

IU 21世纪大学新型参考教材系列

高电压与绝缘技术

〔日〕 小崎正光 编著

Inter
University

The background features a complex arrangement of overlapping geometric shapes in shades of purple and blue. A globe is positioned in the lower-left corner, and a green cone is located in the lower-right area. The overall design is modern and technical.

科学出版社

OHM社

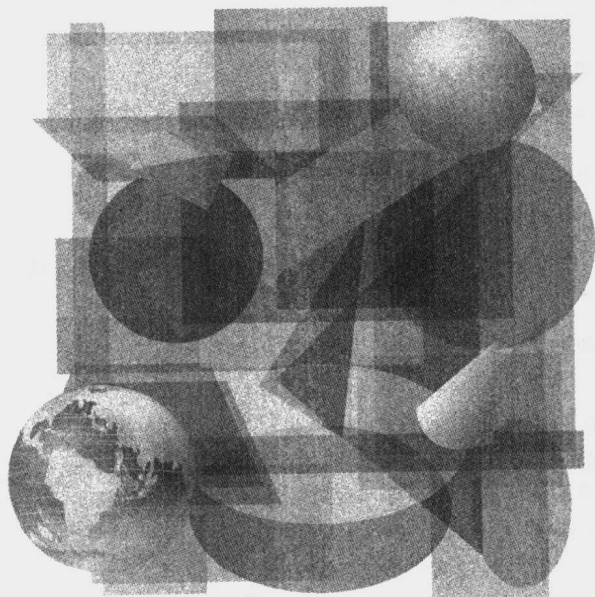
21 世纪大学新型参考教材系列

高电压与绝缘技术

〔日〕小崎正光 编著

李福寿 金之俭 译

马乃祥 周佩白 校



科学出版社 OHM社

2001. 北京

图字:01-2000-3672号

Original Japanese edition

Interuniversity System to Seigyo

by Shigeyuki Hosoe et al.

Copyright © 1997 by Shigeyuki Hosoe

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ

高電圧・絶縁工学

小崎正光 オーム社 1997

图书在版编目(CIP)数据

高电压与绝缘技术/[日]小崎正光编著;李福寿、金之俭译. -北京:科学出版社,
2001

(21世纪大学新型参考教材系列)

ISBN 7-03-009391-7

I. 高… II. ①小… ②李…③金… III. 高电压绝缘技术-高等学校-教材
IV. TM85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 032672 号

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 7 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2001 年 7 月第一次印刷 印张: 4 1/2

印数: 1—5 000 字数: 133 000

定 价: 12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机器
电力电子学

电气能源

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

信息通信

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

测量·控制

系统与控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制



为了适应21世纪的要求

面向21世纪，日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整，现有的教材已不能适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求，经过不断深入考察和讨论，按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员：家田正之（爱知工业大学）
编 委：稻垣康善（名古屋大学）
白井支朗（丰桥技术科学大学）
梅野正义（名古屋工业大学）
大熊 繁（名古屋大学）
绳田正人（名城大学）

NAF 63/H6 14

前 言

在古代,我们的祖先就看到了雷电和桅顶(塔尖等)电光这些引人注目的高电压现象了,但知道这是电的现象还是在富兰克林实验(18世纪50年代前半期)以后。由于先人的努力,人类从知道电到自如地掌握使用电气的方法,只经过250年左右。现在电如空气和水一样存在于我们身边。空气和水是大自然的赏赐,但电是人类聪明睿智汇聚起来而发展的结果。这个道理人们能很好理解。因此,对电气、电子技术有强烈好奇心的青年,学习这些技术后,一定想在相关的技术领域尝试去实现某个梦想。

在将电气作为能量使用时,要求这种最高品质的能量从产生、输送到消费的整个过程,都具有高度稳定性和可靠性,这只要想象一下停电事故(blackout)的后果就明白了。因此,在保证电气稳定性和可靠性的多种科学技术中,高电压、绝缘技术就是重要和必需的了。在确定采用特高压(ultra high voltage, UHV)的1000kV级送电技术时,需要反复用人工雷试验装置进行雷电冲击试验来弄清耐压情况。在这样高的电压下的绝缘材料的开发和绝缘结构的设计也都是维持电力运行的基础技术。看起来不那么吸引人的“防护”技术,是维持电力稳定供给和进一步支撑高度信息化社会的基础,这也是向新方向“进攻”的技术。

