

高职高专机电类专业统编教材
全国水利水电高职教研会组编

GAODIANYA JISHU

高电压技术

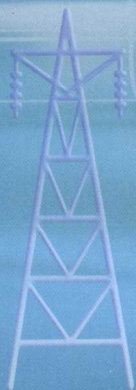
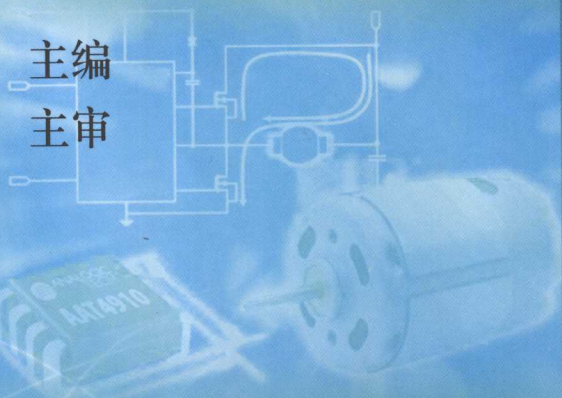
黄瑞梅

李玉清

主编

袁兴惠

主审



黄河水利出版社

高职高专机电类专业统编教材
全国水利水电高职教研会组编

高 电 压 技 术

主 编	黄瑞梅	李玉清
副主编	刘福玉	李文才
参 编	王 维	陈小飞
主 审	袁兴惠	

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是高职高专机电类专业统编教材,是根据全国水利水电高职教研会制定的高电压技术课程教学大纲编写完成的。全书共分8章,内容包括绝缘材料的绝缘性能及放电机理、绝缘的劣化及试验技术、电力系统过电压及保护设备和保护措施、电力系统的绝缘配合等,着重介绍了高电压技术的基本概念及工程应用中的关键问题,对近年来高电压技术领域中的新技术和新进展作了较多的介绍。

本书为高职高专机电类专业高电压技术课程教材,也适用于高等院校成人教育机电类或电气类专业,同时也可以作为电力工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/黄瑞梅,李玉清主编. —郑州:黄河水利出版社,2009.7

高职高专机电类专业统编教材

ISBN 978-7-80734-654-8

I. 高… II. ①黄… ②李… III. 高电压-技术-高等学校:技术学校-教材 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 107045 号

策划组稿:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com
简 群 66026749 w_jq001@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsllcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:12.75

字数:300千字

版次:2009年7月第1版

印数:1—4 100

印次:2009年7月第1次印刷

定价:24.00元

前 言

本书是根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作意见》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》等文件精神,以及由全国水利水电高职教研会拟定的教材编写规划,报水利部批准,由全国水利水电高职教研会组织编写的机电类专业统编教材。

本书是为高等职业技术学院机电专业编写的高电压技术教材,也可以作为发电厂及电力系统、高压输电线路运行与维护、供用电技术等专业课教材。高等职业教育是高等教育的一个重要方面,近年来在我国得到蓬勃发展。其目标是培养具有高尚职业道德、具有大学专科理论水平、具有较强操作动手能力,工作在职业现场第一线的技术人员和管理人员。

高电压技术是一门实践性很强的课程,学生通过本课程的学习不但应该掌握一定的基础理论知识,而且应在分析问题、解决问题和实际动手等能力方面得到锻炼和提高。本书在编写过程中,注重理论结合实际,论述清晰准确,深入浅出。

本书共分 8 章。在编写内容上,注重新技术的介绍,在高压绝缘部分,增加了 SF₆ 气体特性及应用;在高压试验部分,强化了常用电气设备的试验分析和判断,增加了绝缘在线监测技术与分析;在过电压防护部分,淘汰了管型避雷器、阀型避雷器的相关内容,强化了氧化锌避雷器的内容。在编写形式上,各章有一定数量的习题,其内容力求突出本课程的特点和基本要求,尽量做到与实践相结合。

本书编写人员及编写分工如下:绪论、第 1 章、第 2 章和第 4 章由福建水利电力职业技术学院黄瑞梅编写,第 3 章由河北工程技术高等专科学校李文才编写,第 5 章由重庆水利电力职业技术学院刘福玉编写,第 6 章由沈阳农业大学高等职业技术学院王维编写,第 7 章由湖北三峡电力职业学院陈小飞编写,第 8 章由湖北三峡电力职业学院李玉清编写。本书由黄瑞梅、李玉清担任主编,由刘福玉、李文才担任副主编,由四川水利职业技术学院袁兴惠担任主审。

