

陕西省普通高等学校优秀教材一等奖

21世纪全国高等院校 **自动化系列** 实用规划教材

高电压技术

(第2版)

主 编 马永翔

教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

陕西省普通高等学校优秀教材一等奖

21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

高电压技术 (第 2 版)

主 编 马永翔

参 编 郭云玲 张永宜 闫群民

主 审 关根志



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是“21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材”之一,共分 8 章,着重介绍了高电压技术的基本概念、基本原理和物理过程。主要内容包括与高电压有关的气体、液体、固体介质的放电过程、绝缘特性以及电场结构、大气条件等影响放电的因素,电气设备的绝缘试验原理及方法,过电压产生的物理过程及其防护措施,电力弱电防雷保护等内容。

本书可作为高等院校电气工程类专业学生的本科教材,也可供电力工程技术人员及其他领域中的高电压工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/马永翔主编. —2 版. —北京:北京大学出版社, 2016.9

(21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-27206-0

I. ①高… II. ①马… III. ①高电压—技术—高等学校—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 126777 号

书 名 高电压技术 (第 2 版)

Gao Dianya Jishu

著作责任者 马永翔 主编

责任编辑 程志强

标准书号 ISBN 978-7-301-27206-0

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱 pup_6@163.com

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

印刷者 北京富生印刷厂

经 销 者 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 450 千字

2009 年 1 月第 1 版

2016 年 9 月第 2 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价 43.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话: 010-62756370

《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

专家编审委员会

主任委员 张德江

副主任委员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈 静 丁坚勇 侯媛彬

纪志成 任庆昌 吴 斌

秘书长 于微波

委 员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈志新 戴文进 段晨旭 樊立萍

范立南 公茂法 关根志 嵇启春

蒋 中 雷 霞 刘德辉 刘永信

刘 原 马永翔 孟祥萍 孟彦京

聂诗良 王忠庆 吴旭云 燕庆明

杨新华 尤 文 张桂青 张井岗

总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用,深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面,是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中,工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标,党和国家提出走新型工业化道路的战略决策,这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化,就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中,自动化科学与技术起着不可替代的重要作用,高等院校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣历史使命。

我国高等教育中,工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%,其中自动化类专业是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天,人才培养模式多样化已成为必然的趋势,其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养,发挥院校之间相互合作的优势,北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者,由此确定了教材的使用范围,也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点。

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养模式大多定位在高级应用型,对这一大类人才的培养要注重面向工程实践,培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发,本系列教材注重实用性,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容,跟进时代,加入一些新的先进实用的知识,同时淘汰一些陈旧、过时的内容。

(3) 院校间合作交流的果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北京大学出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会,来自各院校的教师比较充分地交流了情况,在相互借鉴、取长补短的基础上,形成了编写大纲,确定了编写原则。因此,这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和做法。

(4) 本系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程,到目前为止,列入计划的已有 30 多门,教材门数多、参与的院校多、参加编写人员多。

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学,将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性,在审纲会上强调了“质量第一,明确责任,统筹兼顾,严格把关”的原则,



要求各位主编加强协调,认真负责,努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责,密切合作,努力使自己的作品得到读者的认可。尽管如此,由于院校之间、编者之间的差异性,教材中还是难免会出现一些问题和不足,欢迎选用本系列教材的教师、学生批评指正。

张德江

2006年1月



第2版前言

本书是根据第1版《高电压技术》出版以来在全国部分高等学校电气工程专业的使用情况，并结合目前高电压技术领域的发展等方面进行的修订。

本书第2版编写过程中，仍然采用8章的编写体例，但内容做了修改与完善，主要体现在以下方面：①力求将基本物理概念及物理过程介绍清楚，对新技术进行适当介绍，对典型实用性数据进行了必要的扩充；②兼顾基本概念和实际应用两个方面，尽可能面向不同需求的读者；③在过电压防护部分，以最新 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》为指导，对输电线路、发电厂及变电站防雷保护内容进行了重新组织与梳理；④充实了部分章节的习题及参考答案。

在形式上，每章前面给出该章的知识架构、教学目标与要求，并在章末提供相关的阅读材料，从而体现其可读性。

为了便于学习，书后还提供了习题参考答案。

本书第2版由马永翔编写绪论及第1、6、8章，郭云玲编写第2、7章及全书的习题参考答案，张永宜编写第3、5章，闫群民编写第4章并对习题参考答案进行了修改和完善，全书由马永翔进行统稿。

