

电力工业学校教材

高压电器绝缘及测试

长春电力学校 徐一凡 主编

China Electric Power Press

中国电力出版社

TM85
X831

TM85
X831

电力工业学校教材

高压电气绝缘及测试

长春电力学校 徐一凡 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书系电力工业学校电气类专业教材之一。

全书内容包括高压绝缘的基本理论、高压电气设备的绝缘结构与测试方法、电力系统过电压及防护常识三部分。

本书可供发电厂及电力系统运行专业、电气检修专业四年、五年学制学生使用，也可作为电力系统高压电气试验、电气检修及相关专业技术工人的培训教材，以及电力系统和电工制造部门工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压电气绝缘及测试/徐一凡主编.-北京:中国电力出版社,
1999.10

电力工业学校教材

ISBN 7-5083-0129-3

I. 高… I. 徐… III. ①高电压绝缘技术-专业学校-教材
②高电压绝缘技术-测试-专业学校-教材 IV. TM85

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 43783 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 4 月第一版 2000 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.25 印张 181 千字

印数 0001—4050 册 定价 13.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

序

近年来，电力职业技术教育在结构改革过程中，创建了将中专和技校融为一体的新型办学模式——电力工业学校。与此同时，进行了专业设置、教学计划、课程体系等一系列教学改革。教材作为教与学双边活动过程中不可缺的信息载体，其改革和建设必然是教学改革的重要部分。为了巩固教育、教学改革已经取得的成果，推动改革持续深入发展，满足电力工业学校教学工作的急需，并促进教学质量不断提高，从1996年底开始，便着手组织力量进行教材改革的研究、探索和教材建设的安排部署，先后成立了电力工业学校教材建设研究课题组，制订了《关于电力工业学校教材建设的若干意见》和《电力工业学校教材出版、推荐、评估暂行办法》，组建了电力工业学校教材编审委员会，并于1997年末在电力职业技术教育委员会各教学研究会和网、省电力公司教育部门推荐的基础上，经过审议、遴选确定了此批电力工业学校一般教材的出版计划。

这批教材以明确的岗位和职业需要为依据，以能力培养为主线，以综合开发学生能力为目标，不片面追求学科体系的完整性，而强调贴近生产实际和工作实际，使理论同实践紧密结合，传授知识同培训技能紧密结合；精选教材内容，删繁就简，返璞归真，充实技术性、工艺性、实用性的内容，而且体现先进性和科学性的原则；注重定性分析，阐明物理意义和应用方法，简化某些论证，减少不必要的数学推导；在内容的编排、组合上，一是最大限度地做到模块化，增强教材使用的灵活性，便于不同教学阶段，不同专业采用。二是使理论阐述同实践指导有机结合，便于在教学过程中贯穿能力培养这一主线，采用以实际训练为轴心，把讲授、实验、实习融为一体的教学方式；适应各校功能延伸的新要求，兼顾各种职业培训对教材的需要。

这批教材的出版只是整个教材改革和建设的阶段性成果，仍需再接再厉，继续深化教材改革，推进教材建设。预期经过几年的努力，会形成一套具有电力职业技术教育特色，以职业能力培养为主线，门类比较齐全，形式比较多样，并能与其他教育相衔接，兼顾职工培训需要的教材体系。

中国电力企业联合会教育培训部
电力职业技术教育委员会电气类专业教学研究会

2000年3月

ABE 20/05

前 言

随着我国电力工业的发展，机组参数、系统电压等级的逐步提高，电气设备的绝缘强度、系统过电压的限制水平对系统安全经济运行的影响日见突出。据统计，高压电网的各类故障多是由于高压电气设备绝缘的损坏所致，而导致绝缘损坏的主要原因是系统过电压，为此了解绝缘特性，掌握绝缘状况，不断提高电气设备绝缘水平，降低系统过电压是安全经济运行的根本保证。

本书包括高电压绝缘的基本理论、高压电气设备的绝缘结构与测试方法、电力系统过电压及防护常识三部分共七章，由徐一凡任主编。其中，第一、二、三章由哈尔滨电力学校刘伟编写，第四、五、六、七章由长春电力学校徐一凡编写。全书由重庆电力高级技工学校纪忠华担任主审，长春电力工业学校毕红焱老师为本书提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于水平有限，书中不妥及错误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

