

OHM

大学参考教材系列

高电压技术

〔日〕中野义映 编
张乔根 译



科学出版社
www.sciencep.com

OHM 大学参考教材系列

高电压技术

〔日〕中野义映 编
张乔根 译

科学出版社
北 京

图字:01-2003-4416 号

Original Japanese language edition

Daigaku Katei Koudenatsu Kougaku (Kaitei 2 Han)

Edited by Yoshiei Nakano

Written by Yoshiei Nakano, Ryouzou Ishibashi, Tatsuya Harada, Hiroshi Kitamura,
Izumi Hayashi and Masamori Saeki

Copyright © 1991 by Yoshiei Nakano

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

大学課程

高電圧工学 (改訂2版)

中野 義映 オーム社 2000

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/(日)中野义映编;张乔根译. —北京:科学出版社,2004

(OHM 大学参考教材系列)

ISBN 7-03-012332-8

I. 高… II. ①中… ②张… III. 高电压-技术-高等学校-教材 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 095429 号

责任编辑 杨 凯 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

涿海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004年1月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2004年1月第一次印刷 印张:7 1/2

印数:1—4 000

字数:190 000

定 价:19.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

随着固体电子学、集成电路、超导、激光、精密电子测量等技术的不断发展,可以预见,最近,信息工程和宇宙科学也将得到飞速发展。由于这些技术的发展以及电子计算机的应用,又进一步促进了各领域的发展和相互融合,从而使信息工程这样一个新的工程学科应运而生。广义上讲,这些学科也属于电气工程的一个分支,可以说,电气工程最近正不断地快速拓宽其研究领域。

首先,开发与研究是电气工程学科发展的直接基础。当然,应用数学、物理学方面的学术研究也是电气工程发展的基础。但是,另一方面,工程技术的研究,简单地讲,改良研究、实用化研究也是不可忽略的主要因素。

为了促进这些研究的发展,本书重点介绍与高电压电气工程相关的理论和技术基础。本书 1968 年第一次出版发行,至今已 30 余年。在此期间,高电压技术也突飞猛进。本次修订发行,全面总结了各方面内容,同时新增加了一些内容,以便于读者学习。

本书第 1 章主要介绍放电的基础理论,同时为了便于磁流体(MHD)发电、等离子喷射、核融合等离子体领域的工作人员参考,又增加了等离子体热电离、电子温度、电子密度和电子发射等。在第 2 章的气体介质的绝缘击穿中,针对冲击电压下过渡放电现象和空气的绝缘击穿机理,介绍了作者(原田)自己的研究工作进展。第 3 章阐述液体和固体介质

的绝缘击穿,在这方面与其说是理论发展慢,不如说是理论化非常困难,在实际应用方面,液体和固体比气体介质更为重要。因此,在复合介质的绝缘击穿方面,作者(石桥)介绍了自己的研究结果。第4章介绍了高电压的产生,第5章介绍了高电压的测量与试验,最后,增加了高电压技术应用作为第6章。

由于作者的水平有限,书中内容可能会有不少错误或不当之处,恳请大家批评指正。衷心感谢在本书修订过程中欧姆社相关人员的大力支持。

编 者

目 录

绪 论	1
0.1 高电压工程的相关领域和主要问题	1
0.2 高电压设备及其他	3
第 1 章 放电基础	4
1.1 激励与电离	4
1.1.1 激励电压	5
1.1.2 电离电压	6
1.2 气体分子的热运动	7
1.2.1 状态方程	7
1.2.2 粒子相互碰撞	8
1.2.3 热运动粒子的速率分布	10
1.3 电离与复合过程	14
1.4 气体电导	20
1.5 火花放电	21
1.5.1 汤逊实验	21
1.5.2 电子碰撞电离作用(α 作用)	22
1.5.3 离子的二次电子释放作用(γ 作用)	24
1.5.4 气体的绝缘破坏	26
1.5.5 巴申定律	26
1.5.6 流注理论	28
1.6 电晕放电(局部破坏放电)	29
1.7 辉光放电	32