承蒙武汉大学的关根志教授在百忙之中仔细审阅了书稿，并提出了不少宝贵意见和建议，在此表示诚挚的谢意！

本书在编写过程中，还得到了兄弟院校及电力系统部分同志的帮助，在此一并致谢！限于编者水平，书中难免存在不妥及疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2016年3月

目 录

绪 论	1	2.2 液体介质的击穿	68
阅读材料 0-1	5	2.2.1 液体介质的击穿机理	68
阅读材料 0-2	9	2.2.2 影响液体介质击穿的因素和 改进措施	68
第 1 章 气体的绝缘强度	13	2.3 固体介质的击穿	71
1.1 气体放电的基本物理过程	14	2.3.1 固体介质的击穿机理	71
1.1.1 气体中带电质点的产生和 消失	14	2.3.2 影响固体介质击穿的因素和 改进措施	72
1.1.2 汤森理论和帕邢定律	17	2.4 绝缘介质的其他特性	74
1.1.3 流注理论	20	2.4.1 热性能	74
1.1.4 不均匀电场中的放电过程	22	2.4.2 机械性能	75
1.1.5 冲击电压下气体间隙的 击穿特性	26	2.4.3 吸潮性能	75
1.2 影响气体放电电压的因素	30	2.4.4 生化性能	75
1.2.1 电场形式对放电电压的影响	30	小结	75
1.2.2 电压波形对击穿电压的影响	31	阅读材料 2-2	75
1.2.3 气体的性质和状态对放电 电压的影响	33	习题	76
1.3 沿面放电	37	第 3 章 电气设备的绝缘试验	78
1.3.1 沿面放电的物理过程	38	3.1 绝缘试验分类	79
1.3.2 影响沿面放电电压的因素	40	3.2 绝缘电阻及吸收比的测量	80
1.3.3 影响绝缘子污闪的因素	44	3.2.1 绝缘电阻的测量	80
1.3.4 污闪事故的对策	49	3.2.2 吸收比的测量	81
小结	51	3.2.3 测量绝缘电阻的规定	82
阅读材料 1-1	51	3.2.4 影响测量绝缘电阻的因素	82
习题	52	3.3 直流泄漏电流的测量	83
第 2 章 液体和固体介质的绝缘强度	55	3.3.1 试验接线	83
2.1 介质的极化、电导和损耗	56	3.3.2 影响测量泄漏电流的因素	84
2.1.1 电介质的极化	56	3.4 介质损失角 $\tan\delta$ 的测量	85
阅读材料 2-1	59	3.4.1 测量介质损失角 $\tan\delta$ 的意义及 适用范围	85
2.1.2 电介质的电导	62	3.4.2 西林电桥的基本原理	86
2.1.3 电介质的损耗	64	3.4.3 影响 $\tan\delta$ 测量的因素	87



