



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

GAODIANYA JISHU

高电压技术

(第二版)

张晓蓉 主 编
张 力 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

GAODIANYA JISHU

高电压技术

(第二版)

主 编 张晓蓉
副主编 张 力
编 写 徐坊降
主 审 苏庆民



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分10章,主要包括气体放电、液体和固体介质的电气性能、绝缘预防性试验、绝缘强度试验、高压电气设备绝缘、波动过程、雷电过电压及防雷设备、内部过电压、电力系统过电压保护和电力系统绝缘配合等。全书内容突出紧密联系现场实际的特色。注重理论与实践的结合。

本书可作为电力职业院校电力技术类专业教材,也可作为电力职工技能培训教材和生产技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/张晓蓉主编. —2版. —北京:中国电力出版社,2014.7

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5123-5920-8

I. ①高… II. ①张… III. ①高电压—技术—职业教育—教材
IV. ①TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第108664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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年10月第一版

2014年7月第二版 2014年7月北京第五次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16.75印张 404千字

定价 33.00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

为适应电力职业教育教学改革的新形势，编者在吸收近几年教学改革成果和经验的基础上，立足于调整课程结构，更新教学内容，提高教学质量。因此在内容的深度和广度上力求做到“少而精”和理论联系实际的原则，既注重了基础知识和基本技能，更注重知识的综合运用及解决现场实际问题的能力的培养，使教材更加贴近实际、贴近应用；在文字的叙述上力求简洁、精当、通俗，易于理解。本书在吸收以往教材精华的基础上，完善了直击雷防护措施，增加了直流输电系统高电压技术的内容，使教材与现场的联系更加密切，实用性更强，满足了迅速发展的电力工业对高电压技术的需求。

全书共 10 章，由国网技术学院张晓蓉担任主编，并编写了第 5~10 章内容；国网技术学院张力担任副主编，并编写了第 1~4 章内容。全书由张力统稿。

本书由苏庆民担任主审。

本书可作为职业院校电力工程专业、供用电技术专业学生的教材，也可作为电力职工技能培训教材及生产技术人员的参考用书。

在本书编写过程中，得到了国网技术学院各级领导的大力支持，得到了省内多家企业的支持。学院内、外专家给予了热情的帮助，尤其是学院电力系魏剑、陶苏东、马文建和王晓玲等老师提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

限于编者水平，疏漏和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

2014 年 4 月

目 录

前言	
绪论	1
第1章 气体放电	2
§ 1.1 气体间隙中带电质点的产生与消失	2
§ 1.2 均匀电场中的气体放电	4
§ 1.3 极不均匀电场中的气体放电	8
§ 1.4 雷电冲击电压下气体间隙的击穿	11
§ 1.5 大气状态对气体间隙击穿电压的影响	15
§ 1.6 提高气体间隙击穿电压的措施	16
§ 1.7 SF ₆ 气体的特性	18
§ 1.8 沿面放电	22
本章要点	26
思考与练习	28
第2章 液体和固体介质的电气性能	30
§ 2.1 电介质的极化	30
§ 2.2 电介质的电导	34
§ 2.3 电介质的损耗	36
§ 2.4 液体电介质的击穿	39
§ 2.5 固体电介质的击穿	43
§ 2.6 电介质的其他性能	46
本章要点	49
思考与练习	50
第3章 绝缘预防性试验	51
§ 3.1 绝缘电阻和吸收比的测量	51
§ 3.2 泄漏电流的测量	55
§ 3.3 介质损失角正切值测量	58
§ 3.4 局部放电的测试	62
§ 3.5 测量电压分布	65
§ 3.6 绝缘油中溶解气体的色谱分析	69
§ 3.7 GIS 试验	73
本章要点	77
思考与练习	79

第4章 绝缘强度试验	80
§ 4.1 交流耐压试验	80
§ 4.2 直流耐压试验	85
§ 4.3 冲击高电压试验	89
本章要点	92
思考与练习	92
第5章 高压电气设备绝缘	94
§ 5.1 电力电容器绝缘	94
§ 5.2 电力电缆绝缘	96
§ 5.3 变压器绝缘	99
§ 5.4 高压旋转电机绝缘	103
§ 5.5 高压绝缘子和高压套管绝缘	107
本章要点	112
思考与练习	113
阶段自测题 (一)	115
第6章 波动过程	119
§ 6.1 单根均匀无损导线上的波过程	119
§ 6.2 行波的折射与反射	122
§ 6.3 行波通过串联电感和并联电容	125
§ 6.4 行波的多次反射	128
§ 6.5 变压器绕组中的波过程	130
§ 6.6 三相变压器绕组中的波过程	133
§ 6.7 旋转电机绕组中的波过程	135
本章要点	136
思考与练习	137
第7章 雷电过电压及防雷设备	139
§ 7.1 雷电放电及直击雷过电压	139
§ 7.2 雷电参数	141
§ 7.3 避雷针和避雷线的保护范围	143
§ 7.4 避雷器	151
§ 7.5 防雷接地	164
本章要点	166
思考与练习	168
第8章 内部过电压	169
§ 8.1 切断空载线路过电压	169
§ 8.2 切断空载变压器过电压	173
§ 8.3 电弧接地过电压	175
§ 8.4 铁磁谐振过电压	180
§ 8.5 电磁式电压互感器饱和过电压	183

