

中等职业学校电气运用与维修专业教学用书

安全用电

戴绍基 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

中等职业学校电气运用与维修专业教学用书

安全用电

戴绍基 主 编

冯 硕 副主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是中等职业学校电气运用与维修专业教材,是教育部职业教育与成人教育司推荐配套教学用书。主要包括:绝缘材料,过电压及其防护,电击事故的防护,电气设备安全,电气设备防火与防爆,电气绝缘试验,安全生产与管理。本书附录还介绍了低压系统按接地形式分类、带电导体系统分类、电气设备按电击防护方式分类、等电位联结和触电事故实例。

本书注重理论联系实际,内容新颖实用;并努力将近年来安全用电的新规定、新做法纳入教材。为便于教学,每章末配有思考题;在电气绝缘试验部分还详细介绍了绝缘电阻和吸收比的测量、介质损耗角正切的测量和直流耐压试验及泄漏电流的测量等试验内容。本书图、表丰富,文字准确、生动,力求图文并茂。

本书可作为中等职业教育供用电技术及相关专业的教材,也可供高职院校及相关工程技术人员学习和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

安全用电 / 戴绍基主编. —北京:高等教育出版社, 2007. 12

ISBN 978 - 7 - 04 - 022607 - 2

I. 安… II. 戴… III. 用电管理 - 安全技术 IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 166598 号

策划编辑	李宇峰	责任编辑	孙 薇	封面设计	于 涛	责任绘图	朱 静
版式设计	陆瑞红	责任校对	俞声佳	责任印制	朱学忠		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 肥城新华印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 17.5
字 数 360 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 12 月第 1 版
印 次 2007 年 12 月第 1 次印刷
定 价 23.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22607 - 00

前 言

本书根据中等职业教育电气运用与维修专业教学需求和中等职业学校“安全用电”课程教学大纲的要求编写。

“安全用电”课程是供用电技术及相关专业的一门主干专业课程。其任务是使学生掌握本专业高素质劳动者和中、初级专门人才所必需的安全用电基本知识和基本技能,为学生提高全面素质,从事供电企业、工矿企业、城镇和农村的供用电技术工作打下基础。

电气安全是安全领域内与电气有关的科学技术与管理工程。电气安全包括人身安全和电气设备安全两个方面。电气安全是一个基础性、综合性极强的技术领域。

电能是现代化的能源,电能已经广泛应用于国民经济的各个部门并深入人们的日常生活中。“电”既被人们用作能源,又被用作信息的载体,因而电气安全是电力、通信、计算机等诸多领域共同面临的问题,具有广泛性的特征。同时,电气安全又涉及材料选用、设备制造、设计施工和运行维护等诸多环节,具有综合性的特征。再者,电气安全的问题往往发生在人们预期以外的电磁过程中,具有随机性和统计规律的特征。因此,电气安全问题具有丰富的学术内涵和广阔的应用范围,应该得到足够的关注。

本书讨论的电气安全包括以下两方面的内容:其一是专业人员(例如电工)在专业场所中(例如工厂)的电气安全;其二是非专业人员在非专业场所中(例如民用建筑中)的电气安全。前者应主要依靠专业知识和一些安全规章制度来保障人身和设备的安全;后者则应主要依靠一些技术措施来保障人身的安全。

一般说来,一门学科在发展初期,大多以研究其规律并利用这些规律为人类造福为主攻方向;而当与此学科相关的工程技术高度发展和应用之后,由于负面效应日益凸显,如何抑制其危害又会成为研究的重点之一。这一规律在汽车、石油化工、煤矿和电气等行业都得到了验证。

我国经济持续快速的发展,促使城市化进程加快,城市居民家庭的电气化水平迅速提高,使得注意电气安全问题显得更为重要。因此,将电气安全问题作为电气工程一个重要的专业方向进行研究,消除长期以来对电气安全问题的一些模糊认识,以科学的态度去认识它,用工程的手段去应对它,是一项十分有意义的工作。基于以上认识,本书将对安全用电的相关问题进行讨论。

本书内容分为七章,分别为绝缘材料、过电压及其防护、电击事故的防护、电气设备安全、电气设备防火与防爆、电气绝缘试验、安全生产与管理。其中,在电气绝缘试验部分专门介绍了绝缘电阻和吸收比的测量、介质损耗角正切的测量和直流耐压试验及泄漏电流的测量等三个试验内容。另外,在附录中还介绍了低压系统按接地形式分类、带电导体系统分类、电气设备按电击防护方式分类、等电位联结和触电事故实例等有关安全用电的内容。

