



普通高等教育铁道部规划教材

电气化铁道高电压工程

吴广宁 主编 李德胜 主审



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育铁道部规划教材

电气化铁道高电压工程

吴广宁 主 编

李德胜 主 审

中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

本书为普通高等教育铁道部规划教材。全书共分十一章,具体内容包括:气体的绝缘特性与介质的电气强度、液体的绝缘特性与介质的电气强度、固体的绝缘特性与介质的电气强度、组合绝缘电介质电气强度、高电压试验、绝缘预防性试验方法、牵引供电系统电气设备预防性试验、牵引供电设备电气绝缘在线监测、输电线路和绕组中的波过程、牵引供电系统雷电过电压及其防护、牵引供电系统内部过电压与绝缘配合等内容。

本书可以作为普通高等教育电气工程类专业本科、高等职业学校相关专业及研究生教材,也可供相关专业技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电气化铁道高电压工程/吴广宁主编. —北京:中国铁道出版社,2011.5

普通高等教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-12456-4

I. ①电… II. ①吴… III. ①电气化铁道—高电压—高等学校—教材
IV. ①U223.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 020803 号

书 名:电气化铁道高电压工程

作 者:吴广宁 主编

责任编辑:阚济存 电话:010-51873133 电子信箱:td51873133@163.com 教材网址:www.tdjiaocai.com

编辑助理:李慧君 张 博

封面设计:崔丽芳

责任校对:张玉华

责任印制:陆 宁

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)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:三河市华业印装厂

版 次:2011年5月第1版 2011年5月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:16 字数:389 千

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-12456-4

定 价:33.00 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,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

本书是普通高等教育铁道部规划教材,是由铁道部教材开发领导小组组织编写,并经铁道部相关业务部门审定,适用于高等院校铁路特色专业教学以及铁路专业技术人员使用。本书为铁路牵引供电系列教材之一。

轨道交通的发展与高电压绝缘技术密切相关,近年来高速电气化铁路发展迅速,而高压电气设备作为轨道交通系统的核心,其运行可靠性是保障系统稳定的重要指标。高电压技术是电工学科的一个重要分支,它涉及数学、物理、化学、材料等基础学科,以电介质物理、电介质化学、电气绝缘材料科学、电磁场、系统工程等学科内容为基础,主要研究高电压(强电场)下的各种电气物理问题。20世纪60年代以来,高电压技术一直不断吸收其他学科(尤其是新科技领域)的研究成果,在促进自身发展的同时,也促进了轨道交通、电力传输等科技领域的发展,显示出了强大的活力。随着铁道电气化的深入,特别是重载、高速列车的发展,对牵引供电系统及高压电气设备的可靠性提出了更高的要求,这是铁道电气化工程和运营实践中必然面对的问题。本书即着眼于研究电气化铁路牵引供电系统中高压电气设备的绝缘、高电压试验和在线监测技术以及过电压防护与绝缘配合等问题。

本书在编写过程中,力求做到深入浅出、通俗易懂,便于读者阅读和自学。在内容选取方面,力求适合轨道交通高电压课程的需要,着重以牵引供电系统为基础介绍本领域高电压技术的理论,分别在电介质的绝缘特性及其电气强度、牵引供电系统电气绝缘与高电压试验、牵引供电系统过电压防护与绝缘配合等方面做了详细阐述,重点涉及工程应用中的关键问题,并对近年来高电压领域的新发展和先进成果做了一定的介绍。

本书由西南交通大学吴广宁主编,铁道部运输局李德胜主审。周利军、高波、李瑞芳参与编写。本书初稿的编校工作得到了艾兵、肖华、陈立、申翰林等同志的大力帮助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥和错误之处,恳请读者给予批评指正。