本章要点·····	184
思考与练习·····	186
第9章 电力系统过电压保护 ·····	187
§ 9.1 输电线路的防雷·····	188
§ 9.2 发电厂、变电站的防雷保护·····	194
§ 9.3 旋转电机的防雷保护·····	204
§ 9.4 直流输电系统过电压保护·····	207
本章要点·····	214
思考与练习·····	216
第10章 电力系统绝缘配合 ·····	218
§ 10.1 绝缘配合的基本概念·····	218
§ 10.2 系统中性点工作方式对绝缘配合的影响·····	220
§ 10.3 变电站绝缘配合·····	222
§ 10.4 架空输电线路绝缘配合·····	231
§ 10.5 特高压直流输电系统的绝缘配合·····	234
本章要点·····	238
思考与练习·····	240
阶段自测题(二) ·····	241
附录 ·····	247
附录1 标准球隙放电电压·····	247
附录2 实验·····	251
参考文献 ·····	258

绪 论

为充分利用自然资源,降低电能生产成本,发电厂通常建在动力能源附近,这就需要采取相应措施将巨大电能输送至远方用户,因而产生远距离高电压输电和配电问题。高电压技术作为工程技术中的一门学科,是因为大功率远距离输电的发展而产生的。

随着输电电压等级的提高,我国规定 $1\sim 220\text{kV}$ 为高压, $330\sim 765\text{kV}$ 为超高压, 1000kV 及以上为特高压。

为满足电力工业迅速发展的需要,世界各国大力发展大型电站,从而促使电力系统扩展,这就势必使输电向超高压与特高压、大容量、远距离方面发展。世界上第一条 400kV 超高压输电线路于 1952 年建成;20 世纪 60 年代一些国家实现 750kV 级;20 世纪 80 年代初,有些国家已在研究和建设 $1100\sim 1500\text{kV}$ 级的特高压输电线路。我国自 20 世纪 80 年代起,国家电网已逐步建成以 $500\sim 1000\text{kV}$ 为主的输电网架,直流输电电压已达到 $\pm 800\text{kV}$ 。

由于交、直流输电系统和超高压及特高压电网的建成,带来一系列高压技术问题,最突出的问题是对电气设备绝缘材料的要求不断提高,设备中所用绝缘逐渐增多,绝缘费用在设备成本中所占比例也就随之加大,设备的体积与质量随之增大。若不采取新技术,将使设备绝缘的制造困难重重。因此,研制新材料,设计优良的绝缘结构,更安全可靠、经济、合理地解决设备绝缘问题显得日益突出,这就需要对各类绝缘材料的特性进行研究。随着输电电压等级的提高,过电压问题更为突出和复杂,因而必须同时考虑如何限制过电压。高电压技术就是专门研究电气设备绝缘和电力系统过电压的一门学科。

高电压技术课程包括电介质理论基础和过电压两大部分。高电压技术是随着输电电压的提高而处在发展中的一门学科,还有许多问题有待进一步研究。它的很多数据与结论来自运行经验统计和实际测量,在很多方面要采用概率统计法,并以生产实际中的统计资料为依据进行综合分析,所以是一门实践性很强的学科。在进行理论分析时,还应注意工程计算、经验公式、经验数据、试验结论等问题间的配合。因此,学习本课程应结合有关规程,做到理论联系实际。

高电压技术是高职高专及中等职业学校电力类各专业必修的一门重要专业课。学生通过学习并结合生产中所获得的实践知识,能初步掌握正确使用绝缘和一般的高电压试验技术;熟悉过电压及其保护方法;能解决工作中所遇到的高电压技术问题,为电力系统安全可靠地运行和电力工业发展作出应有贡献。

气 体 放 电

在电力系统中,空气作为气体电介质应用最为广泛,如架空线路和母线的相与相之间、相对地、变压器外部绝缘、隔离开关断口等,都是利用空气作为绝缘材料的。因此,研究气体电介质的电气性能是高电压技术的一项最基本任务,有着重要的实际意义。

在通常情况下,由于宇宙射线及地层放射物质的作用,气体中带电离子很少(约10000对/ cm^3),在正常工作电压下,气体的电导电流极小,可视为良好的绝缘介质。当气体间隙上电压增大至某一临界值时,电导电流剧增形成导电性很强的通道,气隙失去绝缘性能,这种现象称为气体间隙的击穿,即气体放电。

气体间隙击穿后的放电形式主要有四种:电源容量小、气压较低的密封玻璃管内会发生辉光放电,如验电笔中的氖管、霓虹灯中的放电,均为典型辉光放电;当气隙中出现明亮细放电火花,称为火花放电;在电源容量较大、气压高时会发生电弧放电形式;在极不均匀电场中,尖端电极表面局部电场增强,先出现的放电称为电晕放电。

气体间隙的绝缘强度与很多因素有关。当电场形式不同时,其放电电压和放电特性相差较大;当外加电压种类(直流、交流、雷电冲击电压)不同时,击穿电压也不相同;大气条件变化对击穿电压将产生一定影响;单纯气体与处在空气中的固体介质发生的沿面放电发展过程和放电电压也不同,因此如何合理地使用气体介质以及如何提高气体间隙的击穿电压等问题,是本章的主要任务。工程上常利用典型电场击穿电压的试验数据,来分析各种情况下气体间隙的放电过程和击穿电压。