本书编写过程中得到相关院校领导的大力支持和帮助,在此一并致以衷心的感谢。

限于编者的水平,加之时间仓促,书中错误和不妥之处是难免的,敬请读者批评指正。

编 者

2009 年 3 月

目 录

前 言	
绪 论	(1)
第1章 高电压下材料的绝缘性能	(2)
1.1 概 述	(2)
1.2 气体的绝缘性能	(5)
1.3 液体的绝缘性能	(12)
1.4 固体的绝缘性能	(15)
1.5 复合绝缘体的绝缘性能	(17)
1.6 绝缘体的其他性能	(25)
习 题	(26)
第2章 高电压下的绝缘评估及试验方法	(28)
2.1 绝缘评估	(28)
2.2 绝缘劣化	(29)
2.3 绝缘评估的试验方法	(31)
2.4 电气设备状态监测与故障诊断	(43)
习 题	(45)
第3章 线路和绕组中的波过程	(46)
3.1 行波在无损单导线上的传播	(46)
3.2 行波的折射和反射	(51)
3.3 行波通过并联电容和串联电感	(55)
3.4 行波的多次折射和反射	(58)
3.5 变压器绕组中的波过程	(61)
3.6 旋转电机绕组中的波过程	(68)
习 题	(70)
第4章 电力系统过电压及保护设备	(71)
4.1 电力系统的过电压	(71)
4.2 大气过电压保护设备	(72)
4.3 防雷接地	(80)
习 题	(84)
第5章 电力系统大气过电压及防护	(85)
5.1 雷闪过电压	(85)
5.2 输电线路的防雷保护	(94)
5.3 发电厂、变电所防雷保护	(108)

习 题	(125)
第6章 内部过电压	(126)
6.1 电力系统工频电压升高	(127)
6.2 电力系统操作过电压	(130)
6.3 电力系统谐振过电压	(142)
习 题	(145)
第7章 电力系统的绝缘配合	(146)
7.1 绝缘配合的概念和原则	(146)
7.2 绝缘配合的惯用法	(147)
7.3 绝缘配合的统计法	(149)
7.4 架空线路绝缘水平的确定	(150)
习 题	(154)
第8章 高电压试验技术	(155)
8.1 绝缘电阻的测量	(155)
8.2 泄漏电流的测量	(161)
8.3 介质损耗角正切的测量	(163)
8.4 局部放电试验	(166)
8.5 工频交流耐压试验	(171)
8.6 直流耐压试验	(178)
8.7 冲击电压试验	(180)
8.8 高电压测量技术	(185)
8.9 绝缘状况的综合判断	(191)
参考文献	(197)

绪 论

随着经济的发展,国民经济各行业对能源的需求日益迫切,国际能源机构预测,从近几年到 2025 年全球能源需求将增加近一倍。电力工业作为能源工业的主力而受到极大的重视,在发达国家的能源消费比例中,电能占一多半。除火力发电、水力发电外,又发展了核能发电、太阳能发电、风力发电、海洋能发电、地热发电等多种新能源形式。但不管哪种发电形式都离不开电力的传输,离不开高压输电。

当前,世界上的交、直流输电电压已超过 1 000 kV。我国规定 1 ~ 220 kV 为高电压,330 ~ 500 kV 为超高压,1 000 kV 及以上为特高压。目前我国已建成 1 000 kV 交流特高压输电系统,±800 kV 直流输电系统也已开始建设。

随着输电电压的提高,需要生产相应的高压电气设备,这就需要对各类绝缘电介质的特性及其放电机理进行研究,而其中对气体放电机理的研究是研究其他材料放电机理的基础。设备额定电压的提高使绝缘材料和绝缘结构的研究成为很重要的问题,当前,各种高抗电强度气体和各类有机高分子合成材料等新型绝缘材料的出现为制造高压电气设备提供了广阔的前景。

除设备问题外,建设高压输电系统还面临着很多高电压技术课题,诸如高压输电线路的电晕;不对称故障及输电线路电晕对通信的干扰;高压电磁场对周围环境和人体的影响;电力系统的过电压等。电力系统过电压是危害电力系统安全运行的主要因素之一,电力系统的过电压来自两个方面,一是由雷电和雷击电力系统所引起的大气过电压;二是由电力系统中因开关操作或系统参数配合不当而引起的谐振等形成的内部过电压。电力系统过电压作用的时间虽然很短,但它会造成设备的损坏,危害电力系统的安全运行。研究过电压产生的原因及限制过电压的措施,提高设备耐受过电压的能力,研究新型的能够限制过电压的设备(如避雷器)已成为建设超高压和特高压电网所面临的主要课题。

随着计算机技术、微电子技术及材料科学等新兴技术的发展,传感技术、信号处理技术及计算机控制技术等各种综合技术在电力系统中的不断应用,高电压技术得到了日新月异的发展。电气设备运行的状态监测和设备绝缘状态的检测以及诊断正在由过去以定期检修为主的预防性维护向以预防且预知事故为主的自动化预测维护方向发展,以保证电气设备更加安全、可靠地运行,从而提高电力供应的质量和可靠性,满足由于城市功能进步和社会生活质量提高以及信息化社会发展对电能的需求。

高电压技术这门学科是从生产实践中发展起来的,因为现有的电介质理论还远未完善,各种绝缘材料和绝缘结构的电气性能还不能单纯依靠理论上的分析计算来解决问题,必须借助于各种绝缘试验来检验和掌握绝缘的状态和性能。因此,在研究和学习理论的同时,更应该强调实践的重要性,需要依靠实践结果的积累、提高和总结,推进高电压技术的发展。

第 1 章 高电压下材料的绝缘性能

1.1 概 述

自然界的物质根据其物理导电性能可分为三类,即容易导电的导体(电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$)、不导电的绝缘体(电阻率为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$)以及处于导体和绝缘体之间的半导体。在电力系统中,用气体、液体、固体绝缘材料或它们的组合把各种电气设备的导电部分与接地的外壳或支架隔离开,以保证这些电气设备的正常运行。而这些绝缘物质在外电场的作用下会产生许多物理现象,如极化、电导、电离、损耗和击穿放电等,正确理解和认识这些现象,对我们进行绝缘结构的合理设计、绝缘材料的合理利用以及对绝缘性能的准确评估有着非常重要的意义。