1999年9月

目 录

序

前言

第一章 电介质的极化、电导和损耗	1
第一节 电介质的极化	1
第二节 电介质的电导	5
第三节 电介质的损耗	7
第二章 气体放电	10
第一节 气体放电的基础知识	10
第二节 不同条件下的气体放电	14
第三节 提高气体击穿电压的措施	20
第四节 沿面放电	26
第三章 液体、固体介质的击穿	29
第一节 液体介质的击穿	29
第二节 固体介质的击穿	30
第四章 高压电气设备绝缘	33
第一节 电力电容器	33
第二节 电力电缆	36
第三节 高压套管	41
第四节 电流互感器	45
第五节 电力变压器	47
第六节 高压电机	56
第五章 高压电气设备绝缘测试	62
第一节 概述	62
第二节 绝缘电阻的测试	63
第三节 介质损失角正切 $\tan\delta$ 的测试	66
第四节 泄漏电流的测量及直流耐压	73
第五节 交流耐压试验	76
第六节 局部放电测试	79
第七节 绝缘油的电气试验和气相色谱分析	82
第八节 在线监测	89
第六章 雷电及防雷	93
第一节 雷电的基本知识	93
第二节 防雷器具	97
第三节 电力系统的防雷措施	105

第七章 内部过电压简介	113
第一节 工频电压升高(工频过电压)	113
第二节 操作过电压	115
第三节 电磁式电压互感器引起的铁磁谐振过电压	117
附表 A 直流耐压试验电压的确定	121
附表 B 高压电气设备绝缘的工频耐压试验电压标准	122
参考文献	123

第一章 电介质的极化、电导和损耗

电介质又称绝缘材料，简称绝缘，是电工中应用最广泛的材料之一。

电力系统和电气设备中常用气体作绝缘介质。例如高压输电线路的带电导体裸露于空气中就是利用空气的绝缘性能。此外，电气设备中广泛采用液体和固体介质作为绝缘材料，固体绝缘材料还要作为导体的支撑固定物，或者作为极间屏障和覆盖层。液体介质除作为绝缘外，还作为载流导体和导磁材料（铁芯）的冷却介质，在开关电器中还用液体介质来灭弧。本章着重介绍电介质的电气性能以及影响其绝缘性能的各种因素。

第一节 电介质的极化

一、极化现象和相对介电常数

先看实验现象。如图 1-1 所示将平板电容器放在密闭容器内，将极间抽成真空，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_0 ，如图 1-1 (a) 所示。然后把一块固体介质（厚度与极间距离相等）放在极板之间，施加同样的电压，就可发现极板上的电荷量增加到 $Q_0 + Q'$ ，如图 1-1 (b) 所示。这种电介质在外加电场作用下，介质中原来彼此中和的正、负电荷产生位移，形成电矩，使介质表面出现了束缚电荷的现象，称电介质的极化。平板电容器在真空中的电容量为

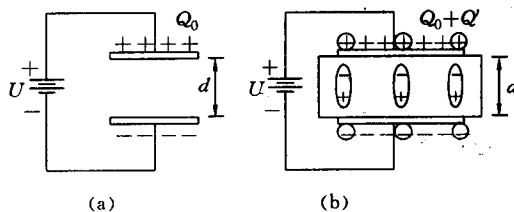


图 1-1 介质极化现象
(a) 极间为真空；(b) 极间为介质

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

式中 A ——极板面积， m^2 ；

d ——极间距离， m ；

ϵ_0 ——真空的介电常数， $\epsilon_0 = 1/36\pi \times 10^{-9} F/m$ 。

极间引入固体介质后，由于介质的极化，造成电容量增大。

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

式中 ϵ ——介质的介电常数。

所以

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

ϵ_r 称为介质的相对介电常数。各种气体的 ϵ_r 均接近于 1，常用的液体、固体介质的 ϵ_r 则

各不相同，大多数在 2~6 之间，而且各种介质的 ϵ_r 与温度、电源频率的关系也不一致。

极化种类较多，基本形式有电子式极化、离子式极化和偶极子式极化三种。

二、极化的基本形式及特点

(一) 电子式极化

如图 1-2 所示，当原子中的电子轨道受到外电场 E 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，其极化程度与正负电荷作用中心间的距离 d 成正比，且随着外电场的增强而增大。

