

GAOYA DIANQI SHIYAN PEIXUN JIAOCAI

高压电气试验

培训教材

邱永椿 编著

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

GAOYA DIANQI SHIYAN PEIXUN JIAOCAI

高压电气试验

培训教材

邱永椿 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是根据 GB 50150—2006《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》中规定的试验项目，归纳成绝缘试验、特性试验和特殊试验三类，着重介绍试验特点、仪器设备选择、试验方法、影响试验结果的因素、试验结果的分析与判断，还增加了近 20 年来新推广的部分试验项目的测试方法，内容丰富，理论联系实际。

本书集高电压技术中的电介质理论、过电压和过电压保护、绝缘配合及电工测量、绝缘油和 SF₆ 气体等与电气试验有关的知识内容。

本书可作为高电压试验人员的技能培训教材，也可供其他相关电气专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压电气试验培训教材/邱永椿编著. —北京: 中国电力出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5123-9628-9

I. ①高… II. ①邱… III. ①高压电器-试验-技术培训-教材 IV. ①TM510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 182293 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 358 千字

印数 0001—2000 册 定价 55.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

高压电气设备的现场试验项目繁多，大致可分为常规绝缘试验、特性试验和特殊试验三类。常规绝缘试验项目包括绝缘电阻、吸收比和极化指数，泄漏电流和直流耐压试验，介质损耗因数 $\tan\delta$ ，交流耐压试验及交直流高电压测量，局部放电试验；特性试验项目包括直流电阻测量，电压比、极性和组别、空载试验和负载试验；特殊试验项目包括变压器绕组变形试验、35kV 及以上电力电缆交流耐压试验、110kV 及以上 GIS 交流耐压试验、35kV 大型干式变压器现场局部放电和感应耐压试验等。

本书主要介绍各项试验的特点、试验仪器设备的选择、原理接线、试验方法、影响试验结果的因素和解决办法、试验中的注意事项、计算方法和温度换算、试验结果分析与判断等方面的内容。

电气试验的作用主要是检查电气设备的绝缘状况，测量各种特性参数，检查制造、检修工艺质量，为检修提供依据，确定故障性质和部位。本书一并阐述了与电气试验有关的基础知识，如高电压技术（包括电介质理论、过电压和过电压保护、电力系统的绝缘配合）、电工测量、绝缘油和 SF₆ 气体等，便于现场试验工作人员全面掌握与电气试验有关的知识。

本书结合常规培训授课内容以及近年来的一些新设备试验，如带非正常连接方式平衡绕组变压器（SQSPZ9-40000/110 型）的变压比及联结组别试验，大容量 10kV 绝缘母线的结构和试验，非晶合金变压器的一般常识和交流耐压试验，变频串联谐振交流耐压试验装置元件参数设计等，与广大读者进行交流探讨。由于编者水平有限，谬误之处恳请读者批评指正。

编著者

2016 年 3 月于上海

目 录

前言

第一章 高电压技术	1
第一节 电介质理论	1
第二节 过电压和过电压保护	9
第三节 电力系统的绝缘配合	19
第二章 电工测量	23
第一节 测量的基本知识	23
第二节 直流电压和电流的测量（磁电系）	26
第三节 交流电压和电流的测量（电磁系）	29
第四节 电阻的测量	31
第五节 功率的测量	37
第六节 常见电工测量仪表与使用	41
第三章 绝缘油和 SF₆ 气体	47
第一节 石油的化学基础	47
第二节 绝缘油	47
第三节 绝缘油的试验、分析与诊断	52
第四节 SF ₆ 气体	65
第五节 SF ₆ 的绝缘特性	68
第六节 SF ₆ 的灭弧特性	72
第七节 SF ₆ 的发展和应用	74
第四章 常规绝缘试验	81
第一节 绝缘电阻、吸收比和极化指数测量	81
第二节 泄漏电流和直流耐压试验	88
第三节 介质损耗因数 tan δ 试验	96
第四节 交流耐压试验	108

第五节 局部放电试验·····	120
第五章 特性试验 ·····	144
第一节 直流电阻测量·····	144
第二节 变压器的变压比试验·····	152
第三节 变压器的极性和组别·····	157
第四节 空载试验·····	163
第五节 负载试验·····	168
第六章 特殊试验 ·····	174
第一节 35kV 及以上交联电力电缆交流耐压试验·····	174
第二节 110kV 及以上 GIS 的交流耐压试验·····	178
第三节 变压器绕组变形试验·····	181
第四节 大型干式变压器现场局部放电和感应耐压试验·····	188
第七章 技术解析 ·····	194
附录一 各类电气设备的绝缘水平·····	213
附录二 油浸式电力变压器绕组的绝缘电阻、泄漏电流、介质损耗因数 参考值和温度换算系数·····	222
附录三 交联聚乙烯电缆电容量等技术参数·····	226
附录四 油浸纸绝缘电力电缆泄漏电流参考值·····	227
附录五 交流无间隙金属氧化物避雷器参数·····	228
附录六 互感器允许的局部放电水平·····	232
附录七 常用高压二极管技术参数·····	233
附录八 污秽等级与爬电比距·····	234
附录九 一球接地时球隙的工频交流、负极性直流、负极性 冲击放电电压·····	235
附录十 现场试验常用计算公式·····	238
参考文献·····	240