1.1.1 电介质的极化

从绝缘体的电介质性质来看,可以把气体、液体、固体绝缘体称做电介质。一切物质内部都有正电荷和负电荷,通常情况下正、负电荷处于相对平衡状态,物质呈现电中性,当外加电压后,正、负电荷受电场力的作用,其相对位置发生变化,尽管内部正、负电荷仍相互抵消,但随着正、负电荷相对位置的变化,电介质表面出现电荷,这种现象称为电介质的极化,出现的电荷称为极化电荷。一般用相对介电常数 ϵ_r 来表示电介质极化的程度。

一些电介质的相对介电常数见表 1-1。

根据电介质极化程度的大小,电介质可分为中性电介质和极性电介质。讨论介质极化现象在工程中是有实际意义的。如相对介电常数 ϵ_r 小的绝缘物质,由于其介质热损耗小,常用做高压电气设备的绝缘结构、电缆绝缘等;而制作电容器时,在相同的耐电强度下,要选择 ϵ_r 大的绝缘材料作为极板间的绝缘物质,以使单位电容器的体积和重量减小。

根据电介质的物质结构,电介质极化具有电子极化、离子极化、偶极子极化和夹层极化四种基本极化形式,中性电介质一般为电子极化、离子极化;极性电介质一般为偶极子极化、夹层极化。

1.1.2 电介质的电导

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,它们可做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。在加直流电压 U 于介质时,初始瞬间由于各种极化过程的存在,流过介质中的电流是随时间变化的,在一定时间后,极化过程结束,流过介质的电流趋于一定值 I (泄漏电流),与此对应的电阻称电介质的绝缘电阻(R_{∞}),可用下式求得

表 1-1 几种电介质的相对介电常数和电导率

材料类别		名称	相对介电常数 ϵ_r (20 °C, 50 Hz)	电导率 γ (20 °C, $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
气体介质		空气	1.000 59	
液体介质	中性	变压器油	2.2	$10^{-12} \sim 10^{-15}$
		硅有机油类	2.2 ~ 2.8	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
	极性	蓖麻油	4.2	$10^{-10} \sim 10^{-12}$
固体介质	中性	石蜡	1.9 ~ 2.2	10^{-16}
		聚苯乙烯	2.4 ~ 2.6	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
		聚四氯乙烯	2	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
	极性	松香	2.5 ~ 2.6	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		纤维素	6.5	10^{-14}
		胶木	4.5	$10^{-13} \sim 10^{-14}$
		聚氯乙烯	3.3	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		沥青	2.6 ~ 2.7	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
	离子结构	云母	5 ~ 7	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		电瓷	6 ~ 7	$10^{-14} \sim 10^{-15}$

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

对固体介质,它应包括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。

介质的绝缘电阻决定着介质中的泄漏电流,它将引起介质发热,加速绝缘老化。介质电导(绝缘电阻之倒数)与金属电导不同,它比金属的电导小得多,且为离子性的(金属的电导是电子电导),故与温度有关。温度愈高,参与漏导的离子(介质本身或杂质)愈多,即电导电流愈大,所以介质电阻具有负的温度系数(金属电阻的温度系数是正值)。

图 1-1 给出了直流电压作用下流过介质的电流变化情况。 i_1 为电容电流分量,它是由加压初始瞬间电极间的几何电容,以及介质中的电子极化或离子极化过程所引起的电流, 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,是由偶极子极化或夹层极化所引起的,其存在时间较长,一般为几分钟至数十分钟,有损耗。 i_2 与时间轴所夹的面积,即为吸收电荷。一般地说,吸收现象主要是由不均匀介质的夹层极化所引起的。 I 是泄漏电流(或称传导电流),它与绝缘电阻值相对应,不随时间变化,于是介质中流过的总电流为

$$i = i_1 + i_2 + I \quad (1-2)$$

由此可画出如图 1-2 所示的等值电路。其中 C_0 代表无损极化与电极间几何电容的纯电容分支, C_0 中流过的电流为 i_1 ; r_a 、 C_a 代表有损耗极化电流分支, 其中流过的电流为 i_2 , 即吸收电流; r_∞ 代表泄漏电流分支, r_∞ 中流过的电流为 I 。

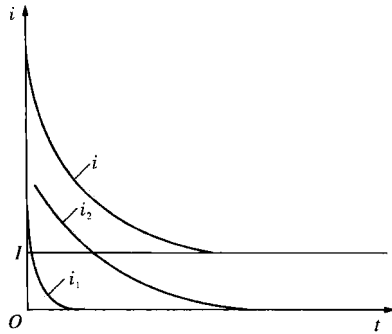


图 1-1 直流电压作用下流过介质的电流

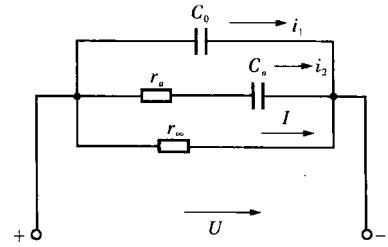


图 1-2 介质加压时等值电路

在工程实际中,绝缘电阻在预防性试验中,可以判断绝缘的优劣或是否受潮。设计时要考虑绝缘的使用环境,特别是湿度。直流设备要注意所用介质的电导与电压分布成反比。并非所有情况下均要求绝缘电阻值高,如高压套管法兰附近上半导体釉,是为了改善电压分布。