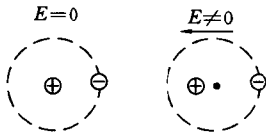


图 1-2 电子式极化

电子式极化存在于一切气体、液体及固体介质中。这种极化的特点为：

(1) 极化过程极快（因电子质量极小），约为 10^{-15} s，所以这种极化在各种频率范围均能产生，即其 ϵ_r 不随频率而变化；

(2) 具有弹性，外电场除去后，依靠正负电荷间的吸引力，其作用中心又会重合而呈现中性，所以这种极化没有损耗。

温度对电子式极化影响不大。当温度升高时，电子与原子核的结合力减弱，使极化略有加强。同时，温度升高时介质略有膨胀，单位体积内的分子数减少，引起 ϵ_r 略有下降。后者略占优势，即 ϵ_r 具有不大的负温度系数。

(二) 离子式极化

固体无机化合物多属离子式结构，如云母、陶瓷材料等。无外电场时，正负离子作用中心是重合的，故不呈现极性。在外电场作用下，正负离子向相应电极偏移，使整个介质呈现极性，如图 1-3 所示。离子式极化也属弹性极化，几乎没有损耗；极化过程也很快，不超过 10^{-13} s，所以在使用的频率范围内可认为 ϵ_r 与频率无关。

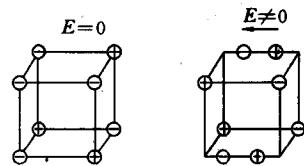


图 1-3 离子式极化

温度对离子式极化的影响，也存在相反两种因素，即离子间结合力随温度的升高而降低，使极化程度增加；但离子的密度随温度的升高而减小，又使极化程度降低，其中以第一种因素影响较大，所以 ϵ_r 稍具有正温度系数。

(三) 偶极子式极化

偶极子是一种特殊的分子，它的正负电荷作用中心不相重合，好像分子的一端带正电荷，另一端带负电荷似的，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称为极性电介质，例如蓖麻油、氯化联苯、橡胶、胶木、纤维素等均是常用的极性绝缘材料。

当没有外电场作用时单个偶极子虽然具有极性，但各个偶极子均处于不停的热运动之中，分布非常混乱，因此整个介质对外并不呈现极性，如图 1-4 (a) 所示。在电场作用下，原来混乱分布的极性分子顺电场方向排列，如图 1-4 (b) 所示，因而对外显示出极性。

偶极子式极化是非弹性的，极化时消耗的电场能量在复原时不可能收回（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粘性的媒质中旋转需克服阻力一样）；极化所需要的时间也较长，约 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ s。因此极性介质的 ϵ_r 与电源频率有较大的关系，频

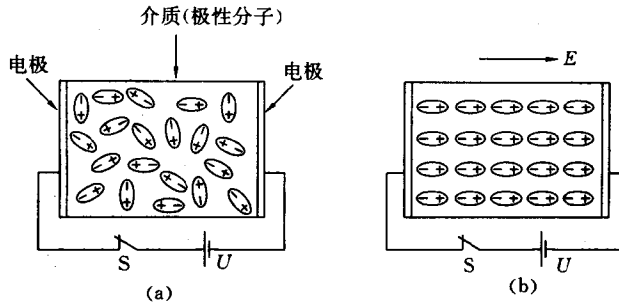


图 1-4 偶极子式极化

(a) 无外电场时; (b) 有外电场时

率很高时偶极子来不及转动, 因而其 ϵ_r 减小。

温度对极性介质的 ϵ_r 有很大的影响, 温度升高时, 分子间联系减弱使极化加强, 但同时分子热运动加剧, 妨碍它们沿电场方向取向, 这又使极化减弱, 所以极性电介质的 ϵ_r 最初随温度的升高而增加, 以后, 当热运动变得较强烈时, ϵ_r 又随温度的升高而减小。

