



等学校教材

高电压技术

赵玉林 周启龙 主编

机械工业出版社

高等学校教材

高 电 压 技 术

赵玉林 周启龙 主编



机械工业出版社

本书主要介绍地方电力系统的高电压技术。内容包括高电压绝缘理论, 高电压试验技术, 电力系统的过电压及其防护技术, 绝缘配合技术。

全书共分十章: 气体电介质的电气性能; 液体、固体电介质的绝缘性能; 高电压试验技术; 电气设备绝缘预防性试验方法; 线路和绕组中的波过程; 雷电放电和防雷设备; 输电线路的大气过电压和防雷保护; 发电厂和变电所的防雷保护; 农电系统内部过电压; 农电系统的绝缘配合。

本书可作为农业电气化自动化专业、电力工程专业及电力职工大学的教材, 也可供地方电力部门有关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高电压技术/赵玉林, 周启龙主编. —北京: 机械工业出版社, 1997.1

高等学校教材

ISBN 7-111-05294-3

I. 高… I. ①赵…②周… II. 高电压-技术-高等学校-教材 N. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 12462 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑: 蔡耀辉 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张佳

封面设计: 姚毅 责任印制: 卢子祥

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年2月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·13.5印张·323千字

0 001—4 000册

定价: 19.50元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

本教材是根据农业部教学指导委员会和高等农业院校农电类教学研究会审定的农业电气化自动化专业高电压技术课程编写大纲以及电力工程类专业的教学计划编写的。在内容方面,以介绍地方电力网的高电压技术为主,并吸收了近年来在该领域的最新成果。在叙述方面,力求深入浅出,强调物理概念,便于自学。本书适用于农业电气化自动化专业及其它电力工程类专业作为教材,也可作为地方电力部门有关人员的参考书。

全书共十章,授课学时为70~80学时。

本书的主要内容为:高电压绝缘理论,介绍了气体、液体及固体电介质的电气性能,击穿机理,影响击穿电压的因素和提高击穿电压的措施;高电压试验技术,介绍了中小型地方发电厂和变电所电气设备绝缘预防性试验的基本理论,工程上具体的试验方法和结果分析,试验设备的选择;电力系统的过电压及其防护技术,介绍了地方电力网过电压的产生发展的物理过程,影响因素和防护措施;电力系统绝缘配合,介绍了220kV以下输电线路和变电所绝缘配合的方法和原则,变电所电气设备绝缘水平的确定。每章后均附有习题。

本书第四章介绍地方发电厂和变电所主要电气设备的具体试验方法,是为增强学生实践能力而设置的,各学校可根据学时多少自行取舍,不影响全书的连贯性。

本书的绪论、第一、第二章、附录由东北农业大学赵玉林编写,第三、四章由河北工程技术高等专科学校夏国明编写,第五、六章由河北农业大学刘恒赤编写,第七、八章由黑龙江八一农垦大学程卫东编写,第九、十章由沈阳农业大学周启龙编写。本书由赵玉林、周启龙任主编。

本书由沈阳农业大学张英书教授主审,他对本书提出了很多修改和补充意见,对提高本书的质量具有重要意义,在此表示衷心的感谢。

对在本书编写过程中给予帮助的东北农业大学孙斐朗教授,沈阳农业大学朴再林副教授,河南农业大学史国栋副教授,以及本书参考文献的编著者表示感谢。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1996年4月