II 前言

本书由河南工业职业技术学院戴绍基担任主编。河南工业职业技术学院冯硕任副主编并编写了第三、四章。河南工业职业技术学院李斌胜编写了第一、六、七章。河南工业职业技术学院刘娇月编写了第二、五章。戴绍基负责全书的统稿、定稿并编写了附录等内容。

本书由高等教育出版社胡淑华编审担任主审。本书编写过程中得到了河南工业职业技术学院和高等教育出版社的大力支持。在此一并表示诚挚的谢意。

本书可作为中职、高职院校供用电技术及相关专业的教材,也可供有关工程技术人员学习和参考使用。

本书在编写中参考了一些相关书籍和资料,除在书末的参考文献中列出外,在此也一并表示诚挚的谢意。

限于编者水平,书中难免有一些缺点错误,恳切希望使用本书的读者批评指正。意见请寄往以下 E-mail 地址:nydsj2004@yahoo.com.cn。

编者
2007年7月

目 录

第一章 绝缘材料	1	第五章 电气设备防火与防爆	159
第一节 电介质的基本特性	2	第一节 电气火灾与爆炸的成因及条件	160
第二节 气体放电的基础知识	13	第二节 电气防火防爆的一般要求	165
第三节 均匀电场中的气体放电	18	第三节 电气火灾与爆炸的预防措施	174
第四节 不均匀电场中的气体放电	22	第四节 防爆电气设备	177
第五节 气体电介质的击穿特性	25	思考题	188
第六节 液体电介质的击穿	44		
第七节 固体电介质的击穿	47		
思考题	50		
第二章 过电压及其防护	51	第六章 电气绝缘试验	189
第一节 概述	52	第一节 电工测量的基本知识	190
第二节 防雷设备	59	第二节 绝缘电阻和吸收比的测量	197
第三节 典型设施的防雷	72	第三节 介质损耗角正切的测量	204
思考题	83	第四节 直流泄漏电流的测量及直流耐压试验	212
第三章 电击事故的防护	84	第五节 工频交流耐压试验	216
第一节 安全用电常识	85	思考题	223
第二节 防止人身触电的技术措施	92	试验一 绝缘电阻和吸收比的测量	224
第三节 安全用具	106	试验二 介质损耗角正切值试验	226
第四节 电气作业的安全措施	114	试验三 直流耐压试验及泄漏电流的测量	229
第五节 触电急救	126	试验四 交流耐压试验	230
思考题	132		
第四章 电气设备安全	133	第七章 安全生产与管理	233
第一节 电气设备的运行安全	134	第一节 安全生产的重要性	234
第二节 电气设备的运行管理	155		
思考题	158		

II 目录

第二节 安全生产的法律规定·····	236
第三节 安全管理体系的建立·····	239
第四节 安全事故的调查与处理·····	242
思考题·····	247

附录····· 248

附录一 低压系统按接地形式 分类·····	249
--------------------------	-----

附录二 带电导体系统分类·····	254
附录三 电气设备按电击防护 方式分类·····	255
附录四 等电位联结简介·····	258
附录五 电气事故实例·····	265

参考文献····· 273

1 低压系统按接地形式分类····· 249

1.1 概述·····	249
1.2 接地系统的分类·····	250
1.3 接地系统的选择·····	251
1.4 接地系统的施工·····	252
1.5 接地系统的维护·····	253
1.6 接地系统的检测·····	254
1.7 接地系统的故障·····	255
1.8 接地系统的改进·····	256

2 带电导体系统分类····· 254

2.1 概述·····	254
2.2 带电导体系统的分类·····	255
2.3 带电导体系统的选择·····	256
2.4 带电导体系统的施工·····	257
2.5 带电导体系统的维护·····	258
2.6 带电导体系统的检测·····	259
2.7 带电导体系统的故障·····	260
2.8 带电导体系统的改进·····	261

3 电气设备按电击防护方式分类····· 255

3.1 概述·····	255
3.2 电击防护方式的分类·····	256
3.3 电击防护方式的选择·····	257
3.4 电击防护方式的施工·····	258
3.5 电击防护方式的维护·····	259
3.6 电击防护方式的检测·····	260
3.7 电击防护方式的故障·····	261
3.8 电击防护方式的改进·····	262