3.5 局部放电的测量	88	第4章 线路和绕组中的波过程	121
3.5.1 局部放电的物理过程	88	4.1 均匀无损单导线中的波过程	122
3.5.2 局部放电的测量原理及其 主要参数	88	4.1.1 波传播的物理概念	122
3.5.3 局部放电的测量方法	90	4.1.2 波动方程	124
3.5.4 局部放电测量中的抗干扰 措施	91	4.1.3 波阻抗与电阻的区别	126
3.5.5 测试结果的分析与评定	92	4.2 行波的折射和反射	126
3.6 绝缘油的气相色谱分析	92	4.2.1 折射、反射系数	126
3.6.1 充油电气设备内部 产生气体	92	4.2.2 几种特殊条件下的折、反射	128
3.6.2 气相色谱分析法简介	93	4.2.3 彼德森法则(简化线路波 过程计算的等值电路)	131
3.7 交流耐压试验	95	4.3 无穷长直角波通过串联电感和 并联电容	131
3.7.1 交流高压试验设备概述	95	4.3.1 直角波通过串联电感	132
3.7.2 工频高压试验原理	97	4.3.2 无穷长直角波通过 并联电容器	133
3.7.3 串级高压试验变压器	98	4.4 行波的多次折、反射	135
3.7.4 工频高压的测量	101	4.5 无损耗平行多导线系统中的波 过程	138
3.7.5 操作规定	103	4.6 波在传播过程中的衰减与畸变	142
3.7.6 交流耐压试验注意事项	104	4.7 变压器绕组中的波过程	144
3.7.7 试验结果分析	104	4.7.1 单相变压器绕组中的 波过程	144
3.8 直流耐压试验	105	4.7.2 三相变压器绕组中的 波过程	148
3.8.1 直流高压的产生	105	4.7.3 冲击电压在绕组之间的 传递	149
3.8.2 直流耐压试验的特点	106	4.8 旋转电机绕组的波过程	151
3.8.3 直流高电压的测量	107	小结	151
3.8.4 直流耐压试验注意事项	108	阅读材料 4-1	152
3.9 绝缘试验主要项目及其特点	109	习题	153
3.9.1 绝缘试验的主要项目	109	第5章 雷电及防雷保护装置	155
3.9.2 绝缘试验项目的特点	110	5.1 概述	156
3.10 绝缘在线监测	111	5.2 雷电放电过程	157
3.10.1 目前在线监测 技术现状	112	5.3 雷电参数	160
3.10.2 红外监测的利用	112	5.4 避雷针和避雷线的保护范围	162
3.11 试验记录、试验报告及试验结果 分析	113	5.4.1 避雷针概述	162
小结	114	5.4.2 避雷针的保护范围	163
阅读材料 3-1	115		
阅读材料 3-2	117		
习题	118		



5.4.3 避雷线	164	6.2.3 雷击避雷线档距中央	197
阅读材料 5-1	165	6.3 输电线路的雷击跳闸率	199
5.5 避雷器	165	6.3.1 建弧率	199
5.5.1 避雷器及其基本要求	165	6.3.2 有避雷线线路雷击跳闸率的 计算	199
5.5.2 金属氧化物非线性电阻片	166	6.4 输电线路的防雷措施	202
5.5.3 氧化锌避雷器的基本工作 原理及特点	168	阅读材料 6-1	209
5.5.4 氧化锌避雷器的主要特性 参数	171	6.5 发电厂、变电站的防雷保护	209
5.6 提高氧化锌避雷器保护性能的措施 ...	174	6.5.1 发电厂、变电站的直击雷 保护	210
阅读材料 5-2	175	6.5.2 35kV 及以上变电站的 进线段保护	212
5.7 接地装置	176	6.5.3 三绕组变压器的防雷保护	213
5.7.1 接地及接地电阻	176	6.6 配电系统的防雷保护	213
5.7.2 接地分类	177	6.7 旋转电机过电压防护	214
5.7.3 接地电阻与电容的关系	178	6.7.1 概述	214
5.7.4 接地体间的屏蔽效应	179	6.7.2 防雷保护措施	215
5.7.5 典型接地体的接地电阻	179	6.8 建筑物防雷	216
5.8 降阻剂	180	6.8.1 普通建筑物的防雷	216
5.8.1 降阻剂的降阻机理	180	6.8.2 特殊建筑物的防雷	218
5.8.2 降阻剂的分类和应用	182	小结	219
5.8.3 降阻剂的选择	184	阅读材料 6-2	219
小结	185	习题	220
阅读材料 5-3	186		
习题	187		
第 6 章 输电线路、发电厂及变电站 防雷保护	189	第 7 章 电力弱电系统防雷保护	222
6.1 输电线路的感应雷过电压	190	7.1 低压供电系统的防雷保护	223
6.1.1 雷击线路附近大地时线路上的 感应雷过电压	190	7.1.1 雷电对供电系统的影响	223
6.1.2 雷击线路杆塔时导线上的 感应过电压	192	7.1.2 供电系统的雷电保护	223
6.2 输电线路的直击雷过电压和 耐雷水平	192	7.2 弱电系统防雷保护器件	224
6.2.1 雷击杆塔顶时的过电压和 耐雷水平	193	7.2.1 气体放电管	224
6.2.2 雷击导线时的过电压和 耐雷水平	196	7.2.2 氧化锌压敏电阻	226
		7.2.3 齐纳二极管	228
		7.2.4 SPD 浪涌防护器	229
		7.3 电子设备的防雷保护	231
		7.3.1 一级防护	231
		7.3.2 二级防护	231
		7.3.3 三级保护	232