目 录

前言

绪论 1

第一章 气体电介质的电气性能 3

第一节 气体中带质点的产生 与消失 3

第二节 均匀电场小气隙的放电 5

第三节 均匀电场大气隙的放电 9

第四节 不均匀电场气隙的击穿 11

第五节 冲击电压下空气的击穿 特性 14

第六节 大气条件对空气间隙击 穿电压的影响 17

第七节 提高气隙抗电强度的措施 18

第八节 沿面放电 21

习题 25

第二章 液体、固体电介质的绝缘 性能 26

第一节 电介质的极化 26

第二节 电介质的电导 31

第三节 电介质的损耗 33

第四节 液体电介质的击穿特性 37

第五节 固体电介质的击穿特性 41

第六节 电介质的老化 43

习题 47

第三章 高电压试验技术 48

第一节 绝缘电阻和吸收比试验 48

第二节 泄漏电流的测量 51

第三节 介质损耗角正切值的测量 59

第四节 工频交流耐压试验 63

第五节 直流耐压试验 69

第六节 冲击耐压试验 72

习题 75

第四章 电气设备绝缘预防性试验 方法 76

第一节 电力变压器、消弧线圈和 油浸电抗器试验 76

第二节 互感器试验 80

第三节 断路器试验 84

第四节 电力电缆和电力电容器 试验 86

第五节 避雷器试验 88

第六节 发电机试验 90

第七节 绝缘油与绝缘工具的耐 压试验 93

习题 97

第五章 线路和绕组中的波过程 98

第一节 均匀无损单导线线路的 波过程 98

第二节 行波的折射和反射 103

第三节 行波通过串联电感和并 联电容 108

第四节 行波的多次折射和反射 110

第五节 冲击电晕对线路波过程 的影响 113

第六节 变压器绕组中的波过程 114

第七节 旋转电机绕组中的波 过程 121

习题 123

第六章 雷电放电和防雷设备 124

第一节 雷电放电及其参数 124

第二节 避雷针、避雷线的保护 范围 128

第三节 避雷器 131

第四节 接地装置 141

习题 144

第七章 输电线路的大气过电压 和防雷保护 145

第一节 输电线路的感应雷过电压 145

第二节 输电线路的直击雷过电压 和耐雷水平 147

第三节 输电线路的雷击跳闸率 151

第四节 地方电力网各级电压线路 防雷的具体措施 153

习题	155	升高	175
第八章 发电厂和变电所的防雷		第三节 切除容性负载引起的过	
保护	156	电压	176
第一节 发电厂和变电所的直击雷		第四节 切除空载变压器引起的	
防护	156	过电压	180
第二节 发电厂和变电所对侵入波		第五节 电弧接地过电压	182
的防护	158	第六节 谐振过电压	188
第三节 变电所的进线段保护	164	习题	193
第四节 三绕组变压器和自耦变		第十章 农电系统的绝缘配合	194
压器中性点的防雷保护	167	第一节 概述	194
第五节 配电变压器的防雷保护	169	第二节 线路和变电所外绝缘的绝	
第六节 旋转电机的防雷保护	169	缘配合	195
习题	172	第三节 电气设备试验电压的确定	198
第九章 农电系统的内部过电压	173	习题	200
第一节 接地故障引起的工频电		附录 球极间隙放电电压	201
压升高	173	参考文献	207
第二节 甩负荷引起的工频电压			

绪 论

乡镇企业的发展使地方用电负荷急剧增长, 为了提供大量的电力, 地方电网电压也随之提高。到目前为止, 在我国已经形成了以 110kV (个别市县已达 220kV) 为骨架的地方电力网。

随着地方电网电压的提高, 有关输电线路和电气设备的绝缘问题愈显突出。为使系统正常运行, 要求输电线路及系统的电气设备(发电机、变压器和开关电器等)能可靠地工作。而这个要求能否得到满足, 在很大程度上又取决于线路及设备的绝缘能否在系统可能出现的各种形式过电压作用下可靠地工作。

输电线路及电气设备在运行中除了受到工作电压的作用以外, 还可能受到下面三种过电压的作用:

(1) 雷电过电压 在电力系统附近落雷时, 由于电磁场的突然变化或雷直击于输电线路或电气设备上引起的过电压。这种过电压通常为单极性且持续时间很短, 但幅值可能很高。它是地方电力系统危害最大的一种过电压。在进行发电厂、变电所设计时必须根据当地的雷电活动强度, 采取防护措施。

(2) 短时过电压 电力系统中单相接地或突然甩负荷引起的工频电压升高以及由于谐振(主要是铁磁谐振)引起的过电压。前者过电压时间较短而后者作用时间较长, 直到谐振条件被破坏后电压才恢复正常。这种过电压数值一般不太高, 不会对地方电力系统的设备绝缘造成危害, 但却是决定过电压保护装置工作条件的重要依据, 在系统设计时, 应对这种过电压加以限制。

(3) 操作过电压 系统中的操作、故障或其它原因在系统中引起的过渡性质的过电压。它的特点是过电压持续时间较短, 衰减较快, 其过电压数值一般不超过电气设备额定电压的 3.5 倍, 且与开关电器的性能有关。这种过电压一般不会对电气设备绝缘造成危害, 但对绝缘较弱的电气设备及直配发电机威胁较大, 必须予以重视。

雷电过电压是由电力系统外部的大气放电所引起的, 所以又称为大气过电压或外部过电压。而短时过电压和操作过电压是由电力系统内部原因引起的, 所以又称为内部过电压。

电气设备的损坏往往是绝缘的损坏。电气设备的绝缘可分为外绝缘和内绝缘两部分。外绝缘是指设备壳体外部的绝缘, 通常以空气作为介质, 如导线间及导线与杆塔间的绝缘。内绝缘通常是指电气设备壳体内部的绝缘。内绝缘通常由不同的固体、液体或气体介质组合而成。

在运行中, 如果很高的电压使介质内部的电场强度高于其绝缘强度(绝缘强度是指介质保持其绝缘性能所能承受的最高外施电场强度)时, 介质将丧失其绝缘性能, 叫绝缘击穿。绝缘击穿的后果对不同形态的介质是不一样的。当空气击穿或绝缘子表面闪络时, 如果导致击穿或闪络的因素消失了, 则空气的绝缘强度会完全恢复, 所以空气绝缘又称为自恢复绝缘。对液体介质, 当外加电压击穿后, 如果外加电压消失了, 它也能恢复其绝缘性能(绝缘强度可能有轻微变化), 所以液体介质也是自恢复绝缘。因此气体、液体介质的击穿若不引起其它部

件的损坏,则一般只造成短时的供电中断或暂时的设备故障,不会造成设备的永久损坏。而固体介质的电气强度的破坏却是不可逆的过程,将导致设备的永久损坏。

综上所述,为了保证电力系统安全、可靠、经济地运行,必须研究各种介质在各种电压作用下的电气性能,以使其得到合理的应用;必须研究在运行中作用于绝缘上的各种过电压的性质、产生和发展过程,以便采取的限制措施;必须研究电气设备的高电压试验技术,以便检验设备是否能继续安全可靠地运行。这些就是高电压技术学科所要研究的主要内容。概括地说,高电压技术就是研究电气设备的绝缘配合及其运行问题的学科。电力系统的工程技术人员,在从事输电线路、变电所及发电厂的设计、安装,调试及运行中都会遇到电力系统的过电压和绝缘配合问题。因此,高电压技术课程的任务是使学习者掌握电气设备绝缘的性能、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能力和试验技能。

