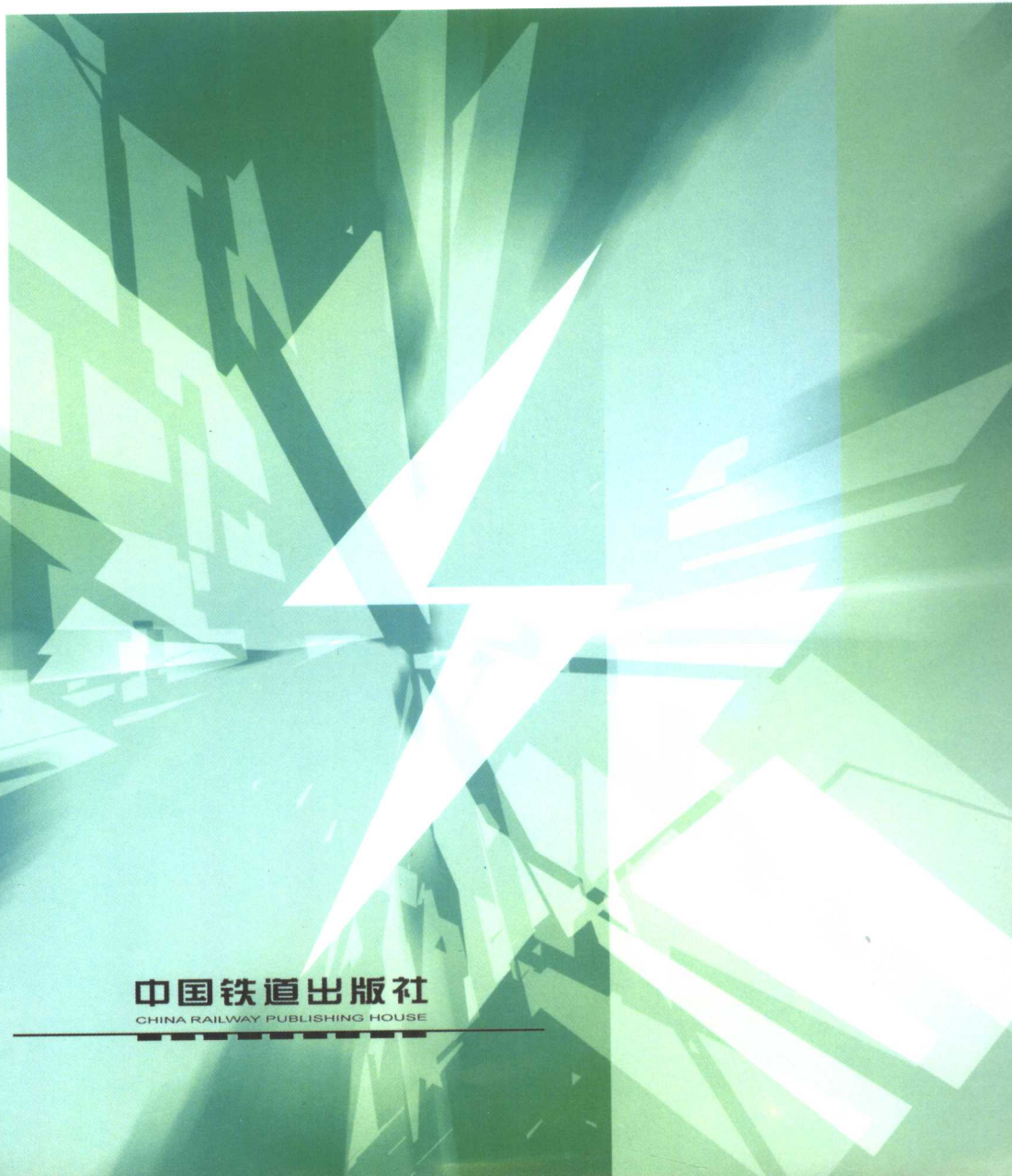




教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等教育电类专业教学用书

高电压技术

李鲁华 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高 电 压 技 术

李鲁华 主编
张小青 林宏裔 主审

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 6 年 · 北 京

内 容 简 介

本书主要介绍气体放电、液体和固体电介质的电气性能、绝缘预防性试验、变电所高压电气设备试验、雷电和防雷设备、输电线路的防雷保护、发电厂和变电所的防雷保护、内部过电压等。每章附有复习思考题,便于学生学习时参考。

本书为高职院校供电专业的教材,也可供从事相关专业的现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/李鲁华编. —北京:中国铁道出版社,
2006.3
高等职业教育教材
ISBN 7-113-06961-4

I. 高… II. 李… III. 高电压—技术—高等学校:
技术学术—教材 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 019163 号

书 名:高电压技术
作 者:李鲁华
出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)
责任编辑:方 军 阚济存
封面设计:冯龙彬
印 刷:中国铁道出版社印刷厂
开 本:787×1092 1/32 印张:16 字数:392 千
版 本:2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷
印 数:1~3 000 册
书 号:ISBN 7-113-06961-4/TK·24
定 价:20.80 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:(010)51873133 发行部电话:(010)51873124

前 言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是按照新的高职学校供电专业教学大纲编写的。

随着国民经济的发展,对电能的需求越来越大,用电量不断上升,输电距离也在不断增加。供电的经济性是和供电电压的高低密切相关的,提高供电电压水平可以显著提高输电线路的输送能力,降低电能生产成本。为了适应电力工业迅速发展的需要,目前世界各国都在竞相研究高压和超高压供电技术,以实现将巨大的电能向远距离输送的目标。我国已于20世纪80年代建成500 kV电压等级的输电线路,有些国家已建成1 200 kV级的特高压输电线路。