高电压技术

高电压技术是指高电压作用下的有关技术问题，如高压电场、高压绝缘、过电压、绝缘配合、高电压试验技术等。高电压技术的研究内容主要有以下三方面：

(1) 绝缘问题的研究。这是高电压技术中最关键的问题，涉及绝缘的问题有：各种绝缘特性；各种绝缘在高电压作用下的放电机理和耐电强度；各种绝缘的结构、老化规律以及与大自然气候环境的关系；怎样才能延长各种绝缘的寿命等。

(2) 过电压问题的研究。电力设备除了要承受交流或直流工作电压的作用外，还会遇到雷电过电压和内部过电压的作用。这两类过电压对电力设备的绝缘会带来严重的危害，因此有必要研究这两类过电压的发生和变化规律，以及防止这两类过电压引起事故的技术措施。

(3) 高电压试验与测量技术的研究。为了研究绝缘和过电压问题，就必须进行各种高电压试验，因而就必须研究试验方法、测量技术，以及研制各种高电压测试设备。

第一节 电介质理论

绝缘就是不导电的意思。对绝缘体和导体来说，绝缘体不导电，而导体则能导电。绝缘的作用是把电位不相同的导体分隔开来，不让导体之间有电流通过，以保持它们之间不同的电位。不导电的材料称为绝缘材料，或者叫做电介质，简称介质，亦或称为绝缘体、绝缘介质。

电介质理论包括极化、电导、损耗、老化与击穿四部分。

一、电介质的极化

电介质的极化就是在电场作用下，电介质中的束缚电荷在相应于电场方向产生有限弹性位移现象，或者极性分子沿电场方向作较有规律的排列现象，这一现象叫做电介质的极化，如图 1-1 所示。

电介质的分子结构可分为中性的、弱极性的和极性的，但从宏观来看都是中性不带电的。当把电介质放在电场中，电介质就要极化，根据极化是否消耗能量可分为无损极化和有损极化两种基本形式。

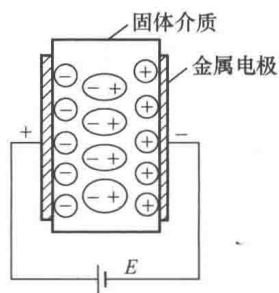


图 1-1 固体介质在电场
内极化示意图

1. 无损极化

无损极化就是在极化过程中不消耗能量，它包括电子式极化和离子式极化两种形式。

(1) 电子式极化。电介质的原子内部电子受到电场的作用发生偏移而引起弹性位移，叫做电子式极化。极化时，正、负电荷中心不再重合，如图 1-2 所示。极化程度随电场的增强而增大。

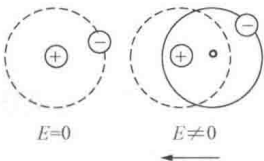


图 1-2 电子式极化示意图

电子式极化的特点是：

- 1) 极化时间极短，约为 $10^{-15} \sim 10^{-13}$ s；
- 2) 能在各种电工频率下极化；
- 3) 可发生在一切电介质中；
- 4) 具有弹性；
- 5) 极化不消耗能量；
- 6) 温度对其影响不大。

(2) 离子式极化。有些固体介质，如云母、陶瓷、玻璃等属于离子式结构，这种介质的正、负离子的中心是重合的。在外电场作用下，正、负离子向相对应的电极偏移，使整个分子呈现极性。这种异性离子间的相对位移而引起的极化，称为离子式极化，如图 1-3 所示。

离子式极化的特点是：

- 1) 极化时间约为 $10^{-13} \sim 10^{-11}$ s；
- 2) 能在任何电工频率下极化；
- 3) 是完全弹性的；
- 4) 极化不消耗能量；
- 5) 其介质具有正的温度系数。温度升高时，由于离子间的结合力减弱而使离子式极化增强。

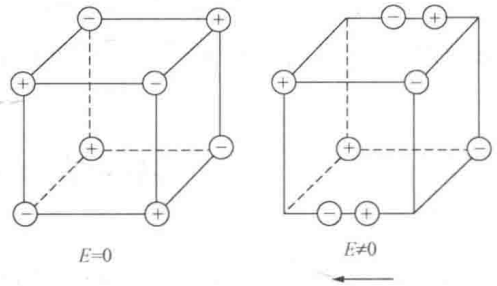


图 1-3 离子式极化示意图

2. 有损极化

有损极化就是极化过程中消耗能量，它包括偶极子极化和夹层极化两种形式。

(1) 偶极子极化。有些介质，如虫胶、蓖麻油、氯化联苯、松香、橡胶、胶木、聚氯乙烯、纤维素等都是偶极子结构，其电子的负电荷作用中心和原子核不重合，形成一个偶极子。这种电介质，称为极化电介质。单个偶极子具有极性，多个偶极子由于分子的热运动而排列混乱，对外不显示极性。