4 等电位联结简介····· 258

4.1 概述·····	258
4.2 等电位联结的分类·····	259
4.3 等电位联结的选择·····	260
4.4 等电位联结的施工·····	261
4.5 等电位联结的维护·····	262
4.6 等电位联结的检测·····	263
4.7 等电位联结的故障·····	264
4.8 等电位联结的改进·····	265

5 电气事故实例····· 265

5.1 概述·····	265
5.2 电气事故的分类·····	266
5.3 电气事故的原因·····	267
5.4 电气事故的预防·····	268
5.5 电气事故的调查·····	269
5.6 电气事故的整改·····	270
5.7 电气事故的总结·····	271
5.8 电气事故的改进·····	272

第一章

绝缘材料

第一节 电介质的基本特性

第二节 气体放电的基础知识

第三节 均匀电场中的气体放电

第四节 不均匀电场中的气体放电

第五节 气体电介质的击穿特性

第六节 液体电介质的击穿

第七节 固体电介质的击穿

思考题

在电气工程中,经常需要采取必要的措施和手段来保证电气设备的正常工作和安全。最基本的方法就是将导体之间、导体与地之间用绝缘材料相互隔离,从而使其保持各自的电位,不让导体之间有电流通过,这种做法称为绝缘。绝缘就是不导电,不导电的材料称为绝缘材料,或称电介质(简称介质),所以,电介质也是电气设备的重要组成部分。

电介质的种类很多,就其形态而言,可分为固体电介质、液体电介质和气体电介质。常用的固体电介质有电瓷、环氧树脂、聚乙烯和聚四氟乙烯、橡胶等,液体电介质有变压器油和硅油等,气体电介质有空气、六氟化硫和氮气等。

在实际工程中,电气设备所用的绝缘一般由一种或几种绝缘材料组合而成。良好的绝缘是保证电气设备和输电线路正常运行、防止电击事故的前提条件。随着电压等级的提高,需要生产各种性能优良的电气设备。为提高设备的可靠性,电介质的用量越来越多,对其性能的要求也越来越高。电气设备的绝缘除应与运行的电压等级相适应外,还要考虑其使用环境、气候等条件。这就需要对各种电介质特性及其放电机理进行研究。不同的电介质具有不同的电气特性,其基本的电气特性有极化特性、电导特性、损耗特性和击穿特性。这些特性分别用相应的参数来表示:例如相对介电常数 ϵ_r 、电导率 γ 、介质损耗因数 $\tan \delta$ 和击穿场强 E_j 等。

第一节 电介质的基本特性

一、电介质的极化和相对介电常数

电介质在电场的作用下,其正、负电荷在沿电场方向产生有限位移或转向的现象称为电介质的极化。这时电介质内部电荷的总和仍为零,但产生了一个与外施电场方向相反的电场,如图 1-1 所示。

图 1-1(a)所示为真空电介质的平行板电容器,(b)所示为充满其他电介质的平行板电容器。在外加直流电压 U 后,对真空电介质的电容器,其两个极板间的电容量可表示为

$$C_0 = Q_0 / U = \epsilon_0 A / d \tag{1-1}$$

式中 Q_0 ——极板为真空时,加电压 U 后极板上积聚的电荷;

ϵ_0 ——真空的介电常数,为 $8.86 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$;

A ——极板面积, cm^2 ;

d ——极间距离, cm 。

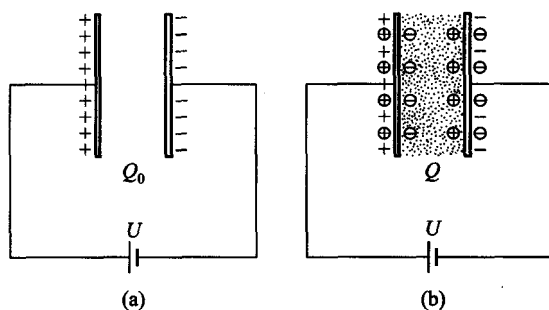


图 1-1 电介质的极化

(a) 极板间为真空; (b) 极板间有介质

对极板间充满介质的电容器来说,由于电介质的存在,在电场的作用下,电介质会产生极化,在外加电压 U 不变的情况下,要保持电场强度也不变,就必须再从电源中获得一部分电荷 Q' ,以抵消电介质极化对电场强度的影响。此时极板间的电荷为 $Q = Q_0 + Q'$,电容量为

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

式中 Q' ——极间放入固体电介质时,极板上电荷的增加量;