高电压技术既是专业课,又具有基础课的特点。其中过电压保护设备、保护接线、限制过电压的措施和预防性绝缘试验等具有专业课的特点,学习时,应按专业课的学习方法进行,要注意工程计算、经验公式、经验数据、试验曲线、预防措施、事故分析的思路和方法等。而高电压绝缘理论、波过程又明显地具有基础课的特点,因此在学习时应注意基本理论、基本概念完整性。

研究高电压技术问题有许多基本理论,如汤申德(Townsend)理论、流注理论和“小桥”理论等,这些理论均来源于试验。另外,由于高电压技术是一门较新的学科,理论还不够完善,有待于发展,因而试验是研究高电压技术的主要手段。所以试验在该课程中显得尤为重要。希望学习时注意这一点。

第一章 气体电介质的电气性能

电介质在电场力作用下的特性可用四个参数来表征。即用介电常数 ϵ 表征介质的极化性能；电导率 γ 或电阻率 ρ 表征导电性能；介质损耗角的正切值 $\tan\delta$ 表征功率损耗性能；击穿场强（介质丧失绝缘性能所需外施的最低电场强度） E_k 或绝缘强度 E_{jy} 表征耐电压性能。对气体介质而言，由于极化、电导和损耗均很小，所以只讨论其耐电压特性。

气体电介质，特别是空气是电力系统中主要的绝缘介质。例如，输电线路的相间绝缘、相对地绝缘、电气设备的外绝缘都是以空气为介质的。所以研究气体电介质的耐电压特性具有重要的实际意义。同时对于了解结构较为复杂的液体、固体电介质的击穿过程也大有帮助。

在正常状态下，中性的气体分子是不导电的，是良好的绝缘体。但当作用于气体的电场强度超过其击穿场强 E_k 时，气体就会失去绝缘性能，出现导电或放电的现象。在均匀电场中，出现放电将导致间隙的击穿；在不均匀电场中，可以有较稳定的局部放电，如电晕放电。当电源功率较小时，气隙的击穿表现为火花放电；当电源功率较大时，击穿常表现为电弧放电。

第一节 气体中带电质点的产生与消失

一、带电质点的产生

纯净的、中性状态的气体是不导电的，只有在气体中出现了带电质点（电子、负离子或正离子）以后才可能导电，并在电场力作用下发展成各种形式的气体放电现象。气体中带电质点的来源有两个：一是气体质点本身发生游离；二是位于气体中的金属发生表面游离。

气体质点游离所需的能量称为游离能。随气体种类不同，游离能一般约在 $10\sim 15\text{eV}$ 。金属表面游离所需要的能量称为逸出功，随金属不同约为 $1\sim 5\text{eV}$ ($1\text{eV}=1.6021892\times 10^{-19}\text{J}$)。

根据引起气体质点游离因素的不同，游离有下列各种方式。

1. 碰撞游离

一个质点（可以是带电质点，也可是中性质点）撞击另一个中性质点且使其分解为两个带电质点的现象称为碰撞游离。发生碰撞游离的首要条件是撞击质点的总能量一定要大于被撞质点在正常状态下的游离能。如果撞击质点的能量小于被撞质点的游离能，虽然不能使其游离，但却可使该被撞质点的位能跃迁到较高能级上去，这种现象称为激励。处于激励状态的质点易发生游离。

撞击质点的能量有两种：

(1) 动能 它等于 $mv^2/2$ ， m 为质点的质量， v 为质点的速度。

(2) 位能 如果以正常中性质点的位能为参考点，取其为零，则处在激励状态下的质点具有较高的位能。

造成碰撞游离的首要条件是撞击质点的总能量（动能与位能之和）必须大于被撞质点的游离能 W_y ，除此还需要一定的相互作用时间。一般来说，撞击质点的动能愈大，造成游离的几率也愈高。

碰撞游离可以一次完成,也可以分级游离的方式完成。例如汞气的游离能是 10.4eV,但是当撞击质点的能量为 4.6eV 时却可使其游离。这是由于先前的撞击已使被撞质点处于激励状态,然后其它的撞击质点,又使其游离,这就是分级游离。但分级游离所需要的总能量一定大于气体的游离能。

电子、离子等对中性质点(原子或分子)的碰撞,以及激励原子对激励原子的碰撞都能产生游离。其中电子的质量小,在电场力的作用下容易获得较高的速度,积累起足够的动能,所以电子在碰撞游离中起主导作用。而其它的质点因为本身的体积和质量较大,难于在碰撞前积累起足够的能量,因而游离作用小。

2. 光游离

短波射线的光子具有很大能量,它以光速运动,当它射到中性原子(或分子)上时所产生的游离称为光游离,光子的能量与其频率成正比,即

$$W = h\gamma \quad (1-1)$$

式中 h ——普朗克常量,等于 $6.6260755 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$;