§ 1.1 气体间隙中带电质点的产生与消失

气体间隙(简称气隙)之所以发生气体放电现象而丧失绝缘能力,是由于气隙中产生大量带电质点使之转为导电状态造成的。气体是一种具有可逆性的电介质,当带电质点消失后,将会自动恢复其绝缘性能。

一、气体原子的激发与游离

中性原子带正电的原子核周围有不同的轨道,每条轨道有若干带负电的电子沿轨道绕原子核旋转。当电子位于离原子核最近的轨道上时,电子具有最小的位能,电子的能级最低。当气体原子接受外界能量(强电场、光照射、高温)后,将引起原子内部能量的增加与改变,若电子由较低能级运转轨道跃至较高能级的运转轨道,但未脱离原子核的束缚,此过程称为原子的激发或激励。如果原子接受外界能量足够大,以致使原子的一个或几个电子脱离原子核的束缚,变成自由电子与正离子,此过程称为气体原子的游离(又称电离)。

二、气体间隙中带电质点产生方式

气隙中带电质点的产生方式主要是气体原子游离,另外还有一种特殊方式,即负离子的形成。

1. 气体游离的形式

依照作用于原子的能量形式的不同,游离有以下形式:

(1) 碰撞游离。气体原子在电场作用下,电子与离子被加速获得动能,与中性原子发生碰撞,当电子或离子动能足够大时,可使气体原子发生游离。碰撞游离主要是自由电子与气体原子相碰撞而引起的,因为自由电子质量小,容易获得较大的速度,积累起足够动能去引起碰撞游离。而离子体积由于质量大、运动速度慢、积累动能小,不容易发生离子碰撞游离。

(2) 光游离。由光辐射引起气体原子(分子)游离的过程称为光游离。光是频率不同的高能电磁辐射,具有粒子性,视为质点,称为光子。普通可见光不能发生光游离,自然界或人工照射具有短波长的如宇宙射线、紫外线、 χ 与 γ 射线中的光子将引起光游离。另外,放电过程本身,被激励的原子回到原始状态;正负离子中和(复合)成中性原子(分子)时,以光子形式放出能量,导致光游离。由于光子以光速度传播,故极易引起光游离。光游离在气体放电发展过程中起着重要作用。

(3) 热游离。高温下的气体,如发生电弧放电时,弧柱内温度高达数千度,气体在高炽热状态下所引起的游离过程,称为热游离。

(4) 金属表面游离。电子从金属电极表面逸出来的过程,称为表面游离。金属表面释放出电子所需要的能量称为逸出功或逸出电位,逸出功的大小取决于金属的种类及表面状态。按作用于金属的能量形式,金属表面游离有正离子撞击阴极、金属表面受光照射、强电场发射和热电子发射四种形式。

2. 负离子的形成

在气体放电过程中,因游离而产生自由电子和正离子外,还同时产生带负电的离子,称为负离子。自由电子与中性分子相遇,若两者相对运动速度较小,自由电子便依附于中性分子形成负离子。气体中含有一定量负离子时,气体则呈负电性,即负电性气体。负离子虽是带电质点但不容易引起游离,所以负离子对气体放电起着阻碍作用,使气体的耐电强度有一定提高。

三、气体中带电质点的消失

气体间隙放电发展过程中,同时存在着两个相反的物理过程:一是因游离产生带电质点的过程;二是因去游离使带电质点消失的过程。当去游离过程大于游离过程时,带电质点将消失,气体会自动恢复其绝缘性能。带电质点的消失主要通过扩散和复合两种方式。

(1) 带电质点的扩散。当气体中带电质点浓度分布不均匀时,带电质点由高浓度区向低浓度区运动,使气隙中各处带电质点的浓度分布均匀,这种现象称为带电质点的扩散。扩散是由热运动造成的,与气体状态有关,当气体压力低时或温度高时,扩散过程就强烈。

(2) 带电质点的复合。正离子与负离子或电子相遇时,正负电荷彼此中和还原为中性分子(原子)的过程称为复合。电子与离子相比,质量小、运动速度快,与正离子相遇时,由于相对运动速度大,相互作用时间短,直接复合的可能性很小。而正负离子间的复合就比较容易,故气隙中正负离子的复合概率较大,为主要复合形式。复合过程的快慢与空间带电质点的浓度有关,正负离子浓度愈大,复合过程就愈快。另外,如气体具有负电性,必然产生一定量级的负离子,有利于复合过程的进行。

在复合过程中将有能量释放,通常是以光子的形式释放出来,而形成光辐射。此外,被

激励的分子回到原始状态时,也以光子形式释放其能量。

§ 1.2 均匀电场中的气体放电

经实验分析表明,电场的均匀程度对气体放电发展过程和放电电压有很大影响。20 世纪初,汤逊于实验室中在均匀电场、低气压、短间隙的条件下进行了放电实验。根据试验结果提出比较系统的放电理论和计算公式,这是最早的气体放电理论。由于受到实验条件的限制,汤逊放电理论有一定的局限性。随着电网电压等级的提高和试验工作的不断完善,高气压、长间隙、大气条件下实验工作的开展,又总结出大气条件下气体间隙击穿的流注放电理论。利用这两个放电理论,可在广泛范围内分析气体放电过程和确定电气强度。本节主要讨论均匀电场中的气体放电过程和击穿电压。