高电压技术不仅和电力技术结合得很紧密,它还有许多其他应用领域,而绝缘技术必然是活跃的电气领域的基础,支持着电力技术的发展。因此,希望不仅是电力、电子学科的学生,学其他学科的也应对高电压与绝缘技术有兴趣。

带着上述意图,笔者为大学生编写了这本将高电压和绝缘技术融合在一起的简明易懂的教科书。本书包括以下内容:

第1章中明确说明高电压与绝缘技术在电气、电子技术中的位置,论述其重要性以及学习方法。

第2章讲述关于成为高电压与绝缘技术基础的电场的概念及其计算方法,另外还要理解伴随高电压产生的感应现象等影响。

第3章解释物质三态(气体、液体、固体)及其组合状态在高电压下表现的性能。

第4章先说明高电压在内的所有电压等级在绝缘设计时要考虑的方面,然后阐明绝缘品质的变化过程及其检测方法和对策。

第5章对各种高电压电气设备的绝缘设计进行说明,还介绍高电压应用方面的有关内容。

第6章学习高电压发生装置工作原理及高电压测量技术。

还应指出,因篇幅有限,很多地方没有充分说明,根据需要,请参考各章所附的参考文献。

最后借本书出版的机会,向编辑委员会主任家田正之先生和编委绳田正人先生以及各位执笔者深表谢意!

小崎正光

目 录

1 高电压和绝缘技术的学习方法	1
1.1 当今电工技术	2
1.2 高电压与绝缘技术	5
2 电气绝缘技术的基础	7
2.1 计算电场和电位的基本公式	8
2.2 解析算法一例——保角变换法	8
2.3 测绘场图的实验方法	10
2.4 电场的数值算法	10
2.5 典型电场的计算公式	13
2.6 高电压对环境的影响	14
练习 题	18
3 高电压下绝缘体的性能	19
3.1 不导电体的两个学名	20
3.2 电极间有电介质时多储存电荷的机理	21
3.3 气体耐高电压的性能	24
3.4 液体的耐高电压性能	30
3.5 固体耐高电压的性能	33
3.6 复合绝缘在高电压下的性能	47
练习 题	52
4 绝缘评估及其试验方法	53
4.1 关于绝缘评估	54
4.2 绝缘劣化	55

4.3	绝缘评估的试验方法	58
4.4	劣化现象的信号变送技术(传感器技术)	64
4.5	信号处理技术	69
4.6	计算机控制(在线技术)	72
	练习题	75
5	高电压设备的绝缘与绝缘配合	
5.1	电力系统的过电压	78
5.2	绝缘子、套管	78
5.3	高电压设备的绝缘	81
5.4	保护电器	86
5.5	气体绝缘变电所	92
5.6	绝缘设计和绝缘配合	92
5.7	直流输电系统的绝缘配合	98
5.8	电力领域之外的高电压应用	99
	练习题	103
6	高电压产生设备与测量技术	
6.1	冲击电压发生器	106
6.2	试验变压器的组成	110
6.3	直流高电压的产生	112
6.4	冲击电流发生器	115
6.5	高电压测量	116
	练习题	125
	练习题解答	127

1

高电压和绝缘技术的 学习方法

本章概略观察一下我们所处的社会和一切活动与电的关系以及电气技术发展的趋势。本书把与电(强电、弱电)有关的知识和技术体系称为电气-电子工程学,本章先说明这门学科各个领域所处的位置。然后再认识即将开始学的“高电压和绝缘技术”在电气-电子工程学中的地位,理解它们在我们的社会生活中的作用和如何被应用的学问和技术。

1.1 当今电工技术

想一下生活中由电工技术完成的工作,其多样性和完美程度令人惊叹。例子实在太多,现仅举例看一下一般家庭中用的一些“电气化”设备,从支撑日常生活的厨房、卫生用电器(冰箱、洗衣机、吸尘器等)、创造舒适生活环境的空调和照明器具,到智能信息设备(电话、电视、音响和个人计算机等),所有这些都是靠“电气”工作的。走出家庭,看看构成社会各方面基础的工厂、商店、医院、学校、交通等部门,就会很清楚到处都利用电工技术。想象一下断电带来的不便,就可以理解,电对人类社会的重要性真是与空气和水相似。