1.1.3 电介质的损耗

由前所述的极化和电导可看出,介质在电压作用下有能量损耗,一种是由极化引起的损耗,极性介质中偶极子转动有能量损耗,在多层介质中也会产生夹层介质极化引起的损耗;另一种是由电导引起的损耗。

直流电压作用下,由于无周期性的极化,因此损耗只是由电导引起的,用体积电阻率和表面电阻率两个物理量已足够表达,故直流电压下不需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 1-3 所示。图 1-3(b)为介质两端施加交流电压时的电压电流向量图(取电压为基准量),由于介质中有损耗,所以电流不是纯电容性的电流,而是包含有功和无功两个分量,即

$$\dot{I} = \dot{I}_r + \dot{I}_c \quad (1-3)$$

所以电源供给的视在功率为

$$\tilde{S} = P + jQ = U(I_r + jI_c) = UI_r + jUI_c \quad (1-4)$$

由图 1-3(c)功率三角形可见

$$P = Q \tan \delta = U^2 \omega C \tan \delta \quad (1-5)$$

用介质损耗 P 表示介质品质好坏是不方便的,因为 P 值和试验电压、试品尺寸等因素有关,不同的试品难以互相比较,故以介质损耗角正切值 $\tan \delta$ (δ 角为功率因数角 φ 的余角)来判断介质的品质。

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。

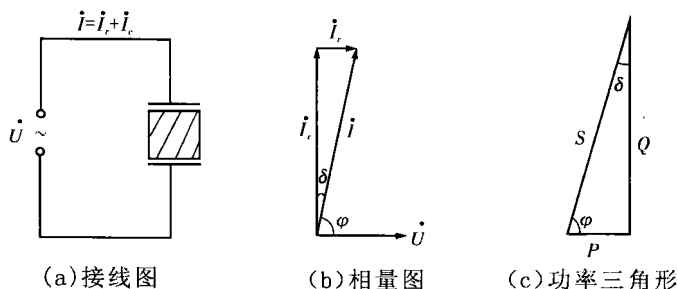


图 1-3 介质在交流下的接线图和相量图

图 1-4 是用电阻、电容并联的等值电路,从相量图上可看出

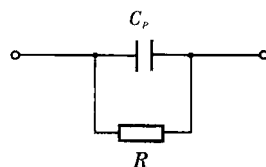
$$\tan \delta = \frac{\frac{U}{R}}{U \omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R} \quad (1-6)$$

如用串联等值电路表示,则 $\tan \delta = \omega C R$ 。由于绝缘的 $\tan \delta$ 都很小,损耗的表达式与式(1-5)相同。

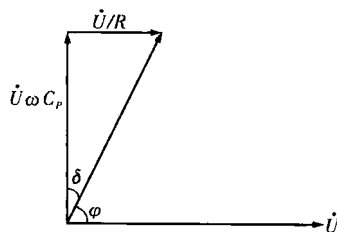
该等值电路只有计算上的意义,并不能确切地反映物理过程。如果损耗主要是由电导引起的,则常用并联等值电路。如果损耗主要由介质极化及连接导线的电阻等引起,则常用串联等值电路。但应注意,同一介质用不同等值电路表示时,其等值电容是不相同的。

由于绝缘材料在受潮或有缺陷时,电导电流会增加;在绝缘材料中有气泡、杂质和受潮的情况下,夹层极化加剧,极化损耗增加。所以,介质损耗角正切值 $\tan \delta$ 的大小直接反映了绝缘状况的好坏,在电气设备绝缘预防性试验中,通过测量 $\tan \delta$ 值可以有效地判断绝缘材料是否受潮、老化。

在工程实际中,设计绝缘结构时,必须注意到绝缘材料的 $\tan \delta$ 值,若 $\tan \delta$ 值过大则会引起严重发热,使材料容易劣化,甚至可能导致热击穿。但介质损耗引起的介质发热有时也有利用价值,如电瓷泥坯的阴干需要很长时间,若在泥坯两端加上适当的交流电压,则可利用介质损耗发热加速干燥过程。



(a) 等值电路



(b) 相量图

图 1-4 用电阻、电容并联等值电路和相量图

1.2 气体的绝缘性能

气体特别是空气,是电力系统中最常见的应用最广泛的绝缘材料。如架空线路相与相之间、导线与铁塔之间等,都是以空气作为绝缘介质的。气体分子间距离比液体和固体大得多,室温和 1 个大气压条件下,气体分子通常以约 500 m/s 的速度运动。虽然分子本身以这样快的速度运动,但因为分子大体是电中性的,基本上没电流,所以气体有非常好