编 者

2011年2月

目 录

绪 论	1
第一章 气体的绝缘特性与介质的电气强度	5
第一节 气体放电的基本知识	5
第二节 气体放电的基本过程	6
第三节 气体介质的电气强度	14
第四节 固体绝缘表面的气体沿面放电	21
复习思考题	24
第二章 液体的绝缘特性与介质的电气强度	26
第一节 液体电介质的极化与损耗	26
第二节 液体电介质的电导	29
第三节 液体电介质的击穿	31
复习思考题	33
第三章 固体的绝缘特性与介质的电气强度	34
第一节 固体电介质的介电常数	34
第二节 固体电介质的电导	36
第三节 固体电介质的击穿	42
复习思考题	47
第四章 组合绝缘电介质电气强度	48
第一节 组合绝缘的概念和主要形式	48
第二节 局部放电	52
第三节 组合绝缘电介质的击穿	57
复习思考题	61
第五章 高电压试验	62
第一节 工频高电压试验	62
第二节 直流高电压试验	72
第三节 冲击高电压试验	78
复习思考题	85
第六章 绝缘预防性试验方法	86
第一节 绝缘电阻、吸收比与泄漏电流的测量	86



第二节	介质损耗角正切值的测量	91
第三节	局部放电的测量	93
第四节	绝缘油的电气性能试验	95
	复习思考题	103
第七章	牵引供电系统电气设备预防性试验	104
第一节	变压器绝缘试验	104
第二节	断路器绝缘试验	113
第三节	互感器试验	116
第四节	GIS 试验	121
第五节	绝缘子和高压套管试验	124
第六节	电力电缆绝缘试验	128
第七节	电力电容器特性试验	131
第八节	电气试验车	134
	复习思考题	135
第八章	牵引供电设备电气绝缘在线监测	136
第一节	在线监测系统的组成	137
第二节	牵引变压器在线监测与故障诊断	140
第三节	断路器在线监测与故障诊断	151
第四节	电容性设备在线监测	153
第五节	氧化锌避雷器在线监测与故障诊断	158
第六节	电力电缆绝缘在线监测与故障诊断	160
第七节	红外成像技术在高压电气设备检测中的应用	166
	复习思考题	169
第九章	输电线路和绕组中的波过程	170
第一节	均匀无损单导线上的波过程	170
第二节	行波的折射和反射	173
第三节	波在多导线系统中的传播	177
第四节	波在传播中的衰减与畸变	179
第五节	绕组中的波过程	181
	复习思考题	187
第十章	牵引供电系统雷电过电压及其防护	188
第一节	雷电放电和雷电过电压	188
第二节	防雷保护装置	195
第三节	牵引变电所防雷保护	208
第四节	接触网防雷保护	210



第五节 综合接地系统.....	216
复习思考题.....	222
第十一章 牵引供电系统内部过电压与绝缘配合.....	223
第一节 切断空载线路过电压.....	223
第二节 空载线路合闸过电压.....	225
第三节 切除空载变压器过电压.....	228
第四节 断续电弧接地过电压.....	230
第五节 谐振过电压.....	234
第六节 分相过电压.....	237
第七节 绝缘配合.....	239
复习思考题.....	242
附 录.....	244
附表 1 普通阀式避雷器的电气特性.....	244
附表 2 电站用磁吹阀式避雷器(FCZ 系列)的电气特性.....	245
附表 3 典型交流无间隙金属氧化物避雷器的电气特性(GB 11032—2000).....	242
参考文献.....	247

绪 论

一、高电压技术的发展和前景

“高电压工程”这一术语,始见于美国工程师皮克(F. W. Peek)于1915年出版的《高电压工程中的电介质现象》一书。当时的高电压技术,主要是为了解决高压输电工程中的绝缘问题。随着电力系统输送容量的增大,电压水平的提高以及相关物理学科的迅速发展,高电压技术在20世纪初的几十年发展十分迅速。而自从20世纪60年代以来,受到高压、特高压输电发展的推动,高电压技术已经产生了许多新的分支,扩大了应用领域,成为电工学科中十分重要的一支。

高电压技术随着电力系统输电电压的提高得到了迅速发展。由于升高电压等级可以提高电力系统的输送能力,降低线路损耗,增加传输距离,还可以降低电网传输单位容量的造价,因此,电力系统总是在安全与经济效益的平衡下采用较高等级的电压。输电电压一般分为高压、超高压和特高压。目前国际上高压一般指35~220 kV的电压;超高压一般指交流330 kV以上、1 000 kV以下的电压;特高压一般指交流1 000 kV及以上的电压。而高压直流(HVDC)通常指的是 ± 600 kV及以下的直流输电电压, ± 600 kV以上的则称为特高压直流(UHVDC)。