人类真正利用电开始于19世纪,到现在还不满200年。当然,这之前还有以琥珀带电为代表的静电和作为自然现象的雷电,但都是不能控制的状态。伏打电池产生电流(1800年)后,奥斯特发现电流产生磁场(1820年)。知道电和磁的关系后不久,有了法拉第电磁感应定律(1831年),这就导致发电机的问世,由当时十分发达的蒸汽机将热能变换为机械能,再将后者变换为连续的电能。人类开始自如地产生电力,并掌握利用电的技术。这以后人类的聪明才智在新的电的应用上得到了充分发挥。

19世纪期间有了将电力作为动力源的电动机、照明和通信,其间也确立了以电磁学和电路为代表的知识体系。进入20世纪后,发现了电子管有将电信号放大的作用,这样就诞生了电子技术。收音机、电视机、雷达等一个个地被研制出来。再和固体物理学结合,使固体电子学开花结果。陆续出现了晶体管、二极管和集成电路等,作出了不可想象的元件和电路,使器件小型化,实现了高可靠性和经济性。接着人类又发明了电脑。这样人们创造了电气,并有目的地发展了应用技术,使现代人大大受益。21世纪将实现高度信息化的社会,作为其基础的电能的重要性更加提高。

为什么电能到了这么万能的地步呢?回答其实很简单。第一是电能传输的瞬时性,其他能量形态都无此特征。其次,电能能令人感到很舒服地完成一些事,用其他能量难以替代或不可能。电视机显像管内有高压的加速电极和偏转线圈,对电子束起操纵作用。电以外的能量形态都不能完成这

个功能。计算机中电子沿复杂电路运动也是靠电信息控制的。换句话说,电能是最高级的能量形态。一旦成为电能,就可简单且高效率地变换为其他能量形态。再看一下图 1.1 可知,只要通过两根电力线就能把电能引入家中,就可转变为动力、热、空调、照明、音响、图像、运算、记录、处理、传送等多种形态。

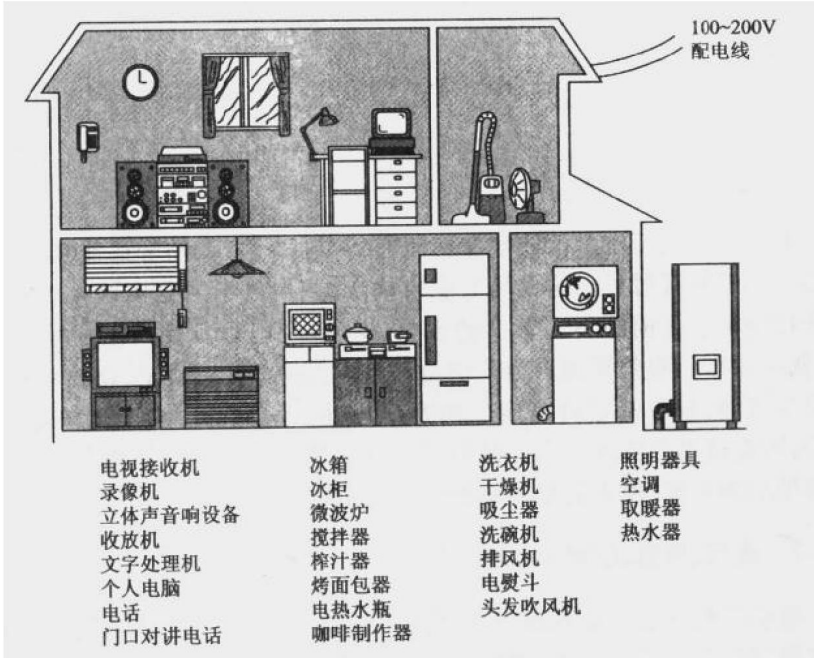


图 1.1 家庭电气化器具

现在,在先进的工业国家,国家总消费能量中近 40% 的一次能用于产生电能。不久假如进入电动汽车实用化时代时,这一比例还要发生很大变化。不等到那个时候,即使从现状来看,日本发电容量已超过 200GW(2 亿 kW),而年电力消耗量 1994 年已超过 7000 亿 kWh。预测到 2010 年可达 1 兆 kWh。高可靠性地供给这样大的电力,是电力技术人员的任务。