(四) 夹层式极化

以上是单一电介质的情况。实际上高压设备的绝缘往往由几种不同的材料组成, 这时会产生“夹层式极化”现象。这种极化的过程特别缓慢, 而且伴随有能量损耗。

为了分析简便, 下面以平行平板电极间的双层介质(每层介质的面积及厚度均相等)为例, 来分析夹层介质极化现象, 如图 1-5 所示。

在 S 刚合闸的瞬间, 两层介质之间的电压分配与各层的电容成反比(突然合闸的瞬间, 相当于加很高频率的电压), 即

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow 0} = \frac{C_2}{C_1}$$

到达稳态的情况时各层上分到的电压与电导 g 成反比。即

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{g_2}{g_1}$$

因为 $C = \frac{\epsilon A}{d}$ 而 $g = \frac{\gamma A}{d}$

所以 $\frac{C_1}{g_1} = \frac{\epsilon_1}{\gamma_1}$ $\frac{C_2}{g_2} = \frac{\epsilon_2}{\gamma_2}$

当 $\epsilon_1 = \epsilon_2, \gamma_1 = \gamma_2$ 时, $\frac{C_1}{g_1} = \frac{C_2}{g_2}$ 。这样可得

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=0} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty}$$

也就是说如果介质均匀, 则合闸后两层介质之间不会发生电荷重新分配的过程。

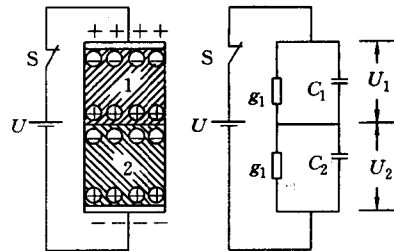


图 1-5 夹层介质极化现象

如果介质不均匀, 即 $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$, $\gamma_1 \neq \gamma_2$, 则 $\frac{C_1}{C_2} \neq \frac{g_1}{g_2}$, 故 $\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} \neq \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty}$, 所以合闸后, 两层介质之间有一个电压重新分配的过程, 也即 C_1 、 C_2 上的电荷要重新分配。

设 $C_1 > C_2$ 而 $g_1 < g_2$, 则 $t=0$ 时, $U_2 > U_1$; $t \rightarrow \infty$, $U_1 > U_2$, 即 $t=0$ 以后, U_2 逐渐下降而 U_1 逐渐增大, 也即 C_2 上的一部分电荷要通过 g_2 放掉, 而 C_1 则要从电源再吸收一部分电荷, 称为吸收电荷。所以夹层的存在使整个介质的等值电容增大, 因而称为夹层式极化。

应该注意, 夹层界面上电荷的堆积是通过介质电导 g 完成的。高压绝缘介质的电导通常都是很小的, 所以, 这种极化过程将是很缓慢的。它的形成时间从几十分之一秒到几分钟, 甚至有长达几小时的。因此, 这种性质的极化只有在低频时才有意义。

显然, 这种极化伴随着能量损耗。

三、常用电介质的介电常数

几种电介质的介电常数见表 1-1。

表 1-1 几种电介质的介电常数

材料类别	名称	ϵ_r (工频, 20°C)	材料类别	名称	ϵ_r (工频, 20°C)		
气体介质 (标准大气条件)	空气	1.00058	固体 · 介质	石蜡	2.0~2.5		
液体 介质	中性或弱极性	变压器油		2.2~2.5	聚苯乙烯	2.5~2.6	
		硅有机液体		2.2~2.8	聚四氟乙烯	2.0~2.2	
	极性	蓖麻油		4.5	松香	2.5~2.6	
		氯化联苯		4.6~5.2	沥青	2.6~2.7	
	强极性	丙酮		22	纤维素 胶木	纤维素	6.5
		酒精		33		聚氯乙稀	4.5
	水	81		离子性	云母	5~7	
					电瓷	5.5~6.5	

四、讨论电介质极化在工程实际中的意义

(1) 选择电容器的绝缘材料时, 一方面要注意电气强度, 另一方面则希望 ϵ_r 大些, 这样电容器单位容量的体积和质量便可减小。但其他绝缘结构则往往希望材料的 ϵ_r 小些。例如电缆的绝缘材料, ϵ_r 小可使工作时充电电流减小。