一、气体放电基本过程

1. 均匀电场气体的伏安特性

图 1-1 所示为均匀电场中气体间隙的伏安特性,图 1-1 (a) 为置于空气中的两平行板电极,两极间电场是均匀分布的。当在板电极间施加直流电压 U 时,气隙中的电流 I 与极间电压 U 的关系为气隙的伏安特性,如图 1-1 (b) 所示。气隙在外界游离能(天然辐射线或人工光源)作用下,逐渐升高外加电场 E , 测量两极板间电压 U 和回路中的电流 I , 绘制出均匀电场中气体间隙的伏安特性曲线。

2. 非自持放电、自持放电

平行板电极施加直流电压后,气隙在外部光源照射下产生少量带电质点,带电质点在电场作用下定向移动形成电流。起初,电流随外施电压的升高而增大,如图 1-1 (b) 中 $0-a$ 段所示。逐渐升高外施电压 U 使 $U_a \leq U \leq U_b$ 时,电流几乎维持不变,见曲线 $a-b$ 段。这时,外界游离能作用下气隙中单位时间内所产生的带电质点全部形成电流,但很微弱,气隙仍有良好的绝缘性能。当电压增大到 U_b 后,电流随电压的升高而增加较快,见曲线 $b-c$ 段。此时气隙中出现了新的电子碰撞游离过程,电子在足够强的电场作用下,已积累起足以引起碰撞游离的动能,使游离过程增强,电流增长加快。当外加电压继续升高 ($U_b \leq U \leq U_c$) 时,气隙中的电流虽增长较快,但数值仍很小,气隙仍有良好的绝缘强度。这时气隙的放电过程依靠外界游离能来维持,若外界游离能消失,放电也将随之停止,这种需要依靠

外电场和外界游离能共同作用才能维持的放电过程称为非自持放电。当外加电压升至某一临界值 (U_c) 后,气隙中发生了强烈的游离,电流剧增,此时气隙中的放电过程已不需要外界游离能的影响,仅靠电场作用即可继续进行,这种仅需要电场作用维持的放电过程,称为自持放电。在自持放电过程中,气隙中电流很大,气隙的绝缘性能完全丧失、

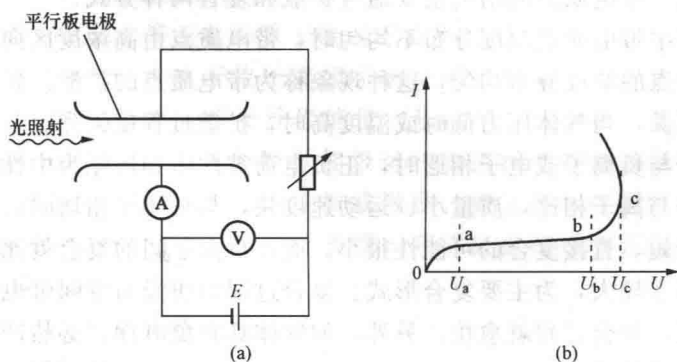


图 1-1 均匀电场中气体间隙的伏安特性

(a) 实验装置原理图; (b) 均匀电场中气隙的伏安特性

转入良好的导电状态,并伴有声、光等现象,气隙被击穿。

由非自持放电转入自持放电的电压称为起始放电电压,见图 1-1 (b) 中的 U_0 。电场比较均匀时,在起始放电电压作用下可使整个气隙实现完全击穿。

二、气体放电理论

1. 汤逊放电理论

当气隙外加电压超过 U_b 后,见图 1-1 (b) 中 b 点。气隙在较强电场与外界游离因素共同作用下,出现电子碰撞游离过程,因游离所产生的电子在由阴极向阳极运动中加速,动能增加,并不断与中性分子相碰撞产生游离。新产生的电子与原有电子一起在电场作用下,获得足够动能后又引起新的游离过程,此过程反复进行,电子数目将按 $e^{\alpha d}$ 规律增长,其中 α 为电子碰撞游离系数, d 为两极间距离。电子自增殖过程剧烈从而形成电子崩。电子崩出现后使气隙中电流急剧增加,但仍是非自持放电。

当气隙上电压升至 U_0 时,强烈的碰撞游离将同时产生等量正离子,这些正离子在电场作用下向阳极运动,其中有一定数量的正离子集聚在阴极附近形成表面游离,使阴极表面游离的电子数目为

$$N_e = \gamma(e^{\alpha d} - 1) \quad (1-1)$$

式中 α ——电子碰撞游离系数,又称第一游离系数;

γ ——阴极表面游离系数,又称第二游离系数, γ 决定于阴极材料和表面状态。

此时气隙同时存在着 α 和 γ 过程,由 γ 过程所产生的光子照射气隙,再引起碰撞游离产生新的电子崩(又称二次崩)。此时气隙的放电即使无外界游离因素的影响,也可仅靠电场来维持,放电转入自持放电。