由于电力系统工作电压的不断提高,高压电气设备的绝缘问题愈显突出,绝缘材料越用越多,绝缘费用在设备成本中所占比例越来越高,设备的体积和重量也越来越大,如果不研究并采用新的技术措施,设备的绝缘甚至无法构成。另一方面,高压电气设备在运行时,除了受到正常工作电压作用外,还会受到过电压的作用。过电压的数值大大超过正常工作电压,极易造成绝缘的破坏。因此,高压电气设备的绝缘除应能耐受正常工作电压的持续作用外,还必须能耐受过电压的作用。所以,为了不致使高压电气设备绝缘的造价过高,并能保证电力系统的正常运行,就必须经济、合理地解决设备的绝缘问题和电力系统过电压产生的原因及限制方法。

高电压技术主要研究各类绝缘在不同形式电压作用下的特性以及相应的高电压试验技术、研究电力系统在运行中作用于绝缘上的各种过电压的特性和相应的限制措施。总之,高电压技术就是研究电气设备的绝缘和过电压及防护的学科。供电专业的从业人员,在从事电气设备的设计、安装、调试及运行工作中,都会遇到电气设备的绝缘和过电压方面的问题。因此,作为供电专业的专业课之一,高电压技术课程的任务是:使学习者掌握电气设备绝缘性能、试验方法和电力系统过电压及其防护等方面的基本知识,并获得解决上述问题的初步能力和实验技能。

高电压技术是电气技术领域通用性较强的技术科学。本书在编写时重点针对电力系统的普遍性问题,也涉及牵引供电系统的一些特殊情况;力求结合高

等职业技术教育的特点，侧重高电压技术在实际中的应用；结合相关内容对目前采用的新技术、新设备和新方法进行了介绍。在各章后附有本章小结和复习思考题。理论阐述由浅入深，文字叙述通俗易懂，便于读者自学。

本书由李鲁华主编，索娜、陈军任副主编，全书共分八章，绪论、第一、二、四、五章由内江铁路机械学校李鲁华编写；第三章由广州铁路集团公司机务处陈军编写；第六章、第七章和第八章的第一、二节由郑州铁路职业技术学院索娜编写；第八章的第三节由西安铁路职业技术学院王旭波编写；第八章的第四节由北京铁路电气化学校郭雅文编写。

本书由教育部推荐专家北京交通大学张小青和北京铁路电气化学校林宏裔主审。参加审稿会的人员还有郑州铁路职业技术学院王睿，广州铁路职业技术学院陈海军。

由于编者水平所限，书中疏漏、不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

2006年5月

目 录

第一章 气体放电

第一节 气体放电的基本知识	1
第二节 气体放电的基本过程	3
第三节 影响气体放电的因素	6
第四节 提高气体间隙击穿电压的措施	12
第五节 沿面放电	16
本章小结	20
复习思考题	21

第二章 液体和固体电介质的电气性能

第一节 电介质的极化	23
第二节 电介质的电导 (或绝缘电阻)	27
第三节 电介质的损耗	29
第四节 液体电介质的击穿	32
第五节 固体电介质的击穿	36
第六节 电介质的老化	38
本章小结	39
复习思考题	40

第三章 绝缘预防性试验

第一节 高电压试验安全技术	42
第二节 绝缘电阻和吸收比的测量	44
第三节 泄漏电流测量和直流耐压试验	47
第四节 介质损耗角正切值的测量	51
第五节 局部放电的测量	54
第六节 绝缘油的电气性能试验	57
第七节 绝缘油中溶解气体的色谱分析	60
第八节 工频交流耐压试验	64
第九节 绝缘的在线监测	70
第十节 绝缘预防性试验新技术	79

本章小结	82
复习思考题	83

第四章 变电所高压电气设备试验

第一节 变压器	85
第二节 互感器	122
第三节 断路器	130
第四节 隔离开关	136
第五节 绝缘子和高压套管	136
第六节 电力电缆	142
第七节 电力电容器	147
第八节 避雷器的试验	151
第九节 与变电所运行有关的其他试验	156
第十节 绝缘工具和安全用具的电气试验	162
本章小结	164
复习思考题	166

第五章 雷电和防雷设备

第一节 雷云放电和大气过电压	167
第二节 雷电参数	170
第三节 避雷针和避雷线	172
第四节 避雷器	176
第五节 防雷接地	188
本章小结	190
复习思考题	190

第六章 输电线路的防雷保护

第一节 波动过程	191
第二节 输电线路的感应雷过电压	199
第三节 输电线路的直击雷过电压	201
第四节 输电线路的耐雷水平和雷击跳闸率	204
第五节 输电线路防雷的主要原则及措施	206
本章小结	209
复习思考题	210

第七章 发电厂和变电所的防雷保护

第一节 发电厂和变电所的直击雷防护	211
第二节 变电所的侵入波防护	213

第三节 变压器的防雷保护	219
第四节 旋转电机的防雷保护	222
本章小结	225
复习思考题	225

第八章 内部过电压

第一节 切除空载线路过电压	226
第二节 切除空载变压器过电压	229
第三节 电弧接地过电压	232
第四节 铁磁谐振过电压	237
本章小结	240
复习思考题	240
附 录	241
参考文献	245