(2) 一般在高压设备中常是几种绝缘材料组合使用, 这种情况下更要注意各材料 ϵ_r 值的配合。

当数种绝缘材料合用时, 不同材料介电常数的比值关系, 常影响整个绝缘系统中电压分布, 使外加电压的大部分常为介电常数小的材料所负担, 因而降低了整个设备的绝缘水

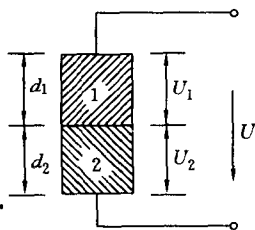


图 1-6 双层电介质

平。如图 1-6 所示的双层电介质, 设有厚度为 d_1 、 d_2 的两种绝缘材料, 介电常数分别为 ϵ_1 、 ϵ_2 , 电容量分别为 C_1 、 C_2 。当施以交流电压 U 后, 若略去材料的电导不计, 则有

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1 d_2}$$

$$U_1 + U_2 = U$$

由此可得

$$U_1 = \frac{\epsilon_2 d_1 U}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \quad U_2 = \frac{\epsilon_1 d_2 U}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}$$

因为

$$E_1 d_1 = U_1 \quad E_2 d_2 = U_2$$

所以

$$E_1 = \frac{\epsilon_2 U}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \quad E_2 = \frac{\epsilon_1 U}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

若 $\epsilon_1 < \epsilon_2$, 则 $E_1 > E_2$, 即介电常数小的材料承受较大的电场强度; 反之, 介电常数大的材料承受较小的电场强度。如果有气泡存在于绝缘材料中, 气体的介电常数小, 其上负担电压高, 而电气强度又低, 将使其先行游离, 使整体绝缘能力降低。

(3) 绝缘的介质损耗与极化形式有关, 而介质损耗是影响绝缘老化和热击穿的一个重要因素。

(4) 夹层介质极化现象在绝缘预防性试验中, 由于水的 ϵ_r 很大, 可通过测量材料 ϵ_r 的变化来判断是否受潮。在使用电容器等容量很大的设备时, 必须特别注意吸收电荷对人身安全的威胁。

第二节 电介质的电导

一、基本概念

1. 电介质的电导的概念

任何电介质都不可能是理想的绝缘体, 内部总有一些联系较弱的带电质点存在。在电场作用下, 它们定向运动构成电流, 因而任何电介质都具有一定的电导。

2. 泄漏电流和绝缘电阻

加直流电压 U 于介质时, 初始瞬间由于各种极化过程的存在, 流过介质的电流是随时间变化的, 待一定时间后, 极化过程结束, 流过介质的电流趋于一定值 I_g (泄漏电流), 与此相对应的电阻称为绝缘电阻 R_∞ , 可用下式求得

$$R_\infty = \frac{U}{I_g}$$

对固体介质, 它应包括绝缘的体积绝缘电阻与表面绝缘电阻两部分。如果要把绝缘的体积泄漏与表面泄漏分开, 应在测量回路中加辅助电极, 使表面泄漏不通过测量表计。

图 1-7 给出了直流电压作用下流过介质的电流变化情况。图中, i_1 为电容电流分量, 它是由加压初瞬介质中的电子式、离子式极化过程引起的, 并与电极间的几何尺寸有关, i_1 存在时间很短, 可认为是瞬间完成的; i_2 为吸收电流分量, 是由偶极子式极化或夹层式极化所引起, 其存在时间较长, 约为几分或数十分钟; I_g 是泄漏电流 (或称电导电流), 它与绝缘电阻相对应, 不随时间变化。于是介质中流过的总电流为

$$i = i_1 + i_2 + I_g$$

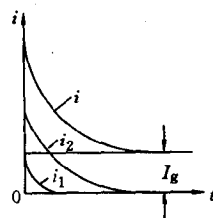


图 1-7 直流电压下流过电介质的电流

3. 介质的电导与金属电导的主要区别

介质电导（绝缘电阻的倒数）与金属电导不同，它比金属电导小得多，且为离子性（金属电导是电子电导）。温度愈高，参与漏导的离子（介质本身或杂质的）愈多，即电导电流愈大，所以介质电阻具有负温度系数（金属电阻温度系数是正值）。

二、不同电介质的电导

1. 气体电介质的电导

在气体电介质中，当外加电场强度低于击穿场强时，介质中流过的电流非常小，可不必考虑。

2. 液体电介质的电导

构成液体介质的电导主要有两种。一是由液体本身的分子和杂质的分子离解为离子；另一种是液体中的胶体质点（如变压器中悬浮的小水滴），吸收电荷后变成带电质点。

中性液体的离子电导主要是由杂质离子构成，极性液体除杂质外还有本身分子形成的离子，故电导率较高。如前所述，水和酒精等强极性液体本身电导已很大，不能作为绝缘材料，但在工程中，介质总不免含有一些水分，它在介质中起非常有害的影响。