汤逊放电理论能较好地解释低气压、短间隙、均匀电场中的放电过程,已被实验所证实。但它用来解释大气中长间隙(Pd 较大)放电过程时,有以下几点与实际不相符:

(1) 根据汤逊放电理论计算出来的击穿过程所需时间,与实际击穿时间有很大差别,而实际测得的时间比计算值要小 10~100 倍。

(2) 根据汤逊放电理论,阴极材料的性质在击穿过程中起着重要作用,而实验表明,气体在大气压力下,间隙击穿电压与阴极材料无关。

(3) 按汤逊放电理论,气体放电沿整个间隙均匀、连续地发展,但在大气中气体击穿时,出现有分支的明亮细通道。

由此可知,汤逊理论只适用于 Pd 值较小的范围内。经实验证实,当 Pd 过小趋于真空,或 Pd 值过大($Pd > 200 \times \frac{1031}{760}$),气隙中的击穿过程已发生变化,汤逊理论已不适用。

2. 巴申放电定律

早在汤逊放电理论之前,巴申从实验中总结出:当气体性质和电极材料一定时,气隙的放电电压 U_b 是气压 P 与间隙距离 d 乘积的函数,即

$$U_b = f(Pd)$$

均匀电场中三种不同性质气体的击穿电压 U_b 与 Pd 的关系曲线如图 1-2 所示。三条曲线呈 U 形。在某 Pd 值下,击穿电压 U_b 有一最小值,这是由于对应于此 Pd 值下,气体间隙最容易出现游离,并使放电达到自持。当 Pd 减小或增大时,间隙击穿电压 U_b 都将提高。巴申放电定律在工程中得到广泛应用,如真空断路器和空气断路器等。

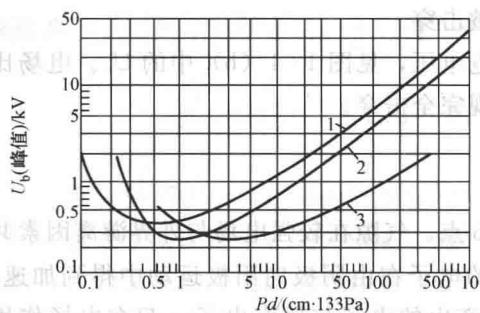


图 1-2 均匀电场中三种气体的击穿电压

U_b 与 Pd 的关系

1—空气; 2—氢气; 3—氖气

3. 流注放电理论

流注放电理论是在电雾室中, 通过均匀电场、短间隙的放电实验, 经分析研究综合而来。流注理论目前还不够周密, 只限于大气条件下气体放电过程的定性描述。流注放电理论与汤逊理论的根本区别, 在于流注放电理论考虑了空间电荷对外电场的畸变作用及光游离的影响。流注放电理论可以较好地说明大气压力下空气击穿的过程。

流注放电理论解释大气中长间隙的放电, 主要有两个过程: 一是电子崩过程; 二是流注形成

过程。间隙的放电过程先从电子崩开始, 然后由电子崩转为流注, 从而使间隙实现击穿。

(1) 电子崩过程。气隙在强电场作用下, 由碰撞游离产生大量电子形成电子崩。由于电子运动和扩散作用大于正离子, 朝向正极方向的崩头集中大量电子, 形成密度很大的负空间电荷, 而正离子则缓慢向负极运动形成正空间电荷, 其分布由崩头直至崩尾, 如图 1-3 (a)、(b) 所示。

由正负空间电荷合成后形成的电场如图 1-3 (d) 所示。它使气隙电场分布发生畸变, 崩头的游离过程更强烈, 电场越畸变, 崩的前后电场明显增强, 如图 1-3 (c)、(d) 所示。崩头将辐射大量光子, 崩中间区域电场较弱, 有利于复合过程和被激励的分子回到原始状态, 它也将有光子辐射, 其结果必然引起空间光游离, 此时属于非自持放电。

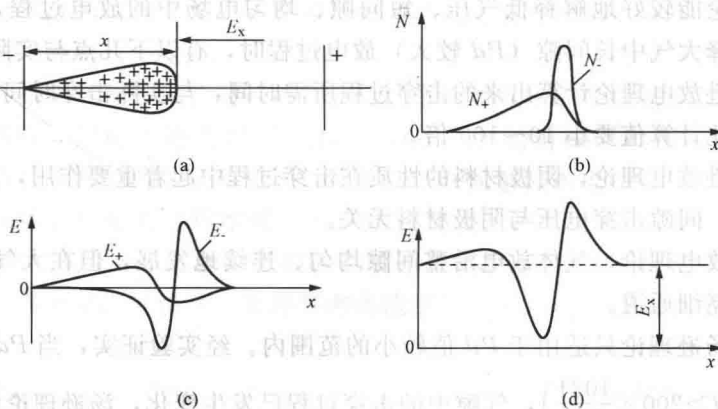


图 1-3 平行板电极间电子崩空间电荷对外电场的畸变作用

(a) 电子崩示意图; (b) 电子崩中空间电荷的浓度分布;