我国高电压技术的发展和电力工业的发展是紧密联系的。在1949年新中国成立以前,电力工业发展缓慢,输电建设迟缓,输电电压因具体工程不同而不同,没有统一标准,输电电压等级繁多。从1908年建成的石龙坝水电站—昆明的22 kV线路,到1943年建成的镜泊湖水电站—延边的110 kV线路,中间出现过的电压等级有33 kV、44 kV、66 kV以及154 kV等。直到新中国成立以后,我国才逐渐形成了经济合理的电压等级系列。1952年我国依靠自身技术力量开始自主建设110 kV线路,并形成京津唐110 kV输电网。1954年建成丰满—李石寨220 kV输电线,在接下来的几年时间形成了220 kV东北骨干输电网。1972年建成330 kV刘家峡—关中输电线路,并逐渐形成西北电网330 kV骨干网架。1981年建成500 kV平顶山—武汉输电线路,开始形成华中电网500 kV骨干网架。1989年建成500 kV葛洲坝—上海超高压直流输电线路,实现了华中、华东两大区的直联联网。

目前世界上最高的交、直流输电电压等级已经分别达到了1 150 kV和600 kV。就我国绝大多数电网而言,高压电网指的是110 kV和220 kV电网;超高压电网指的是330 kV、500 kV和750 kV电网。特高压输电指的是1 000 kV交流电网和800 kV直流输电工程。特高压电网指的是以1 000 kV输电网为骨干网架,超高压输电网和高压输电网以及特高压直流输电、高压直流输电和配电网构成的层次结构清晰的现代化大电网。由于我国幅原辽阔,一次能源分布不平均,动力资源与重要负荷中心距离很远,因此我国的送电格局是“西电东送”和“北电南送”。由于送电距离的原因,发展1 000 kV及以上的特高压输电技术对我国有着十分重要的意义。



高电压技术发展前景主要体现在以下几个方面。

(1) 更高电压等级的应用

我国输电电压经历了中压、高压到超高压的发展阶段,目前正在向特高压的方向发展。为实现西电东送,北电南送,以及全国大区电网互联的战略发展布局,我们必须认真开展更高级电压特别是特高压输电的深入研究,以适应远距离大功率输电的需要。

(2) 新材料新技术的应用

材料学科是发展最快的领域之一,很多材料的功能及性能以前所未有的速度不断得到改进提高,新材料不断涌现。相比而言,电工技术是一个较为成熟的学科领域。然而,新材料在此领域的应用,却有可能带来革命性变化。可以预计,高温超导材料、新型磁性材料、新型合金及新型绝缘材料将会在高压电气设备上迅速得到推广应用。在新技术方面,以信息科学为代表的高新技术将是高电压技术学科发展的又一动力。新型传感技术、信息的采集和处理、网络技术、自动化技术、纳米技术、现代通信技术、微电子技术等将在高电压技术领域获得广泛应用,并在推动高电压学科进步上发挥显著作用。

(3) 与其他学科的交叉渗透

1) 环保领域

随着经济的发展,世界各国越来越认识到环境保护的重要性。我国将环境保护提高到了基本国策的高度,并投入巨额资金进行保护和治理,而高电压技术在这一领域也有着日新月异的应用,例如烟气的脱硫、脱硝、除尘,汽车尾气处理和污水处理等。

2) 生物医学领域

研究表明,静电场或脉冲电磁场对于促进骨折愈合效果明显;通过营造适当的电磁场环境,对促进骨细胞生长有着较好的效果;在某些医疗诊断仪器或者治疗仪器上,高电压技术往往是其核心技术之一。因此,电磁环境学已经成为目前热点研究问题之一。