影响液体介质电导的主要因素是杂质与温度。

3. 固体电介质的电导

固体电介质的电导分为体积电导与表面电导。体积电导由本身离子和杂质离子构成，其本身离子电导很小，故一般在温度不太高时，杂质电导起主要作用。杂质的形成可以是人为的为一定目的而加入的某种成分，有些是外界侵入的（如水分）。

固体介质的表面在干燥、清洁时，其电导很小，故其表面电导主要是附着于介质表面的水分与其他污物引起。此外也与介质本身的性质有关，对中性、弱极性介质，水分在其上不能形成连续的水珠，故表面电阻率较高（硅有机物、石蜡等）。有的介质部分溶于水，其电阻率较小（大部分玻璃属此类），且与温度有关。对多孔性介质，其表面电阻、体积电阻均小（纤维材料即属此类）。

对一些防潮性差的介质，要采取表面处理，以增大其表面电阻。如绝缘子表面涂硅有机物等。

三、温度对介质电导的影响

温度升高，体积膨胀，离子的运动速度加快，电导增大，同时热运动加速，离子摆脱分子束缚成为自由离子形成电导的可能性加大。因此，测量高压电气设备的绝缘电阻或泄漏电流时，需同时记录温度。

四、讨论绝缘电阻的意义

(1) 在绝缘预防性试验中，以绝缘电阻值的高低判断绝缘的优劣或是否受潮。

(2) 多层介质在直流电压下，电压分布与电导成反比，故设计直流设备时要注意所用介质的电导，应使材料使用合理。

(3) 设计时要考虑绝缘的使用环境，特别是湿度。

(4) 并非所有情况下均要求绝缘电阻高，如在高压套管法兰附近上半导体釉，其目的是为改善电压分布。

第三节 电介质的损耗

一、电介质损耗的产生与表达方式

由电介质的极化和电导可以看出，在外加电压作用下，电介质中的一部分电能被转换为热能，这种现象称为介质损耗。

在直流电压作用下，由于无周期性的极化，因此损耗只由电导引起，用体积电阻和表面电阻两个物理量已足够表达，故直流电压下不需要再引入介质损耗这个概念。但在交流电压作用下，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，需引入一新的物理量来表示，如图 1-8 所示。图 1-8 中 (b) 为介质两端施加交流电压时的电压电流相量图，由于介质中有损耗，所以电流不是纯电容性电流，而是包含有功和无功两个分量，即

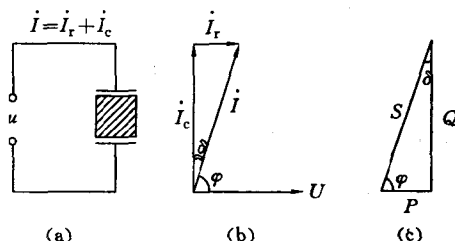


图 1-8 介质在交流下的接线与相量图
(a) 接线图；(b) 相量图；(c) 功率三角形

$$i = i_r + i_c \quad (1-4)$$

所以电源供给的视在功率为

$$S = P + jQ = U(I_r + jI_c) = UI_r + jUI_c \quad (1-5)$$

由图 1-8 (c) 的功率三角形可见

$$P = Q \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (1-6)$$

用介质损耗功率 P 表示介质品质好坏是不方便的，因为 P 值与试验电压、试品尺寸等因素有关，不同的试品难以比较，故以介质损耗角正切 $\operatorname{tg} \delta$ (δ 角为功率因数角 φ 的余角) 来判断介质的品质，它如同 ϵ_r 那样，仅取决于材料的特性，而与材料的尺寸、外施电压、电源频率等无关 [可从式 (1-7) 推导证明]。