1.7.1	辉光放电的形式	32
1.7.2	辉光放电的形成机理	34
1.7.3	特殊辉光放电	35
1.8	电弧放电	36
1.8.1	阴极降落区	36
1.8.2	正光柱	37
1.8.3	电压-电流特性	38
1.8.4	电弧的动态特性	39
1.9	放电等离子体	40
1.9.1	放电等离子体概述	40
1.9.2	等离子体分类和术语	41
1.9.3	热平衡等离子体的电离度的萨哈公式	44
1.9.4	探针法	48
1.10	电子发射	49
1.10.1	热电子发射	49
1.10.2	F-N型电子发射(冷电子发射)	51
练习题		54
参考文献		55

第2章 气体介质的绝缘击穿 56

2.1	真空放电	56
2.2	高气压放电	59
2.3	高频放电	61
2.3.1	均匀电场中的高频火花电压	61
2.3.2	不均匀电场中高频局部破坏	64
2.3.3	无电极放电	65
2.4	各种电极配置和放电特性	65
2.4.1	平行平板间隙	65
2.4.2	球间隙	67

2.4.3	同轴圆筒间隙	70
2.4.4	平行圆筒间隙	72
2.4.5	针尖间隙	73
2.4.6	特殊电极	78
2.5	冲击电压击穿特性	80
2.6	冲击电压下过渡放电现象	86
2.7	绝缘气体	89
2.7.1	SF ₆ 气体	91
2.7.2	混合气体	92
2.8	雷电现象	92
2.8.1	雷云的形成	93
2.8.2	雷云的构造与电荷的产生	93
2.8.3	雷云放电的机理	94
2.8.4	雷电屏蔽与防护	97
	练习题	100
	参考文献	101

第3章 液体、固体介质的绝缘击穿 102

3.1	液体介质的电导与绝缘击穿	102
3.1.1	均匀电场中的电气传导	102
3.1.2	不均匀电场中电压-电流特性(针-平板电极系统)	103
3.2	绝缘油的耐压特性	110
3.2.1	矿物油	110
3.2.2	不可燃绝缘油	112
3.2.3	纯有机液体的冲击击穿电压	113
3.3	固体介质的电导与绝缘击穿	114
3.3.1	固体电导	114
3.3.2	热击穿	114

3.3.3	电击穿	115
3.4	固体介质的耐压特性	116
3.4.1	电极形状及边缘效应	116
3.4.2	绝缘物厚度的影响	117
3.4.3	电压施加条件与击穿电压	118
3.5	复合介质的绝缘击穿	120
3.5.1	双层介质中各层电压分布	120
3.5.2	不均匀电场中双层介质的击穿电压特性	121
3.6	沿面放电	122
3.7	绝缘物表面污损与盐碱害	123
3.7.1	台风、季风引起的盐害	125
3.7.2	盐碱污秽	125
3.7.3	有机硅涂覆	127
	练习题	129
	参考文献	129

第4章 高电压的产生 130

4.1	交流高压的产生	130
4.1.1	试验变压器	131
4.1.2	串联谐振产生交流高压	133
4.1.3	低频高压的产生	134
4.1.4	高频高压的产生	135
4.2	直流高压的产生	136
4.2.1	整流电路的方法	137
4.2.2	多级切换式直流升压法	139
4.2.3	静电发生器	140
4.2.4	可控硅控制直流高压发生器	141
4.3	冲击电压的产生	142
4.3.1	发生电路的工作原理	143

4.3.2	电路参数和波形的形成	144
4.3.3	多级冲击电压发生器	145
4.3.4	各种冲击电压的产生	148
4.4	冲击电流的产生	151
	练习题	153
	参考文献	154
第 5 章	高电压的测量与试验	155
5.1	高电压的测量	155
5.1.1	交流高电压的测量	155
5.1.2	直流高压的测量	160
5.1.3	高频电压的测量	163
5.1.4	冲击电压的测量	164
5.1.5	冲击电流的测量	172
5.1.6	光应用测量技术	175
5.2	高电压试验	178
5.2.1	绝缘特性试验	178
5.2.2	绝缘强度试验	185
	练习题	193
	参考文献	194
第 6 章	高电压技术的应用	195
6.1	带电粒子束的应用	195
6.2	静电应用	198
6.3	放电等离子体的应用	202
6.3.1	大功率脉冲的产生与控制	202
6.3.2	等离子体处理	203
6.3.3	半导体器件加工	204
6.3.4	光源	205