现把最高品质能量形态的电能有关知识和技术体系称为电气-电子工程学。概略地看一下电气-电子工程学,它可理解为图 1.2 所示的由三柱组成的体系。

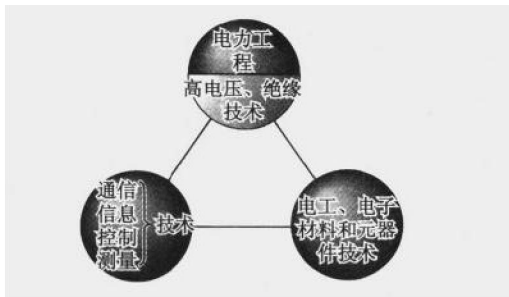


图 1.2 电气-电子工程学现状和高电压与绝缘技术所处位置

1.1.1 电力工程

电能可以从所有其他能量变换而来,它是形态极为特异的能量,其产生和消费几乎没有时延。这也是电能的缺点,要把电不加变换地大规模贮存起来在经济上目前还不合算。把发电、送电、变电以及用户组成可靠系统后,就可以作到有效利用。为了供给日益增大的电能消费量,就要设置巨大的发电基地,从该基地将电能传输到用户处。这都要求极为高级的技术。另外,还有将电力作为动力和热源应用的领域。因此这门学科是现代社会的能量供给的基础,使人们更好掌握电气应用知识。

1.1.2 通信、信息、控制、工程技术

电能的特征之一是具有以光速传播的特性。通信、控制和信息处理极为有效地应用了这一特性,并形成了这方面理论和技术的研究领域。正朝着 21 世纪高度信息化(因特网、电子通信、卫星通信的运行支援等)迈进。其中成为“无名英雄”的电能支撑着各硬件可靠地工作也是事实。在这一领域,特别要求电能的高可靠性和高品质性。

1.1.3 电气、电子材料和元器件技术

在电能产生、输送和消费全过程中不能缺少发挥各种功能的电机电器和硬件等。从发电基地的 1GW 超大容量发电机到个人电脑各自都应用在合理设计下制造的材料和元器件。这些领域已形成系统的技术。特别是 1950 年以来有了由半导体材料开辟的固态元器件领域,使元器件小型化、微型化的追求可以实现,使今日的电脑已成为智能社会的基础。激光的出

现使高科技成为可能,今后还会有高温超导等具有巨大潜能的材料问世。可想而知,还会开创优质材料和元件方面的新技术。

1.2 高电压与绝缘技术

进入正题,高电压与绝缘技术在电力工程中所占的位置如图 1.2 所示。从巨大的发电基地发出的电能一般要用送电线送到用户。电能是功率的时间积分所对应的量。功率是电压和电流的乘积。首都圈等大消费地方要求供给巨大的电能,必然要求从发电基地输送大功率电力。为适应这一要求,提高送电电压是为上策,因为电流大时,在送电线电阻(R)上引起的热损耗增大。这样,日本的送电电压由图 1.3 和图 1.4 可以看出,正从 500kV 迈向 1000kV。实现称为超高压(extra high voltage; EHV)和特高压(ultra high voltage; UHV)电压等级的技术与高电压技术密切相关。维持与雷可比的高电压安全运行要有水平非常高的技术。再如利用六氟化硫(SF_6)气体的变电所,已可使体积缩小至空气绝缘时的 1/20。另外,用高性能的电力电缆向大城市进行地下送电已成为可能。