第一章 气体放电

电力系统和电气设备主要由导体和绝缘体组成。导体的作用是提供电流流通的路径、完成电能的分配。绝缘体的作用是将电位不等的导体分隔开,使其没有电的连接,以保持不同的电位。绝缘体的电阻率极高,可达 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ (半导体为 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 导体为 $10^{-9} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$), 在一般电场作用下,流过其中的电流极小,通常可以忽略不计,从而起到绝缘的作用。用作绝缘的材料,称为电介质,或绝缘介质。电气设备运行的可靠性,在很大程度上取决于绝缘材料的绝缘性能良好与否,据统计,电力系统中 50% ~ 80% 的停电事故是由绝缘材料的绝缘性能下降引起的。所以,绝缘是电气设备中的重要组成部分,对电力系统的安全运行起着极为重要的作用。

在电力系统和电气设备中常用气体作为绝缘材料,例如,架空输电线、母线、隔离开关的断开处等完全以空气作为绝缘,变压器、断路器等以空气作为外部绝缘的一部分。除直接用空气作为绝缘材料外,还有许多处于空气中的固体绝缘材料,例如绝缘子、套管等,会出现沿固体绝缘材料表面的空气放电的情况。另外,在液体和固体绝缘材料内部也或多或少含有一些气泡,对绝缘性能产生影响。因此,研究气体绝缘,特别是空气的放电过程,是非常有意义的。

第一节 气体放电的基本知识

气体在正常状态下是良好的绝缘介质,但在电压的作用下,也会形成微弱的电流。气体在外加电压作用下产生导通电流的现象称为气体放电。

当加于气体上的电压达到一定数值时,通过气体的电流会突然剧增,气体失去绝缘的性能。气体在外加电压作用下由绝缘状态转变为导电状态的过程称为击穿。使气体击穿的最低电压称为击穿电压。气体发生击穿时,电导突增,并伴有光、声、热等现象。

一、气体放电的主要形式

通过实验观察,由于电源功率、电极形状、气体压力等的不同,气体放电现象存在以下几种主要形式:

1. 辉光放电

外加电压增加到一定值时,通过气体的电流明显增加,气体间隙整个空间突然出现发光现象,这种放电形式称为辉光放电。辉光放电的电流密度较小,放电区域通常占据整个电极间的空间。

辉光放电是低气压下的放电形式,验电笔中的氖管、广告用霓虹灯管发光就是辉光放电的例子。

2. 电晕放电

对于电极很尖的极不均匀电场气隙,随外加电压的升高,在电极尖端附近会出现暗蓝色的晕光,并伴有滋滋声。如电压不继续升高,放电就局限在这较小的范围内,形成局部放电,称为电晕放电。发生电晕放电时,气体间隙的大部分尚未丧失绝缘性能,放电电流很小。

电气设备带电的尖角和输电线路,在运行中时有发生这种电晕放电。

3. 火花或电弧放电

在气体间隙的两极,电压升高到一定值时,气体中突然产生明亮的树枝状放电火花,当电源功率不大时,这种树枝状火花会瞬时熄灭,接着又突然产生,这种现象称为火花放电;当电源功率足够大时,气体发生火花放电以后,树枝状放电火花立即发展至对面电极,出现非常明亮的连续弧光,形成电弧放电。

二、气体中带电质点的产生和消失

我们已经知道,气体间隙在外加电压作用下会产生放电,甚至击穿,这说明气体中有大量带电质点产生;而气体间隙击穿后,若去掉外加电压,气体又能恢复到它原来的耐电强度,这说明气体中的带电质点会消失。

1. 带电质点的产生

气体原子由带正电荷的原子核和若干带负电荷的电子构成。正常状态下,这些电子受原子核的吸引在各自的轨道上围绕原子核旋转,这时的气体原子是一个整体,呈中性,称为中性原子。但在足够大的外界能量作用下,电子(也许还不只一个)就会挣脱原子核的吸引,脱离原子成为自由电子,中性原子由于失去了电子而成为正离子,原来的一个中性原子分成了电子和正离子,这一过程称为游离。游离产生的电子、正离子就是带电质点。因此,带电质点是由游离产生的,而要产生游离则必须要有足够的外界能量作用。

由于外界能量种类的不同,存在以下几种游离形式:

(1)碰撞游离

高速运动的质点(电子、离子等)与中性原子碰撞,使中性原子游离,产生更多的带电质点,这种由碰撞(动能)而产生的游离叫碰撞游离。显然,运动质点的速度越高、动能越大,就越容易产生碰撞游离。与离子相比,电子质量小、速度快,因此碰撞游离主要是由电子与气体中性原子碰撞引起的。

需要注意的是,既不是所有的碰撞都能产生碰撞游离,也不是碰撞次数越多就越容易产生碰撞游离;也有只碰撞不游离的,并且碰撞越频繁、消耗的能量越多,越不容易产生碰撞游离。归根结蒂,能否产生碰撞游离决定于碰撞时的动能是否足够。

(2)光游离

由光辐射引起的气体分子游离叫光游离。能够产生较强光游离的有 x 射线和 γ 射线等。

(3)热游离

由气体热状态(高温)引起的游离叫热游离。这种游离一般要在数千度高温下才会发生,在室温下游离的可能性极小。

以上 3 种游离形式都是气体中性原子产生游离,即气体中性原子在动能、光能或热能的作用下变成电子、正离子的过程。

(4)金属表面游离

在外界能量的作用下,电子从金属表面和电极上发射出来叫金属表面游离。外界能量可

以来自电极加热、质点碰撞、强光照射或强电场作用等。

2. 带电质点的消失

气体中产生带电质点的同时,还伴随着相反的过程—带电质点的消失。气体中带电质点的消失主要有3种方式:

(1) 定向运动

在外电场作用下,电子、负离子向阳极运动,正离子向阴极运动,形成电流,带电质点消失于电极。

(2) 扩散

当气体中带电质点分布不均匀时,则会由浓度高处向浓度低处移动,使其趋于均匀,这一过程称为扩散。扩散是由热运动造成的,与气体状态(压力、温度)有关。例如游离强烈的区域带电质点的浓度就较高,在热的作用下,这些带电质点会从浓度高的区域向浓度低的区域移动,形成扩散。

(3) 复合

正、负带电质点相遇,电荷彼此中和而还原为中性原子,这一过程称为复合。复合过程中将以光辐射的形式释放能量,这种光又有可能使中性原子发生光游离。

影响复合过程的因素主要是正、负带电质点的浓度和相对运动速度。正、负带电质点的浓度越大,越容易发生复合,复合过程就越强烈;而正、负带电质点的相对运动速度越快,越不容易发生复合,因此正、负离子之间的复合概率比正离子与电子之间的复合概率更大。

第二节 气体放电的基本过程

一、非自持放电和自持放电

如图1-1(a)所示,两平板电极间充满气体介质,光照射下,气体由于光游离而产生一定数量的带电质点,外加电压逐渐增大,利用电压表监测外加电压变化情况,利用电流表监测回路电流,也就是气体介质中流通的电流的变化情况。图1-1(b)是其伏安特性——随外加电压逐渐升高,气体介质中电流的变化情况。

OA段,外加电压升高,气体介质中流通的电流随之增大,这是由于电压升高、电场增强,气体中带电质点运动速度加快的缘故。AB段,外加电压继续升高,气体介质中的电流却基本不变,这是由于在单位时间内光照射气体产生的带电质点数基本不变。BC段,随外加电压进一步升高,气体介质中的电流又开始逐渐增大,这是因为这时的电压已足够高、电场

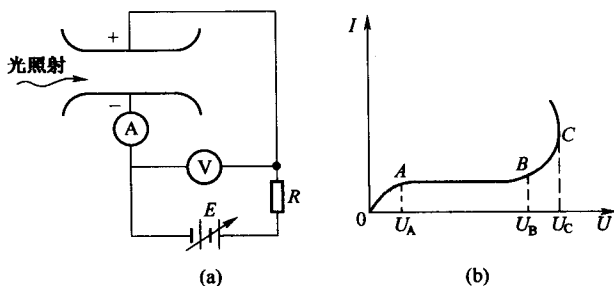


图1-1 气体放电实验
(a)实验电路图;(b)气体的伏安特性。

已足够强,而使电子运动的速度达到了产生碰撞游离的程度,气体中带电质点数量增多,电流也快速增大。C点及以后,电压升高达某一临界值 U_C 后,电流剧增,并伴有声、光等现象,这时,原本处于绝缘状态的气体介质转变为导电状态,使两平板电极间发生短路,也即这时气体介质击穿。

当外加电压小于 U_C 时,气隙内虽有电流,但数值很小,通常远小于微安级,这时的气体介质仍具有相当的绝缘性能,仍处于绝缘状态,而且这时的放电电流要依靠外界游离因素(光照射)才能维持,如果这时取消外界游离因素,则电流也将消失、放电就会停止。这种需要依靠外界游离因素的作用才能维持的放电称为非自持放电。

当外加电压达到 U_C 以后,气体中发生了强烈的游离,电流剧增,气隙击穿,这时气体放电可以只依靠电场的作用自行维持,不再需要外界游离因素。这种仅靠电场的作用就能自行维持的放电称为自持放电。

二、汤逊理论

汤逊理论描述了低气压、均匀电场气隙的放电过程。

如图 1-1,由外界游离因素(光照射)产生的起始电子,在电场的作用下向阳极运动。当两极间电压升高到 U_B 后,电场较强,电子动能较大,碰撞气体中性原子产生碰撞游离,游离产生的第二代电子又在气体中产生新的碰撞游离,又产生第三代电子,这样电子数一代代的倍增,如同雪崩一样,形成电子崩,如图 1-2 所示。电子崩的出现,使间隙中带电质点增多,故放电电流也增大(BC 段),但放电仍是非自持的。

当气隙外加电压增至 U_C 时,在碰撞游离中与电子同时产生的正离子,在强电场的作用下向阴极运动,撞击阴极表面,使阴极产生表面游离,释放出电子,这些电子在电场中获得动能又产生碰撞游离,使电子崩现象加剧。这时气体放电就转入自持。