的电绝缘性。

在通常情况下,由于宇宙射线及地层放射物质等天然辐射的作用,大气中少量气体分子被电离,同时被电离的分子由于扩散和复合而消失,所以一般保持平衡状态。给这样条件的气体施加电压时,电流将如图 1-5 所示分三个区段。在开始区段 A,随着电压的升高,离子的运动速度加大,电流与电压成正比地增加。至区段 B,电压上升时,电流不再随电压的升高而增加,因为这时所有电极间产生的离子已全部参与导电,所以电流趋于饱和。区段 B 的电流取决于离子生成速度,大气中的饱和电流密度约为 10^{-19} A/cm^2 ,此时饱和电流密度是极小的,因此气体仍处于良好的绝缘状态。进一步升高电压时,将出现电流骤增的区段 C。在这一区段,被电场加速的电子将碰撞中性分子,产生电子的碰撞电离,引起电荷骤增。在这以后再升高电压将导致气体绝缘击穿。下面将重点讨论在区段 C 发生的现象。

1.2.1 汤逊放电理论

英国人汤逊对区段 C 的电荷骤增作了如下说明。

靠宇宙射线等的天然辐射能使气体分子电离,生成正离子和电子。在低电场时,电子将附着于中性分子成为负离子,但在高电场时,电子将被加速并获得能够使其他气体分子电离的足够能量,去碰撞气体分子,并使其引起碰撞电离生成新的电子和正离子对。若在单位长度上这种碰撞电离重复发生 a 次,则最初的 n_0 个电子前进 x 距离时将变为 $n_0 e^{ax}$ 个,即按指数函数急剧增加,这种现象称为电子雪崩过程。图 1-6 是电子雪崩的示意图,由于电子的移动速度快,所以集中于电子雪崩的头部,而同时产生的正离子移动慢,留在电子雪崩的中后部。另外,在电离过程中电子因向侧面扩散,故电子雪崩呈圆锥状。

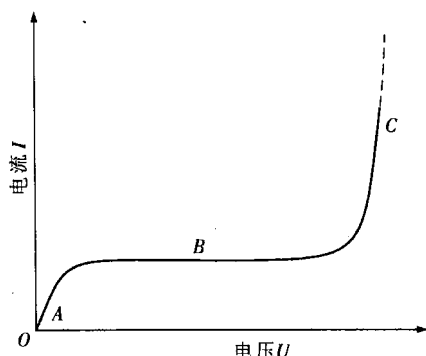


图 1-5 均匀电场中气体的导电特性

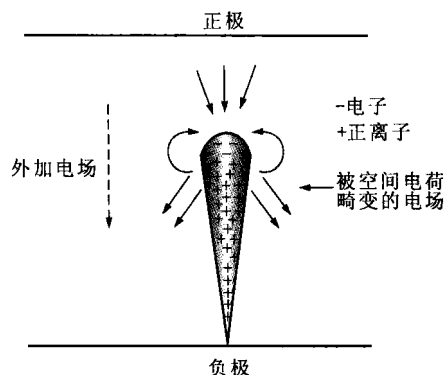


图 1-6 电子雪崩中的电荷分布

电流随电子雪崩发展而增大,但电子雪崩起始电子的生成只是靠宇宙射线等天然辐射能引起的偶发现象,电子雪崩只是单次的。为了使放电持续发生,必须有使电子雪崩的起始电子不断产生的新条件。电子雪崩过程中生成的正离子碰撞阴极时,使阴极至少释放出一个电子,从而抵偿产生电子雪崩后进入阳极的那个电子,这个电子仍将会在电场的作用下,向阳极移动,再次使气体分子引起碰撞电离形成新的电子雪崩。这样,即使不从外界供给起始电子,放电也能维持下去,这种放电现象称为自持放电。

1.2.2 巴森定律

因为气体分子的密度与压力成正比,所以汤逊放电条件下的碰撞电离次数是气压 p 和电极间隙 d 的乘积的函数,可从理论上导出均匀电场中气体绝缘击穿电压(也叫火花电压)为 pd 的函数。巴森用实验整理了气体击穿电压与 pd 的关系,弄清了各种气体都有同样的关系曲线(巴森曲线),如图 1-7 所示。这个关系称为巴森定律。

巴森曲线在 $pd = 10^{-2} \text{ bar} \cdot \text{mm}$ ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) 附近有极小值。在极小值点的右侧, p 由大变小时,电子碰撞的平均距离(平均自由程)增大,电子容易获得碰撞电离所需的能量,因而击穿电压

低。另一方面,在极小值左侧,由于 p 太小,致使碰撞电离所需的气体分子密度也太小,碰撞电离次数低,所以击穿电压高。另外,电极间隙距离 d 太小时,因电子雪崩不能充分发展,故击穿电压高。由曲线可知,当压力极端变大或变小,而 d 为数十厘米以下时,巴森定律都成立。这意味着在此范围内用汤逊放电理论来解释放电现象是可以理解的。

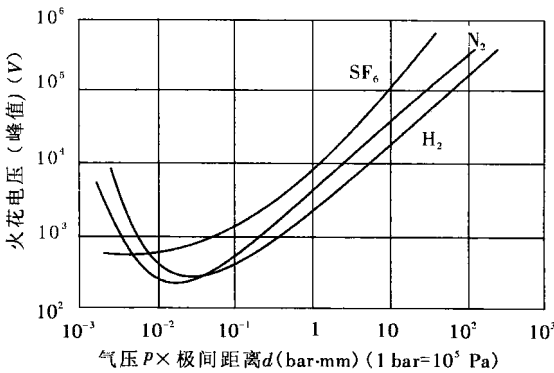


图 1-7 各种气体的巴森曲线(25 °C)