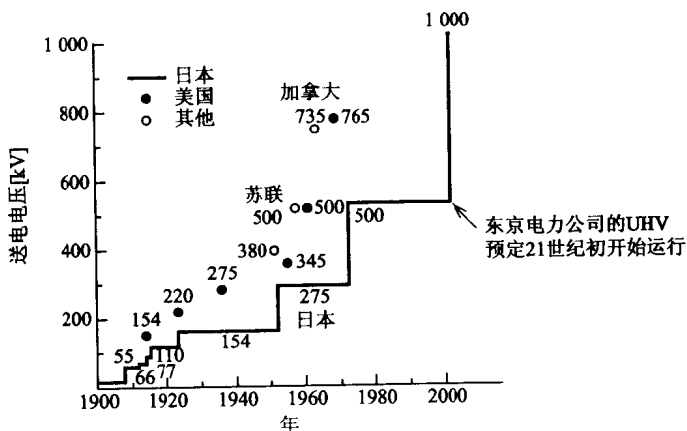


图 1.3 日本等国的送电电压变迁

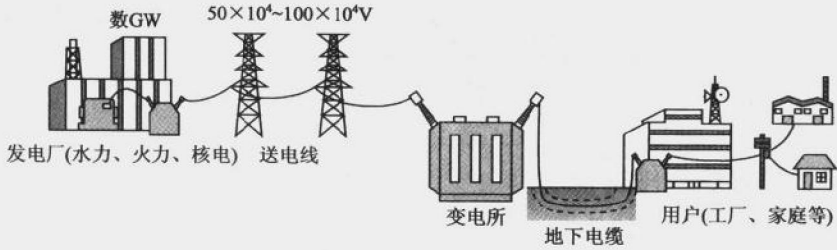


图 1.4 地下电缆

另一方面,还有积极应用高电压的领域。靠高电压放电使中性分子电离或产生离子,或使离子附着于某物,或产生臭氧,在净化环境的有关技术上有各种应用。另外,超高压电子显微镜和 X 射线发生装置,技术上没有高电压也是搞不出来的。

电气绝缘担负着维持高电压长期安全的作用。或分别使用气体、液体和固体绝缘,或把它们构成组合绝缘使用。金属导体加高电压在长时间通电流使用时性能几乎不劣化;但带高压的绝缘体多为高分子材料,随着加压时间延长,绝缘性能有下降的倾向。因此,提高绝缘材料的长期特性、绝缘设计合理化和运行中电机电器的绝缘诊断等理论和技术都有很高的要求。与半导体和激光等相比,绝缘是看上去不吸引人的领域,但当发生事故造成很大影响时这一技术的重要性就显示出来了。日本在这一领域的学术和技术上都处于世界最高水平。在电力供给的稳定性方面有世界前沿的业绩。

高电压在电极边缘处形成高电场。另一方面,绝缘膜极薄时,即使在低电压下也容易形成高电场。超大规模集成电路(ULSI)为代表的元器件小型化给层间绝缘带来苛刻的工作条件。

对高电压与绝缘技术可这样理解:电能与人类的生存、发展有密切关系,而高电压与绝缘技术是其中一个很重要的知识体系,它是支撑电能应用的一根有力的支柱。今后还将抓住称为梦之能源的核聚变发电、超导应用、大陆间送电、直流系统、电能贮藏、高性能蓄电池等大量课题进一步发展下去。学习本教科书后,如能对这一领域有所理解和引起兴趣那就太好了。

2

电气绝缘技术的基础

本章解释为掌握电气绝缘技术所需的基础知识。首先介绍电磁学中静电场电位和场强的基本计算公式,然后讲述高电压下产生的干扰和流动物体的带电现象。

2.1 计算电场和电位的基本公式

求解电荷 (electric charge) 在空间连续分布的区域中的电场强度 [原书称电场 (electric field)] E 和电位 (electric potential) ϕ 时, 设体电荷密度为 ρ , 则可由下面所示的泊松方程 (Poisson's equation) 求得电位中。

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

式中, ϵ_0 为真空的介电常数 (permittivity in vacuum), x, y, z 为位置坐标。由

$$\mathbf{E} = -\text{grad} \phi \quad (2.2)$$

求得场强 \mathbf{E} 。对体电荷 $\rho = 0$ 的区域, 变为解式 (2.1) 右侧为零的拉普拉斯方程 (Laplace's equation):

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.3)$$

对于二维场, 由

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.4)$$

表示, 若取柱坐标, 则

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0 \quad (2.5)$$

这些方程可用解析方法计算, 或用测绘场图的实验方法得到结果。最近应用大型计算机的电场数值计算很盛行。下面对各种计算的原理进行简单介绍。

2.2 解析算法一例——保角变换法

下面简短介绍一下作为解析计算方法之一的保角变换法 (conformal mapping method)。设复变函数 $F(z)$ 的实部为 $u(x, y)$, 虚部为 $v(x, y)$ 则