7.4 微机保护与综合自动化系统的 接地.....	233	8.7.1 绝缘配合的原则	251
小结	235	8.7.2 绝缘配合的基本方法.....	252
阅读材料 7-1	235	8.8 输电线路和变电所的绝缘配合	253
习题	239	8.8.1 绝缘子串的选择	254
第8章 操作过电压及其防护	240	8.8.2 空气间距的选择	256
8.1 概述	241	8.8.3 变电站电气设备绝缘水平的 确定	258
8.2 空载线路合闸过电压	242	8.9 中性点接地方式对绝缘水平的 影响	260
8.2.1 正常空载线路合闸过电压	242	8.9.1 中性点接地的优点.....	261
8.2.2 重合闸过电压	243	8.9.2 中性点直接接地的缺点.....	261
8.2.3 空载线路合闸过电压的 影响因素及限制措施	244	小结	262
8.3 切除空载线路过电压	244	阅读材料 8-1	262
8.4 切除空载变压器过电压	245	习题	267
8.5 操作过电压的限制措施	247	附录	269
8.5.1 利用断路器并联电阻限制 分合闸过电压	247	附表 1 球隙放电标准 1 (IEC 1960 年公布).....	269
8.5.2 利用避雷器限制操作 过电压	248	附表 2 球隙放电标准 2 (IEC 1960 年公布).....	270
8.6 中性点接地方式对内过电压的 影响	248	附表 3 国外一些高电压实验室的 主要特性参数.....	271
8.6.1 中性点接地方式的特点	249	附表 4 国内一些高电压实验室的 主要特性参数.....	272
8.6.2 中性点接地方式对内过 电压的影响	249	习题参考答案	273
8.7 绝缘配合的原则及方法	251	参考文献	296

绪论

1. 高压输电的发展过程

1) 高压输电的出现与电压等级的提高

1890 年在英国出现了从德特福德(Deptford)到伦敦(London)长 45km 的 10kV 输电线路, 1891 年在德国出现了从劳芬(Lauffen)到法兰克福长达 170km 的 15kV 三相输电线路。100 年来, 世界上的输电电压提高了 100 倍。表 1 给出了各电压等级在国际上首次出现的时间。

表 1 交流输电各电压等级首次出现的时间

电压等级 /kV	10	50	110	220	287	380	525	735	1150
首次出现年份	1890	1907	1912	1926	1936	1952	1959	1965	1985

随着经济的发展, 国民经济各行业对能源的需求日益迫切, 国际能源机构预测, 从近几年到 2025 年, 全球能源需求将增加近一倍。电力工业作为能源工业的主力而受到极大的重视, 在发达国家的能源消费比例中, 电能占一多半。除火力发电、水力发电外, 又发展了核能发电、太阳能发电、风力发电、海洋能发电、地热发电等多种新能源形式。但不管哪种发电形式都离不开电力的传输, 离不开高压输电。

促使输电电压等级提高的直接动力就是对电力需求的激增。因为线路的输送容量 P 与交流输电电压 U 的二次方成正比, 即 $P=U^2/Z$, 其中 Z 为线路波阻抗。对于架空线, 各电压等级下的波阻抗和输送容量如表 2 所示。电缆的波阻抗只有几十欧姆, 因此, 在同样电压等级下, 电缆线路比架空线路可以输送大得多的功率。但是电缆太贵, 而且出故障后查找与修复起来都很困难, 因此, 目前国际上仍以架空线为主要的输电方式。

表 2 交流输电各电压等级下输电线路的波阻抗与输送容量

系统电压/kV	220	330	500	750	1000	2000
波阻抗/ Ω	400	303	278	256	250	250
输送容量/MW	121	360	900	2200	4000	16000

除了大容量输电需要高压输电以外, 促使电压等级提高的另一个因素是电力的远距离输送, 当发电中心远离用电中心时, 高压输电就不可避免了。巨型水电站、巨型坑口电站群往往都远离城市, 远离负荷中心, 如长江、黄河的水电, 山西、内蒙古的火电等。核电站也不会建在市中心, 巨型空间太阳能地面接收站更是建在荒无人烟的地方才好。