γ ——光的频率(Hz)。

当气体受到光辐射作用时,如光子的能量大于气体的游离能,就有可能引起光游离。

光游离也可以分级游离的方式来完成。

紫外线、X射线、 α 、 β 和 γ 等短波射线都是产生光游离的因素。在气体击穿过程中异号带电质点不断复合为中性质点而放出的光子,激励状态的原子还原时放出的光子也有产生光游离的作用,并且是重要的光游离因素。

3. 热游离

当温度升高时,气体质点的动能也增加。在高温下,质点热运动时相互碰撞而产生的游离称为热游离。在常温下,热游离的可能性很小,只有在 5000~10000K 的高温下才产生热游离。

热游离有三种形式:

(1) 高温时,高速运动的气体分子相互碰撞而产生的游离。

(2) 气体分子与容器壁相碰撞失去动能而放出光子,温度升高,光子的频率及能量增加,因而在高温时,光子与气体分子相遇时可能产生的游离。

(3) 上述两种游离产生的电子与中性质点碰撞而产生的游离。

上面的三种游离均发生在气体的空间,然而在气体的击穿过程中还存在表面游离现象。

4. 表面游离

金属表面的电子接受外界能量后,逸出表面成为自由电子的现象称为表面游离。

表面游离有四种形式:

(1) 热电子发射 将金属表面加热,电子热运动速度增加,其能量超过逸出功,电子逸出金属表面。

(2) 二次发射 具有足够能量的质点(例如正离子)撞击阴极表面,使其释放出电子。

(3) 光电子发射 用短波光照射金属表面,当光子能量大于逸出功时,金属表面释放出电子。

(4) 强电场发射 当电极附近的电场特别强时,金属表面的电子被强行拉出。这种发射所需的外电场极高,在 10^6V/cm 数量级。一般气隙的击穿场强远低于此值,所以,一般气隙

的击穿过程中不会出现强电场发射。强电场发射只在某些高压强或高真空下气隙的击穿时才具有重要意义。

二、带电质点的消失

某些气体、如氧、氟、氯、六氟化硫等，它们的游离能特别大，当电子与之相撞时，通常不能产生碰撞游离，反而撞击电子被吸附而形成负离子。这样的气体通常称为负电性气体。

在负离子形成过程中，气隙中的电子逐渐减少。另外，由于负离子体积大，运动速度慢，因此它不易使气体游离而产生新电子，所以负离子的形成会阻碍击穿过程的发展。

在气体放电的发展过程中，除了有带电质点产生的游离过程，也同时存在带电质点从游离区消失或削弱其游离的过程，这个过程称为去游离过程。在放电发展过程中，游离起主导作用。而在电弧熄灭过程中，则与前面相反，去游离起主导作用。去游离过程将使气体迅速恢复中性的绝缘状态。

带电质点的消失主要有下面两种形式：

1. 带电质点的扩散

气体中的带电质点也和其它的中性分子一样，经常处于不规则的热运动之中。如果不同区域的带电质点存在浓度差，则它们总的趋势是不断从高浓度区域移向低浓度区域，趋向于使各处带电质点浓度变得均匀。这种现象称为带电质点的扩散。当气隙发生放电并去掉电源后，放电通道中高浓度的带电质点迅速地向外扩散，使间隙恢复到原来的绝缘状态。

2. 带电质点的复合

正离子与负离子或电子相遇，发生电荷的传递而相互中和还原为中性质点的现象称为带电质点的复合。复合可以在气体空间进行，也可在容器壁上发生。若放电空间离容器壁较远，则显然前者是主要的。