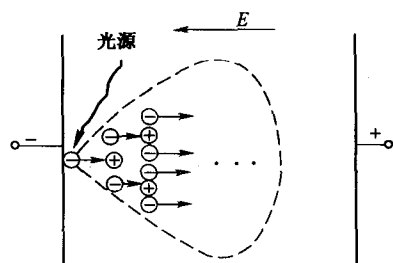


图 1-2 电子崩形成示意图

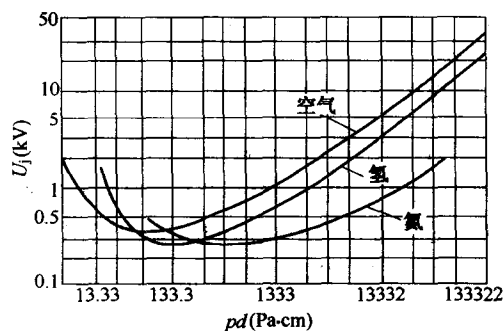


图 1-3 均匀电场中几种气体的 $U_j = f(pd)$ 曲线

U_j —击穿电压(幅值);

pd —气体压力与两电极间距离的乘积。

因此汤逊理论的实质在于:电子碰撞游离形成电子崩是气体放电的主要过程,而电极表面游离释放电子是气体放电得以自持的条件。

巴申定律:当气体成分和电极材料一定时,气体间隙的击穿电压 U_j 是气体压力 p 与间隙距离 d 乘积的函数,即 $U_j = f(pd)$ 。巴申定律的实验曲线如图 1-3 所示。

由实验曲线可见,随 pd 的变化,气隙的击穿电压 U_j 有一最小值,对于空气,其最低的击穿电压值为 327 V,对应的 pd 值为 76 Pa·cm。这是因为:当气隙距离 d 一定而改变气压 p 时,如果气压太低,气体密度小,电子在运动中碰撞的机会太少,只有提高电压增加电子的动能才能产生足够的碰撞游离,使气隙击穿,因此击穿电压要升高;如果压力太大,气体密度大,虽然碰撞的机会增多,但由于碰撞过于频繁,能量不断消耗,电子不易积聚起足以产生碰撞游离所

需的动能,因而也只有提高电压才能产生碰撞游离,使气隙击穿,因此击穿电压也会升高。由此可知,提高气体的压力和真空度,都能使气隙的击穿电压提高。

此外,巴申定律还说明气压 p 与间隙距离 d 两个因素具有同等的重要性,在一定的范围内, pd 乘积不变, U_i 保持不变。

三、流注理论

流注理论描述了高气压情况下气隙的放电过程。

由外界游离因素产生的起始电子,在向阳极运动的途中产生碰撞游离,形成电子崩,由于电子质量小、运动速度快,在电场的作用下快速地向阳极移动,而正离子质量大、运动速度慢,在电场的作用下缓慢地向阴极移动,电子和正离子数量随电子崩的发展而增多,这样电子崩中出现了大量的空间电荷,崩头集中着电子,崩尾则是正离子,其外形似球头的锥体,如图 1-4(a)所示。由于这些正、负空间电荷的出现使得极板间的电场发生了畸变,崩头负空间电荷与阳极间的电场以及崩尾正空间电荷与阴极间的电场都得以加强,而电子崩中部正、负空间电荷之间的区域电场削弱。在电子崩中部正、负空间电荷之间电场最弱的区域,也是带电质点浓度最大的区域,这就给正、负带电质点的复合创造了有利的条件,于是在这个区域中不断的发生复合,复合时放出的光随着复合的加剧而增强,随着电子崩的发展,带电质点的浓度越来越大,复合就越来越强烈,因此光的强度就随着电子崩的向前发展而越来越大。

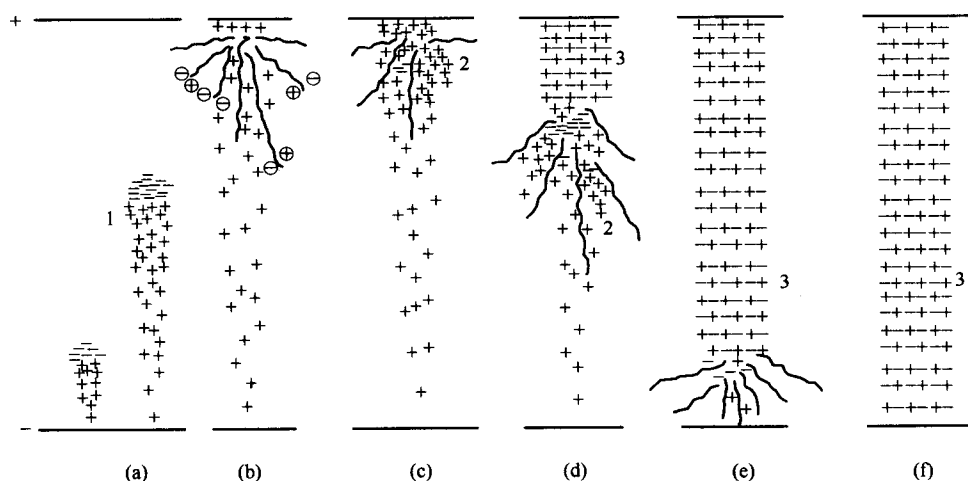


图 1-4 流注的产生及发展

1—主电子崩;2—二次电子崩;3—流注。

当外电场相对较弱[见图 1-1(b)中 $U < U_c$ 时],以上过程不很强烈,光的强度还不足以使气体中性原子产生光游离,这样电子崩在经过整个间隙后,电子进入阳极,正离子也逐渐在阴极上发生中和,这个电子崩就消失了,放电仍是非自持的。

但如果外电场较强[见图 1-1(b)中 $U \geq U_c$ 时],当电子崩基本走完整个间隙,光已达到较高强度足以引起光游离,如图 1-4(b)所示。光游离新产生的电子又产生激烈的碰撞游离形成新的电子崩,称为二次电子崩,原来的电子崩称为主电子崩,如图 1-4(c)所示。二次崩与主崩汇合,其头部的电子进入主崩的正空间电荷区(因主崩的电子已大部进入阳极),形成正、负带电质点相互混合的通道,这就是流注,如图 1-4(d)所示。流注形成后复合加剧,光的强度增