2) 特高压输电的出现与展望

在高压输电行业中, 习惯上称 100kV 以下为高压, 100~1000kV 为超高压, 1000kV



及以上为特高压。20 世纪 60 年代后期,国际上就开始了特高压输电的研究。苏联于 1985 年率先建成了 1228km 长的交流 1150kV 特高压线路,可送负荷 5500MW,1985 年开始部分投运,后因负载过小而降压至 500kV 运行。日本也于 20 世纪 90 年代建成了 300km 长的 1000kV 特高压线路,但至今仍运行在 500kV。美、意、法等国,包括巴西等也早已开始了特高压的研究。苏联曾有人建议在 2020 年左右建设 1800~2000kV 线路,以送出西伯利亚的巨大能源,并有人建议与北美联网,实现东西半球调峰。

各国发展特高压输电的原因不尽相同,俄罗斯是远距离、大容量两方面因素兼有,日本、意大利发展特高压,除大容量输电外,很关键的一点是为了减少电站出线回数,压缩线路走廊,节省土地资源。但是百万伏级的特高压输电毕竟有许多未解决的技术困难,因此,国际上目前实际投入工业运行的最高电压只有 750kV 等级的输电线路。加、美、俄、巴西、南非等国已有多年的实际运行经验,韩国也独立地建成了 750kV 输电线路。中国幅员辽阔,很多地方也已出现走廊紧张的问题了。2005 年 9 月,西北电网已率先投运额定电压 750kV 的官亭—兰州东线路;2009 年 1 月,1000kV 特高压交流示范工程(晋东南(长治市)—南阳—荆门)正式投入运行;2013 年 9 月,淮南—浙北—上海 1000kV 皖电东送特高压交流工程投运,成为世界特高压发展史上的又一个重要里程碑。2009 年 6 月世界首条 ± 800 kV 云(南)—广(东)特高压直流工程投入运行;2010 年 7 月向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流工程投入运行。另外,我国 ± 1100 kV 级的特高压直流输电工程已在逐步实施之中。

3) 直流输电、紧凑型输电及灵活输电

因为直流电压不能利用变压器,所以交流输电最先得到迅速发展。20 世纪 50 年代中期以来,随着各方面技术的进步,直流输电的优越性逐步得到体现,许多国家又逐步开始发展直流输电。我国多条远距离的西电东送线路即为直流输电线路。从输电的角度说,直流输电几乎没有距离的限制,也可用直流电缆在水下、地下输电,因此,在远距离输电上很有发展前景,但存在几大难题,例如,换流站设备昂贵,尚未造出性能满意的直流断路器,直流瓷绝缘子及钢化玻璃绝缘子耐污性能差等。各直流电压等级下的输送容量如表 3 所示。

表 3 直流输电电压与输送容量

电压/kV	± 400	± 500	± 600	± 700	± 800
双极容量/MW	500~1000	1000~3000	2500~4000	4000~6000	6000~9000
电流/A	600~1250	1000~3000	2100~3300	2150~4300	2800~5600

为了节省线路走廊资源,有时只好采取同塔双回,甚至同塔四回的超高压输电线路。虽然每回线路输送的功率并没有提高,但每条线路走廊的输送容量却大大提高。但是同塔多回线路也带来系统可靠性在一定程度上降低的问题。

高自然功率的紧凑型线路靠三相同塔窗来大大缩小相间距离,增大每相分裂导线的分裂半径,以减小电感,增大电容,从而降低线路波阻抗,提高输送容量。在同样电压等级下,高自然功率的紧凑型线路所需线路走廊窄,占地少,自然功率高,技术经济指标可比



常规线路优越 20%~30%，甚至更高。在俄罗斯和巴西等国已有试验线路。我国第一条 500kV 紧凑型线路从昌平到房山，长 82km，相间中心距 6.7m，分裂半径为 0.75m，不同相子导线间最近距离 5.95m，线路波阻抗 191 Ω ，自然功率 1300MW，已于 1999 年 11 月投运，2001 年 5 月 6 日成功进行了 1600MW 的大功率输电试验。