在带电质点复合中会发生光辐射，如前所述，这种光辐射在一定条件下又可能成为导致光游离的因素。

第二节 均匀电场小气隙的放电

一、气隙放电的伏安特性曲线

19 世纪 90 年代，英国物理学家通过如图 1-1 的实验装置，做出了均匀电场空气隙，从零逐渐升高直流电压时放电的伏安特性曲线如图 1-2 所示。

从图 1-2 可以看出，当电压很低时也有电流流过气隙，即气隙中有电荷的定向移动。那末，

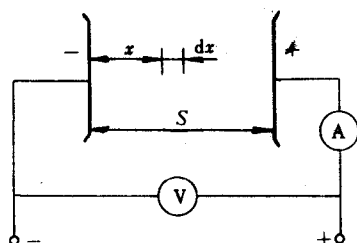


图 1-1 平行板电极实验装置

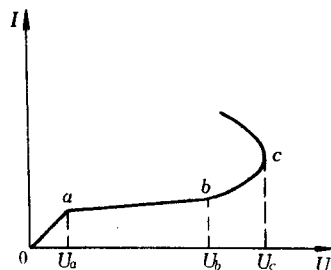


图 1-2 气隙的伏安特性曲线

这个电荷是从哪里来的呢? 汤申德认为, 空气中由于宇宙射线和地球放射性物质射线的作用, 总是存在中性质点光游离和电荷复合的运动过程。同时, 阴极受表面游离的作用也要向气隙中发射电子。在平衡状态下, 空气中总是存在少量的带电质点(现代物理实验证明, 空气中每立方厘米约存在 500 对正负电荷)。这些带电质点在外电场作用下定向移动形成了电流。开始, 随电压的升高, 带电质点的移动速度加快, 电流也随之增大, 如图 1-2 中的 $0 \sim a$ 段。到达 a 点以后, 由外界因素在气隙中产生的带电质点已全部参与导电, 且由于带电质点在移动过程中与中性质点相碰撞时必然要损失它的能量, 从而使带电质点的移动速度随外加电压的升高而趋于不变, 所以电流也基本不变。这时的电流密度是极小的, 一般约为 10^{-19}A/cm^2 数量级。因此, 这时气隙仍处于良好的绝缘状态。当到达 b 点以后, 电流又重新随电压的升高而增大。这是因为当外加电场足够高时, 移动的带电质点(主要是电子)的能量足以使被撞的中性质点游离, 即碰撞游离。这种碰撞游离一旦发生, 就将愈来愈剧烈, 被碰撞游离出来的新电子在强电场加速下又将去产生新的碰撞游离。这种现象就如同雪山上的雪崩一样剧烈地发展下去, 故称为电子崩。由于电压的升高产生电子崩使气隙电荷急剧增加, 所以电流也急剧增大。最后达到 c 点时, 电流更急剧增加到必须依靠外电路电阻来限制的地步, 即气隙已经击穿。

通过用铅皮在放电的不同时刻封包气隙的辅助性实验表明, 在 $0 \sim c$ 段的放电必须依靠外界游离因素才能使放电维持下去, 所以此范围的放电称为非自持放电。在 c 点以后的放电即使取消了外界射线的作用, 也能使放电靠外施电压自行维持下去, 所以此段放电称为自持放电。

二、汤申德理论计算气隙击穿电压 U_k

汤申德在他的气体放电理论中, 引用游离系数来描述击穿过程。

1. 汤申德游离系数

(1) 汤申德第一游离系数 α 一个电子逆外电场方向行进单位距离产生的碰撞游离数称为汤申德第一游离系数, 记为 α 。显然 α 与电场强度、气体种类及相对密度有关。实验和理论分析得知其关系如下式

$$\alpha = A\delta e^{-\frac{B\delta}{E}} \quad (1-2)$$

式中 A 、 B ——均为与气体性质有关的常数, 对空气, $A=109.61/\text{kPa}$, $B=2738.40\text{V/kPa}$;

δ ——气体的相对密度;

E ——电子所在点的气体的电场强度。

由式 (1-2) 可以清楚地看出, α 值对 E 值非常敏感, 即电场强度 E 的很小变化就会引起 α 值的很大变化, 如图 1-3 所示。

(2) 汤申德第二游离系数 β 气隙在外加电压作用下, 正离子要沿外电场方向移动。一个正离子沿外电场方向行进单位距离所产生的碰撞游离数称为汤申德第二游离系数, 记为 β 。由于正离子质量大, 在外电场作用下不易加速, 且体积大, 平均自由行程短, 所以在运动中不易积累起能引起碰撞游离的能量, 因而 β 值很小, 在分析气隙击穿过程中可以不予考虑。

(3) 汤申德第三游离系数 γ 正离子在外电场作用下向阴极移动, 当与阴极表面相撞时, 如果能量大于阴极材料的逸出功, 可使其表面游离而发射电子。一个正离子撞击阴极表面, 使其净释放的电子数(指除与正离子中和的电子数后)称为汤申德第三游离系数, 记为 γ 。

γ 的大小与阴极材料和气体种类有关, 在空气中, 铜的 $\gamma=0.025$, 铝的 $\gamma=0.035$ 。

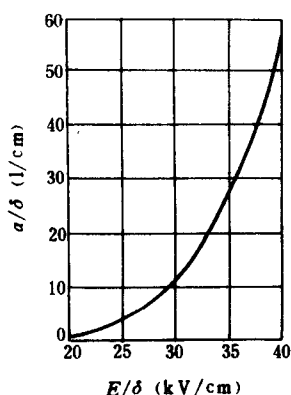
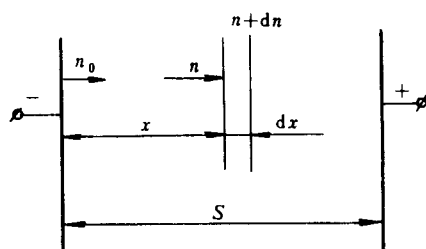
图 1-3 标准大气条件下空气中 α 与 E 的关系

图 1-4 电子崩中电子数的计算

2. 自持放电的条件

阴极的逸出功远小于气体的游离能。所以在外界射线的作用下，靠近阳极表面的自由电子密度较高。且在外电场作用下，这些电子产生的碰撞游离数要远高于其它部分的电子，所以气隙的放电能否维持，关键取决于阴极表面能否连续不断地释放出电子。如果在外电场作用下，这些电子产生的电子崩中的正离子向阴极移动，对阴极表面的游离作用能够代替外界射线的作用，则阳极能源源不断地释放出电子。这些电子不断形成新的电子崩，使气隙维持导电状态，即达到了自持放电。工程上关心的就是这种放电。那末，在什么条件下才能形成自持放电呢？下面进行简单的定量分析。