1.2.3 流注理论

当 $pd > 5\,000 \text{ bar} \cdot \text{cm}$ 时,汤逊放电理论与实际气体放电现象出现偏差。根据汤逊放电理论计算出来的击穿放电所需时间比实测的放电时间小 10 ~ 100 倍;按汤逊放电理论,阴极性质在击穿过程中起重要作用,然而在 1 个大气压的空气中,间隙击穿电压与阴极材料无关;按汤逊放电理论,气体放电应在整个间隙中均匀连续地发展,但在大气中气体击穿时,会出现有分支的明亮细通道。这些现象用汤逊理论不能解释。为了解决这一问题,流注理论被提了出来。

在流注理论中,考虑了汤逊放电理论中被忽视的正离子的空间电荷作用。由于正离子运动速度相比电子小得多,电子雪崩的正离子密度在阳极附近很大, pd 越大,正离子密度也越大,由此产生的局部空间电荷使场强提高,并向重新引起电子雪崩所需的场强值发展。这样一来,初始电子雪崩周围存在的电子将作为起始电子产生新的二次电子雪崩,二次电子雪崩不断地向初始电子雪崩汇合,其头部的电子进入了初始电子雪崩的正离子区域,电子和正离子高密度混合,成为电导性很高的等离子体状态,这就生成了流注,如图 1-8 所示。

流注内部正负电荷密度和温度都较电子雪崩时高,伴随较强的发光。在发光的作用下,流注周围气体分子被光电离,这使得向流注发展的电子雪崩起始电子充分存在。这样一来,如图 1-8(b) 所示,流注一边在其头部吸引电子雪崩,一边从正极向负极伸展,等电极间被流注连通时(见图 1-8(c)),整个间隙就被击穿。

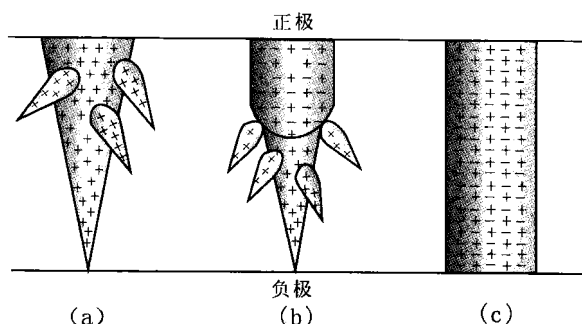


图 1-8 向负极发展的流注

如果极间距离更大,且电场极不均匀,那么,将出现与汤逊放电和流注放电不同形式的放电。图 1-9 画出了棒电极对平板之间的长间隙施加正冲击电压时的放电示意图。在棒电极头部电场高的地方发生多个局部流注放电,这些流注汇集起来成为导电性较高的高密度等离子体状态,这叫先导。先导到达对面平板电极时,把两电极跨接起来。电源供给很大能量,先导转为主放电,即绝缘被击穿。从用高速摄影机拍摄的先导发展过程可知,从正电极发展的正先导比负先导生长得快。雷电现象中先导放电阶段很明显。

1.2.4 电晕放电

在极不均匀电场中,电极曲率半径较小处附近空间的局部场强很大,因此在这局部强场区中,会产生强烈的碰撞电离,并在气体整体发生放电前,这部分放电持续进行。这种现象称为电晕放电,如图 1-10 所示。

在针—平板电极的不均匀电场中,放电集中在针尖高场强部分。给针对板电极施加直流电压时,根据针电极极性的不同,放电表现出的外观也有差异。正极性时,随着电压的上升,针尖附近从辉光电晕过渡到刷状电晕,再转为流注电晕,放电逐渐激烈,最后发展到击穿。负极性时,开始是称为托里切尔脉冲的脉冲电流,随着电压上升,脉冲周期逐渐缩短,然后过渡到辉光电晕和刷状电晕,最后整个间隙被击穿。下面解释托里切尔脉冲的发生机理。电子雪崩的电子离开带负电的针电极时,使针尖附近场强减小,碰撞电离难于进行,气体分子附着电子后在针电极头部形成负离子的同性空间电荷层。这个负的电荷层削弱针头部电场,使放电停止。但因负离子在电场作用下从针电极散开移向正电极,故针头部场强重又升高,开始放电。托里切尔脉冲就是上述过程的重复。

电晕放电具有以下几种效应:

(1) 伴随着放电过程有声、光、热等效应,表现为发出“滋滋”的声音,出现蓝色的晕光以及使周围气体温度升高。

(2) 电晕会产生高频脉冲电流,其中还包含着许多高次谐波,会造成对无线电的干扰。

(3) 电晕放电会产生许多化学反应,会在空气中形成 O_3 、 NO 、 NO_2 , O_3 对金属及有机绝缘有强烈的氧化作用, NO 、 NO_2 会与空气中的水分合成硝酸,是强烈的腐蚀剂。所以

