



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电力安全技术

杨文学 任 红 主 编
胡 斌 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电力安全技术

主 编 杨文学 任 红
副主编 胡 斌
编 写 陈 兵
主 审 田建华



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书分为 7 章,其主要内容包括电气设备绝缘的电气特性及其预防性试验、人身触电及其防护、过电压防护、电气作业的安全措施、供用电安全性评价及危险点分析、电气防火与防爆、电力事故管理等方面的内容。

本书主要作为本、专科电类专业教学用书,还可作为电力及相关行业的培训用书,也可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力安全技术/杨文学,任红主编. —北京:中国电力出版社,2006

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 7-5083-4506-1

I. 电... II. ①杨...②任... III. 电力工业—安全技术—高等学校—教材 IV. TM08

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 072268 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 360 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.60 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)

前 言

进入 21 世纪以来,我国经济迅速发展,人们生活水平不断提高,电力工业也得到了迅猛的发展,特别是近几年我国加大了对城乡电网的建设和改造力度,是电力工业有史以来发展最快、投资最大的时期。随着电力工业的发展和科学技术的进步,电网的规模越来越大,自动化程度也越来越高,因此对电力系统的可靠性和安全性也提出了更高的要求。

本书既可作为电类专业的专业课用书和非电类专业的选修课用书,也可以作为从事电力生产的工作人员的参考用书。全书贯彻“安全第一,预防为主”的方针,从安全技术和安全管理角度出发,从人、设备、环境诸方面揭示电能生产、传输和使用过程中存在的危险因素和所应采取的安全措施。全书简明扼要、简单实用。

全书共分七章,每章都附有小结和思考题,供学习时参考。

本书由郑州电力高等专科学校杨文学编写第一章,第二章和第六章由长沙电力职业技术学院陈兵编写,郑州电力高等专科学校胡斌编写第三章和第七章,郑州电力高等专科学校任红编写第四章与第五章。全书由杨文学、任红统稿并担任主编。

郑州电力高等专科学校田建华副教授对全书进行了审核,提出了宝贵的建议。在编写过程中得到了一些电力系统兄弟单位的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中有不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2006 年 4 月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 电气设备绝缘的电气特性及其预防性试验	4
第一节 概述	4
第二节 电介质的极化	5
第三节 电介质的电导	9
第四节 电介质的损耗	11
第五节 电介质的击穿	13
第六节 绝缘电阻和吸收比的测量	32
第七节 泄漏电流的测量	34
第八节 介质损耗角正切 $\tan\delta$ 的测量	37
第九节 耐压试验	40
第二章 人身触电及其防护	49
第一节 电流对人体的伤害	49
第二节 人体的触电方式	55
第三节 防止人身触电的技术措施	58
第四节 触电急救	65
第三章 过电压防护	79
第一节 雷电的放电过程	79
第二节 雷电参数	80
第三节 防雷保护的基本措施	82
第四节 输电线路的雷电过电压及其防护	92
第五节 发电厂和变电站的雷电过电压及其防护	97
第六节 操作过电压及其防护	103
第四章 电气作业的安全措施	112
第一节 保证安全的组织措施	112
第二节 保证安全的技术措施	116
第三节 电气安全用具	122
第四节 倒闸操作的安全措施	134
第五节 带电作业安全要求	146

第五章 供用电安全性评价及危险点分析	158
第一节 电力系统的安全性评价	158
第二节 电力生产作业中的危险点及预控	179
第六章 电气防火与防爆	187
第一节 消防基本常识	187
第二节 常用灭火器的适用范围及其使用方法	191
第三节 电气火灾扑救	194
第七章 电力事故管理	198
第一节 电力事故及其分类	198
第二节 事故报告及调查	204
第三节 事故分析	209
附录一 电气试验安全规程	213
附录二 变电站(发电厂)第一种工作票格式	216
附录三 电力电缆第一种工作票格式	220
附录四 变电站(发电厂)第二种工作票格式	224
附录五 电力电缆第二种工作票格式	226
附录六 变电站(发电厂)带电作业工作票格式	228
附录七 变电站(发电厂)事故应急抢修单格式	230
附录八 变电站(发电厂)倒闸操作票格式	231
附录九 二次工作安全措施票格式	232
附录十 标示牌式样	233
附录十一 人身事故调查报告书	234
附录十二 电网事故调查报告书	236
附录十三 设备事故调查报告书	238
附录十四 火灾事故调查报告书	240
参考文献	242