假定在外界游离因素作用下，阴极表面释放出 n_0 个电子，如图 1-4 所示。在外电场作用下，这 n_0 个电子向阳极移动，产生碰撞游离。行进 x 距离后，电子数增加到 n 个。这 n 个电子再行进 dx 距离，则电子的增量为 dn 。 dn 为 n 个电子在 dx 距离内产生的碰撞游离数，即

$$dn = n\alpha dx \quad (1-3)$$

对上式积分得

$$\ln n = \int_0^x \alpha dx + c_1$$

$$n = ce^{\int_0^x \alpha dx}$$

当 $x=0$ 时， $n=n_0$ ，所以 $c=n_0$ ，

则

$$n = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx}$$

对均匀电场， α 为常数， n_0 个电子经碰撞游离，进入阳极的电子数为

$$n_y = n_0 e^{\alpha S}$$

在气隙中产生的正电荷数为

$$n_0 e^{\alpha S} - n_0 = n_0 (e^{\alpha S} - 1) \quad (1-4)$$

如果 $n_0 (e^{\alpha S} - 1)$ 个正离子在外电场作用下撞击阴极表面，表面游离出的净电子数大于或等于由外界游离的电子数 n_0 ，在没有外界游离因素的情况下放电也将进行下去，所以自持放电条件为

$$n_0 (e^{\alpha S} - 1) \gamma = n_0$$

即

$$e^{\alpha S} - 1 = \frac{1}{\gamma} \quad (1-5)$$

3. 击穿电压 U_k 的计算

根据自持放电条件式 (1-5) 可以求得自持放电时的放电电压。对均匀电场, 自持放电电压就是间隙的击穿电压 U_k , 即

$$U_k = E_k S \quad (1-6)$$

式中 E_k ——空气的击穿场强, $E_k = 30 \text{ kV/cm}$;

S ——极板之间的距离 (cm)。

由自持放电条件

$$e^{\alpha S} - 1 = \frac{1}{\gamma}$$

得

$$\alpha S = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

因为

$$\alpha = A \delta e^{-\frac{B \delta}{E_k}} = A \delta e^{-\frac{B \delta S}{U_k}}$$

所以

$$A \delta S e^{-\frac{B \delta S}{U_k}} = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

经整理得气隙的击穿电压为

$$U_k = \frac{B \delta S}{\ln \frac{A \delta S}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}} \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可以看出:

(1) 气隙的击穿电压与阴极材料和气体性质有关。

(2) 均匀电场气隙的击穿电压不仅与气隙 S 有关, 还和气体分子相对密度 δ 有关, 是 δ 与 S 乘积的函数。只要 δS 的乘积不变, U_k 也不变。

三、巴申 (Paschen) 定律

U_k 是 δS 的函数这个规律早在汤申德推导出式 (1-7) 以前就已由巴申从大量试验中总结出来, 其结果如图 1-5 所示, 所以这个规律又称为巴申定律。

由图 1-5 可见, 曲线存在一谷点, 对应的 $\delta S \approx 75 \times 10^{-4} \text{ cm}$, $U_k \approx 330 \text{ V}$ 。它说明, 当气隙的工作点 (δS 的值) 不同, U_k 随 δS 的变化规律也不同。我们可以这样理解为气隙的击穿就是气隙在外电压作用下有强大电流通过, 即有大量的带电质点定向移动。而带电质点的产生取决于从阴极出发的电子在向阳极移动过程中与中性质点的碰撞次数和使其游离的概率。假设 δ 保持不变, S 增大, 则必须增大外施电压才能使电子获得足够的能量以产生碰撞游离。但是, 当 S 值很小, 碰撞游离概率已经很高时, 如果继续减小 S , 则由于电子与中性质点碰撞次数的减少, 反而使气隙移动的带电质点减少, 所以必须升高外施电压才能保持气隙的击穿。在 S 的变化过程中, 总有一个 S 对气隙中的带电质

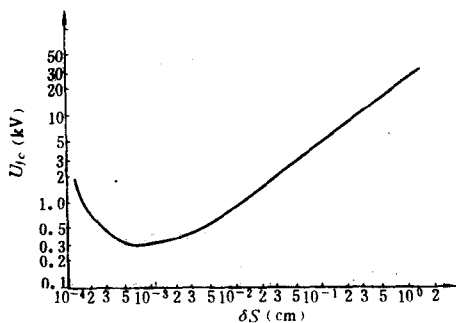


图 1-5 气隙击穿电压与 δS 的关系

点的产生最有利,使击穿电压最低,这就是谷点,同理,当 S 保持不变,气体分子相对密度 δ 增大时,电子的自由行程缩短了,相邻两次碰撞之间电子积聚到足够动能的概率减小了,故 U_k 必然升高,这就是谷点的右侧。反之,当 δ 减小到很小数值后,使碰撞游离概率增加的影响不再能抵消碰撞次数减少的作用,所以为了保持一定数量的带电质点,必须升高外施电压,即 U_k 升高,这就是谷点的左侧。在这两者之间,总有一个 δ 值对造成碰撞游离最有利,此时 U_k 最小,这就是谷点。