大,继续引起光游离,出现新的二次崩,它们被吸引向流注头部,从而使流注通道延长,如图 1-4(e)所示。由此,流注不断向阴极推进。当流注发展到阴极后,整个间隙就被导电性良好的正、负带电质点混合的通道所贯穿,而形成气隙的击穿,如图 1-4(f)所示。

综上所述,流注理论认为:电子碰撞游离形成电子崩是气体放电的主要过程,而空间的光游离是气体放电自持的条件,同时强调了空间电荷对电场的畸变作用。

第三节 影响气体放电的因素

影响气体放电的因素,主要是气隙电场的分布形式、外加电压的种类和大气状态等。

一、电场形式对气体放电的影响

气隙电场的形式,一般可以分为均匀电场和不均匀电场两种。

均匀电场气隙,其各处电场强度的大小相等,且方向相同。前面我们就是以平板电极所构成的均匀电场气隙为例,来分析气体的放电过程的。图 1-5 是在均匀电场中,标准大气状态下,在直流电压或工频交流电压作用时,空气间隙的击穿电压 U_j 与间隙距离 d 的关系。从图中可以看出,当 $d > 1$ cm 时,均匀电场中空气的击穿场强 E_j 大致为 30 kV(幅值)/cm。

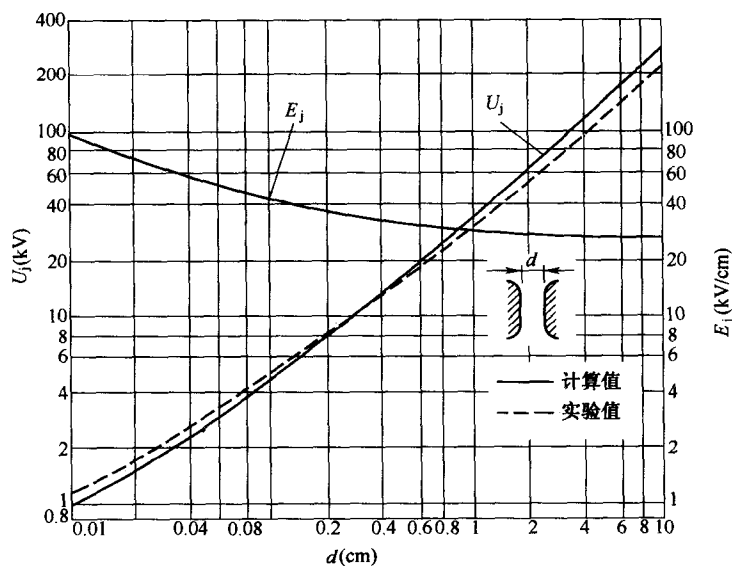


图 1-5 均匀电场中空气间隙的击穿电压

d —间隙距离; U_j —击穿电压(幅值); E_j —击穿场强(幅值)。

但在实际的电气设备绝缘结构中,电场大多是不均匀的,而且通常间隙的距离很大,所以电场极不均匀。例如输电线与地之间、三相输电线之间、变压器引出线间等,都是极不均匀电场气隙的情况。

在均匀电场中,气隙内的流注一旦形成,放电即转为自持,间隙就被击穿。而在不均匀电场中,情况就不同了,存在电晕放电和极性效应现象。

通常利用尖—板、尖—尖形状的电极来研究不均匀电场气隙的放电过程。

1. 电晕放电

在不均匀电场中,空气间隙击穿以前,随间隙上所加电压的升高,在尖电极附近,电场强度将先达到引起电子碰撞游离并形成电子崩等游离过程的数值,气隙就在尖电极附近区域形成局部放电,称为电晕放电。形成电晕放电后,在黑暗中可以看到尖电极附近有暗蓝色的晕光、听到滋滋的响声、嗅到一股鱼腥味,回路中电流明显增加(但数值仍很小),并有能量损耗。电气设备带电的尖角和输电线,在运行中均会出现电晕放电。

尖电极附近,产生电晕放电这一局部区域称为游离区或电晕层。游离区内的气体原子,在电场的作用下产生了游离,形成大量的电子崩;与此同时也产生了游离的逆过程——复合,在复合过程中会产生光辐射,从而形成了晕光。产生电晕放电后,如外加电压不再升高,由于电晕层以外区域的电场强度较小,不足以引起游离过程,因此放电就局限在尖电极附近的小范围内不会向前发展;但如继续升高电压,则游离区内的电子崩加剧并向外扩展,形成流注,流注贯穿间隙,就会导致气隙完全击穿。

电晕放电是不均匀电场气隙所特有的一种自持放电形式。开始产生电晕时的电压叫电晕起始电压,它低于气隙的击穿电压,并且,气隙电场越不均匀,电晕起始电压与击穿电压的差距就越大。开始产生电晕时尖电极表面的电场强度叫电晕起始电场强度。