绪 论

电力工业是我国重要的基础产业,它的安全关系到国民经济的各个行业和部门。确保电力系统安全生产是电力行业各个单位的首要任务,同时也是保证我国电力系统健康发展的基础。电业生产的目的,就是保证向国民经济各行各业和人民生活可靠、安全的提供电能。电业生产的特点是高度自动化和产、供、销同时完成。这样的生产特点对安全有着极高的要求,否则就会因为任何一个环节的不安全因素而造成设备的损坏、人员的伤亡以及电网的大面积停电等事故,给电力企业或用电企业造成重大经济损失,甚至是灾难。

一、电力安全生产的重要性

电力安全生产的重要性是由电力生产、电力基本建设、电力多种经营的客观规律和生产特性及社会作用决定的。随着电力工业迅速发展、电力体制改革和市场化进程加快,电力安全生产的重要性更加突出。电力安全生产的重要性有以下几个方面。

(1) 电力安全生产影响各行各业和社会稳定。电力工业是国民经济的基础产业,是具有社会公用事业性质的行业。它为各行各业及人民的日常生活提供电力,如果供电中断,特别是电网事故造成大面积停电,将使各行各业的生产停顿或瘫痪,会给社会和人民生活秩序带来混乱,甚至形成社会灾难,造成极坏的社会影响。因此,电力安全生产关系到人民生命财产安全,关系到国民经济的健康发展,关系到国家和社会的稳定。

(2) 电力安全生产影响电力企业本身的发展。安全是电力生产的基础,如果一个电厂经常发生事故,就不可能做到满发稳发和文明生产;如果系统经常发生事故,系统中的发电厂和变电站就不能正常运行,使电力生产和输配电处于混乱状态,因此电力企业本身需要安全生产。电力企业的生存与发展,必然要求有好的经济效益,如果电力企业的安全生产做的不好,必然会减少发供电并增加各种费用的支出,其结果是成本上升,效益下降,因此搞好安全生产是提高经济效益的基础。

(3) 电力生产的特点需要安全生产。电能是一种特殊的商品,其发、供、用同时进行的特点使得电力系统必须有着极高的可靠性和连续性,任何一个环节发生故障都有可能带来连锁反应,造成人员伤亡、设备损坏或大面积停电、电网崩溃等灾难性事故。目前的电力系统已进入大机组、大容量、高电压和高度自动化时代,这些对电力系统的安全生产提出了更新、更高的要求。

(4) 电力生产的劳动环境要求安全生产。电力生产的劳动环境有几个明显的特点:①电气设备多;②高温高压环境多,如火电厂的锅炉、汽轮机、压力容器和热力管道等;③易燃易爆和有毒物品多,如燃煤、燃油、强酸、强碱、制氢、制氧系统,变压器油和电容器油,绝缘用橡胶等;④特种作业多,如带电作业、高空作业及焊接作业等。这些特点表明,电力生产的劳动条件和环境相当复杂,本身潜在着很多不安全因素,潜在的危险性大,这些都构成了对工作人员的人身安全的威胁。因此,工作中稍有疏忽,潜在的危险就会变

成事故, 因此要求我们高度重视电力系统的安全生产。

二、我国用电安全状况

安全用电是衡量一个国家用电水平的一个重要标志之一, 许多国家常以用电量和触电死亡人数的比值作为衡量安全用电水平的标准。安全用电水平高的国家每耗电 20 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 触电死亡 1 人; 而水平低的国家则每耗电 1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 即触电死亡 1 人。而我国近年来的统计数据既是平均 1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 电触电死亡 1 人, 是发达国家的 20~30 倍。这说明我国目前的电气安全水平与发达国家相比, 还存在着较大的差距, 电气安全理论研究和实际应用的发展较缓慢。特别是近年来, 一些特殊行业对电气安全问题重视不够, 使电气事故频发。因此, 提高我国的电气安全水平已是当务之急。

近 20 年来, 我国的用电安全水平得到了大幅度的提高, 尽管我国的用电量迅速增加, 供电区域迅速扩大, 而每年触电死亡人数的绝对值却呈下降趋势。特别是近年来, 随着双重绝缘、电气隔离、漏电保护等防触电新技术的应用, 对于减少触电事故已经取得了明显的效果。我国在农村推广使用漏电保护器后, 触电死亡减少了 1/2。双重绝缘设备的开发和推广, 对控制和减少手持电动工具、家用电器的触电事故也起了很大的作用。电气隔离是应用高绝缘隔离变压器将接地配电网转换为小容量不接地配电网, 隔断明显的故障电流回路的安全技术, 这一技术有待进一步推广。对于其他新兴的防触电技术, 如不导电环境, 防触电本质安全型电气装置等方面也有待继续开发和探讨。