ε ——固体电介质的介电常数。

从式(1-1)和式(1-2)可以看出,在加入电介质后两极板间的电荷增加了 Q' 。将 C/C_0 之比称为该电介质的相对介电常数,用 ε_r 表示,即

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1-3)$$

相对介电常数反映了极间放入电介质后的极间电容量与真空时极间电容量的关系。电介质的相对介电常数越大,电介质的极化特性越强,由其构成的电容器的电容量也越大,因此,相对介电常数是表示电介质极化强度的一个物理量。工程中一般采用相对介电常数,各种气体的相对介电常数(ε_r)均接近于 1,常用的液体、固体电介质的相对介电常数(ε_r)在 2~10 之间,且各种电介质的 ε_r 与温度、电源频率的关系也不尽相同。

在工程实践中,选用制造电容器用的绝缘材料时,除要注意电气强度外,还希望材料的 ε_r 较大,这可使电容器单位容量的体积和重量减小。对于电缆和套管中的材料,则希望 ε_r 小,这不仅可减小绝缘材料的损耗,还可使电缆工作时的充电电流减小,使套管的沿面放电电压提高。通常的电气设备都希望用 ε_r 较小的绝缘材料,这是为了减小通过绝缘的电容电流以及由此引起的介质损耗,介质损耗是造成绝缘劣化和热击穿的重要因素。高电压设备的绝缘一般由多种不同相对介电常数的材料组合在一起使用。合理地选用不同 ε_r 值的材料,可以改善绝缘材料中的电场分布,充分利用电介质的绝缘强度,因为在交流和冲击电压作用下,串联介质中电场强度的分布与 ε_r 成反比。

二、极化的分类

由于构成电介质的分子、原子结构以及分子、原子运动形式各不相同,在电场的作用下发生极化的方式也不同,常见的极化方式有以下几种。

1. 电子式极化

在电场作用下,电介质原子中的电子产生了相对于原子核的弹性位移,致使正、负电荷作用中心不再重合,形成电矩,这种由于电子位移造成的极化称为电子式极化,如图 1-2 所示。极化强度与正、负电荷作用中心间的距离成正比,并随外电场的增强而加大。

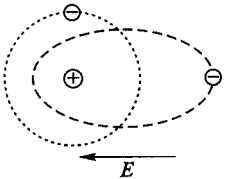


图 1-2 电介质的极化

在一切气体、液体和固体电介质中均能发生电子式极化,其特点为:形成极化所需的时间极短(因电子质量极小),约 $10^{-15} \sim 10^{-13}$ s,可看做瞬时完成,故在各种频率的交变电场下均能产生电子式极化;电子式极化具有弹性,即当外电场消失后,依靠正、负电荷间的吸引力,电子又返回到原来的轨道,正、负电荷作用中心又重合。这种极化消耗能量极少,可忽略不计,它不使电介质发热,故又称为无损极化。

2. 离子式极化

正常情况下,当离子式结构的固体电介质不受电场作用时,虽然电介质中的正、负离子排列无序,但正、负电荷的作用互相抵消,对外不呈现出电极性。当有外加电场时,在电场的作用下,电介质离子内部除发生电子式极化外,正、负离子还按照电场方向排序,正、负离子发生相对位移而形成极化,这种极化方式称为离子式极化,如图 1-3 所示。例如云母、陶瓷等固体无机化合物,在电场作用下,就会呈现出离子式极化。

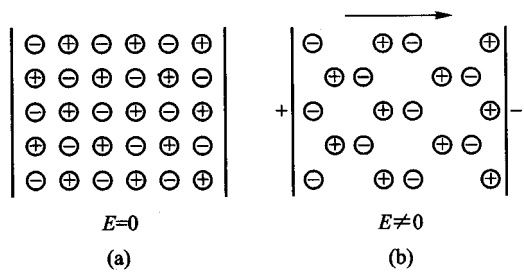


图 1-3 离子式极化

(a) 无电场作用; (b) 有电场作用

离子式极化的建立可以认为是瞬时的,也是完全弹性极化,几乎不消耗能量,也属于无损极化。由于极化完成时间很短,离子式结构的固体电介质都会出现这种极化。温度对离子式极化有两方面的影响:一方面温度升高使离子间结合力下降,有利于极化;另一方面温度升高又使离子密度减小,使极化程度降低。一般情