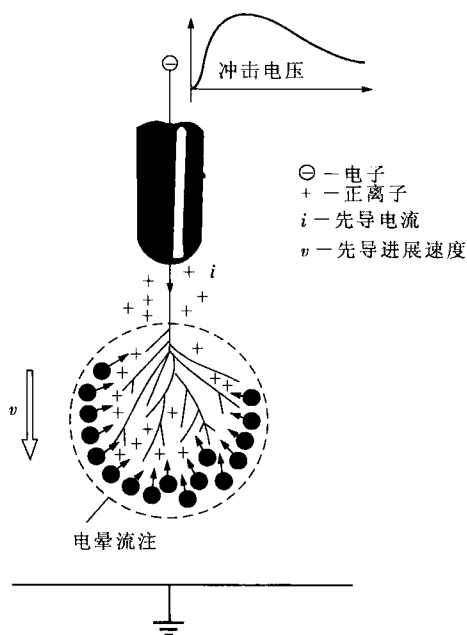


图 1-9 长间隙放电过程

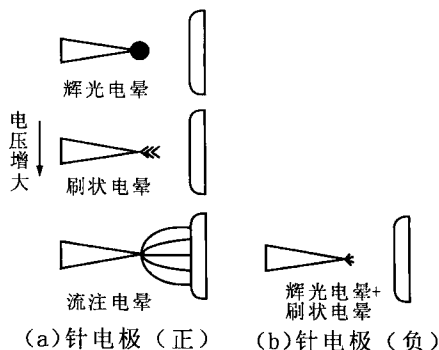


图 1-10 电晕放电(局部放电)

电晕会促使有机绝缘老化。

1.2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

在高压电气设备中经常遇到气体绝缘间隙。为了减小设备尺寸,一般希望间隙的绝缘距离尽可能缩短。为此需要采取措施,以提高气体间隙的击穿电压。根据前述分析可以知道,提高气体击穿电压有两种途径:一是改善电场分布,使其尽量均匀;二是利用其他方法来削弱气体中的游离过程。改善电场分布又有两种途径:一种是改进电极形状;另一种是利用气体放电本身的空间电荷畸变电场的作用。以下介绍一些提高气体间隙击穿电压的方法。

1.2.5.1 改进电极形状

均匀电场和稍不均匀电场间隙的平均击穿场强比极不均匀电场间隙的要高得多。一般来说,电场分布越均匀,平均击穿场强也越高,因此改进电极形状、增大电极曲率半径,可改善电场分布,提高间隙的击穿电压。同时,电极表面应尽量避免毛刺、棱角等,以消除电场局部增强的现象。高压静电电压表的电极就是电场比较均匀的电极结构的典型例子。

如不可避免出现极不均匀电场,则应尽可能采用棒—棒类型的对称电场。即使是极不均匀电场,不少情况下,为了避免在工作电压下出现强烈电晕放电,也必须增大电极曲率半径(改变电极形状)。在高压套管的端部加设屏蔽罩(如图 1-11 所示)即是一例。

1.2.5.2 极不均匀电场中屏障的采用

在电场极不均匀的空气间隙中,放入薄片绝缘材料(例如纸或纸板),在一定条件下,

可以显著提高间隙的击穿电压。所采用的薄片绝缘材料称为屏障。当屏障很薄,其本身的击穿电压很低时,同样存在屏障效应。

由图 1-12 可见,当屏障位于间隙中间一段范围内时,在不同极性下间隙的击穿电压彼此接近。可认为,这时整个间隙的击穿电压主要取决于电场相当均匀的屏障和板极间一段距离的击穿电压。均匀电场中空气的电气强度约 30 kV/cm ,整个间隙的击穿电压可按 $U_b \approx 30(d - d_1) \text{ kV}$ 估计。由图 1-12 还可看出,当屏障离尖电极的距离 d_1 为间隙距离 d 的 $15\% \sim 20\%$ 时,屏障对间隙击穿电压的提高效果最大。

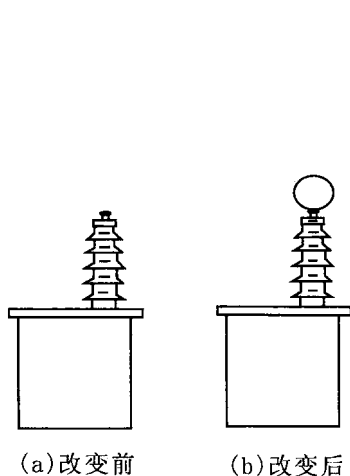


图 1-11 改变电极形状

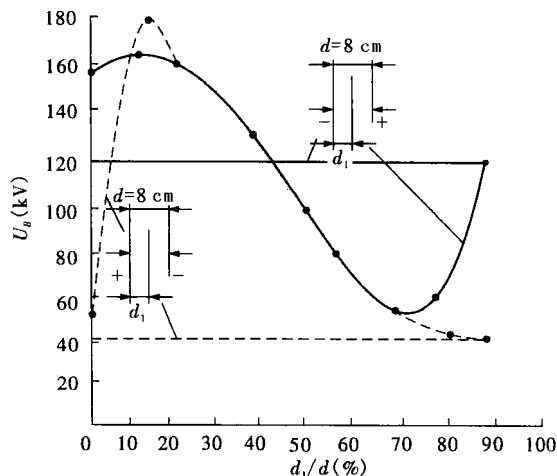


图 1-12 直流电压下尖—板空气间隙中击穿电压和屏障位置的关系曲线

极不均匀电场中,在一定条件下可以利用屏障提高间隙击穿电压。但应指出,在均匀电场及稍不均匀电场中,实验表明,设置屏障是不能提高气体间隙的击穿电压的。因为这时击穿前没有电晕放电阶段,且击穿前间隙中各处场强都已达很高数值,所以屏障不能有积聚空间电荷而起改善电场的作用,也不能妨碍流注的发展,因而屏障起不到提高击穿电压的作用。