具有偶极子结构的介质中，偶极子在外电场作用下，力求沿电场方向作有规律的排列，叫做偶极子极化，如图 1-4 所示。

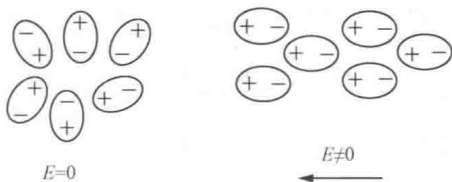


图 1-4 偶极子极化示意图

偶极子极化的特点是：

- 1) 极化时间较长，约为 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ s；
- 2) 极性介质的相对介电系数 ϵ_r 和电源频率有关，频率高时，偶极子来不及随外电场转动，因而 ϵ_r 减小；

3) 不是弹性的;

4) 极化时消耗能量;

5) 极性分子的相对介电系数 ϵ_r 与温度有关。温度升高时, 由于热运动增强, 妨碍了分子的极化, ϵ_r 最初随温度升高而增大, 以后由于热运动增强, ϵ_r 又随温度升高而减小。

(2) 夹层式极化。高压电气设备中常用两种或两种以上介质作绝缘, 如变压器胶木筒、绕组及引线的油纸绝缘, 电缆及电容器中的油浸纸等, 即为夹层介质。另外, 不均匀介质中含有杂质、水分、空气等, 都相当于夹层介质。夹层介质在外电场作用下产生的极化现象, 叫做夹层式极化, 如图 1-5 所示。

$$t=0 \text{ 时, } \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{x_{c1}}{x_{c2}}$$

$$t \rightarrow \infty \text{ 时, } \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{g_2}{g_1}$$

设 $C_2 > C_1, R_2 > R_1$

则 $t=0$ 时, $U_1 > U_2$; $t \rightarrow \infty$ 时, $U_1 < U_2$

夹层式极化的特点是:

1) 极化过程较缓慢, 时间较长, 从几秒到几十秒甚至更长;

2) 极化时消耗能量;

3) 其极化过程可用等值电路来分析。

夹层介质在加压瞬间的电压按电容大小 (即容抗大小) 分布, 待加压一定时间后, 电压按电阻大小 (或电导大小) 分布, 在外电场作用下, 由于介电系数 ϵ_r 和电导的不同, 整个电介质中的电场分布由起始状态过渡到稳定状态时, 在两种介质的交界面上会积聚电荷, 出现极化现象。这种极化只有在直流电压或 1000Hz 以下的低频时才能发生。

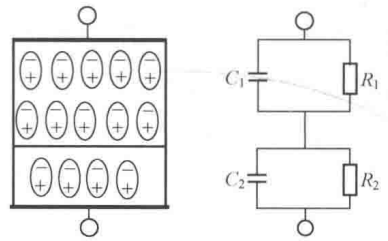


图 1-5 夹层介质极化及等值电路图

二、电介质的电导

电导是用来衡量导体导电能力的一个物理量, 其数值等于电阻的倒数, 用符号 G 来表示, 即:

$$G = \frac{1}{R}$$

在绝缘介质中, 绝缘电阻越高, 电导越低, 反之亦可。

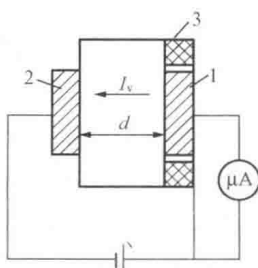


图 1-6 体积电阻测量图

电阻率通常是指从两对称面测得的物体单位体积的电阻值, 用 ρ 表示。如图 1-6 所示, 设在正极 1 和负极 2 之间的电介质厚度为 d (cm), 电极面积为 S (cm^2), 3 为屏蔽电极, 可以消除表面电流对测量的影响, I_v 为测得的电介质内部电流, 设电介质体积电阻为 R_v , 则体积电阻率为:

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{d} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1-1)$$

电导率 γ 就是电阻率 ρ 的倒数, 即:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

绝缘的作用是把电位不同的导体分隔开来，不让电荷通过，以保持它们之间不同的电位。但实际上几乎没有一种绝缘材料是绝对不导电的，任何一种绝缘材料，只要在其的两端加上足够的电压，总会有一些电流通过，这电流就叫做泄漏电流。所加的电压越高，泄漏电流就越大。一般用作绝缘的绝缘材料，其泄漏电流都非常小，通常以 μA (10^{-6}A) 计。