3) 新能源领域

由于目前广泛采用的一次能源,如石油、煤、天然气等储量有限,因此对于新能源的开发已经成为能源领域迫在眉睫的问题。而受控核聚变,太阳能发电,风力发电以及燃料电池等新能源技术要得到飞跃发展,高电压技术范畴的大功率脉冲电源、等离子控制等技术的发展进步将会起到关键的作用。

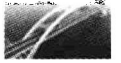
4) 材料领域

在材料领域,目前世界上许多实验室正在研究用等离子聚合的方法制作具有特殊功能的薄膜。利用等离子聚合所形成的薄膜,在结构、性能上与常规薄膜有所不同的新特性,如等离子聚合膜的交联度很高,致密性好,具有机械强度高、耐热性好、耐化学侵蚀性强的优点;有的等离子聚合膜的介电常数非常大,可以用于集成电路芯片制造;等离子聚合膜的电导率也较高,可用作防静电的绝缘保护膜;通过低温等离子技术研制的新型半导体材料,不论在制作还是在实际应用中,都与高电压技术有着非常紧密的联系。

二、牵引供电系统高压电气设备的安全运行

电力牵引供电系统的主要作用,就是将从电力系统取得的电能,按要求的电压以单相的方式送给在铁路线上运行的电力机车,其构成如图 0-1 所示。

牵引供电系统动力取自于 110 kV 或 220 kV 电网,经牵引变电所降压为 25 kV 送入接触



网,由电力机车取流、再次降压,驱动牵引电机来完成。牵引供电系统建立在 25 kV 的高压供电系统基础之上,涉及大量的高压电气设备,需要解决各种高压绝缘和检测问题。例如,在牵引变电所中用 110/27.5 kV 电力变压器进行电压变换时,需对牵引变压器进行绝缘电阻与吸收比试验、变压器油气相色谱分析和局部放电试验等;用 110 kV、27.5 kV 断路器对电路的通断进行控制,需对其进行交流耐压、泄露电流试验等;对系统工作状况进行监测的 110 kV、27.5 kV 电压互感器、电流互感器,需要对其进行绝缘电阻试验和绝缘油特性试验等;另外,用于对系统进行过电压保护的 110 kV、27.5 kV 避雷器均需要进行高压绝缘试验。在接触网中用 25 kV 悬式或棒式绝缘子对导线进行悬挂固定;用分相绝缘器、分段绝缘器对接触网的不同相位和不同供电区段的导线进行电气隔离;在电力机车上采用多抽头电力变压器进行电压变换;用 25 kV 避雷器来限制对电力机车侵袭的各种过电压;在牵引变电所和接触网检修工作中常常需要确定带电体与接地体之间的最小电气距离,选择带电用绝缘工具和确定带电作业的安全距离,处理各种绝缘故障问题。综上所述,牵引供电系统及其高压电气设备的绝缘可靠性是决定电气化铁道牵引供电系统安全运营的重要因素。

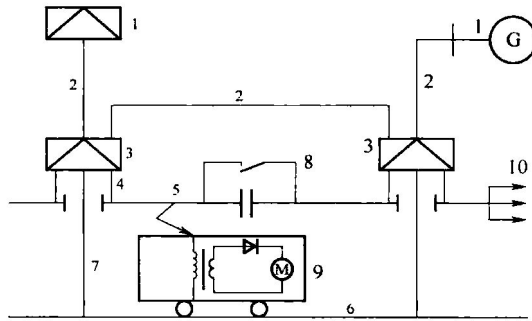
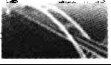