6.3.5 可控热核融合反应的研究	206
练习题	207
参考文献	208
附 录	209
1 物理常数	209
2 MKS 单位与 cgs 单位的比较	210
3 元素周期表和原子核外电子的配置表(1953 年)	211
4 长周期型周期表与原子核外电子的配置表	212
5 统计权重 g	213
6 不确定度	213
7 放电电压	214
8 标准球间隙的放电电压(峰值, kV)	215
9 式(5.21)和式(5.22)的求解方法	217
10 升降法	219
11 淋雨试验	222
参考文献	223
练习题简答	224

绪 论

高电压工程的主要目的就是产生高电压,并确保高电压的绝缘,若反过来看,后者就是如何防止绝缘物中的放电。很久以前,人们就开始对放电现象进行了大量研究,但由于放电现象非常复杂,而且是在很短时间内进行着急剧变化的过程,所以除了一些特殊情况外,至今气体放电仍存在许多不明确的地方。但是,随着科学技术的发展,最近对气体放电现象有了进一步认识。液体、固体以及两相的击穿现象也逐渐被人们认识,因此,电气绝缘材料的开发和绝缘技术也得到了很大发展。

0.1 | 高电压工程的相关领域和主要问题

在电气工程领域中,高电压技术的一个非常必要的因素就是输配电,亦即电力系统部门。随着文明的进步,全世界电力消费急速上升,日本国内外对大容量、远距离安全输电的要求也越来越高。面对保证经济性的前提下满足这些输电的要求,高电压工程技术就显得尤为重要。也就是说,大容量输电时,增加输电电压等级,可以减小输电线的截面积,降低建设费用,即使因此而使绝缘等级增加,建设费用也增加得较少。另外,如果再综合考虑运行过程中的电力损耗以及维修费用、稳定运行条件等,则可有效地降低总体电力的基本费用。

(1) 超高压 鉴于上述观点,国外已经建成 1150kV 等级的输电系统,日本则以 500kV 输电系统的运行经验为基础,正在建设 UHV

输电系统(1000kV)。因此,本书针对超高压输电系统的建设以及运行中可能出现的问题进行讨论。

首先,对于建设中所采用的变压器、断路器、避雷器、电流互感器、电抗器等与电力系统串接的设备的制造,在大容量、高电压等级下,为了确保其比过去具有更高的可靠性,就必须进行一些特殊的试验研究。特别地,降低整个系统的绝缘等级(BIL: Basic Impulse Insulation Level,基本冲击绝缘强度),可明显降低建设费用,因此,研究操作波(内雷)的形成原因,以及操作波的限制措施和操作波作用下的闪络特性,具有重要意义。随着以高性能无间隙 ZnO_2 为主体的避雷器的使用,超高压系统已经可以吸收操作波,并确保安全运行。对于自然雷(外雷)的侵入,在超高压系统中并不是主要问题,这也可以说是超高压输电的一个优点。另外,在沿海附近的输电系统中,如何解决线路和变电所的绝缘子表面因附着盐分而导致的绝缘性能的下降,也是一个非常重要的问题。防止导体表面出现电晕,以及随之产生的无线电干扰,也必须依赖超高压技术。

(2) 直流输电 这是近年来电力行业的主要课题。其理由是:远距离超大容量输电时,直流输电比交流输电更具优越性;互联时,与系统的特性无关,可以实现不同步系统间的互联;可有效地提高输电稳定性和防止短路容量的增加;输电线路的建设费用低,输电损耗小等。除此之外,在采用电缆的情况下,不会出现交流充电损耗的问题,可以充分设计电缆介质的绝缘强度,降低电缆的造价。利用这些优点,可在城市配电系统的用地方面确保其经济的地位。但是,直流输电仍存在直流断路器的技术问题,与此相关,要建成包含多端输电网或分支路等的输电网,也存在许多问题。而且,高电压变换器生产成本的降低也是今后的一个问题。直流输电目前典型的应用有:

- ① 向孤岛输电。如英吉利海峡、苏格兰、撒丁岛、新西兰等。
- ② 长距离大容量输电。如前苏联、美国、加拿大等。
- ③ 频率变换。如日本的佐久间、新信浓(没有输电线路)等。

0.2 | 高电压设备及其他

除了前面所述的大电力系统外,高电压工程在其他一些领域也是必不可少的,例如通信部门、原子核应用工程等物理化学设备、工业生产部门等。特别是随着电力部门使用电压等级的增加,以及新材料的开发,与此相关的高电压设备的绝缘技术也在飞速发展。而且,为了确保设备绝缘的可靠性,绝缘试验具有极其重要的意义,所以最近也在进行试验方法的开拓和改良。

另一方面,由于各种高电压设备的工作电压不断上升,固体、液体、气体绝缘材料的突出进展,以及因用地费用高而必须缩减设备尺寸等,为了保证其经济性,设备的绝缘结构也发生了很大的变化。采用性能优越的绝缘材料是设备构成的第一必要条件,而且长期保持其实用性能的稳定也极其重要。一般地,绝缘材料劣化与温度紧密相关,设备额定电压主要由绝缘物的性能以及这种性能下温度上升的极限所决定。绝缘物的劣化大多是由于长期处于较高温度,材质变化不断积累而造成的。特别是对于固体绝缘物,材料的劣化将导致机械强度降低,而且所加热量变化时,内部应力也不断反复变化。同时由于负荷电流的急速变化而形成的冲击电磁力的作用,在绝缘物中会造成裂痕,或使绝缘物的结构发生紊乱,从而导致电晕放电或火花放电。

绝缘结构存在气泡放电或旋转电机中有裂纹放电时,由于电晕放电,材料劣化或绝缘性能的保持方面存在严重问题。因此,将这种劣化原因降到最低限度的绝缘构成方法是高电压设备绝缘的改进目标。本书介绍了高电压工程应用领域的一些基础理论问题,从中可以学到高电压工程的一些理论和技术。最后简单介绍了最近一些新的应用。

第 1 章 放电基础

很久以前,人们就开始对放电现象进行了大量研究,但由于放电现象非常复杂,而且是在很短时间内急剧变化的一个过程,所以很难彻底掌握放电现象。但是,自 20 世纪初英国物理学家汤逊(J. S. Townsend)提出**电子崩理论**,并用于解释放电现象以来,气体的绝缘击穿理论得到了飞跃的发展。气体绝缘击穿现象的表现尽管多种多样,但它们都是由电子崩所构成的,而且随着科学技术的进步,气体放电现象也得到了进一步的阐释。对于液体和固体的击穿现象,也逐渐被人们认识,因此,以高电压技术为基础的电气绝缘材料的开发和绝缘方法的改进也逐渐得到了进一步发展。

1.1 激励与电离

原子的激励和电离与放电现象密切相关。根据著名的玻尔(Niels Bohr)模型,原子由 1 个原子核和 1 个以上核外电子组成。根据能级的不同,核外电子各自在一定的轨道上运行。当电子从外界吸收一定的能量后,电子的正常状态遭到破坏,电子会跃迁到更高能级的轨道,这个现象称为原子的**激励(excitation)**。图 1.1 所示为氢原子的结构和激励,而氢原子的能级如图 1.2 所示。与原子结构相关的能量单位,常用电子所处位置的能量——**电子伏(eV: electron Volt)**作单位。

电子伏相当于 1 个电子经 1V 电位差加速后所获得的能量,即 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ 。运行轨道半径越大,核外电子的能级也就越高。图 1.2 中 E_1, E_2, E_3 分别表示位于图 1.1 中轨道 r_1, r_2, r_3 上电子的能量。 E_1 表示氢原子核外电子的基态。

