介质更易发生热击穿; 或者由于局部放电引起的化学变化、发热等损伤绝缘, 使绝缘劣化加速, 从而导致电化学击穿提前到来。

5. 受潮湿的影响

固体介质受潮后, 击穿电压下降, 下降程度与介质的性能有关。对于不易吸潮的中性介质, 如聚乙烯、聚四氟乙烯等, 吸潮后击穿电压将下降50%左右; 但对于易吸潮的极性介质, 如棉丝、纸等纤维材料, 吸潮后击穿电压迅速下降, 最低可降至干燥时的数百分之一。这是因为介质中含水量增大时, 其电导率和介质损耗均迅速增加, 很容易造成热击穿。

6. 机械力影响

对均匀和严密的固体介质来说, 在弹性限度内, 击穿电压与其机械形变无关, 但是对于某些具有孔隙的不均匀介质来说, 机械应力和形变对击穿电压有很显著的影响。机械力可能使介质中的孔隙减少和缩小, 从而使击穿电压升高, 或者可能使某些原来较完整的介质产生裂缝, 导致击穿电压降低。

7. 累积效应的影响

固体介质在均匀电场中, 特别是在冲击电压作用下, 发现有强烈的局部放电, 但由于电压作用时间短, 没有形成贯穿的击穿通道, 仅在固体介质中形成局部损伤或不完全击穿。实验指出, 不完全击穿具有累积效应, 即介质的击穿电压随着过去承受过的不完全击穿次数的增加而降低。

1.3 液体介质的击穿

1.3.1 液体介质的击穿机理

对液体介质击穿机理的研究远不及对气体的研究, 还提不出一个较为完善的击穿理论。其主要原因在于: 工程用液体中总含有某些气体、液体或固体杂质, 这些杂质的存在, 对液体介质的击穿过程影响很大。因此, 宜将液体介质分为两类, 即纯净的和工程上用的液体介质来加以研究。实际中接触最多的、也是应用最广泛的液体介质是变压器油, 故在下面的讨论中, 以变压器油为主要对象。

1. 电击穿理论

一般认为, 纯净的液体介质的击穿过程基本上与气体介质的击穿过程相类似。在液体介质中, 总会有一些最初的自由电子, 这些电子在电场的作用下, 产生碰撞游离。当外加电场足够强时, 电流剧增, 致使液体介质击穿。

由于液体介质的密度远比气体介质大, 液体介质中电子的自由行程很短, 不易积累到足以产生碰撞游离所需的动能。因此, 纯净液体介质的耐电强度总比常态下气体介质的耐电强度高很多, 前者可达 10^6 V/cm 数量级, 而后者仅有 10^4 V/cm 数量级。

2. 小桥击穿理论

工程用液体介质总量不是很纯净, 即使以极纯净的液体介质注入电气设备中, 在注入过程中也难免有杂质混入。因为液体介质与大气接触时会逐渐被氧化, 并从大气中吸收气体和水分, 而且常有各种纤维从固体绝缘物中脱落到液体介质中来; 在运行过程中, 液体介质本身也会老化, 分解出气体、水分和聚合物, 所以工程中的液体介质总是含有一些杂质。这些杂质的介电系数和电导与纯净液体介质本身的相应参数是不相等的。因此在外电场作用下, 会在这些杂质附近造成局部强电场。由于电场力的作用, 这些杂质会在电场方向被拉长, 沿电场方向逐渐排列成杂质的“小桥”。如果此“小桥”贯穿于电极之间, 则由于组成此“小桥”的纤维及水分等电导较大, 使漏泄电流增大, 发热增加, 促使水分汽化, 形成气泡; 即使杂质小桥尚未贯穿全部间隙, 在各段杂质链端部处液体介质中的场强也将增大很多, 液体介质将在此局部高场强下电离而分解出气体; 小桥中气泡的增多, 促使游离过程增强, 最后将小桥通道游离而导致击穿。

1.3.2 影响液体介质击穿电压的因素

1. 杂质的影响

液体介质中的杂质含有水分、气泡和纤维等。如果气体和水分溶解于液体介质中, 则对耐电强度影响不大, 如呈悬浮状态, 则如前所述, 将易形成“小桥”, 而使击穿电压明显下降。油中含水量对工频击穿电压的影响如图 1-9 所示, 当油中含水量仅占万分之几时, 就会使击穿电压显著下降; 当含水量继续增加时, 多余部分将沉积于底部, 击穿电压就不再继续下降。当油中纤维存在时, 水分的影响特别明显。纤维越多, 击穿电压值降低也就越大; 电场越均匀, 杂质对击穿电压的影响越大, 击穿电压的分散性越大。在不均匀电场中, 杂质对击穿电压的影响较小, 因在场强高处先发生局部放电而产生扰动, 杂质不易形成“小桥”。对于冲击击穿电压, 杂质的影响也较小, 因为冲击电压作用时间短, 杂质来不及形成“小桥”。