图 0-1 工频单相交流牵引供电系统示意图

- 1—区域变电所或发电厂;2—高压输电线;3—牵引变电所;4—馈电线;
5—接触网;6—钢轨;7—回流线;8—分区所;9—电力机车;10—开闭所

牵引供电系统正常运行时,高压电气设备长期处于带电工作状态。但是,由于牵引变电所和接触网地域分布广泛,所经地形地势复杂,易遭受雷击侵扰而致使部分带电设备失电。另外电力机车在起动、停止,以及电力机车频繁的通过接触网各个供电段之间的电分相装置时,不断出现接触网、电力机车、电分相系统组合变化,引起系统电气参数改变和状态的切换,必然导致电压电流等电磁参量的变化,可能诱发电磁暂态过程,并在牵引供电系统中产生内部过电压。另外,电气化铁道牵引供电系统中同样存在各种过电压的问题,如铁磁谐振后引发弧光过电压使电缆“放炮”,谐振过电压或过电流使电压互感器烧毁,间歇性过电压使避雷器爆炸等。过电压的作用时间虽然很短,但幅值大大超过正常工作电压,容易造成高压电气设备绝缘损坏。在牵引供电系统发生短路时,牵引变压器线圈承受电动力作用。高压电气设备还要受到日晒夜露、风吹雨打;冰雪覆盖、骤冷骤热;化工气体、烟雾、尘埃等污染。这些都会导致高压电气设备在工作电压下绝缘性能逐渐劣化,失去原有的绝缘特性,在一定条件下发生闪络、击穿,造成停电事故。工作电压常常是决定高压电气设备绝缘使用寿命的主要条件,而过电压往往是高压电气设备发生绝缘事故的诱发因素。牵引供电系统及高压电气设备能否安全运行,取决于作用在电气设备绝缘上的电压高低和耐受过电压的能力。



评估高压电气设备绝缘耐受过电压的能力,最实用有效的方法是对高压电气设备进行绝缘试验,即:在低于或接近额定电压下测试设备的绝缘特性参数及其变化情况,在施加等值模拟运行中可能遇到过电压来判断设备绝缘耐受压的能力。各种电压等级的高压电气设备的最高工作电压、各种类型的试验电压以及实验周期、试验方法,在国际电工委员会(以下简称 IEC)的有关出版物和国家标准中已有明确规定,例如:IEC Standard, High-voltage Test Techniques, Publication 52, 60, 270; 国家标准 GB 311.1—1997《高压输变电设备的绝缘配合》、国家标准 GB 50150—2006《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》、电力行业标准 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》、铁道部《牵引变电所运行检修规程》、《接触网运行检修规程》等。高压电气设备的型式试验、出厂试验和交接试验的电压及波形,是设计其绝缘结构的主要依据之一;运行中的预防性实验是监督高压电气设备的绝缘状况,确定被试设备是否可以继续投入运行,或者需要维修的重要依据。

本书的目的在于使读者学习掌握牵引供电系统中高压电气设备的各种电气特性、破坏机理、牵引供电设备的绝缘结构、绝缘试验设备及测试仪表的原理、绝缘故障诊断和在线监测技术,学会维护和提高电气设备绝缘抗电强度的方法、绝缘试验的方法、检测和判断高压电气设备绝缘状态的基本方法和原则。

第一章

气体的绝缘特性与介质的电气强度

绝大多数电气设备都在不同程度上以不同的形式利用气体介质作为绝缘材料。大自然提供了一种相当理想的气体介质——空气。架空输电线路各相导线之间、导线与地线之间、导线与杆塔之间的绝缘都利用了空气,高压电气设备的外绝缘也利用了空气。

在空气断路器中,压缩空气被用作绝缘媒质和灭弧媒质。在某些类型的高压电缆(充气电缆)和高压电容器中,特别是在气体绝缘组合电器(GIS)中,更采用压缩的高电气强度气体(例如 SF₆)作为绝缘。

在一定条件下,气体中也会出现放电现象,甚至完全丧失其作为电介质而具有的绝缘特性。在本章中,研究气体放电的主要目的:①了解气体在高电压(强电场)的作用下逐步由电介质演变成导体的物理过程;②掌握气体介质的电气强度及其提高方法。

第一节 气体放电的基本知识

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,气体放电现象主要存在以下几种形式。

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间隙,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,在运行中这种电晕放电时有发生。