我国是一个用电相对落后的国家, 用电状况又十分复杂, 发展也不平衡。同时, 随着各国不同电气设备的引进, 随着科学技术的发展, 必将出现新的电气安全问题。因此, 必须研究触电领域里的新问题, 包括安全标准、安全规范、安全教育、安全管理等软科学课题的研究, 也包括大量的不同用电装置、不同用电环境、不同用电条件、不同用电要求下防触电的技术的研究。

三、电力生产安全目标

(一) 我国电力系统(或电力行业)总体安全目标

我国电力系统(或电力行业)安全生产的总体安全目标是防止两类七种事故。

(1) 两类事故, 即对社会造成重大影响和对资产造成重大损失的事故。

(2) 七种事故。与两类事故对应的七种事故是:

- 1) 人身死亡事故。
- 2) 大面积停电事故。
- 3) 大电力系统瓦解事故。
- 4) 电厂垮坝事故。
- 5) 主设备严重损坏事故。
- 6) 重大火灾事故。
- 7) 核泄漏事故。

(二) 国家电网公司分公司、电力集团公司、省电力公司安全生产目标

(1) 不发生人身死亡事故。

(2) 不发生重大电力系统事故。

(3) 不发生有人员责任的重大设备事故。

(4) 不发生特别重大设备事故。

(5) 不发生重大火灾事故。

(6) 不发生重大施工机械设备损坏事故。

(三) 水电施工企业安全生产目标

(1) 不发生人身群亡事故。

(2) 不发生重大施工机械设备严重损坏事故。

(3) 不发生重大质量事故。

(四) 发电、供电、检修、火电施工和送变电施工企业安全生产目标三级控制

(1) 企业控制重伤和事故，不发生人身死亡、重大设备损坏和电力系统事故。

(2) 车间（含工区、工地）控制轻伤和障碍，不发生重伤和事故。

(3) 班组控制未遂和异常，不发生轻伤和障碍。

(五) 安全无事故记录

发电、供电企业及有关调度机构每年实现的百日无事故记录个数为：

(1) 1000MW 及以上容量的火电厂 1 个，其他容量的火电厂 2 个。

(2) 500 MW 及以上容量的水电厂 2 个，其他容量的水电厂 3 个。

(3) 主变压器容量 1000MV·A 及以上的供电企业 1 个，500~1000 MV·A 的供电企业 2 个，500MV·A 及以下的供电企业 3 个。

(4) 省级及以上调度机构 3 个。

四、课程介绍

本书从预防电气事故的理念出发，以供用电运行管理为研究对象，从已知的运行状况和事故资料，揭示事故原因、存在的危险因素，探讨所应采取的安全技术措施和管理措施。本课程第一章讨论绝缘的电气特性及其预防性试验方法；第二章讲述人身触电的防护及触电急救常识；第三章讲述过电压的知识及过电压的防护；第四章讨论电气作业的安全技术措施和组织措施；第五章介绍安全性评价和危险点分析的有关内容；第六章和第七章分别讲述电气防火防爆及电力事故的统计与分析有关内容。

第一章 电气设备绝缘的电气特性及其预防性试验

第一节 概 述

人们通常把导电能力很差的物质叫作绝缘材料,或称电介质,非严格意义上可认为绝缘材料不导电。绝缘材料可分为气体、液体和固体绝缘材料。如空气、六氟化硫和氮气等是常用的气体绝缘材料;变压器油、蓖麻油和硅有机油类等是液体绝缘材料;电瓷、云母、环氧树脂、聚乙烯和聚四氯乙烯等是固体绝缘材料。

在电力系统中,为了防止发生人身直接接触电事故和保证电力系统的安全运行,各种电气设备结构中有各种各样的绝缘,其导电部分要用绝缘与接地的外壳或构架隔离开。这些电气设备的绝缘就是由各种绝缘材料或它们的组合构成的。

电气设备绝缘在制造、运输过程中可能产生潜伏性缺陷,在长期运行过程中,还将受到正常运行电压和过电压、热、化学、力、大气等的影响而逐渐劣化,并发展成为缺陷,从而引起电力系统运行事故。

绝缘的缺陷一般可分为集中性缺陷和分布性缺陷两大类。集中性(或局部性)缺陷是指绝缘的某个局部或某几个部分存在缺陷,而剩余部分完好无损。例如瓷件局部开裂、发电机绕组线棒端部绝缘局部磨损或开裂、绝缘内部有气泡等。这种缺陷在一定条件下发展很快,会波及到整体。分布性(或整体性)缺陷是指绝缘在各种因素影响下导致的整体绝缘性能下降。例如绝缘整体受潮、变压器油变质、固体有机绝缘的老化等。这种缺陷是缓慢发展的。