何谓介电系数。两块平行的金属极板被电介质分隔开来，就构成了能储存电荷的电容器。电容器的电容量 C 与极板面积 S 成正比，与极板间的距离 d 成反比，还与极板间的介质有关。当面积和距离相同的两块极板间的介质是空气时，电容量最小（与真空近似），如果用其他介质代替，电容量就增大，不同的介质增大倍数不同。电容的一般公式为： $C = \epsilon \cdot S/d$ 。

在两块极板面积和距离相同的条件下，把某一种绝缘材料构成电容的电容量和用空气（严格的说应该是真空）构成电容的电容量相比，称为这种介质相对于空气的介电系数，简称相对介电系数，通常称为介电系数，用 ϵ_r 来表示， $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 。如，真空 $\epsilon_0 = 1$ ，空气 $\epsilon = 1.00059$ ，变压器油 $\epsilon = 2.2$ ，云母 $\epsilon = 7$ 。

在交流或冲击电压作用下，夹层（或多层）介质中的电场强度 E 与各层绝缘材料的介电系数 ϵ 成反比，即：

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

在交流电压下，两种不同介电系数的绝缘介质串联使用时，介电系数大的介质承受的电压低，即：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

介电系数在绝缘结构中的意义是什么？高压电气设备的绝缘结构大都由几种绝缘介质组成，不同的绝缘介质其介电系数也不同，介电系数小的介质所承受的电场强度高，如果电气设备的绝缘介质中有气隙、气泡，因空气的介电系数小，则电场强度多集中在气隙、气泡上，常使气隙、气泡中的空气先行游离而产生局部放电，促使绝缘老化，甚至绝缘被击穿。因此，在绝缘结构中，介电系数是影响电气设备绝缘状况的重要因素。

1. 电介质电导与加压时间的关系

绝缘介质在直流电压作用下，其等值电路和流过绝缘介质中的三种电流如图 1-7 所示。

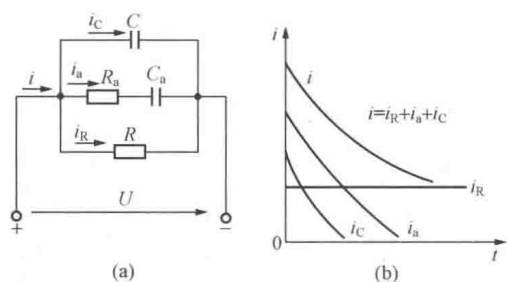


图 1-7 电介质电导与加压时间的关系
(a) 电介质的等值电路图；(b) 电介质在直流电压作用下电流随时间变化曲线

(1) 电容电流 i_C 。它是由绝缘介质内部的电子或离子在直流电场作用下产生位移而形成的电流，与介质的几何尺寸有关，所以又称几何电流。由于电子或离子在电场作用

下移动非常快，极短的时间内就可完成，一般只有 $10^{-15} \sim 10^{-12}$ s，所以电流迅速衰减为零。电介质内部的电子或离子在直流电压作用下产生位移，也称弹性极化。

(2) 吸收电流 i_a 。它是夹层极化和偶极子（转向）极化形成的电流，这两种极化属于缓慢极化，所以吸收电流衰减得很慢，它相当于电源经电阻向电容器 C_a 充电的过程，一般需要几十秒、几分钟甚至几十分钟。

(3) 泄漏电流 i_R 。也称传导电流、电导电流。它是由绝缘介质中的极少数载流子（主要是离子）定向移动所形成的，在加压后瞬间趋于定值，与加压时间无关。

i_c 、 i_a 、 i_R 三个电流合成的总电流 i 称为吸收电流。绝缘电阻随时间而变化的特性称为介质的吸收特性。

绝缘介质在施加直流电压后，常有明显的电流随时间衰减的现象，这种衰减可以延续到几秒、几十秒甚至更长的时间。特别是测量大容量电气设备的绝缘电阻时，通常都可以看到绝缘电阻随测量时间的增加而增加，这种现象称为介质的吸收现象。

2. 电介质电阻的温度系数

(1) 电介质内部总有一些联系较弱的带电质点（或叫离子），它们在电场作用下做有规律的运动而形成电流，所以任何电介质都有一定的电导。电介质的电导是离子性的，温度越高，电介质中离子运动越强，容易改变原有被束缚状态，在电场中运动的离子数和离子运动速度都增加，电导随温度上升而增大，使电阻下降，所以电介质电阻（通常称为绝缘电阻）具有负的温度系数。

(2) 一般绝缘介质内部或多或少地含有少量的水分和溶解于水分中的杂质，在温度升高时，水分因受热而膨胀，溶解于水分中的杂质也会增多，使导电性增强，其绝缘电阻明显下降，所以在电试规程中对某些试验项目的设备温度有一定的要求。