3. 火花或电弧放电

在气体间隙的两级,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、带电介质的产生与消失

气体放电是对气体中流通电流各种形式的统称。正常状态下,没有受到外电离因素影响的中性气体分子是不导电的。由于空气中会存在一些来自于空间的辐射(如宇宙射线或者大地中一些放射性物质的辐射),气体会发生微弱的电离而产生少量的带电质点,一般大气中每 cm^3 会存在 500~1 000 对正、负带电质点。这个带电质点数量相对于大气分子密度而言非常少,因而正常状态下气体的电导很小,所以空气还是性能优良的绝缘体。只有在出现大量带电质点的情况下,气体才会丧失绝缘性能。因此在论述气体放电过程之前,首先要了解气体中带电质点是如何产生与消失的。

气体发生放电时,除了不断形成带电质点的电离过程外,还存在相反的过程,即带电质点的消失过程。在电场作用下,气体放电是不断发展以致击穿,还是气体尚能保持其电气强度而起绝缘作用,主要取决于上述两种过程的发展情况。气体放电过程中,带电质点除在电场作用下定向运动,消失于电极上而形成外回路的电流外,还可能因扩散和复合使带电质点在放电空间消失。

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。

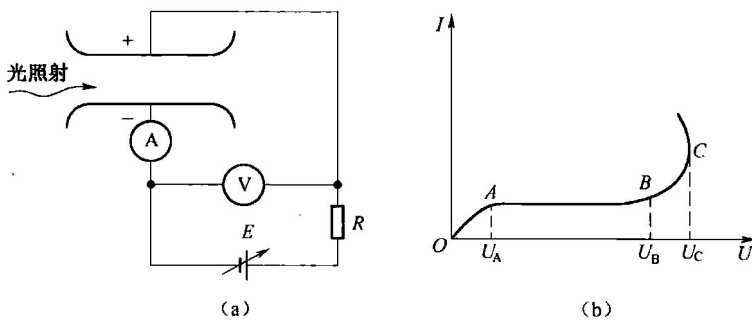


图 1-1 气体放电实验及其伏安特性

(a) 实验电路图 (b) 气体的伏安特性

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好的绝缘性能,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、流注理论和巴申定律

1. 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。

因此汤逊理论的实质是: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。

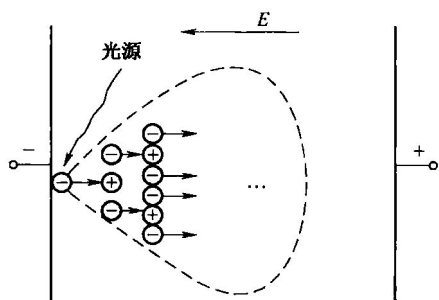


图 1-2 电子崩形成示意图

2. 流注理论

流注理论描述了高气压或长间隙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,在电场作用下快速地向阳极移动,而正离子质量大、相对运动速度慢,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1-3(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。

当外电场相对较弱[见图1-1(b)中 $U < U_c$ 时],以上过程不是很强烈,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。

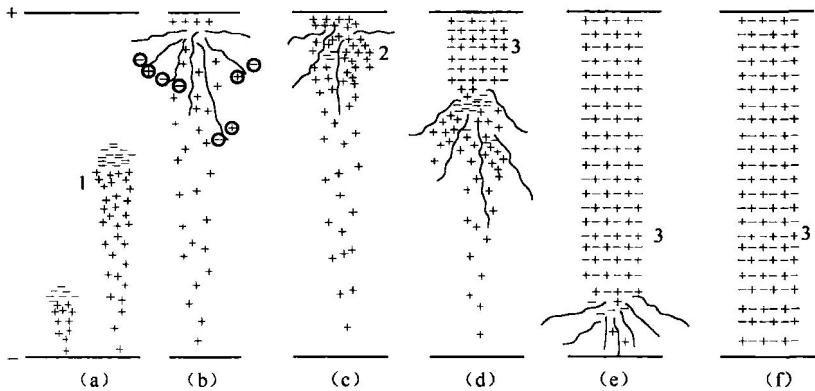


图 1-3 流注的产生及发展

1—主电子崩;2—二次电子崩;3—流注

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 1-3(b)所示。光游离新产生的电子又产生激烈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 1-3(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 1-3(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 1-3(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 1-3(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。