电晕放电在电力生产中有许多明显的害处。产生电晕放电时,回路中将有电晕电流流过,以及发出光、声、热,这都会造成能量损耗;电晕放电还会使空气发生化学反应,产生臭氧、二氧化氮等气体,腐蚀绝缘材料;在电晕放电过程中,还会出现放电的脉冲现象,形成高频电磁波,对弱电线路和设备产生电磁干扰。所以,应防止或限制电晕放电。例如超高压输电线路,通常采用分裂导线的办法来防止电晕的产生。所谓分裂导线,就是将每相输电线分裂为几根导线组成,但总的截面积不变,采用分线支架保证每相中各导线间的距离。分裂导线后,相当于增大了输电线的半径,这样可以使导线表面的电场强度减小,从而限制电晕的形成。另外,在高压电气设备的高压出线端加均压罩、均压环,在绝缘子串端部加均压环等,都是为了防止电晕的产生。当然,电晕放电也并非全无益处,当线路上出现过电压时,产生的电晕放电消耗能量,将使过电压幅值降低,这时电晕放电就起到有利的作用。

2. 极性效应

对于尖—板电极构成的不均匀电场气隙,从前面的电晕放电现象已经知道,由于尖电极附近的电场最强,因此游离过程总是从尖电极附近开始的,但以后的发展却与尖电极的极性有关。

当尖为负极性时,如图 1-6 所示,在尖电极附近因游离而产生带电质点,其中的电子运动迅速,很快离开尖电极散去,正离子则滞留在尖电极附近,形成空间电荷。这些正空间电荷将使原电场发生畸变,减弱了朝向板极方向的电场,而加强了朝向尖电极的电场。因此,朝向板极方向的电子崩不易形成,放电向前发展较困难,必须提高电压间隙才能击穿,即击穿电压较高。而尖电极附近由于电场加强,电晕容易发生,即电晕起始电压较低。

当尖为正极性时,如图 1-7 所示,同样在尖电极附近因游离而产生带电质点,其中的电子很快进入尖电极,

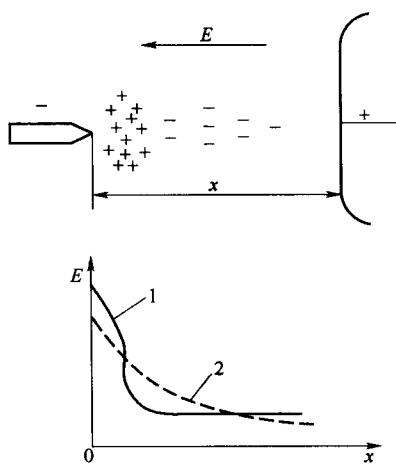


图 1-6 负尖—正板气隙中空间电荷
对原电场的畸变作用
1—畸变后的电场;2—原电场。

正离子滞留在尖电极附近,形成空间电荷。但这些正空间电荷畸变原电场的结果,却是加强了朝向板极方向的电场,而减弱了朝向尖电极的电场。因此,朝向板极方向的电子崩容易形成,有利于放电向前发展,即击穿电压较低。而尖电极附近由于电场减弱,发生电晕较困难,即电晕起始电压较高。

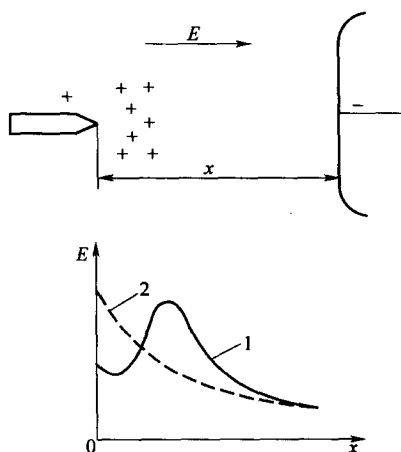


图 1-7 正尖—负板气隙中空间电荷
对原电场的畸变作用
1—畸变后的电场;2—原电场。

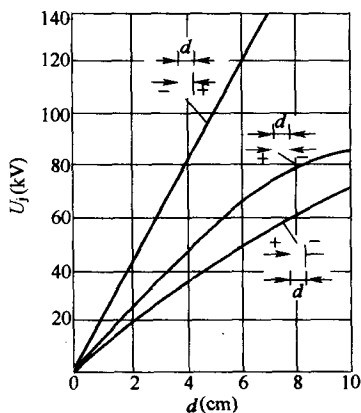


图 1-8 尖—板、尖—尖气隙的
直流击穿电压
 d —间隙距离; U_j —击穿电压。

因此,所谓极性效应是指,对于电场不均匀的尖—板气隙,其击穿电压的高低与尖电极的极性有关。图 1-8 和图 1-9 是标准大气条件下尖—板、尖—尖空气隙在直流电压作用下的实验曲线。

分析以上实验曲线可以看出,气隙电场越不均匀、越不对称,则极性效应越显著,正尖—负板气隙的击穿电压就越低。例如,10 cm 间距以下,尖为正极性时平均击穿场强约为 7.5 kV/cm,尖为负极性时约为 20 kV/cm,而在 50 cm 以上的长间距中,尖为正极性时平均击穿场强约为 4.47 kV/cm。

二、电压种类对气体放电的影响

在电力系统中作为绝缘应用的空气间隙,可能承受的电压有直流、工频交流和冲击电压 3 种形式。

气体在直流电压作用下的放电过程,前面我们已经作了详细的分析。

气体在工频交流电压的作用下,其放电过程和特性(例如电晕放电、极性效应等)与在直流电压下完全相同,并且,

在尖—板气隙上加工频交流电压时,由于电极极性的交替变化,因此气隙击穿总是在尖的极性为正、电压达幅值时发生,而且其击穿电压(幅值)和直流电压下正尖—负板的击穿电压相近。图 1-10 是标准大气条件下尖—板、尖—尖空气隙在工频电压作用下的实验曲线,可以看出,除起始部分外,击穿电压和间隙距离近似成直线关系,尖—尖气隙的平均击穿场强约为 3.8 kV(有效值)/cm,尖—板气隙的稍低一些,约为 3.35 kV(有效值)/cm。工程上遇到电场很不均匀