2. 高电压、高场强下的特殊问题

有许多问题在低电压、低场强下并不突出，但当电压或场强高到一定程度后，不仅变得十分突出、十分特殊，还很不好解决，具体表现在以下方面。

1) 绝缘问题

没有可靠的绝缘，高电压、高场强甚至无法实现。高电压、高场强下的绝缘问题之所以突出就是因为对绝缘的要求太高，以致为绝缘所花的代价太高，而且可靠性往往还有问题。

(1) 绝缘材料。首先要选择性能优良的绝缘材料，要研究各种绝缘材料在高电压、高场强下的各种性能、各种现象以及相应的过程、理论，尤其是绝缘击穿破坏的过程及理论。在此基础上也可以开发新材料，进而大幅度提高性能。

(2) 绝缘结构(电场结构)。绝缘材料的性能并不能代表绝缘结构的性能，绝缘结构的性能才是实际的设备使用性能。同一种材料在不同的绝缘结构下其外在表现是不同的。对绝缘结构的研究就是要更好地利用材料的性能。

(3) 电压形式。研究绝缘问题是不能离开电压形式的，如工频或高频交流电压、直流电压、冲击电压等，同样的材料、结构在不同的电压形式下，绝缘性能也是不尽相同的。

(4) 高电压试验问题。对任何一门工程性很强的学科而言，实际的试验都是必不可少的。高电压试验面临的问题首先就是如何产生各种高电压，而且所产生的高电压在波形、幅值上都应该方便可调，这就需要研究各种经济、灵活的高电压发生装置。有了人为产生的高电压，如何对电气设备进行高电压试验也是很值得研究的。另外，还有如何测量高电压的问题，在各学科的研究中计量与测试都是研究的基础，因此，如何能测得准确、方便、及时是基本要求。低电压下各种电量的测量方法、手段、仪器很多，但高电压、高场强下的测量就不那么方便了。高强度、微弱量、快速量都不好测，而在高电压试验中这 3 类信号都有，微弱量受到高电压、大电流下的强电磁干扰也是普通干扰所不能比的。

2) 过电压防护问题

随着高电压设备上工作电压的升高，设备的造价也已升高，例如，一台 500kV、360MVA 的电力变压器，2007 年的出厂价已达 2600 万元左右。但在电力系统的运行过程中，还会有各种情况导致比工作电压高得多的过电压产生，例如，自然界的雷击，称为大气过电压或外过电压，又如由电力系统本身操作导致的参数变化引起振荡的过渡过程，称为操作过电压或内过电压。如果对这些过电压不加防护而完全用设备本身的绝缘去承受，将使设备的造价高到无法承受的地步。

所以要研究各种过电压的特点及形成条件，研究各种保护装置及其保护特性，研究电压、绝缘、保护三者之间的绝缘配合问题。



3) 电磁环境问题

高电压下的电磁环境问题可分为电磁兼容与生态效应两个方面。

(1) 电磁兼容问题在电子设备日益广泛应用的今天已经很热门了,高电压、高场强下各种电磁干扰信号更强,电磁兼容问题也就更突出。电压高场强下的电磁干扰主要有空间电磁干扰、线路传导干扰与地电位浮动干扰。在高电压测试技术中的抗干扰与这里的消除干扰、抗干扰有密切的联系,也有所不同。

(2) 生态效应 500kV 输电线正下方地面最大场强约 100V/cm,但随离开输电线距离的增加,地面场强衰减很快,这种场强当然是低压线路所没有的。特高压下地面场强与此差不多,110kV、220kV 线路下的地面场强要小一些。

20 世纪 70 年代初,苏联、西德、美国、法国、西班牙、加拿大、瑞典等国都对高压线路、变电站的工作人员及附近居民在长期电场下的健康情况进行了考察,以及病理学研究,至今未发现在 200V/cm 电场下有什么差异。

美国、日本等国对动物(白鼠小型哺乳动物、鸟类、蜜蜂)进行的研究也未得出任何统计性的差异,但是鸟类往往回避在带电的高压线上栖息。对作物、林木的研究表明,即便在 765kV 线路下,7~8kV/m 的场强不大可能影响作物生长。在树顶 20~25kV/m 的场强下,树枝端部有电晕烧伤现象,但这种烧伤对树木生长并无影响。