3. 巴申定律

早在汤逊理论出现之前,巴申(Paschen)就于 1889 年从大量的实验中总结出了击穿电压 U_b 与气体密度 p 、极间距离 d 的乘积 pd 的关系曲线,称为巴申定律,即

$$U_b = f(pd) \quad (1-1)$$

图 1-4 给出了空气间隙的 U_b 与 pd 的关系曲线。从图中可见, U_b 是 pd 的函数;并且 U_b 不是 pd 的单调函数,而是 U 形曲线,有极小值。

对于不同气体,其巴申曲线上的最低击穿电压 $U_{b,min}$,以及使 $U_b = U_{b,min}$ 的 pd 值、 $(pd)_{min}$ 值各不相同。对于空气, U_b 的极小值为 $U_{b,min} \approx 325 \text{ V}$ 。此极小值出现在 $pd \approx$

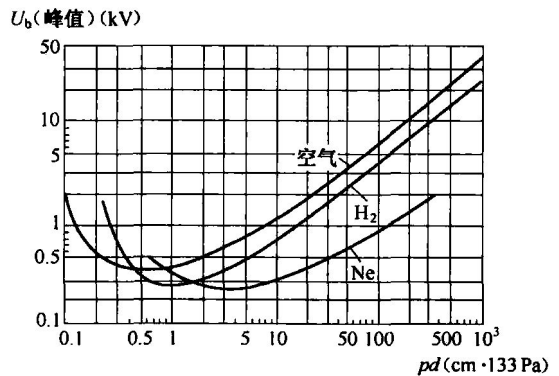


图 1-4 实验求得的均匀场不同气体间隙的 $U_b = f(pd)$ 曲线

75 $\text{cm} \cdot \text{Pa}$ 时,即 U_b 的极小值不是出现在常压下,而是出现在低气压,即空气相对密度很小的



情况下。

三、不均匀电场中的气体放电

电气设备中很少有均匀电场的情况。但对高压电气绝缘结构中的不均匀电场还要区分两种不同的情况,即稍不均匀电场和极不均匀电场,因为这两种不均匀电场中的放电特点是不同的。全封闭组合电器(GIS)的母线筒和高压实验室中测量电压用的球间隙是典型的稍不均匀电场;高压输电线之间的空气绝缘和实验室中高压发生器的输出端对墙的空气绝缘则属于极不均匀电场。

1. 稍不均匀场和极不均匀场的特点

稍不均匀电场中放电的特点与均匀电场中相似,在间隙击穿前看不出放电的迹象。极不均匀电场中的放电则不同,间隙击穿前在高场强区(曲率半径较小的电极表面附近)会出现蓝紫色的晕光,称为电晕放电。刚出现电晕时的电压称为电晕起始电压,随着外施电压的升高电晕层逐渐扩大,此时间隙中放电电流也会从微安级增大到毫安级,但从工程观点看间隙仍保持其绝缘性能。另外,任何电极形状随着极间距离的增大都会从稍不均匀电场变为极不均匀电场。

通常用电场的不均匀系数 f 来判断稍不均匀电场和极不均匀电场。有些会采用电场利用系数 η 来判断,电场利用系数 η 就是电场不均匀系数 f 的倒数。电场不均匀系数 f 的定义为间隙中最大场强 E_{\max} 与平均场强 E_{av} 的比值。

$$f = E_{\max} / E_{\text{av}} \quad (1-2)$$

$$E_{\text{av}} = U/d \quad (1-3)$$

式中 U ——间隙上施加的电压;

d ——电极间最短的绝缘距离。

而通常用电场不均匀系数可将电场不均匀程度划分为:均匀电场 $f=1$;稍不均匀电场 $f < 2$;极不均匀电场 $f > 4$ 。

在稍不均匀电场中放电达到自持条件时发生击穿,但因为 $f > 1$,此时间隙中平均场强比均匀场间隙要小,因此在同样间隙距离时稍不均匀场间隙的击穿电压比均匀场间隙要低。而在极不均匀场间隙中自持放电条件即是电晕放电的起始条件。