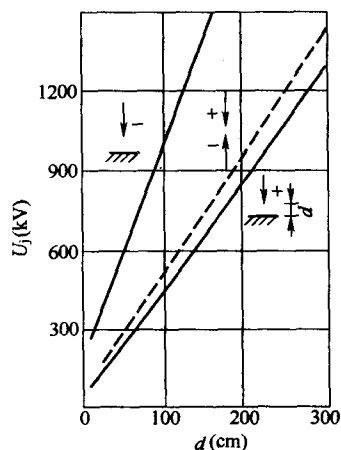


图 1-9 尖—板、尖—尖长气隙
的直流击穿电压
 d —间隙距离; U_j —击穿电压。

的空气间隙时,可以根据这些典型电极的击穿电压值来估计绝缘距离。如果电场分布不对称,可参照尖—板电极的数据;如果电场分布对称,可参照尖—尖电极的数据。

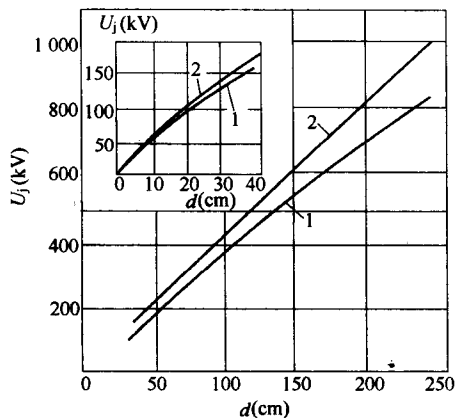


图 1-10 尖—板、尖—尖气隙

的工频击穿电压

d —间隙距离; U_j —击穿电压(有效值);

1—尖—板(接地); 2—尖—尖(接地)。

则冲击电压作用时间隙并不在 1 点击穿,而可能是在 2 点击穿。从加上电压起到间隙击穿所需的时间,称为放电时间,记为 t_d 。

在冲击电压下,间隙的击穿电压值与冲击电压的波形有很大关系,在进行绝缘试验时,为使试验结果能互相比较,对冲击电压的波形必须严格的规定。我国规定的雷电冲击电压标准波形为:视在波前时间 $\tau_1 = 1.2 \mu\text{s}$,允许偏差为 $\pm 3\%$;视在波长时间 $\tau_2 = 50 \mu\text{s}$,允许偏差为 $\pm 20\%$;峰值允许偏差为 $\pm 3\%$ 。标准雷电冲击电压波形参数记为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 。

2. 冲击电压下气体击穿的特点

气体在冲击电压作用下发生放电或击穿,其过程与直流和工频交流电压下是一样的,而且对于极不均匀电场气隙,在冲击电压下同样存在电晕放电、极性效应现象。但是,冲击电压具有持续时间短、电压幅值高的特点,正是由于冲击电压存在这一与持续电压不同的特点,就使得气体在冲击电压下的击穿表现出一些特殊性。

前面我们已经提到,当冲击电压升高到持续电压作用下的击穿电压值 U_1 时,间隙并不立即击穿,而需再经过一定时间,到 2 点才发生击穿。可见,要使间隙击穿,不仅需要要有足够的电压,而且电压作用时间还必须充分。这是由于击穿过程的发展需要一定时间的缘故。这就导致:(1)气隙在冲击电压(短时电压)下的击穿电压比在持续电压(长时电压)下的击穿电压高;(2)气隙在冲击电压下的击穿电压值与该电压作用的时间有很大关系。幅值较小,作用时间较长的冲击电压可以使气隙击穿;而幅值较大,但作用时间较短的冲击电压可能并不会使气隙击穿。

一方面,完成击穿需要电压持续作用一段时间;另一方面,冲击电压持续作用的时间又极短,这就导致气体在冲击电压作用下的击穿具有很大的分散性,或称偶然性、不确定性。对同

直流电压和工频交流电压统称为持续电压。

冲击电压就是作用时间极为短暂、非周期性变化的电压,它的作用时间一般为几微秒到几十微秒。雷电所造成的过电压就是一种常见的冲击电压。冲击电压对高压电气设备的绝缘威胁很大,是电力系统发生事故的重要因素。

1. 冲击电压的标准波形

冲击电压的波形如图 1-11 所示。从加上电压起到电压达幅值 U_m 的时间,称为波首或波头,记为 τ_1 ;从加上电压起到电压值降为 $\frac{1}{2} U_m$ 的时间,称为波长,记为 τ_2 。

实验证明,当冲击电压作用于气体间隙时,它的击穿电压比持续电压作用时的击穿电压更高。

如图 1-11,假设持续电压作用时的击穿电压为 U_1 ,

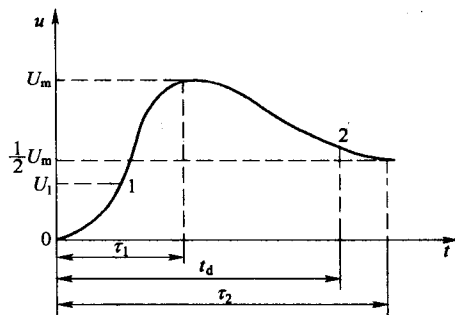


图 1-11 冲击电压波形