第三节 均匀电场大气隙的放电

当 δS 很小时,用汤申德理论可以较好地解释气隙的放电过程,物理过程清晰,并且可以定量计算气隙的击穿电压。但是,当 δS 较大(例大于 0.26cm)时,气隙放电的许多特点无法用汤申德理论解释。例如气隙从加上电压到整个气隙击穿所用的时间应为电子从阴极出发到达阳极与正离子从阳极到达阴极所用时间之和,而实际击穿所用时间要比这小得多;气隙放电应在整个气隙中进行(因从阳极释放出的电子近似均匀分布),而实际放电常是在带有明亮分枝的狭窄通道内进行;击穿电压 U_k 与阴极材料有关,而实际击穿电压与阴极材料几乎无关。上述现象说明在 δS 较大时,气隙的击穿除了碰撞游离外,还有新的因素对 U_k 有影响。在汤申德理论的基础上,由洛伊布(Leob)和米克(Meek)等通过大量的试验研究和对雷电的观测,提出了流注放电理论。流注理论既考虑到碰撞游离,又考虑到在初崩发展过程中空间电荷对气隙电场的畸变和光游离的作用,能够较切合实际地解释气隙的放电过程。

一、空间电荷对气隙电场的畸变

从阴极发出的电子在外电场作用下向阳极移动,碰撞游离发展成电子崩(称为初崩)。由于电子的质量小,所以在外电场作用下很容易获得加速,以很高的速度移动在电子崩的头部。而正离子,由于其质量大,体积也较电子大得多,所以缓慢地移动在电子崩的后部(向阴极移动)。由于电子的扩散作用,电子崩在发展过程中半径逐渐增大,其外形如一个头部为球形的圆锥体,如图1-6a所示。图1-6b为空间电荷的浓度分布示意图,其中 N_+ 与 N_- 分别代表该截面上正负电荷的数量。沿电子崩轴线各点的合成电场将是电源的外施电场和初崩空间电荷所产生电场的矢量和,如图1-6c、d所示。崩头前面电场被加强得最大,有利于初崩向前发展或产生新电子崩。崩内正负空间电荷混杂处的电场被大大减弱,这有利于电荷的复合和强烈的反激励(由激励状态恢复到正常状态的过程称为反激励)。复合与反激励会以光能的形式释放出游离与激励时质点所吸收的能量。当光子的能量大于中性质点的游离能时,可能形成光游离。而初崩尾部电场也得到了加强,这有利于光游离出的光电子形成新的电子崩。这个由初崩中发的光产生的光游离形成的电子崩称为二次电子崩。

二、流注的形成

如果外施电压为气隙的最低击穿电压,当初崩发展到阳极时,正负电荷复合和反激励发的光足以使位能较高的初崩尾部的部分中性质点光游离而形成光电子。由于受空间电荷(初崩)的畸变作用,崩尾的电场较高,它使光电子以很高的速度向初崩的正电荷区移动,形成二次电子崩。二次电子崩头部的电子与初崩的正空间电荷汇合成为充满正负带电质点的混合通道。这个正电荷多于负电荷的混合通道称为流注通道,简称为流注。流注导电性能良好,其端部又有二次崩尾部留下的正空间电荷,因此大大加强了流注前方(流注的发展方向为从阳

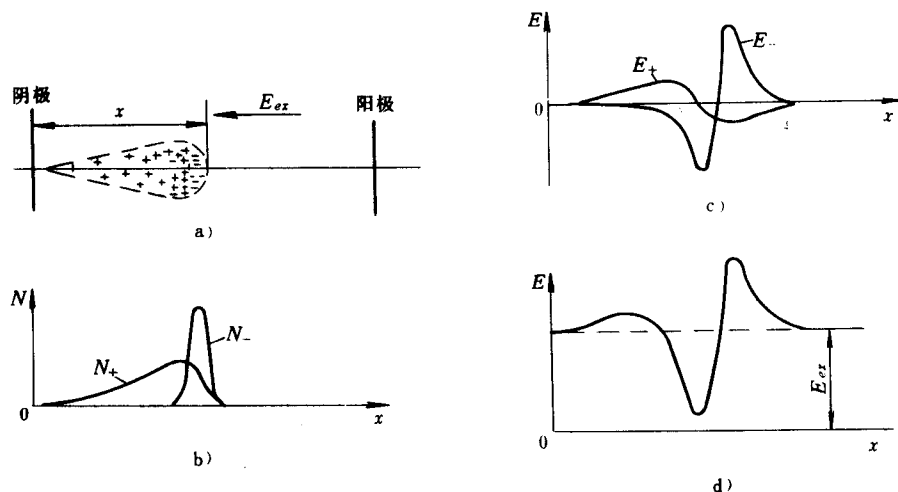


图 1-6 平行板电极间空间电荷对电场的畸变

a) 电子崩示意图 b) 空间电荷的浓度分布 c) 空间电荷的电场 d) 合成电场

极到阴极) 的电场。由于流注内部正负电荷密度大, 场强低, 所以也存在剧烈的正负电荷的复合与中性质点的反激励过程。这个过程发出的光子又将使流注前方的部分中性质点光游离, 产生出新的光电子。这个新的光电子又以很高的速度向流注前端的正电荷区移动, 形成新的电子崩, 使流注通道不断地向阴极延伸。当流注沟通两极时, 就将导致间隙的完全击穿。这个流注是从阳极向阴极发展的, 所以称为正流注。正流注的形成和发展过程如图 1-7 所示。在这里, 自持放电的条件即间隙击穿的条件就是流注形成的条件。初崩头部电荷达到一定的数量, 使初崩轴线电场得到足够的畸变并造成足够的光