绝缘在电场作用下,会发生诸如极化、电导、损耗和击穿等各种物理现象,表征这些现象的物理量就表示了电气设备绝缘的电气特性。绝缘出现缺陷后,其电气特性及其他绝缘性能就要发生变化绝缘试验就是通过使用各种方法,测量表征其电气特性及其他绝缘性能的有关参数的变化或趋势,来判断绝缘的状况。

绝缘预防性试验是在运行过程中结合检修定期进行的绝缘试验。这种试验能及时发现设备中存在的隐患,然后加以消除,避免发生事故,是判断设备能否投入运行、预防设备绝缘损坏和保证设备安全可靠运行的重要措施。

电气设备的预防性试验方法一般可分为非破坏性试验和破坏性试验两大类。

非破坏性试验是指在低于或接近额定电压下或者用非电的方法测量绝缘的各种特性及其变化,从而判断绝缘的状况。这种试验方法对被试验电气设备绝缘(也称为被试品或试品)不会造成损伤。非破坏性试验方法有很多种,各种方法能够反映的绝缘缺陷的性质不同,对不同的绝缘材料和绝缘结构的有效性也不一样。因此,对绝缘一般采用多种不同的非破坏性试验方法,并对试验结果进行综合分析比较后,才能做出正确的判断。其优点是能在一定程度上反映绝缘缺陷的不同性质及其发展程度,不损坏绝缘;缺点是不能根据测量结果直接确定绝缘耐受电压的能力(击穿电压)。

破坏性试验是指在高于工作电压下所进行的试验,也称耐压试验。这类试验模仿设备

绝缘在运行中可能受到的各种过电压,对绝缘施加与之等价的或更为严峻的电压,所加电压较高,从而考验绝缘耐受这类电压的能力,对绝缘的考验是严格和有效的,但可能对绝缘造成损伤。其优点是对绝缘的考验严格,是最有效和最可信的;缺点是不能揭示绝缘缺陷的性质且有可能导致绝缘损坏。

各种非破坏性试验的结果与绝缘的击穿电压之间没有确切的定量关系,所以耐压试验是决定性的和不可替代的,但又只能在绝缘缺陷发展到较严重的程度时,耐压试验的结果才能以击穿的形式表现出来,而非破坏性试验能使我们防患于未然。由此可见,两类试验方法是互为补充,而不能相互代替的。由于破坏性试验对绝缘可能造成损伤,所以破坏性试验应在非破坏性试验之后进行。如果非破坏性试验结果已表明绝缘存在缺陷,则必须查明原因并进行处理后,再进行耐压试验,以免发生不应有的击穿事故。

在这里先介绍绝缘材料的电气特性,然后再介绍绝缘的预防性试验方法。

第二节 电介质的极化

一、极化和介电常数

一般电介质在没有外部电场情况下对外不显示电性,即不显示极性。但当电介质在受到电场作用时,情况发生了变化,开始对外显示电性,即出现极性。这种在电场作用下电介质中的电荷质点在电场方向上产生有限位移的现象就称为电介质的极化。

如图 1-1 所示为一平行平板电容器,极板面积为 A ,距离为 d ,电极间所加直流电压为 U 。当极板间为真空时,电压 U 对真空电容器充电,极板上出现的电荷量为 Q_0 ,此时真空电容器的电容(几何电容) C_0 为

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

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

在该真空电容器极板间放入某种电介质,如图 1-1 (b) 所示,施加同样的直流电压 U ,发现极板上电荷量为 $Q = Q_0 + \Delta Q$,即极板上电荷量由真空时的 Q_0 增加到 Q ,此时电容器的电容量为

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

其中, ϵ 为该种电介质的介电常数,其值由电介质材料性质决定,它描述了介质的极化现象。一般把电介质的介电常数与真空的介电常数的比值称为该介质的相对介电常数,用

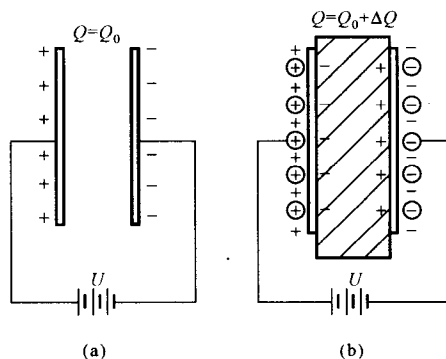


图 1-1 极化现象

(a) 电极间无介质; (b) 电极间有介质

ϵ_r 表示, 即

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

显然, $\epsilon_r > 1$ 。各种气体的相对介电常数都接近于 1, 而常见的液体、固体的相对介电常数一般在 2~6 之间。几种常用介质的相对介电常数, 见表 1-1。介电常数的大小, 反映了极化现象的强弱, 与温度和频率有关, 还与极化形式有关。