况下,前一种因素对离子极化影响较大。

3. 偶极子极化

在正常情况下,正、负离子作用中心不重合的分子称为极性分子,又称偶极子。在极性分子结构的电介质中,当没有电场作用时,各个极性分子均处在不停的热运动中,分布杂乱,故整个电介质对外不呈现极性。一旦加上外电场,原来因热运动而杂乱分布的极性分子受到一个转矩的作用而顺电场方向转向,做较有秩序的排列,这时单位体积电矩已不再为零,形成偶极子极化,如图 1-4 所示。

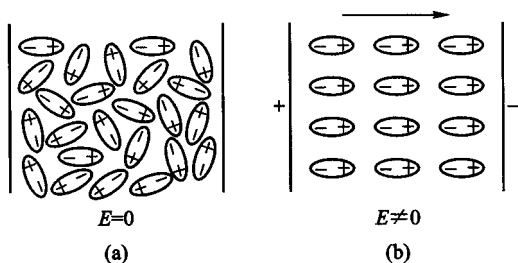


图 1-4 偶极子极化

(a) 无电场作用; (b) 有电场作用

由于偶极子的结构远大于原子和离子,当其转向时就需要克服分子间的吸引力而消耗能量,因此属于有损极化,且为非弹性极化。偶极子电介质的极化时间较长,约 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ s,所以在工频电场作用下,偶极子极化可能来不及完全建立,因此极性分子结构电介质的介电常数与电场频率有关,介电常数与电源的频率成反比,频率升高介电常数将减小。

介电常数与温度的关系较为复杂,温度升高时,分子间联系力削弱,极化将加强;但与此同时,由于分子的热运动加剧,又妨碍了分子沿电场方向做有序排列,而使极化减弱。当温度较低时,介电常数随温度升高而增大,而当升高到某一温度值后介电常数则降低。对极性气体电介质,由于分子间联系较弱,主要是后者起作用,故常具有负的温度系数。

具有极性分子的电介质称为极性电介质,纤维素、胶木、橡胶、氧化联苯以及蓖麻油等都是常用的极性电介质。

4. 夹层极化

高压电气设备的绝缘常由几种不同的材料组成,存在不同电介质间的分界面,可看成是分层电介质绝缘,这种电介质在外电场作用下的极化称为夹层极化。夹层极化过程特别缓慢,所需时间从几秒钟到几十分钟甚至更长,且伴随有能量损耗,也属于有损极化。夹层极化的发生是由于各层电介质的介电系数不同,其电导率也不同,当外施电压后,刚开始时各层电介质间的场强分布与介电常数成反比,随着时间的增加,达到稳定状态后的场强则与电导率成反比。为简便起见,下面以平行平板电极间的双层电介质为例,分析电介质夹层极化形成的过程。

如图 1-5 所示, C_1 、 C_2 分别为两种电介质的电容, G_1 、 G_2 分别为两种电介质的电导。在 S 刚合闸的瞬间(设 $t=0$ 合闸),电压由零很快升到 U ,电流主要流过电

容,电导相当于开路,这时两层电介质的电压分配与各层的电容成反比,即

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} = \frac{C_2}{C_1} \tag{1-4}$$

到达稳态时(认为此时 $t \rightarrow \infty$),电容相当于开路,电流全部经电导流过,各层电介质上的电压与电导成反比。即

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=\infty} = \frac{G_2}{G_1} \tag{1-5}$$