三、电介质的损耗

1. 介质损耗的基本概念

交流电压作用下会引起介质内部的电荷运动，电荷运动就会消耗能量，通常把消耗的能量叫做介质损耗。

所消耗的能量表现为温度升高（简称温升），温度过高会使介质变质、老化、变脆、开裂、干枯和烧焦等，失去绝缘作用。所以，介质损耗是衡量介质优劣的一项重要指标。

2. 产生介质损耗的原因

产生介质损耗的原因主要有：

(1) 由介质极化所引起的损耗。在电压作用下，介质发生极化时，由于电荷运动产生摩擦而引起的能量损耗。在交流电场下，由于电场不断地变化，这种损耗的分量比较大。

(2) 由泄漏电流所引起的损耗。在电压作用下，泄漏电流使介质发热所消耗的能量。如果绝缘受潮，泄漏电流显著增大，这种损耗也将显著增加。

(3) 游离和局部放电引起的损耗。在交流电压作用下，绝缘介质中的气隙、气泡中

会产生电晕损耗，在液体和固体介质中会产生局部放电，引起损耗。

3. 介质损耗角正切值 ($\tan\delta$)

介质损耗角正切值称为介质损耗因数，它是介质的有功电流分量 I_R 与无功电流分量 I_C 的比值，即：

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

根据绝缘介质在交流电压作用下的等值电路图及相量图，推导出介质损耗和各物理量间的关系，如图 1-8 所示。

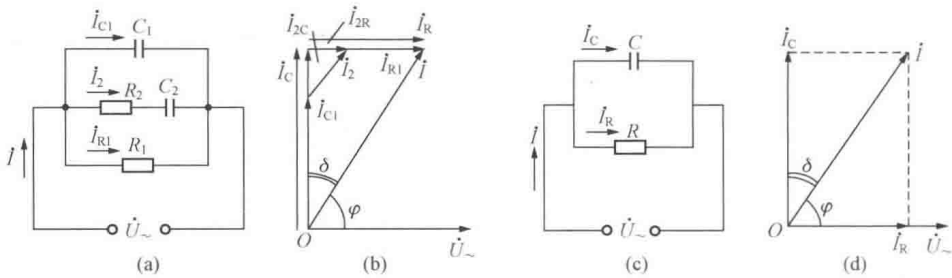


图 1-8 介质在交流电压作用下的等值电路图及相量图
 (a) 电介质的等值电路图；(b) 介质在交流电压作用下的相量图；
 (c) 本图 (a) 的简化图；(d) 本图 (b) 的简化图

在交流电力系统中的电气设备，其绝缘（电介质）大多数都可以看成由一个电阻和一个电容并联而成的等值电路，如图 1-8 (c) 所示。在回路中，经过电阻 R 的电流 I_R 与电源的交流电压 \dot{U} 同相位，而经过电容 C 的电流 I_C 超前交流电压 \dot{U} 90° ，如图 1-8 (d) 所示。图中流过电阻的电流 I_R 为有功分量，流入电容的电流 I_C 为无功分量，无功分量不消耗能量，所以计算能量损耗时，损耗的功率 $P = UI_R$ ，由于 I_R 比 I_C 小得多，通常测得的电流 I 中主要是 I_C ，而 I_R 很难直接测量，由于 $I_R/I_C = \tan\delta$ ，所以 $P = UI_C \tan\delta = \omega CU^2 \tan\delta$ ，其中 $I_C = \omega CU$ ， $\omega = 2\pi f$ ， f 为试验电源频率，工频交流频率 $f = 50\text{Hz}$ ， $1/\omega C$ 为容抗，因此当施加电压 U 和频率 f 不变时，能量损耗与 $\tan\delta$ 成正比， $\tan\delta$ 大，意味着绝缘趋于劣化。当 δ 很小时， $\delta \approx \sin\delta \approx \tan\delta$ 。

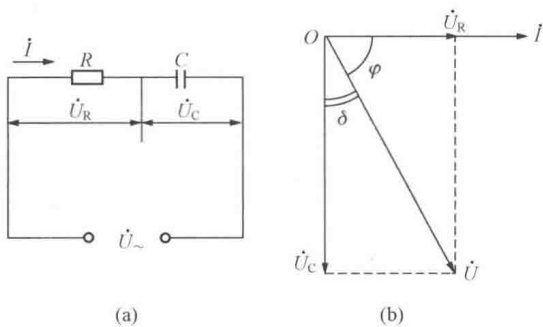


图 1-9 电介质串联等值电路及相量图
 (a) 电介质串联等值电路图；(b) 相量图

电气设备的绝缘也可以用串联等值电路来代替，如图 1-9 所示。

4. 介质损耗与温度、频率、电压的关系

(1) 介质损耗与温度的关系。电力设备中固体绝缘的介质损耗一般是随温度升高而增大，这是因为温度升高后，介质中的离子数增多，绝缘电阻降低，泄漏电流增大，而电容变化却很小，所以介质损耗增大。