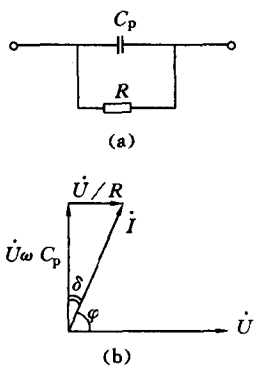


图 1-9 R 、 C_p 并联等值电路及相量图
(a) 等值电路；(b) 相量图

有损耗的介质可以用一个理想电容器和一个有效电阻的并联或串联等值电路来表示。图 1-9 是电阻、电容并联等值电路，从相量图上可看出

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U/R}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R} \quad (1-7)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta \quad (1-8)$$

如用串联等值电路时，由于绝缘的 $\operatorname{tg} \delta$ 都很小，损耗的表达式与式 (1-8) 相同。

二、不同状态介质的损耗

1. 气体介质的损耗

由前述可知，气体介质的极化程度极小。当电场强度小于气

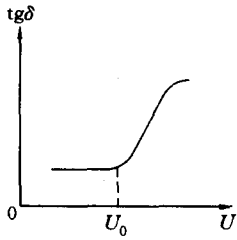


图 1-10 气体的 $\text{tg}\delta$ 与电压的关系

体游离所需要的场强时，气体介质的电导也极小，此时气体介质中的损耗必然很小，所以常用气体介质（如空气、氮气等）作为标准电容器的介质。但当外施电压超过其起始放电电压时，气体介质会发生局部放电，损耗剧增，气体的 $\text{tg}\delta$ 与电压的关系如图 1-10 所示。这种现象在高压输电线上表现得极为突出，称电晕损耗。

2. 液体介质的损耗

中性或弱极性液体介质的损耗主要起因于电导，所以损耗极小，与温度的关系也与电导相似。

极性液体介质（如蓖麻油、氯化联苯等）以及极性和中性液体的混合物（如电缆胶是松香和变压器油的混合物）都具有电导和极化两种损耗，故损耗与温度、频率都有关系，如图 1-11 为极性液体介质 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系。当温度 $t \leq t_1$ 时，由于温度低，故电导和极化损耗都很小。随着温度升高，电导增加，电导损耗也增大；同时由于液体粘度是随着温度的上升而减小，故偶极子的极化增强，极化损耗也因而增加。所以在该段内 $\text{tg}\delta$ 随温度升高而增大，直到 $t = t_1$ 时达极大值。在 $t_1 < t < t_2$ 范围内，由于分子热运动加快，妨碍偶极子在电场作用下作规则的排列，极化强度反而减弱，所以极化损耗就随温度升高而减小。由于这一段内极化损耗的减小比电导损耗的增加更快，故总的看来 $\text{tg}\delta$ 随温度升高而下降。在 $t = t_2$ 时 $\text{tg}\delta$ 出现一极小值。 $t > t_2$ ，极化损耗已不起主要作用，电导损耗决定着总的损耗，故 $\text{tg}\delta$ 重新随温度上升而增加。

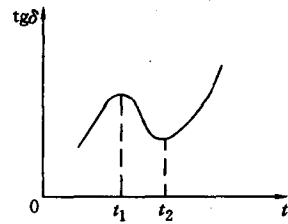


图 1-11 极性液体介质 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系

当频率增加时， $\text{tg}\delta$ 的极大值出现在较高的温度下，这是因为频率高时，偶极子的转动来不及充分进行，要使极化进行充分，就必须提高温度以减小粘度。

3. 固体介质的损耗

固体介质的情况比较复杂，通常分为分子式结构、离子式结构、不均匀结构和强极性电介质等四类。强极性电介质在高压设备上是不采用的。

分子式结构有中性和极性两种。中性的如纯石蜡、聚苯乙烯、聚乙烯、聚四氟乙烯等，其损耗主要由电导引起，这些介质的电导极小，故介质损耗非常小，在高频下也可使用。极性的纤维性材料（纸、纤维板）等和含有极性基的聚合物（聚苯乙烯、有机玻璃、酚醛树脂、硬橡胶）等，此类介质的 $\text{tg}\delta$ 与温度、频率的关系与极性液体相似， $\text{tg}\delta$ 值较大，高频下更为严重。

离子式结构的介质与其结构特性有关。结构紧密的离子晶体，当不含有使晶格畸变的杂质时，主要是电导损耗，故 $\text{tg}\delta$ 极小，如云母。云母不仅 $\text{tg}\delta$ 小，而且电气强度高、耐热性能好、耐游离性能也好，故优良的绝缘材料在高频下也可使用。