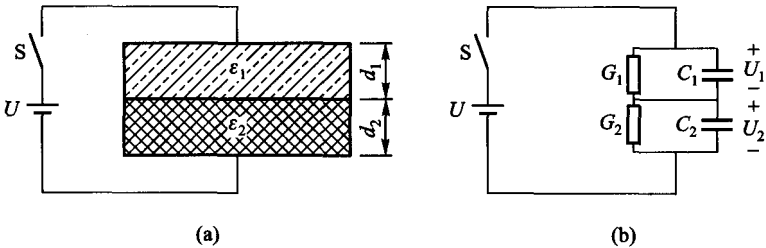


图 1-5 双层介质的夹层极化
(a) 示意图; (b) 等值电路

假如极板间的电介质为单一的均匀电介质时, $C_1 = C_2$, 通常 $G_1 = G_2$, 则有 $\frac{C_2}{C_1} = \frac{G_2}{G_1}$, 所以 $\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=\infty}$ 。也就是说, S 合闸以后, 单一电介质之间不存在电压重新分配的现象。当 $\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{G_2}{G_1}$, 则有 $\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} \neq \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=\infty}$, 即 C_1 、 C_2 上的电荷要重新分配。设 $C_1 < C_2$, $G_1 < G_2$, 则在 $t=0$ 时, $U_1 > U_2$; 而当 $t \rightarrow \infty$ 时, $U_2 > U_1$ 。这样, 当 $t > 0$ 后, 随着时间 t 的增大, U_1 逐渐下降, 而 U_2 逐渐增高。于是 C_1 上一部分电荷要通过 G_1 放掉, 而 C_2 却要从电源经 G_2 吸收一部分电荷(常称吸收电荷)。于是在两层电介质的分界面上将积聚自由电荷, 这一过程就是夹层电介质分层界面上电荷的重新分配过程。由于电导较小(电阻很大), 致使吸收过程较缓慢, 故夹层极化的时间较长, 并有能量损耗。当外加电压去掉后, 电介质内部吸收的电荷要释放, 但比较缓慢。但是当电介质受潮或劣化时, 电导增大, 电荷的吸收或释放时间就大大缩短, 利用这一特性, 可以通过测量吸收比来检查绝缘是否受潮或劣化。

同样, 对刚使用过的大电容设备, 采用将两极短接的办法(增大电导), 可以使电容充分放电, 以免危及人身安全。

三、电介质的电导

各种结构及各种物态(如气态、液态和固态等)下的任一物质, 都不同程度地具有传导电流的能力。因为每种物质多少具有一些可以自由移动的电子或离

子,在电场作用下,它们将沿电场的方向移动,从而形成电流,因而具有一定的电导。

固态或液态金属受到电场作用时,其中的自由电子在电场的作用下定向运动形成电流,电流通过这类物质时,其结构和性能不会改变。但电子的移动会受到金属离子晶格的影响。热运动使离子间距时大时小;温度愈高,离子晶格振幅愈大,对电子的移动影响也愈大,并使电子把自己的部分能量传递给离子晶格;于是金属导体表现出电阻及被加热现象,且电阻随温度的升高而增大。

电介质电导与金属电导有所不同,不仅是两者电导率的差别很大,且在绝大多数情况下,电介质电导是由电介质中游离出来的电子、离子在电场作用下移动造成的,导电能力主要取决于电介质中的游离电子和离子的多少;而游离电子和离子的产生又靠电介质本身分子和杂质分子的化学分解或离解。电介质的电导随温度增加而剧增,这是因为温度增加时,离子获得的热动能增大,容易克服周围异性电荷的束缚,使在电场中定向运动的离子数目增加,且速度也增大,有利于离子的迁移。这与金属的电导恰恰相反。故在测量绝缘电阻时,必须考虑温度的影响。例如变压器、发电机刚退出运行时绝缘电阻比冷态时要低很多。测量电介质的绝缘电阻时最好在同一温度下测量,以便于比较。电介质的电导率与温度的关系可用式(1-6)来表示:

$$\gamma = Ae^{-\frac{B}{T}} \quad (1-6)$$

式中 A 、 B ——常数;

T ——绝对温度。

电介质的电导特性一般用电阻来表示,称为电介质的绝缘电阻。它的另一个重要特点是绝缘电阻值与加压时间有关,表现为当电介质加以直流电压时,常观察到通过电介质的电流随时间而减小并趋向于某一稳定值。该稳定值是电介质中载流子做定向移动形成的泄漏电流,随时间而变化的电流量是由极化过程引起的位移电流。去掉电压后,将电极短路时,发生反向的放电电流(类似情况在测绝缘电阻时也会发生,当反向放电电流大时,应注意保护兆欧表)。这种现象称为介质的吸收现象,它由缓慢极化过程产生的位移电流引起,这种位移电流常称为吸收电流,它包括偶极子极化及夹层极化所引起的电流。把电流达到稳定的泄漏电流 I 时的电阻作为绝缘电阻。一般情况下,加上直流电压约 1 min,泄漏电流即可达到稳定值,所以,在测量设备的绝缘电阻或泄漏电流时,应在加压一段时间后进行。此时,吸收电流很小或降到零值,电流值趋于稳定。工程上一般规定加压 1 min 后测得的值作为绝缘电阻或泄漏电流值。

此外,固体电介质的电导还和它的宏观结构有关。例如多孔性绝缘材料的电导随大气湿度的增加而剧增,使用时应采取防潮措施;而结构致密的电介质则没有这种现象。前者是由于毛细管的作用,使材料易吸潮,如纤维材料就是这样。置于空气中的变压器油等液体电介质,其电导也随大气湿度的增加而增加,应注意减少其与空气的接触面并采取其他措施。对固体电介质而言,其泄漏电流由两部分组