表 1-1 几种电介质的相对介电常数

材料类别		名 称	相对介电常数 (工频, 20℃)
气体介质 (标准状态下)		空 气	1.00059
		六氟化硫	1.002
液体介质	弱极性	变压器油	2.2
		硅有机油	2.2~2.8
	极性	蓖麻油	4.5
		氯化联苯	4.6~5.2
	强极性	丙 酮	22
		酒 精	33
		水	81
固体介质	中性	石 蜡	1.9~2.2
	弱极性	聚四氯乙烯	2.0
		聚苯乙烯	2.4~2.6
		松 香	2.5~2.6
		沥 青	2.6~2.7
	极性	纤维素	6.5
		胶 木	4.5
		聚氯乙烯	3.3
	离子性	云 母	5~7
		电 瓷	5.5~6.5

二、极化形式

1. 电子式极化

任何电介质都是由原子、分子或离子构成, 其微观结构都是由具有带正电的原子核和带负电的电子组成。没有外电场时, 其正、负电荷的作用中心重合, 电荷量彼此相等, 对外呈中性, 如图 1-2 (a) 所示。

当有外电场作用时, 电子的轨道将相对于原子核产生位移, 其作用中心与原子核的正电荷不再重合, 对外呈现出极性, 这就叫作电子式极化, 如图 1-2 (b) 所示。

电子式极化在所有电介质中都会发生。其特点是形成极化的时间极短, 约在 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ s}$, 可看作瞬时完成, 故其 ϵ_r 不随频率改变; 电子式极化具有弹性, 即当外电场消失后, 依靠正负电荷间的引力, 正负电荷作用中心会立即重合而呈中性, 没有能量损耗, 不

使介质发热；温度对电子式极化的影响极小，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 下降，即 ϵ_r 具有很小的负温度系数。

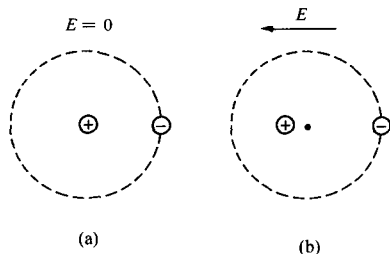


图 1-2 电子式极化

(a) 无外电场；(b) 有外电场

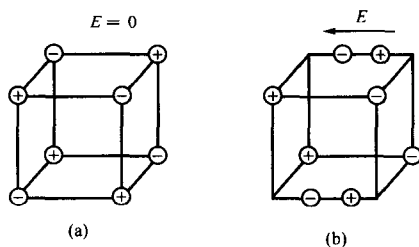


图 1-3 离子式极化

(a) 无外电场；(b) 有外电场

2. 离子式极化

固体无机化合物如云母、陶瓷、玻璃等属于离子式结构。这类介质在无外电场时，每个分子正负离子的作用中心是重合的，故不呈现极性，如图 1-3 (a) 所示。在外电场作用下，正负离子发生相对位移，正离子顺电场方向偏移，负离子逆电场方向偏移，使整个分子对外显现极性，这种极化称为离子式极化，如图 1-3 (b) 所示。

离子式极化发生在离子式结构的介质中，和电子式极化相似，极化的过程很短，约为 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ s}$ ，而且 ϵ_r 不随频率变化。它也具有弹性，几乎没有能量损耗。温度对离子式极化有两方面的影响：一方面是温度升高时离子间的结合力下降，使极化程度增加；另一方面是温度升高时离子的密度减小，使极化程度降低。一般前者的影响较大，故其 ϵ_r 具有正的温度系数。

3. 偶极子式极化

极性电介质诸如蓖麻油、橡胶、胶木、聚氯乙烯、纤维素等是由偶极子组成的。偶极子的电子作用中心和原子核不重合，分子本身形成一个永久性的偶极子。单个偶极子虽具有极性，但由偶极子构成的极性介质在没有外电场作用时，各个偶极子都处在不停的热运动之中，分子排列杂乱无章，对外并不显示极性，如图 1-4 (a) 所示。但是，在外电场作用下，原来混乱分布的偶极子受电场力作用开始转向，顺电场方向作有规则排列，因而对外显示极性，这就是偶极子式极化，也叫转向极化，如图 1-4 (b) 所示。