(c) 空间电荷的电场分布; (d) 合成电场

(2) 流注的形成。图 1-4 所示为电子崩发展为流注, 气隙被击穿过程。图 1-4 (a) 所示, 电子崩形成后, 由于崩头前电场很强, 游离过程剧烈, 电子崩很快通过整个间隙。电子崩空间电荷密度很大, 以致加强了崩头、崩尾电场, 并辐射大量光子而引起空间光游离, 如图 1-4 (b) 所示。光子受到崩头前强电场的作用而产生新的电子崩 (称为二次电子崩), 如图 1-4 (c) 所示。二次崩头部电子被主崩头部正离子吸引进入主崩头部区域内, 汇合后成

为充满正、负带电质点、导电性极强的混合通道，称为流注，如图 1-4 (d) 所示。由于流注通道导电性良好，又因二次崩留下正空间电荷，使得流注头部前后出现强电场，故流注发展很迅速，如图 1-4 (e) 所示。当流注发展到阴极后，整个间隙被导电性能好的带电质点通道所贯通，于是间隙实现击穿，如图 1-4 (f) 所示。此时放电转入自持放电。

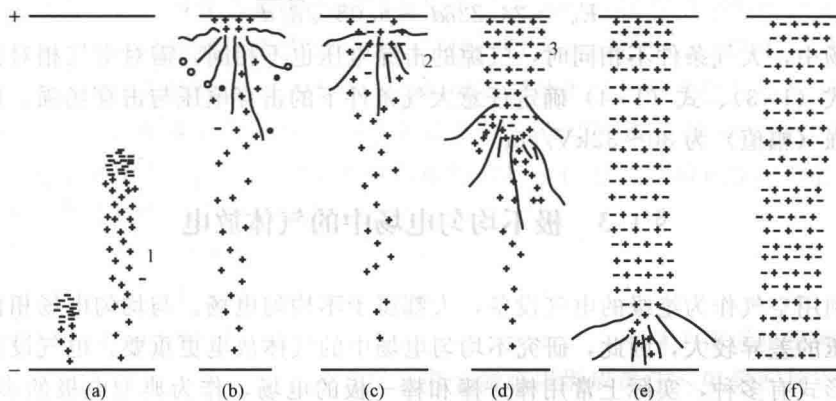


图 1-4 正流注的产生及发展

1—主电子崩；2—二次电子崩；3—流注

上述流注为阳流注。如果外加电压比间隙击穿电压高得多，电子崩不需要通过整个间隙，其头部游离即已相当强烈，足以形成流注，当流注发展到阳极时，间隙击穿。这种形式的流注为负流注或阴流注。

综上所述，可知电子崩的空间电荷对外电场发生畸变作用；使电场增强，游离更加强烈；辐射的光子引起空间光游离而出现二次电子崩，与主崩汇合后形成流注；流注通道导电性很好，流注发展迅速，当流注贯穿两极时，间隙击穿。间隙完全失去绝缘性能，放电转入自持放电。

4. 均匀电场中由非自持放电转入自持放电的条件

由汤逊放电理论实验总结的条件为

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1 \quad (1-2)$$

其中， α 、 d 、 e^{ad} 、 γ 的意义与式 (1-1) 相同。其物理意义为：在外界游离能的作用下产生一个有效起始电子，自阴极出发通过两极间距离 d 到达阳极，其间因碰撞游离电子增加到 e^{ad} 个，减去原有的有效起始电子，共增加 $(e^{ad} - 1)$ 个电子，并有相同数量的对应正离子。正离子射入阴极，因 γ 过程释放出的电子为 $\gamma(e^{ad} - 1)$ 个。此时间隙中始终有一个有效电子维持放电过程，放电已不再依赖外界游离能作用，而仅依靠气隙本身即可维持放电。达到自持放电的条件，从而转入自持放电。

三、均匀电场中气隙的击穿电压

只有在短间隙的均匀电场中，讨论空气的击穿电压才有实用价值。均匀电场中气隙的击穿电压与大气状态有关，而与外加电压种类（直流、工频、冲击电压）无关。均匀电场中放电电压分散性较小。所谓放电电压分散性是指气体间隙在相同的试验条件下，多次加压试验其击穿电压值无重复性。

均匀电场空气击穿电压 U_b 的经验公式为

$$U_b = 24.22\delta d + 6.08 \sqrt{\delta d} \quad (1-3)$$

式中 d ——两平行极板间距离, cm;

δ ——空气相对密度, 修正方法可参阅式(1-8)。

空气的击穿场强为

$$E_b = 24.22\delta d + 6.08 \sqrt{\delta/d} \quad (1-4)$$

均匀电场中, 大气条件不相同, 气隙的击穿电压也不相同, 需对空气相对密度 δ 修正后方可利用式(1-3)、式(1-4)确定任意大气条件下的击穿电压与击穿场强。标准大气条件下击穿场强(幅值)为 $30 \sim 32 \text{ kV/cm}$ 。

§ 1.3 极不均匀电场中的气体放电

工程中利用空气作为绝缘的电气设备, 大都属于不均匀电场。与均匀电场相比, 放电过程和放电电压的差异较大, 因此, 研究不均匀电场中的气体放电更重要。电气设备绝缘结构的电场分布形式有多种, 实际上常用棒—棒和棒—板的电场, 作为典型电极的不均匀电场, 若遇到其他形式不均匀电场时, 可根据这两种典型电极不均匀电场的击穿电压数据来估算绝缘距离。极不均匀电场中的气体放电有两大特性: 一是电晕放电; 二是极性效应。