成,一部分为通过电介质本身体积的泄漏电流 I_v ,另一部分为沿电介质表面的泄漏电流 I_s ;对应的电阻分别为体积电阻 R_v 和表面电阻 R_s 。绝缘电阻 R 可以看做是由这两部分电阻并联而成的,即

$$R = \frac{R_s R_v}{R_s + R_v} \quad (1-7)$$

由于电介质的表面一般暴露在外面,因而其表面电阻受潮湿、污秽等的影响很大,为了准确测量绝缘电阻,测量前应将电介质表面进行清洁处理,或采取措施减少表面泄漏电流的影响。

下面分别讨论气体、液体及固体电介质的电导以及分层电介质的极化与电导。

1. 气体电介质的电导

气体电介质的电导极小,这表明气体可作为优良的绝缘材料来使用。当气体用作绝缘材料时,加于气体间隙的电压,不应超过其击穿电压;故线路及电气设备的额定工作电压越高,其空气间隙也越大,只要气体的工作场强低于游离场强,就不必考虑气体电导,因为电导很小。

2. 液体电介质的电导

液体电介质中的载流子主要有两种,一种是构成液体的基本分子或杂质分子离解后产生的离子,它们构成离子电导;另一种是液体中的胶体质点(即胶状杂质粒子,如变压器油中悬浮的小水滴、碳渣及树脂等)吸附离子或极性分子而带有一定的电荷,它们沿电场方向移动,构成电泳电导。

中性液体电介质本身分子的离解极微,其电导主要由杂质离子构成。极性液体的电导除杂质形成外,还与本身分子离解形成的离子有关,故其电导率较高。强极性液体已是离子半导体而不是电介质,因其本身电导很大,不能用作绝缘。显然,强极性液体不应用作绝缘的液体。但工程上用的液体电介质,不可避免会出现杂质,例如变压器油运行一段时间后,就会产生很多杂质,这是由于受潮或固体绝缘(如棉纱、纸板、木材等的纤维)脱落在油中,以及油本身的化学变化(受热、氧化)产生有机酸的腊状物等引起的,因此电导率大大增加。这些杂质中以水分的影响为最大。当油中杂质太多时,绝缘性能下降很大,甚至不能再用;这时应采取相应的技术措施,进行再生处理,使之恢复绝缘性能。

当温度升高时,液体粘度变小,同时分子的离解度增加;前者使离子的迁移率增大,后者使离子数目增加。因此,离子电导和电泳电导都随温度而上升。

综上所述,影响液体电介质电导的外界因素主要有两个:一是杂质,二是温度。

液体的原子排列是介于气体与固体之间的,既没有固体结晶那样的规则性,也不像气体那样原子间隔大,原子间引力可忽略。液体各原子间进行的是完全杂乱的热运动。因此,与固体及气体两种极端的情况相比,液体特性理论的发展较缓慢,而且在实验中,各种气体与杂质容易溶解或混在液体中,故重复性的一致结果也较难得到。

3. 固体电介质的电导

固体电介质的电导和液体相似,由本身的离子和杂质的离子构成。固体电介质本身离子电导很小,所以一般在温度不是太高的情况下,总是杂质电导起主要作用。

固体电介质的电导与温度的关系和液体电介质相似,也具有指数关系,温度升高时,主要是自由离子数目增加而使电导增大。

流过固体电介质的电流,根据流过的路径可分为流过表面的表面电流和流过电介质体内的体积电流。前者对应于电介质的表面电导(或表面电阻),后者对应于电介质的体积电导(或体积电阻)。干燥、清洁的固体电介质,表面电导很小,所以表面电导主要是附着于电介质表面的水分和其他污物引起的。电介质表面极薄的一层水膜就能造成明显的电导,水膜越厚则电导越大;如还有污秽,则表面电导将显著增大。表面电导主要取决于外界的因素,但各种材料吸附水分的能力不同,故可将表面电导看做电介质本身的一种性能。

对一些防潮性能较差的绝缘结构,采取表面处理的措施,可有效地增大表面电阻。例如绝缘子表面涂复合硅有机物薄膜等,用于污秽地区有良好的效果。又如胶木外壳的设备,为防止严重受潮,提高表面电阻,在胶木外壳表面涂刷一层环氧漆。当使用多孔性结构的电介质(如纸、纤维板等)时,应经过干燥浸渍处理,容器要密闭,以防止受潮。