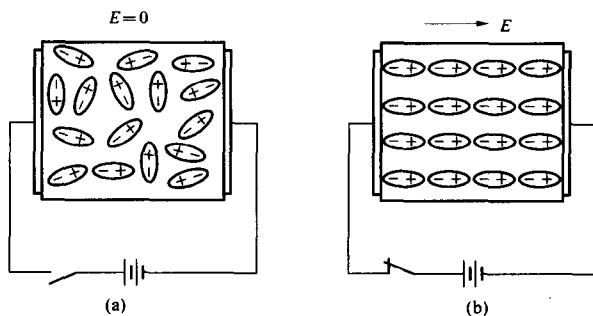


图 1-4 偶极子式极化

(a) 无外电场；(b) 有外电场

偶极子式极化在一切极性介质中都会发生。这类极化的特点是极化属于非弹性极化；因极性分子转向时需要克服分子间的作用力，故在极化过程中需要消耗能量，极化所需的时间也较长，约为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ s}$ ；它的 ϵ_r 与频率有关，开始会随着频率增加而增大，但当频率较高时偶极子的转向跟不上电场方向的变化，使 ϵ_r 减小；温度对极性介质的影响较大，当温度

升高时,分子间作用力减弱使极化加强,同时分子热运动加剧使极化减弱,故极性介质的 ϵ_r 在温度较低时会随温度升高而增大,在温度较高热运动变得剧烈时会随温度升高而减小。

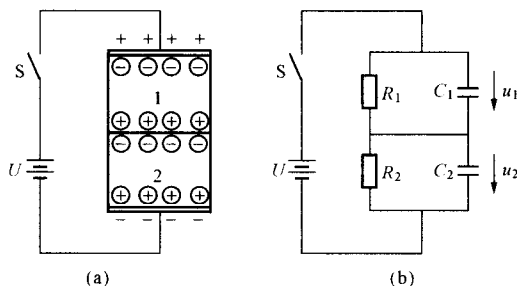


图 1-5 夹层极化的物理过程

(a) 电路示意图; (b) 等效电路

C_1 、 C_2 —各层介质的电容; R_1 、 R_2 —各层介质的电阻;

u_1 、 u_2 —各层介质上分到的电压

4. 夹层式极化

上述三种极化是单一介质中发生的极化形式,对于由多层介质构成的电气设备绝缘,如电缆、电容器和变压器绕组等,还会发生夹层极化。下面以双层介质为例来分析其极化过程,如图 1-5 所示。两层介质 1、2 各自的等值电阻和电容分别为 R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 ,外施直流电压 U ,等值电路如图 1-5 (b) 所示。

在 S 合闸瞬间 ($t=0$),电压由 0 升到 U ,相当于很高频率电压的作用,电阻相当于开路,电流全部流过电容,电容支路的

阻抗远小于电阻,这时两层电介质上的电压分配与各层电容成反比,即

$$\left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{t=0} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1-4)$$

到达稳态时 ($t \rightarrow \infty$),电容相当于开路,电流全部流过电阻,各层上分到的电压与各层电阻成正比,即

$$\left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1-5)$$

由于不是同一种介质,即 $C_1 \neq C_2$, $R_1 \neq R_2$,所以通常情况下有

$$\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{R_1}{R_2} \quad (1-6)$$

则

$$\left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{t=0} \neq \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{t \rightarrow \infty} \quad (1-7)$$

所以合闸以后,两层介质之间有一个电压重新分配的过程,即 C_1 、 C_2 上的电荷要重新分配。

设 $C_1 > C_2$ 和 $R_1 > R_2$,则 $t=0$ 时, $u_1 < u_2$; $t \rightarrow \infty$ 时, $u_1 > u_2$ 。随时间 u_1 逐渐增大而 u_2 逐渐下降,就是说 C_2 上的一部分电荷要通过 R_2 放掉,而 C_1 则要从电源再吸收一部分电荷(称吸收电荷),于是在两层电介质的交界面上就出现电荷的积聚,并使整个电介质的等值电容增大,这就是夹层极化。极化时因介质电阻较大而时间常数较大,故极化过程是很缓慢的,其完成时间从几秒到几十分钟。因此,这种性质的极化只有在低频时才有意义,并且极化时伴随有能量损耗。需要指出的是:当外施电压去掉后,介质内部吸收的电荷逐渐中和,即使在极板暂时短路的情况下,仍会有残余电荷,因此对使用过的大电容设备,应将两极短接彻底放电,以免危及人身安全。