3. 高电压下的特殊现象及其应用

每门学科都有各自的理论、现象。高电压学科的特有现象可以举出许多,其中一些已得到应用,并有很好的发展前景,它已成为国内外广泛开展研究的方向。

1) 静电技术及其应用

静电除尘器效率达 99% 以上,在国际上已得到广泛应用,在我国也成为大力发展的新型环保产品。静电除尘器在大型发电厂已成为与汽轮机、锅炉、发电机并称的 4 大主要设备。另外,在污水处理、选矿、印刷、纺织、喷漆、喷雾、食品保鲜等方面,各种利用电晕与静电现象制成的设备也得到了广泛的应用。

2) 液电效应及其应用

液电效应,即液体电介质在高电压、大电流放电时伴随产生的力、声、光、热等效应的总称。利用液电效应制成的肾结石体外碎石机、铸件清砂装置等已在国内外得到广泛的应用,在石油开采冰下大型桥桩的探伤等方面也已得到应用。

3) 线爆技术及其应用

强大的电流脉冲通过金属线时,会使金属线熔化、气化、爆炸。产生很强的力学效应及光、热、电磁效应,从而可以对难熔金属、难镀材料喷涂,也可以用线爆来模拟高空核爆炸或地下核爆炸。

4) 脉冲功率技术及其应用

许多高端技术领域、尖端武器领域,如可控热核聚变、激光技术、电子及离子加速器、电磁轨道炮等,包括美国的“星球大战”计划中的许多课题对脉冲功率的要求都越来越高。目前脉冲功率技术正向着高电压、大电流、窄脉冲、高重复率的方向发展,正在向着各民用工业领域、各学科方向迅速渗透发展。



阅读材料 0-1

国际特高压输电发展现状

从 20 世纪 70 年代开始,苏联、日本、美国、意大利等国出于满足国内电力供应,实现电能的长距离、大负荷输送,解决输电走廊不足等不同原因,集中开展了特高压输电的研究和建设,取得了丰硕成果。经过近四十年的发展和实践考验,其中的成败得失和经验教训,为我国的特高压电网建设提供了有益的借鉴和参考。



苏联:第一条交流特高压工程的诞生地

苏联是世界上第一个建成交流特高压工程并投入工业化运行的国家,从 1981 年开始,先后动工建设了 5 段 1150kV 特高压线路,总长度为 2344km。分别是:埃基巴斯图兹—科克契塔夫,长度 494km;科克契塔夫—库斯坦奈,长度 396km;库斯坦奈—车里亚宾斯克,长度 321km;埃基巴斯图兹—巴尔瑙尔,长度 693km;巴尔瑙尔—依塔特,长度 440km。

苏联发展特高压输电,是由其能源分布和负荷中心位置决定的。苏联的西伯利亚地区水力资源丰富,且蕴藏大量煤炭,哈萨克斯坦地区也有大量煤炭资源,共计约 80% 以上的发电一次能源集中在苏联的东部地区。但是,75% 的电力负荷却位于欧洲部分,处于苏联的西部。为保证电力供应,必须实现由东向西的长距离、大负荷电能输送。

苏联的大量研究结果表明,按照当时的技术水平和国家计划规定的铁路运输价格,在大约 1000km 的距离内运输原煤是合理的。如果运输优质煤,距离则可以放宽到 2000~3000km。含热量低的褐煤则适宜就地建厂发电外送。

随着单机容量和电厂规模的迅速增大,输电容量和输电距离也在不断增加,随之要求电网主干线输送容量需相应增大,输电网电压等级越高,输送电力越经济。采用特高压输电不仅能远距离输送巨型电站和能源基地的电能,有效降低输电成本,而且可以强化系统的联网运行。因此,苏联在规划建设埃基巴斯图兹等总装机容量在 2000 万千瓦以上的大型电源基地的同时,规划建设交、直流特高压电网,将巨大电能送到 1000km 以外的莫斯科等负荷中心。

为了做好国内特高压输电线路的建设,苏联十分重视前期科研,开展了大量基础研究和产品开发。在 1972 年之前,苏联集中精力进行了特高压基础研究,重点研究了绝缘、系统、线路、设备以及对环境影响等问题,得到了大量研究成果,为特高压建设奠定了坚实的基础。1972—1978 年,苏联开展了设备研制攻关,进行样机试制;1978—1980 年转入正式生产的同时,将原型设备投入试运行考核。