一、极不均匀电场中的电晕放电

1. 电晕放电现象

不均匀电场中, 气隙上电压升高至某一临界值(起始放电电压)时, 在曲率半径较小的尖电极附近空间, 局部场强将首先达到引起强烈游离的数值, 尖电极附近很薄一层空气中达到自持放电条件, 在这局部区域内形成自持放电。在光线较暗时可以看到该电极周围有薄薄的发光层, 其发光像“月晕”, 所以称为电晕放电。这个发光层称电晕层, 电晕层外电场很弱, 不会发生游离过程。发生电晕放电时, 还伴有“滋滋”的声音, 同时发出臭氧气味。电晕放电只是在尖电极表面很薄一层气隙满足自持条件时才发生自持放电, 而整个气隙场强较低, 仍具有很高的绝缘强度。电晕放电现象是极不均匀电场中特有的一种自持放电。

2. 电晕放电的危害

高压线路、母线发生电晕放电会产生许多危害。放电过程中的光、声、热等效应以及化学反应都将引起能量损失。电晕电流是多个断续高频脉冲波, 形成高频电磁波传播到空间, 严重干扰周围的无线电通信和测量。电晕放电还使空气发生化学反应, 生成臭氧及氧化氮气体, 对电极和绝缘起腐蚀、老化作用, 特别是严重地危害设备内部有机绝缘。因此, 研究电晕放电, 如何限制电晕放电, 是高电压技术中的一项重要任务。

3. 电晕起始电压、起始场强

作用在气隙上的电压升高至某一数值时, 发生电晕放电。刚发生电晕放电时的临界电压称为电晕起始电压; 尖电极表面(电晕层内)的场强称为电晕起始场强。

为防止出现电晕放电, 工程上采取了许多措施加以限制。如高压电器采用曲率半径较大的电极; 超高压与特高压线路采用分裂导线; 利用均压装置改善电场分布等方法, 都是为了提高电晕起始电压而避免出现电晕放电。实际电气设备的绝缘结构比较复杂, 电极形状与表面状态及各种因素的影响相差很大, 准确计算电晕起始电压十分困难, 一般采用(皮克)经验公式计算电晕起始电压与起始场强。

二、极不均匀电场放电过程和极性效应

由以上分析可知,极不均匀电场中,气隙尚未击穿前,首先出现电晕放电。实际上在临近出现电晕放电前,尖电极表面游离已相当强烈,大量的空间电荷使电场发生畸变,对整个气隙放电发展和击穿电压产生很大影响。

实际中常用棒—板电极作为典型不均匀电场来讨论放电过程和击穿电压。无论棒电极的极性如何,空间游离总是从棒电极表面开始,以后的放电发展过程和击穿电压与尖电极的极性有着密切关系。由于尖电极的极性不同,空间电荷对外电场的畸变作用也不相同,对电晕起始电压和击穿电压的影响也就不同。其他实验条件完全相同而仅是尖电极的极性不同时,所造成的气隙击穿电压不相同,这种现象称为极性效应,已被实验所证实。极性效应同样是极不均匀电场放电过程中的一种放电特性。

1. 非自持放电阶段、电子崩的产生

(1) 正棒—负板时。正棒电极表面强场区产生电子崩,如图1-5(a)所示。崩头朝向正棒,崩中电子很快与正棒电极中和,正棒电极表面积聚大量正离子构成正空间电荷,正空间电荷削弱了正棒电极表面电场与游离过程。电子崩难以形成流注,电晕起始电压较高。

(2) 负棒—正板时。负棒电极表面强场区产生电子崩,如图1-6(a)所示。崩头朝向正板,电子迅速向正板运动并消失在弱场区,不可能引起游离。正离子缓慢向负棒运动,部分正离子可能形成表面游离,负棒表面始终滞留部分正离子形成正空间电荷,使负棒表面电场加强。电子崩容易形成流注而产生电晕放电,电晕起始电压较低。