绝缘材料种类很多，各种绝缘材料的性质千差万别，温度的影响也各不相同。如极性介质（有松香、纤维素、胶木、聚氯乙烯、沥青等）的损耗由电导损耗和极化损耗组成，电导损耗随温度升高而增大，而极化损耗开始在温度较低时段随温度升高而增大，温度再升高时极化减弱（即在这一时段极化减弱，引起介损减小超过电导上升引起的介损增加），如果温度继续升高，在这一时段电导损耗的增加超过极化损耗的减小，则介质损耗又随温度上升而增大，如图 1-10 和图 1-11 所示。

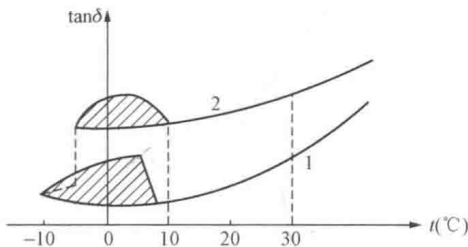


图 1-10 固体介质损耗因数与温度的关系
1—干燥的绝缘；2—受潮的绝缘

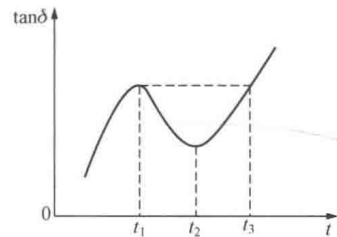


图 1-11 极性介质损耗与温度的关系

图 1-10 中 $-10 \sim 10^\circ\text{C}$ 之间为不稳定测量区， $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 之间为稳定测量区。

(2) 介质损耗与频率的关系。绝缘介质的介质损耗与频率的关系不是简单的线性关系， $P = \omega C U^2 \tan \delta$ 。

频率增高时，介质中离子反复极化的速度增大，极化损耗也增大。

频率过高时，介质极化不完全，极性分子来不及转向，极化损耗反而减小，所以介质损耗随频率升高而有一个极大值，如图 1-12 所示。

(3) 介损损耗与电压的关系。良好的绝缘介损损耗不随电压升高而明显增加，若绝缘受潮或内部有缺陷，则其介质损耗将随试验电压的升高而明显增加。几种典型示例如图 1-13 所示。

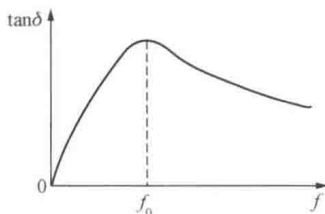


图 1-12 介质损耗与频率的关系曲线示意图

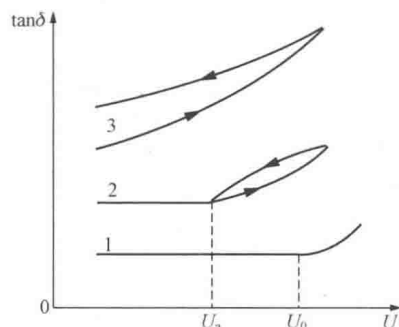


图 1-13 介损与电压的关系曲线示意图

如图 1-13 所示，曲线 1 是良好的绝缘状况。其介质损耗在某一电压以下几乎不随电压升高而增加，仅在电压很高时才略有增加。

曲线 2 为绝缘中存在气隙的示例。在试验电压未达到气体起始游离之前，介质损耗保持稳定，当电压升高至气隙游离后，介质损耗增大，曲线出现转折，当逐步降压测量时，由于气体放电随时间和电压的增加而增强，故介质损耗高于升压时相同电压下的值，直至气隙放电终止。

曲线 3 是受潮绝缘的状况。在较低电压下，介质损耗已较大，随电压的升高介质损耗继续增大，在逐步降压时，由于介质损耗较大，已使介质发热温度升高，所以介质损耗不能与原数值相重合，而以高于升压时的数值下降，形成开口环状曲线。

四、绝缘的老化与击穿

1. 绝缘老化的概念

电气设备的绝缘介质在运行中不断受到电的、热的、化学的、机械的作用，其绝缘性能会随着运行时间的增长而逐渐变差，性能变差之后不能恢复到原来的状态，这种现象称为绝缘老化。

绝缘劣化与老化是有区别的，所谓绝缘劣化是指介质在电场、热、化学、机械力、大气条件等因素的作用下，其绝缘性能变劣的现象。绝缘的劣化有的是可逆的，有的是不可逆的。例如，绝缘受潮后，其绝缘性能下降，但进行干燥后，又恢复原有的绝缘性能，常见的有油浸式电力变压器和油断路器应进行定期或不定期检修就是一例。这种劣化不属于老化，不可逆的劣化称为老化。