1985 年 8 月,世界上第一条 1150kV 线路埃基巴斯图兹—科克契塔夫在额定工作电压下带负荷运行。1992 年 1 月 1 日,哈萨克斯坦中央调度部门把这段线路电压降至 500kV 运行。在此期间,埃基巴斯图兹—科克契塔夫线路段及两端变电设备在额定工作电压下运行时间达到 23787h。另一条特高压输电线路科克契塔夫—库斯坦奈线路段及库斯坦奈变电站设备在额定工作电压下运行时间达到 11379h。经过长时间的实际运行,特高压变电设备



运行情况良好,线路未发生倒塔、断线、绝缘子损坏等导致线路停电的重大事故,证明了苏联的 1150kV 特高压输电技术具有较高的运行可靠性。

1990 年,苏联开始建设从埃基巴斯图兹到坦波夫的线路,用于将哈萨克斯坦境内的埃基巴斯图兹中部产煤区的煤电向欧洲部分负荷中心输送的直流特高压输电工程。该直流输电工程采用 $\pm 750\text{kV}$ 、600 万千瓦的输电方案。工程中所采用的直流设备均为苏联自行研制,并通过了型式试验。

苏联解体后(1991 年 12 月 25 日),由于国民经济条件的恶化,用电及发电量长期停滞不前,送端电源因资金短缺而无法按预计目标建设,导致特高压线路负载过轻,输送容量仅为额定容量的 20%~30%,已经建成的工程被迫降压运行,原计划扩建的特高压线段也不能按计划建设。

但是,俄罗斯并没有放弃特高压输电。据了解,随着近年来俄罗斯国民经济的复苏,目前已经出现电力负荷增长的趋势。基于对电力发展的基本预测,俄罗斯统一电力公司计划重新启用 1150kV 输电线路。俄罗斯计划于 10 年内,在巴尔瑙尔与车里亚宾斯克之间重新架设 1150kV 线路,以加强系统联系,将东部大量的电能安全经济地输送到西部负荷中心。线路全线都将位于俄罗斯境内,分别通过卡拉苏克、鄂木斯克、库干,总长度约 1480km。随着经济的发展,俄罗斯的特高压输电将会有广阔的发展前景。



日本:在特高压输电中积极应用新技术

日本决定采用百万伏级交流输电技术,主要是从解决线路走廊紧张、电网的稳定性和短路电流超限等角度考虑的。通过对不同电压等级交流和超高压直流输电方式进行反复比较论证,日本得出的结论认为:800kV 线路输送能力较低,单位传输功率成本高,从经济、环境以及占用土地几方面看都不适合日本的情况。1500kV 线路虽然需要的回路数少,输送容量大,但从输电线路设计、设备制造等方面看,存在难以预料的困难。采用 1000kV 特高压交流(最高运行电压 1100kV)方案是最经济的。

20 世纪 70 年代,日本经济高速增长,电力需求年增长率为 6%~10%。根据当时的预测,日本东京市区的负荷将超过 5000 万千瓦。为了获得稳定的电源,东京电力公司在沿海发展大规模核电,其中位于日本海沿岸的柏崎刈羽核电站装机 812 万千瓦,位于太平洋沿岸的福岛第一和第二核电站分别装机 470 万千瓦和 440 万千瓦。为了适应柏崎刈羽核电站的扩建,东京电力公司决定建设从核电站到西群马开关站,以及西群马开关站到东山梨变电站和新今市开关站的同杆双回 1000kV 交流输电线路,从而加强关东西部地区电网,构成日本 1000kV 系统的南北向网架。从南磐城开关站经东群马开关站到西群马开关站的南磐城干线和东群马干线,将形成 1000kV 系统的东西向网架,同样采用同杆双回方案。

日本从 1972 年第一条 500kV 交流输电线路投入运行开始,就启动了特高压输电技术的研发计划,其特高压输电技术研究和设备研制经历了三个发展阶段:第一阶段(1972—1978 年)围绕输变电技术和设备的调查研究;第二阶段(1978—1982 年)围绕特高压输电技术开展基础性研究;第三阶段(1982—1985 年)围绕输电线路和变电站设备开展实用性试验研究。