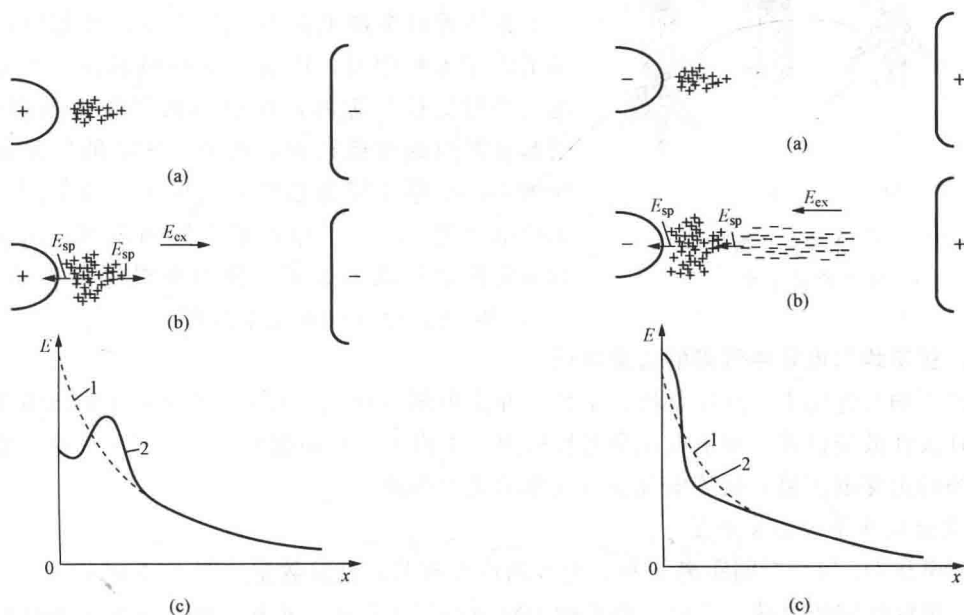


图1-5 正棒—负板间隙中非自持放电

阶段空间电荷对外电场的畸变作用

E_{ex} —外电场; E_{sp} —空间电荷的电场

1—外加电场分布; 2—畸变的电场分布

图1-6 负棒—正板间隙中非自持放电

阶段空间电荷对外电场的畸变作用

1—外加电场分布; 2—畸变的电场分布

2. 自持放电阶段、流注的产生

随着外加电压的升高,棒电极表面电场增强形成流注,出现电晕放电。由于棒电极的极

性不同,空间电荷对棒极表面和整个间隙的影响也不同,从而致使间隙的放电过程和击穿电压也就不相同——极性效应。

(1) 正棒—负板时。正棒电极表面形成流注,电子崩尾部正空间电荷的电场 E_{sp} 和外电场 E_{ex} 作用方向相同,如图 1-5 (b) 所示,畸变的电场加强了朝向负板间电场,如图 1-5 (c) 中曲线 2 所示。畸变后的电场得到增强,使流注更容易向负板发展,流注头部与负板间电场将进一步增强,流注迅速发展并贯穿到负板,气隙很快被击穿,故它的击穿电压较低。

(2) 负棒—正板时。负棒电极表面正空间电荷的电场 E_{sp} 和外电场 E_{ex} 作用方向相反,如图 1-6 (b) 所示。畸变后的电场削弱了朝向正极板间电场,如图 1-6 (c) 中曲线 2 所示。外加电压升高时,负棒表面的流注形成较容易但向正板发展却很困难,造成流注发展缓慢,故它的击穿电压较高。

3. 先导放电

当棒—板间气隙在 1m 以上时,工程上可认为是长间隙。在流注发展到一定长度后,强烈的游离过程使空气温度升高,特别在流注通道根部温度可达数千度,产生炽热的高游离火花通道。新的流注会使火花热游离通道伸长,这种热游离通道的伸长称为先导放电。图 1-7 所示为正棒—负板先导放电发展过程,由于极性效应的缘故,负棒—正板时的放电电压较正棒—负板时高。

4. 主放电过程

先导通道头部电荷与棒极电荷极性相同,先导通道内导电性很好,因而有如棒极延伸。当先导通道头部与负板接近时,在很小的气隙中场强极大,引起更强烈的游离过程,使该小区域的气隙电导迅速增大,在原先导通基础上出现新的放电通道——主放电通道。当主放电通道贯穿两极时,强大的主放电电流流过放电通道,使两电极电荷迅速中和,类似两电极短路,气隙完全击穿。

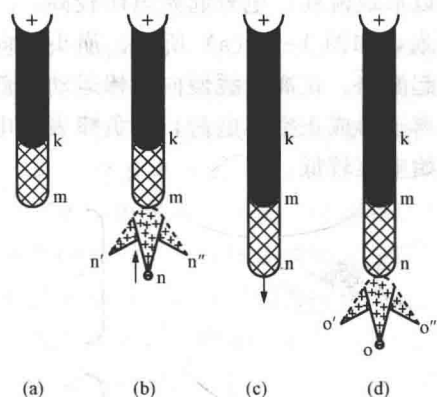


图 1-7 正棒—负板先导放电发展过程

三、极不均匀电场中气隙的击穿电压

在极不均匀电场中,施加直流、工频及冲击电压(详见 § 1.4)下的击穿电压值相差较明显,且极性效应显著,放电电压分散性较大。工程上一般根据棒—板、棒—棒典型电极不均匀电场的击穿电压值,估算电气设备气隙的绝缘距离。

1. 直流电压下的击穿电压

击穿电压 U_b 与两极间距离 d 和尖电极的极性有关,试验数据如图 1-8 所示。

由于极性效应的缘故,正棒—负板的击穿电压低于负棒—正板,棒—棒电极击穿电压介于极性不同的棒—板之间。这是因为棒—棒电极为对称电场,有两个强场区域,游离出现后相当于电极几何尺寸加大,改善了电场分布,击穿电压有所提高,其结果高于正棒—负板、低于负棒—正板。

2. 工频电压下的击穿电压

工频电压作用下气隙击穿,总是发生在正棒—负板电压达到幅值时,击穿电压幅值和直流电压下正棒—负板的击穿电压很相近,如图 1-9 所示。由图 1-9 可见,除起始部分外,