2. 绝缘老化的原因

绝缘老化的主要原因有：

(1) 电老化。绝缘材料在长期的电压作用下，在电场强度比较集中的部位，如导体的棱角、边缘处附近的气体会发生局部放电，绝缘内部的空隙和气泡，由于电场强度集中，也会发生局部放电，局部放电使其邻近绝缘材料受到腐蚀，严重的会发展到干枯、烧焦而变质，甚至产生电击穿。

(2) 热老化。电气设备中的绝缘材料在长期负荷电流的作用下，耐受高温的作用，如电力变压器、电力电缆、电力电容器、发电机等，导致绝缘材料的热分解、氧化、变质、电气性能下降，并且，过热加速了绝缘材料的化学反应，导致绝缘材料硬化和脆化，甚至发生热击穿。

(3) 机械老化。绝缘材料在运行中常受到机械力的作用，而使绝缘老化或损坏。如发电机的云母绝缘，受机械振动的作用，使线圈绝缘产生微小的裂纹或空隙；绝缘子在机械力的作用下发生裂纹；电力变压器近区短路，受到电动力的作用而损坏等。

(4) 环境因素的影响。大自然中日光、紫外线、风霜雨雪的侵蚀，水分、温度、化学气体、环境污染以及微生物（如霉菌）等的作用，使绝缘材料的老化加速，绝缘寿命缩短。如严重的雪灾事故，平时的雾闪、污闪事故等。

3. 电介质的击穿

施加于电介质两端的电压如果不断增加，当电压达到一定数值时，通过电介质的电流急剧增大，电介质完全失去了绝缘性能，这种现象称为电介质击穿。

击穿可分为电击穿、热击穿和电化击穿，但最终还是通过电击穿表示出来。

第二节 过电压和过电压保护

一、过电压的产生和分类

电气设备在运行中需要承受正常的工作电压，但是由于某种原因，如雷电或电网内部的操作、故障等，常产生异常的电压升高，这种电压升高称为过电压。过电压可分为雷电过电压和内部过电压。

1. 雷电过电压

雷电引起的过电压，叫做雷电过电压，又称大气过电压、外部过电压、外过电压。在高温无风的天气，大地上和海洋的水分被太阳强烈照射之后，蒸发成水汽和空气混合在一起，受热膨胀，形成一股潮湿的气流在空中往上升。水汽到高空遇到冷空气凝成水滴，小水滴相互碰撞合并，体积大的、重的水滴往下掉落，就变成雨（俗称阵雨或雷阵雨），而轻的还飘浮在高空的小水滴叫做云。实验证明，大水滴在往下掉落时，由于相互摩擦，就产生静电，容易游离的负电荷从水滴表面脱离，并附在轻浮的水沫上，留在云堆里构成带负电的乌云，而失去负电荷带正电荷的雨滴往下落到地面。所以，雷雨云聚集了大量的负电荷，并与地面构成一个很大的静电场，由于静电感应的作用，将同时使另外一些云堆和地面上的物体感应出正电荷来，它们之间好像构成了一个很大的“电容器”，当云堆的负电荷和被感应而生的正电荷积聚得越来越多，云堆与云堆或云堆与地面物体之间的电场强度达到 3000kV/m （即 30kV/cm ）以上时，夹在当中的空气被击穿，形成放电，这就是打雷，放电时产生的电火花，就是闪电，放电时正负电荷中和发出的爆炸声就是雷声，这是主放电阶段。主放电过后，常产生重复雷击，这是因为第一次主放电后，主放电雷云变为地电位，和其他雷云之间的电位差增大了，容易发生重复雷击，重复雷电流较主放电电流小。

2. 内过电压

在电力系统中，由于断路器的正常操作、系统设备发生故障或其他原因使系统参数发生变化，引起电力系统内部储存在电感元件中的磁场能量和储存在电容元件中的静电场能量发生转换，在此转换的过渡过程中出现的异常电压升高叫做内过电压，或内部过电压。

内过电压一般可分为操作过电压和暂态过电压两类。

(1) 操作过电压。由于电力系统中断路器的正常操作或切除故障操作的瞬间，在系统的相与地之间、相与相之间以及断路器断口间所产生的过电压，叫做操作过电压。主要原因是储存在电感元件中的磁场能量与储存在电容元件中的静电场能量产生转换、过渡的振荡过程，从而出现过电压。