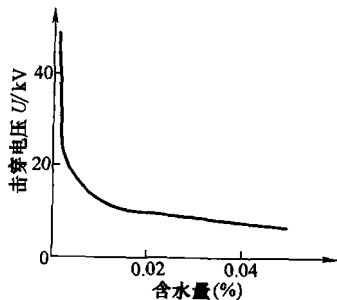


图 1-9 油中含水量对工频击穿电压的影响

2. 温度的影响

油的击穿电压与温度的关系较复杂。图 1-10 所示的是油的温度对工频击穿电压的影响, 当温度在 $0 \sim 60^\circ\text{C}$ 内, 油的击穿电压往往随温度的升高而增加。这是由于油中悬浮状态的水分随着温度升高转变为熔解状态的缘故, 以致在温度为 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 内, 油的击穿电压出现最大值, 当温度过高时, 油中水分汽化, 形成气泡, 而使击穿电压降低。

3. 电压作用时间的影响

由于加上电压后,油中的杂质聚集到电极间或者是油发热等都需要一定的时间,所以油间隙击穿电压会随加压时间的增加而下降。当油的净度及温度提高时,电压作用时间对击穿电压的影响减小。经过长时间工作后,油的击穿电压将缓慢下降,这常常是由于油的劣化、变脏等因素造成的。在油不太脏并由工频电压作用时,1min下的电气强度和较长时间的电气强度相差不大,因而工频交流耐压试验通常只加1min的试验电压。

4. 电场均匀程度的影响

当油的净度较高时,改善电场的均匀程度能使工频或直流电压下的击穿电压明显提高。但在品质较差的油中,因杂质的影响已使电场发生畸变,故此时改善电场的均匀程度所带来的好处并不显著。若含杂质的油受冲击电压作用时,因杂质来不及形成小桥,则改善电场均匀程度能提高其击穿电压。

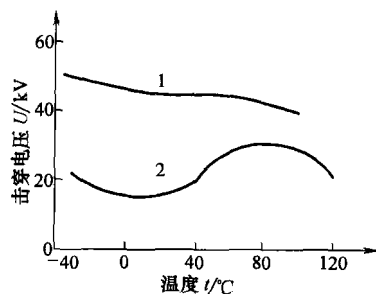


图 1-10 油的温度对工频
击穿电压的影响
1—干燥的油 2—潮湿的油

1.3.3 提高液体介质击穿电压的方法

1) 在液体介质的电极间,放入固体介质屏障用以提高击穿电压。在不均匀电场中,将屏障放在电场较强附近处时效果特别明显。加入屏障之所以能提高液体介质的击穿电压,是由于屏障阻止了小桥的形成,限制了放电发展的缘故。

2) 减少杂质。从上面的分析可知,液体介质中杂质对其间隙的击穿电压影响较大,所以应尽量减少杂质。具体方法有过滤、防潮、祛气等。

1.4 气体放电

在许多电气绝缘结构中,广泛应用空气作为绝缘材料,如架空线、母线、变压器引出线、隔离开关断口处等。气体在正常情况下是良好的绝缘材料。但是电极间电压超过一定临界值时,气体会突然失去绝缘能力而发生放电现象,称为气体放电。在气压低、电源容量小时,放电表现为充满整个间隙的辉光放电形式;在大气压时常表现为火花放电或电弧放电形式。在很不均匀的电场中,间隙击穿前,在局部电场很强的地方已开始放电,这种放电形式被称为电晕放电。气体间隙在击穿放电结束后,气体介质能自动恢复绝缘性能,故又称为自恢复绝缘。

当气体中有固体介质时,例如,支承载流导体的绝缘子常常会沿着固体表面层气体发生击穿放电,这种放电形式称为沿面放电。

1.4.1 气体放电理论

气体放电理论最初是在低气压、短距离的条件下进行放电实验的基础上建立起来的。随着电气设备电压等级的提高、物理实验技术的进步,高电压、长间隙条件下气体放电实验研究逐渐发展起来。在这些实验基础上总结出气体放电理论,但还不够完善,正处于进一步研究之中。下面以比较均匀的电场放电发展过程为例,介绍气体放电基本理论。