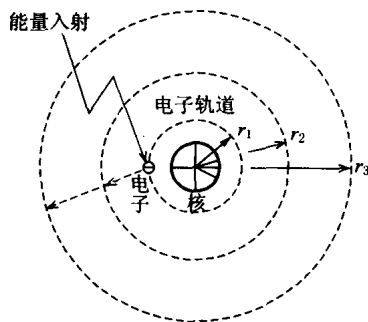
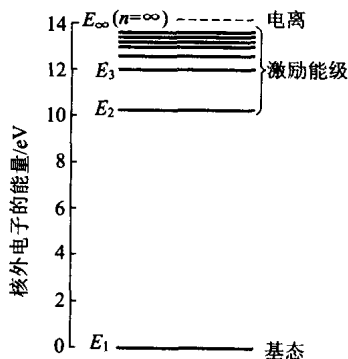


图 1.1 氢原子的结构与激励



1.2 氢原子的核外电子的能级

1.1.1 激励电压

激励所必需的能量(eV)称为激励电压。原子处于激励状态的时间非常短(平均寿命一般为 10^{-8}s),会迅速地由激励态恢复到原来状态。原子由激励态恢复到原来状态时,会对外释放频率为 ν 的放射线(光子),光子的频率可根据激励电压,由 $\Delta W = h\nu(\text{J})$ 决定。式中,普朗克(Plank)常数 $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$ 。

水银和一些惰性气体(Ne, Ar, He)的激励状态的寿命特别长,可达 10^{-3}s ,这样的状态称为亚稳态(metastable state)。处于亚稳态的原子再次吸收能量后会发生电离(累积电离),或者与其他原子、分子、器壁碰撞,并释放出能量 ΔW ,然后恢复到无激励状态。将少许具有亚稳态的气体添加到其他一些气体中,可以显著降低放电电压,这一现象称为潘宁(Penning)效应。例如荧光灯、水银灯中,除水银外还充入了少许氩(Ar)气。

一些气体分子由亚稳态恢复到正常状态时,由于释放出的光子能量与气体分子的固有能级发生共振,光子会被其他分子强烈吸收,这样的激励态称为共振电压(resonance potential),或称为共鸣电压。

1.1.2 电离电压

当核外电子的激励能量超过图 1.2 所示的 E_{∞} 时,会脱离原子核的束缚而形成自由电子,这一现象称为电离(ionization),而电离所必需的能量称为电离电压(ionization potential),单位用电子伏来表示。

原子失去核外电子变成正离子(阳离子)。表 1.1 列出了各种原子的共振电压和电离电压,表中列出的第 2 电离电压和第 3 电离电压,表示已电离的原子继续失去电子时的电离电压。

表 1.1 气体的激励电压和电离电压

气 体	原子 序数	共振 电压	亚稳态激 励电压/eV	第 1 电离 电压/eV	第 2 电离 电压/eV	第 3 电离 电压/eV
稀有气体	He	2	19.8	19.8	24.58	54.40
	Ne	10	16.6	16.62	21.56	41.07
	Ar	18	11.61	11.55	15.76	27.6
	Kr	36	10.02	9.91	13.996	24.56
	Xe	54	8.4	8.32	12.127	21.2
一般气体	H	1	10.2		13.6	
	H ₂		7.0		15.6	
	N	7	10.3	2.38	14.54	29.6
	N ₂		6.3	6.2	15.5	47.43
	O	8	9.15	1.97	13.61	35.15
	O ₂		1.635	1.0	12.2	54.93
	CO		6.0		14.1	
	CO ₂		10.0		13.7	
金属蒸气	Li	3	1.85		5.390	75.62
	Na	11	2.11		5.138	47.29
	K	19	1.61		4.339	31.81
	Cu	29	1.4		7.7	
	Cs	55	1.39		3.893	25.1
	Hg	80	4.886	4.667	10.434	18.751