三、电介质极化在工程上的意义

(1) 选择制造电容器的绝缘材料时,一方面要注意材料的绝缘强度,另一方面希望材

料 ϵ_r 要大,这样电容器单位容量的体积和重量就可以减小。其他绝缘结构则往往希望 ϵ_r 小一些好,例如减小电缆绝缘的 ϵ_r ,可以减小充电电流以及因极化而引起的发热损耗。

(2) 电气设备绝缘为几种绝缘材料组合时要注意各种材料 ϵ_r 值的配合。在交流及冲击电压作用下,多层串联电介质中的场强分布与介电常数成反比,因为气体介质的 ϵ_r 比固体介质的小,固体绝缘中的气泡将受到较大场强的作用,因而容易引起局部放电。在电缆绝缘中,由于电场径向分布不均匀,靠近电缆芯处的场强大于外层的场强,如果利用具有不同 ϵ_r 的电介质作电缆绝缘,使内层绝缘的 ϵ_r 大于外层绝缘的 ϵ_r ,就可使场强的分布更加均匀。

(3) 绝缘的介质损耗与介质的极化形式有关,而介质损耗是决定绝缘老化和热击穿的重要因素。如极性介质的 ϵ_r 大,往往其介质损耗也大。

(4) 在绝缘预防性试验中,夹层极化现象可用来判断绝缘受潮的情况。

第三节 电介质的电导

一、电介质电导的定义及其特点

任何电介质都不可能是理想的绝缘体,只是导电能力很差,也就是说电介质中总有少量的带电粒子(主要是正、负离子)存在。在电场作用下,这些带电粒子沿电场方向作有规则的运动,形成电流,这种物理现象称为电介质的电导。任何电介质都具有一定的电导,表征电导大小的物理量是电导率,通常用 γ 表示,它决定着介质的绝缘性能。几种电介质的电导率参见表1-2。

表 1-2 几种电介质的电导率

材料类别		名称	电导率 (20℃, $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
液体介质	弱极性	变压器油	$10^{-12} \sim 10^{-15}$
		硅有机油	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
	极性	蓖麻油	$10^{-10} \sim 10^{-12}$
固体介质	中性	石蜡	10^{-16}
	弱极性	聚四氟乙烯	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
		聚苯乙烯	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
		松香	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		沥青	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
	极性	纤维素	10^{-14}
		胶木	$10^{-13} \sim 10^{-14}$
		聚氯乙烯	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
	离子性	云母	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		陶瓷	$10^{-14} \sim 10^{-15}$

电介质的电导主要是由离子移动造成的,导电能力是由电介质中的离子决定的。离子来源有两方面,一方面是电介质分子分解成的自由离子,另一方面是电介质中的杂质分解成的离子。与金属导电相比,它们的电导截然不同。电介质的电导是离子性的,而金属的电导是电子性的。电介质的电导极小,其电阻率高达 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$,而金属的电导则极大,电阻率仅为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。因为温度升高,离子的热运动加剧,容易改变原有受束缚的状态,故电介质的电导率就会随温度升高按指数规律上升,即电介质的电阻具有负的温度系数,而金属因温度升高,自由电子热运动加剧,增加其定向移动的难度,故金属电导会随温度升高降低,即金属电阻具有正的温度系数。另外,当施加在电介质上的电压达到一个临界值时,会发生显著的、快速增长的自由电子导电现象,此时其电导大增,绝缘电阻剧烈下降。

气体电介质在外施电压低于其放电电压情况下的电导极小,可以忽略不计,这表明气体电介质是优良的绝缘材料。

构成液体介质电导的带电粒子主要有两种:一是由液体本身的分子和杂质的分子分解产生的离子;另一种是液体中的胶体质点(如变压器油中悬浮的小水滴)吸附电荷后变成带电粒子。中性液体介质本身分子的分解是极微的,其电导主要是由杂质离子构成。极性液体的电导除由杂质离子形成外,还与本身分子分解形成的离子有关,故其电导率较高,而且极性液体介质的相对介电常数越大,其电导也越大,已不能作为绝缘材料使用,如水、酒精等。杂质对液体介质电导的影响很大,当杂质较多时,其绝缘性能将大大下降,如变压器油中杂质太多时应进行净化处理,使之恢复绝缘性能。液体介质的电导还与温度有关,当温度升高时,液体介质的粘度降低,离子受电场力作用移动时所受的阻力减少使电导增大。同时,温度升高时,液体介质分子或离子的热离解度增加也使电导增大。