1.2.5.3 高气压的采用

由巴森定律可知,当提高气体压力时,可以提高间隙的击穿电压值,这是因为提高气压可以减小电子的平均自由行程,削弱游离过程,从而提高气体的电气强度。例如,大气压力下空气的电气强度仅为变压器油的 $1/5 \sim 1/8$,而提高压力至 $10 \sim 15 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 101.3 \text{ kPa}$) 后,空气的电气强度就和一般的液、固态绝缘材料如变压器油、电瓷、云母等的电气强度相接近了。压缩空气绝缘及其他压缩气体绝缘近来在一些电气设备(如高压空气断路器、高压标准电容器等)中已得到采用。采用压缩气体的缺点是对设备容器的机械强度及密封等方面的要求提高了,从而增加了制造成本。

在均匀电场中空气间隙击穿电压和压力及距离的乘积 pd 的关系见图 1-13。由图 1-13 可见,当间隙距离不变时,击穿电压随压力提高而很快增加,但当压力增加到一定值后,击穿电压增加的陡度逐渐减小,说明再继续增加压力效果不大了。均匀电场中提高

气压后,击穿场强的提高遵循巴森定律,并且击穿场强大致和气压成正比。但是,巴森定律只是在一定的压力范围内才比较符合实际。大约从 10 atm 开始,实验结果和巴森定律的分歧就逐渐明显了,压力越高分歧越大。

在大气压力下,击穿电压和电极的表面状态及材料关系不大。而在高气压下,实验表明,击穿电压和电极(主要是阴极)的表面状态有很大关系。电极表面不光洁,击穿电压将下降,分散性也大。在高气压下,电极材料对击穿电压也有影响,如不锈钢电极的击穿电压较铝制电极的要高。

在不均匀电场中,提高气压后,间隙的击穿电压也将高于标准大气压力下的数值。但在高气压下,电场均匀程度对击穿电压的影响比在标准大气压下要显著得多,击穿电压将随电场均匀程度的下降而剧烈降低。在极不均匀电场中,当尖电极为正时,击穿电压随压力变化会出现极大值,即在压力较低时击穿电压随压力上升而增加,但压力超过某值后,击穿电压反而会下降。此后击穿电压再随压力增加而上升。

在高气压下,湿度对击穿电压也有很大影响。在压缩空气中湿度增加时,击穿电压明显下降,电场不均匀,下降更显著。

综上所述,在高气压下,应尽可能改进电极形状,改善电场分布。气体要过滤,滤去尘埃及水分。如不可避免出现极不均匀电场,应根据试验结果正确选择压力,以便取得提高气压的较大效益。

1.2.5.4 高电气强度气体的采用

用提高气压的方法可提高击穿电压,但在气压太高时,密封比较困难,容器本身造价也较高,并且在 10 atm 后,再继续增加气压效果不大。此外,由于压缩空气中含有氧,故在高气压下很易因击穿时的火花,引起绝缘物燃烧。可用氢、氮、二氧化碳等来代替压缩空气。近几十年来,发现许多含卤族元素的气体化合物,如六氟化硫(SF₆)、氟里昂(CCl₂F₂)等,其电气强度比空气的要高得多,这些气体称为高电气强度气体。采用这些气体以后可以大大提高气体间隙的击穿电压或大大降低工作时气体的压力。表 1-2 中给出了几种气体的相对电气强度。

卤族元素具有高电气强度的原因是:它们具有很强的负电性,气体分子容易和电子结合成为负离子,从而削弱了电子的碰撞游离能力,同时又加强了复合过程。因为这些气体的分子量都比较大,分子直径较大,故使得电子在其中的自由行程缩短,减小了碰撞游离的能力。

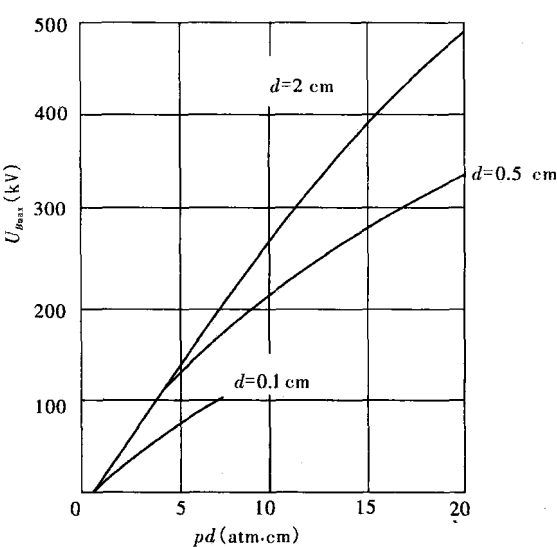


图 1-13 均匀电场中不同间隙距离下空气的击穿电压与 pd 的关系