在结构不紧密的离子结构中，有离子松弛式极化现象（介质中联系不紧密的离子能在外界电场作用下，从非定向的热运动转为沿电场方向的位移），这种极化同偶极子转向极化相似，也是有损耗的。所以这类介质的 $\text{tg}\delta$ 值较大，玻璃、陶瓷就属于这一类，但随成分和结构的不同， $\text{tg}\delta$ 相差悬殊。

不均匀结构介质在工程上经常遇到,如电机绝缘中使用的云母制品和广泛使用的油纸、胶纸绝缘等。它们的损耗决定其中各成分的性能和数量之比。

三、讨论介质损耗的意义

(1) 在绝缘预防性试验中, $\text{tg}\delta$ 的测量是一基本项目。绝缘受潮或劣化时, $\text{tg}\delta$ 增大; 当绝缘内部发生局部游离时, $\text{tg}\delta$ 急剧增加。因此可根据如图 1-10 所示 $\text{tg}\delta=f(U)$ 的曲线来判断绝缘状况。

(2) 用做绝缘材料的介质, 希望其 $\text{tg}\delta$ 小。但介质损耗引起的发热有时也可以加以利用, 如用于烘干领域。

(3) 在设计绝缘结构时, 要注意选材的 $\text{tg}\delta$ 值, 如 $\text{tg}\delta$ 值过大会引起严重发热, 使绝缘材料劣化, 导致热击穿。

(4) 在进行冲击测量时, 其连接电缆的 $\text{tg}\delta$ 必须很小, 否则冲击波形在其中传播时将发生畸变, 影响测量精度。

第二章 气体放电

在电力系统中，气体（主要是空气）是一种运用得相当广泛的绝缘材料，如架空线、母线、变压器的外绝缘、隔离开关的断口处等。但是，当电场强度达到一定数值后，气体会失去绝缘能力，从而造成事故。为了能正确构成气体绝缘，就需要了解气体中的放电过程，对气体放电过程的研究也有助于阐明固体及液体电介质中的放电过程。

第一节 气体放电的基础知识

一、气体放电的基本概念及形式

1. 基本概念

在通常情况下，由于宇宙射线及地层放射性物质的作用，大气中总有少量带电质点（约为 1000 对/ cm^3 ）。它们在电场作用下，沿电场方向移动形成电导电流。因此，气体通常不是理想的绝缘材料。但当电场较弱时，气体电导极小，可视为绝缘体。

当气体间隙的电压提高至一定值后，电流突然剧增，从而气体失去绝缘性能。气体这种由绝缘状态突变为良导电状态的过程，称为击穿。击穿时加于间隙的电压称为击穿电压，用 U_b 表示。均匀电场中，击穿电压与间隙距离之比叫击穿场强 E_b ，它反映气体耐受电场作用的能力，也即气体的电气强度。不均匀电场中，击穿电压与间隙距离之比称为平均击穿场强。

2. 气体放电的主要形式

气体间隙击穿后，可依电源功率、电极形式、气体压力等具有不同的放电形式，在低气压、电源功率较小时，放电表现为充满间隙的辉光放电形式；在高气压下，常表现为火花或电弧放电形式；在极不均匀电场中，会在局部电场较强处先开始放电，称为电晕。

除使用纯空气间隙作绝缘外，电力系统中还有许多处在空气中的固体绝缘，如输电线路的绝缘子、电机定子绕组槽外部分的绝缘等，所以还会遇到沿固体绝缘表面气体放电的沿面放电。当沿面放电贯穿两极时称为闪络。

二、气体中带电质点的产生与消失

1. 气体原子的激发与游离

气体原子在接受外界能量时，将引起内能的改变，即引起气体原子的激发与游离。

依原子结构模型，原子中有一带正电的核，周围有若干电子沿一定轨道绕核旋转。当各电子位于离原子核最近的轨道上时，原子具有最小的位能（正常状态的原子即有最小的位能）。当原子由外界获得能量时，其电子可跃至能级较高的轨道，此过程称为激发，此时该原子为激发态的原子。如果由外界获得的能量足够大，以至使原子的一个或几个电子脱离原子核的束缚而成为自由电子与正离子（即带电质点），此过程称为原子的游离。