由于电介质表面对外部的污秽和吸潮的影响非常敏感,所以表面电流比体积电流受环境条件的影响要大得多,它是不稳定的。分别对这两种电流进行测量是必要而有意义的,它可使我们清楚地了解电介质内部的以及电介质表面的绝缘状况。

4. 直流电压下不均匀电介质的吸收现象

工程中用的绝缘材料,大多数是由分层的多种电介质所组成。例如变压器油中的油屏障绝缘是油和间隔纸板的组合;电缆中的油浸纸绝缘由纤维和油组成;电机绝缘可由云母、衬垫物和胶合剂等组成。分层电介质可能有完全不同的介电性能,例如介电常数和电导率不同。这种不均匀性的程度,可通过分层电介质的内部极化现象来判断。分层绝缘的电气设备,当发生绝缘局部老化和受潮时,其分层电介质的不均匀程度将更加突出,据此可判断运行中设备的绝缘是否老化和受潮。

前边已经讨论,夹层电介质在加上直流电压并达到稳态时,会伴随着吸收过程的存在,该过程形成的电流称为吸收电流。吸收电流是随时间缓慢变化的,当电荷的重新分配进行完毕后,则吸收电流等于零。从电路上看,吸收电流是一个经电阻向电容充电的充电电流,它按指数曲线衰减而最终降为零。吸收电流的持续时间与电容、电导的大小有关,可持续几分之一秒、几十秒、几分钟甚至几十分钟。电介质的电导越大,吸收电流衰减越快,持续时间也越短。在温度升高时,吸收现象衰减也会加快,因为电介质的电导增加了。吸收现象是可逆的,充电时电介质内部积累的电荷在放电时会释放出来,其变化规律和充电时类似。

5. 泄漏电流和电导在工程应用上的意义

高压设备绝缘良好时,吸收电流持续时间较长(按指数关系衰减);而受潮劣化的绝缘吸收现象难以在测试中反映出来,所以工程上常用测量绝缘的吸收比来判断绝缘是否劣化和受潮。吸收比 K 由下式定义:

$$K = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1-8)$$

式中 R_{60} ——加压测量开始后 60 s 时的绝缘电阻值;

R_{15} ——加压测量开始后 15 s 时的绝缘电阻值。

在绝缘预防性试验中,一般都要测绝缘电阻和泄漏电流,以判断绝缘是否受潮或有其他劣化现象。在这种试验中必须注意将表面泄漏区别开来。对于电缆、电容器及大型电机等电容量大的设备,判断绝缘是否受潮或存在局部贯穿性的缺陷,最有效的办法是测定泄漏电流的大小或其随电压的变化趋势。绝缘良好时,泄漏电流很小;绝缘受潮或有局部缺陷时,泄漏电流明显增加。此外,绝缘良好时,绝缘电阻为一常数,即不随外加电压改变,泄漏电流与外加电压成线性关系;若泄漏电流有急剧增长现象,一般表明绝缘存在问题。

有些情况下要设法增大绝缘表面的电导率,例如在高压套管法兰附近涂上半导体釉,高压电机定子绕组出槽口部分涂半导体漆等,这是为了改善电场分布,降低这些地方的电场强度,以消除电晕。又如用于污秽地区的绝缘子,表面涂半导体釉以增大表面电导率,使泄漏电流增大,加热污秽,从而提高绝缘子串的闪络电压。

四、电介质的损耗

在电场作用下,任何电介质都会有能量损耗。其中,一部分是由电导引起的电导损耗,一部分则是由于极化的存在而形成的极化损耗。同一种电介质在不同电场作用下,其损耗也不同。电介质的能量损耗又称为介质损耗,它是导致电介质发生热击穿的根源。单位时间内消耗的能量称为介质损耗功率。电气设备的介质损耗应尽可能小,其值之大小是鉴别绝缘品质的重要指标之一。

1. 直流电压作用下的介质损耗

当直流电压加在电介质上时,因电场的方向不会发生改变,也就没有周期性的电介质极化,所以极化损耗可以忽略不计。电介质中的损耗主要为电导引起的损耗,用电介质的体积电导及表面电导两个物理量就能表达电介质的品质。这时用电导率就可以表达电介质的损耗特性。

2. 交流电压作用下的介质损耗

当交流电压作用于电介质时,电介质就处于交变电场之中,根据介质损耗物理特性的不同,可分成下面几种形式。

(1) 电导损耗

实际电介质总有一定的泄漏电导,在电场作用下,电介质中会有泄漏电流引起