操作过电压的特点是持续时间通常比雷电过电压长，比暂态过电压短，一般在数百微秒到 100ms 之间，并且衰减很快。

电力系统发生操作过电压的种类很多，主要有以下几种类型：

1) 切断电感性负载而引起的操作过电压，如切断空载变压器、消弧线圈、电抗器或电动机等引起的过电压。

2) 切断电容性负载而引起的操作过电压，如切断空载长线路、电缆线路或电容器组等引起的过电压。

3) 合上空载线路（包括重合闸）而引起的操作过电压，如具有残余电压的系统在重合闸过程中再次充电而引起的重合闸操作过电压。

4) 间歇性弧光接地、电力系统因负荷突变或系统解列、甩负荷而引起的操作过电压。在这种情况下，系统以操作过电压开始，接着还出现持续时间较长的暂态过电压。

(2) 暂态过电压。又称暂时过电压、短时过电压、工频电压升高。它指的是由于电力系统接地故障，切断负荷或谐振，在系统某处引起的相对地之间或相对相之间的电压升高。

它的特点是持续时间比较长，衰减较慢，持续时间为 0.1~60s，甚至更长。暂态过电压的幅值随系统接地方式而异，一般接地电阻较小的系统，暂态过电压倍数就低。

暂态过电压的产生原因主要有以下几种：

1) 接地故障。它包括：

a. 单相接地故障时，非故障相出现对地电压升高；

b. 在中性点不直接接地系统中，流过故障点的电容电流往往会形成不稳定电弧，电弧时熄时现，使系统内的电磁能量时充时放，形成振荡，于是故障相和非故障相都可能产生电压升高；

c. 在中性点经消弧线圈接地系统中，如果处在欠补偿工作状态时，也会发生故障相及非故障相的电压升高。

2) 负荷突变。系统突然失去负荷时，由于输电线路的电容电流对发电机有励磁作用，而发电机的调速设备有惰性，来不及调速，于是使发电机的转速突然增加，电动势和频率上升，导致系统电压升高。

3) 谐振。系统中的电力设备，如变压器、电抗器、互感器、消弧线圈、线路导线等，都带有电感。系统中还含有许多电容，如导线对地和导线相间电容、补偿用的并联或串联电容器、电力设备的杂散电容等。这些电感和电容在系统中构成各种振荡回路，当系统进行操作或发生故障时，上述振荡回路的固有频率恰好与电源频率相等（或相近），将产生串联谐振，系统电压将会升高。

内过电压的峰值与系统最高运行相电压的峰值之比，称为内过电压倍数，用 K 来表示。则： $K = U_m / U_{\text{fm}}$ ，式中 U_m 表示内过电压峰值， U_{fm} 表示系统最高运行相电压的峰值。

K 值的大小随系统中设备的元件参数、电网结构、中性点运行方式、故障性质以及断路器特性等因素的不同而异。内过电压倍数见表 1-1。

表 1-1 内过电压倍数表

过电压性质	操作及故障类别	内过电压倍数 (倍)
操作过电压中	切断电感性负载	1~4.0
	合闸空载线路 (包括重合闸)	1~3.5
	切断空载线路	1~3.5
	合空载变压器	1~2.0
暂态过电压中	单相接地故障	1.1~1.3
	甩负荷	1.2~1.3
	电弧接地	1~3.5
	谐振	1~3.5

我国电力系统绝缘配合要求内过电压倍数不大于表 1-2 所示数值。

表 1-2 我国电力系统绝缘配合要求内过电压倍数不大于下表值

系统电压等级 (kV)	500	330	110~220	60 及以下
内过电压倍数 K	2	2.75	3	4

二、雷电过电压的危害及防止对策

1. 雷电过电压的危害性

由于雷电的瞬时能量非常大,雷电压可高达几百万伏,雷电流幅值可高达几百千安,时间很短,以微秒计。雷电过电压对电气设备或线路最危险的是直击雷过电压,其峰值很高,破坏性很强,例如在输电线路可能引起绝缘子闪络,在变电站可能使电气设备绝缘发生闪络或损坏,同时它又以波(即雷电波)的形式沿着导体到处传播,雷电波入侵电气设备也会损坏设备绝缘。因此,电力系统除了要防止直击雷之外,还要有防止雷电波入侵的措施。

感应过电压的峰值只有极少数达到 50 万~60 万 V,通常仅对 10kV 及以下电网的电气设备绝缘造成危害。

2. 雷电过电压的防止对策

(1) 输电线路的防雷措施。

1) 架设避雷线。避雷线又叫架空地线,它的作用是雷直接击在避雷线上,避免导线遭受直接雷击。此外,它还对雷电流有分流作用,使塔(杆)顶电位下降。

2) 加强绝缘。增加绝缘子串的片数,即使雷落在线路上,绝缘子串一般也不会发生闪络。

3) 降低杆塔的接地电阻。使雷电击中避雷线或杆塔后,雷电流泄放入大地时,不致引起电压升得太高,导致绝缘遭受反击而闪络。

4) 装设避雷器,限制过电压。

5) 采用消弧线圈接地方式。采用消弧线圈接地,使绝大多数单相着雷闪络的接地故障电流能被消弧线圈所熄弧,故障被自动消除。

6) 装设自动重合闸。由于雷击造成的外绝缘闪络大多能在断路器跳闸后自行恢复