2. 极不均匀电场的电晕放电

(1) 电晕放电

在极不均匀场中,当电压升高到一定程度后,在空气间隙完全击穿之前,小曲率电极(高场强电极)附近会有薄薄的发光层,有点像“月晕”,在黑暗中看得较为真切。因此,这种放电现象称为电晕。

电晕放电现象是由电离区放电造成的,电离区中的复合过程以及从激励态恢复到正常态等过程都可能产生大量的光辐射。因为在极不均匀场中,只有小曲率电极附近很小的区域内场强足够高,电离系数 α 达到相当高的数值,而其余绝大部分电极空间场强太低, α 值太小,得不到发展。因此,电晕层也就仅限于高场强电极附近的薄层内。

电晕放电是极不均匀电场所特有的一种自持放电形式。开始出现电晕时的电压称为电晕起始电压 U_c ,而此时电极表面的场强称为电晕起始场强 E_c 。

根据电晕层放电的特点,可分为两种形式:电子崩形式和流注形式。当起晕电极的曲率很



大时,电晕层很薄,且比较均匀,放电电流比较稳定,自持放电采取汤逊放电的形式,即出现电子崩式的电晕。随着电压升高,电晕层不断扩大,个别电子崩形成流注,出现放电的脉冲现象,开始转入流注形式的电晕放电。若电极曲率半径加大,则电晕一开始就很强烈,一出现就形成流注的形式。电压进一步升高,个别流注快速发展,出现刷状放电,放电脉冲更强烈,最后贯通间隙,导致间隙完全击穿。冲击电压下,电压上升极快,因此电晕从一开始就具有流注的形式。爆发电晕时能听到声、看到光、嗅到臭氧味,并能测到电流。

(2) 电晕放电的起始场强

电晕属极不均匀场的自持放电,原理上可由 $\gamma \exp\left(\int \alpha dx\right) = 1$ 来计算起始电压 U_c ,但计算十分复杂且结果并不准确,所以实际上 U_c 是由实验总结出的经验公式来计算。电晕的产生主要取决于电极表面的场强,所以研究电晕起始场强 E_c 和各种因素间的关系更直接。

对于输电线路的导线,在标准大气压下其电晕起始场强 E_c 的经验表达式为(此处 E_c 指导线的表面场强,交流电压下用峰值表示):

$$E_c = 30 \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) \text{ (kV/cm)} \quad (1-4)$$

式中 r ——导线半径,cm。

式(1-4)说明导线半径 r 越小, E_c 值越大。因为 r 越小,电场就越不均匀,也就是间隙中场强随着其离导线的距离的增加而下降,碰撞电离系数 α 随离导线距离的增加而减小。所以输电线路起始电晕条件为:

$$\int_0^{x_c} \alpha dx = K \quad (1-5)$$

式中 x_c ——起始电晕层的厚度, $x > x_c$ 时 $\alpha \approx 0$ 。

可见电场越不均匀,要满足式(1-5)时导线表面场强应越高。式(1-4)表明,当 $r \rightarrow \infty$ 时, $E_c = 30 \text{ kV/cm}$ 。

而对于非标准大气条件,则进行气体密度修正以后的表达式为

$$E_c = 30\delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{ (kV/cm)} \quad (1-6)$$

式中 δ ——气体相对密度。

实际上导线表面并不光滑,所以对绞线来说要考虑导线的表面粗糙系数 m_1 。此外对于雨雪等使导线表面偏离理想状态的因素(雨水的水滴使导线表面形成突起的导电物)可用系数 m_2 加以考虑。

此时,式(1-6)写为

$$E_c = 30m_1m_2\delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{ (kV/cm)} \quad (1-7)$$

理想光滑导线 $m_1 = 1$,绞线 $m_1 = 0.8 \sim 0.9$,好天气时 m_2 可按 0.8 估算。算得 E_c 后就不难根据电极布置求得电晕起始电压 U_c 。例如,对于离地面高度为 h 的单根导线可写出

$$U_c = E_c r \ln \frac{2h}{r} \quad (1-8)$$

对于距离为 d 的两根平行导线($d \gg r$),则可写出

$$U_c = 2E_c r \ln \frac{d}{r} \quad (1-9)$$