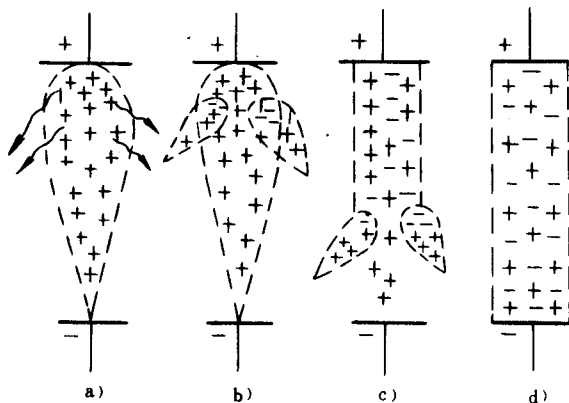


图 1-7 正流注的形成和发展过程

游离。一般认为当 $\alpha=20$ (或 $e^{\alpha s} \approx 10^8$) 时便可满足上述条件, 使流注得以形成。而流注一旦产生就将继续发展下去, 最后导致间隙的完全击穿。这种用流注的形成来解释气隙击穿过程的理论称为流注理论。

按流注理论, 气隙击穿与否的关键取决于初崩的空间电荷对其轴线电场的畸变程度和初崩发展过程中的发光程度, 而与阴极能否被正离子表面游离无关, 所以击穿电压与阴极材料无关。击穿所用时间为初崩从阴极发展到阳极与正流注从阳极发展到阴极所用时间之和, 而正流注的发展速度比正离子的移动速度高得多, 所以算出的击穿所用时间也要短得多。当第一个电子崩形成后, 其空间电荷对周围电场具有屏蔽作用, 因而不宜在其它位置形成电子崩和流注, 所以放电仅在一个狭窄通道内进行。

如果外施电压比气隙的最低击穿电压高得多,则主崩不需经过整个间隙,其头部即已积累到足够多的空间电荷,发的光足以使主崩前方以及尾部的部分中性质点光游离产生光电子。崩头前方的光电子在畸变后的电场作用下,向阳极高速移动,形成二次电子崩。初崩头部负电荷与二次电子崩尾部正电荷汇合形成由阴极向阳极发展的流注,称为负流注。同时初崩尾部的光电子形成的二次电子崩崩头与初崩正电荷区汇合形成向阴极发展的正流注,当正、负流注沟通两极时,气隙击穿。负流注的发展过程如图 1-8 所示。

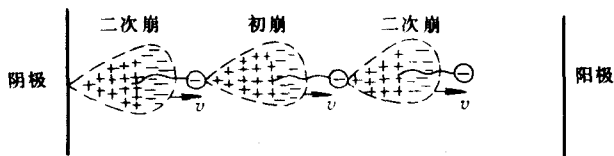


图 1-8 负流注的发展过程

第四节 不均匀电场气隙的击穿

电力工程中大多数实际结构的电场都是不均匀的。与均匀电场相比,不均匀电场气隙的放电有一系列的特点。因此研究不均匀电场中气隙放电的规律具有重要意义。

不均匀电场的形式繁多,绝大多数为不对称电场,少数为对称电场。不对称电场的典型形式是棒—板电极,对称的典型代表为棒—棒电极。

对不均匀电场,汤申德理论不适用,只能用流注理论来分析研究其气隙的击穿过程与特点。

在不对称电场的情况下,电压极性对气隙的击穿电压有很大影响,并且长间隙与短间隙的放电又有所不同,下面以棒—板电极为例进行分析研究。

一、短间隙的击穿

棒为正极性时,电子是从场强低的区域向场强高的区域发展,这对电子崩的发展极为有利。此外,初崩的电子很快进入阳极(棒极),在棒极前方留下了正离子,见图 1-9a。这些正离子大大加强了气隙深处的电场,极易使气隙深处的电子产生新的电子崩(二次电子崩),见图 1-9b。这个电子崩崩头的电子与初崩产生的正空间电荷汇合形成流注,而流注头部(二次崩尾部)的正空间电荷加强了流注前方的电场,使流注进一步向阴极扩展,见图 1-9c。由于流注所产生的空间电荷总是加强前方的电场,所以它的发展是连续的,速度很快,与棒为负极性时相比,击穿同一间隙所需电压要低得多。

当棒为负极性时,情况就不同了。初崩直接由棒极向外发展。先经过强场区,后来的路程中场强愈来愈弱,这就使电子崩的发展比棒为正极性时不利得多。初崩留下的正空间电荷(电子已向外扩散,见图 1-10a)显然增强了负棒极附近的电场,却削弱了气隙深处的空间电场,使流注的向前发展受到抑制。只有再升高电压,并待初崩中向阴极方向(向后)发展的正流注(见图 1-10b)完成,使前方(气隙深处)的电场加强后,才可能在前方空间产生新的电子崩,见图 1-10c。新电子崩的发展过程与第一个电子崩相同。这样就形成了自阴极向阳极发展的负流注。这个负流注发展过程是阶段式的,其平均速度比正流注小得多,击穿同一间隙所需的电压要高得多。

不论是正流注还是负流注,当流注发展到对面电极时,整个间隙就被充满正、负电荷,具