固体电介质的电导由体积电导和表面电导组成。体积电导是由固体介质本身的离子和杂质离子构成。固体介质本身的离子电导很小,故在温度不太高的情况下,一般总是杂质电导起主要作用。杂质的形成有些是为了某种目的而加入的某种成分,有些是外界侵入的(如水分),故对多孔性材料,要进行防止水分侵入的处理。表面电导主要是附着于介质表面的水分、尘埃或导电性的化学沉淀物引起的。表面电导对介质表面的污秽和吸潮情况非常敏感,故受环境条件的影响很大,也不稳定。固体介质表面干燥、清洁时,其表面电导

很小。

二、直流电压下通过电介质的电流

在电压作用下,电介质中将有电流通过。如图 1-6 (a) 所示,当开关合上后,在电介质上加一直流电压,可以测到介质中流过一个微小的电流 i 。它随加压时间逐渐衰减,最后趋于一稳定值,如图 1-6 (b) 所示。电流 i 由三个分量组成,即

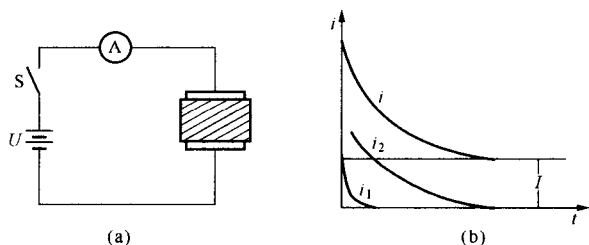


图 1-6 直流电压下流过介质中的电流

(a) 电路图; (b) 电流变化曲线图

$$i = i_1 + i_2 + I \quad (1-8)$$

其中, i_1 是电源对几何电容的充电以及电介质的电子式极化、离子式极化所引起的电流, 存在的时间极短, 迅速衰减到零; i_2 是由夹层极化和偶极子极化等有损耗极化过程所引起的电流, 称为吸收电流, 它衰减比较缓慢, 存在时间可达数分钟, 甚至数小时, 在多层介质中是比较明显的; I 是由电介质中离子移动形成的电流, 即电介质在直流电压作用下, 经过一定的时间后极化过程结束, 电介质中通过的电流趋于一个稳定值, 这个电流称为泄漏电流。与这个稳定电流值相对应的电阻值称为电介质的绝缘电阻 R_∞ , 即

$$R_\infty = \frac{U}{I} \quad (1-9)$$

流过电介质中泄漏电流的大小主要是由介质中自由离子的多少决定的, 泄漏电流大将引起介质发热, 加速绝缘老化。

三、绝缘电阻在工程上的意义

(1) 在电气设备绝缘预防性试验中, 测量绝缘电阻值和直流泄漏电流可以判断设备绝缘是否受潮或有否其他劣化现象。

(2) 多层介质在直流电压作用下的稳态电压分布与各层介质的绝缘电阻成正比, 故设计用于直流的设备时, 要注意所用介质的电导率, 尽量使材料得到合理的使用。

(3) 设计绝缘结构时, 要考虑到绝缘使用的环境条件, 特别是湿度的影响。如有些有胶纸外壳的高压设备, 在潮湿天气时, 由于受潮引起表面电导太大而无法使用。

(4) 并不是所有情况下都希望绝缘电阻值高, 有些情况下要设法减小绝缘电阻值。如在高压套管法兰附近涂半导体釉、高压电机定子绕组出槽口部分涂半导体漆等来减小其表面电阻值, 达到改善电压分布的目的, 以消除电晕的产生。

第四节 电介质的损耗

一、电介质损耗的基本概念

由前述可知, 电介质在电压作用下都有能量损耗。一种是由极性介质中的偶极子极化和多层介质的夹层极化等引起的极化损耗; 另一种是由介质电导引起的电导损耗。在直流电压作用下, 电介质中不存在周期性的极化过程, 所以只存在由电导引起的电导损耗; 在交流电压作用下, 除了电导损耗外, 还存在由周期性极化过程引起的极化损耗。

我们把电介质单位时间内消耗的能量称为电介质功率损耗, 简称介质损耗。它将使电介质发热, 加速绝缘老化, 是导致固体电介质热击穿的根源。

如图 1-7 所示, 电介质在交流电压作用下的等值

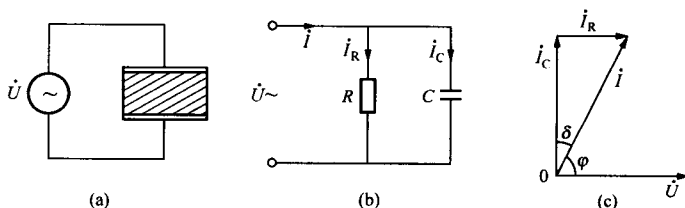


图 1-7 电介质在交流电压下的等值电路和相量图

(a) 电路图; (b) 等值电路; (c) 相量图