



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

高电压技术

主 编 马永翔
副主编 张永宜



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

高电压技术

主 编 马永翔

副主编 张永宜



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是“21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材”之一,共分 8 章,着重介绍高电压技术的基本概念、基本原理和物理过程,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。

本书可作为高等学校电气工程类专业的本科教材,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。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/马永翔主编. —北京:北京大学出版社,2009.1

(21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-14461-9

I. 高… II. 马… 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(2008)第 191118 号

书 名: 高电压技术

著作责任者: 马永翔 主编

策 划 编 辑: 李 虎 李娉婷

责 任 编 辑: 李娉婷

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-14461-9/TP·0978

出 版 者: 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> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 390 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 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

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书系根据 2008 年 5 月在北京召开的 21 世纪本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材会议所通过的大纲及要求, 结合近年来高电压技术的发展而编写的教材。

编写过程中, 注重理论结合实际, 论述清晰准确, 深入浅出。在内容上, 注重新技术的介绍, 在高压绝缘部分, 增加了 SF_6 气体特性及应用; 在高压试验部分, 强化了常用电气设备的试验分析和判断, 增加了绝缘在线监测技术与分析; 在过电压防护部分, 淘汰了管型避雷器、阀型避雷器的相关内容, 强化了氧化锌避雷器的内容, 增加了配电网及弱电系统的防雷内容。

在形式上, 每章前面给出本章的知识架构、教学目标与要求, 引入应用实例, 提供相关的阅读材料, 以激发学习兴趣。章末小结, 便于读者总结思考。

为了便于学习, 书后提供了每章习题的参考答案。

本书由马永翔编写绪论及第 1、5、8 章; 郭云玲编写第 2、7 章及参考答案部分; 张永宜编写第 3、6 章; 闫群民编写第 4 章并对参考答案进行了修改和完善, 全书由马永翔统稿。

本书承蒙武汉大学电气工程学院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及建议, 在此表示诚挚的谢意。

在本书的编写过程中, 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, 书中难免有不妥之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 8 月

目 录

绪论	1
----------	---

第 1 章 气体的绝缘强度	12
---------------------	----

本章知识架构	12
--------------	----

本章教学目标与要求	12
-----------------	----

1.1 气体放电的基本物理过程	13
-----------------------	----

1.1.1 气体中带电质点的产生 和消失	13
-------------------------------	----

1.1.2 汤逊理论和巴申定律	16
-----------------------	----

1.1.3 流注理论	19
------------------	----

1.1.4 不均匀电场中的放电 过程	20
-----------------------------	----

1.1.5 冲击电压下气体间隙的 击穿特性	24
--------------------------------	----

1.2 影响气体放电电压的因素	28
-----------------------	----

1.2.1 电场形式对放电电压的 影响	28
------------------------------	----

1.2.2 电压波形对击穿电压的 影响	29
------------------------------	----

1.2.3 气体的性质和状态对放电 电压的影响	31
----------------------------------	----

1.3 沿面放电	34
----------------	----

1.3.1 沿面放电的物理过程	35
-----------------------	----

1.3.2 影响沿面放电电压的 因素	37
-----------------------------	----

1.3.3 影响绝缘子污闪的因素	40
------------------------	----

1.3.4 提高沿面放电电压的 措施	43
-----------------------------	----

小结	44
----------	----

习题	45
----------	----

第 2 章 液体和固体介质的绝缘强度	48
--------------------------	----

本章知识架构	48
--------------	----

本章教学目标与要求	48
-----------------	----

2.1 介质的极化、电导和损耗	49
-----------------------	----

2.1.1 电介质的极化	49
--------------------	----

2.1.2 电介质的电导	54
--------------------	----

2.1.3 电介质的损耗	56
--------------------	----

2.2 液体介质的击穿	59
-------------------	----

2.2.1 液体介质的击穿机理	59
-----------------------	----

2.2.2 影响液体介质击穿的因素 和改进措施	60
----------------------------------	----

2.3 固体介质的击穿	63
-------------------	----

2.3.1 固体介质的击穿机理	63
-----------------------	----

2.3.2 影响固体介质击穿的因素和 改进措施	64
----------------------------------	----

2.4 绝缘介质的其他特性	65
---------------------	----

2.4.1 热性能	65
-----------------	----

2.4.2 机械性能	66
------------------	----

2.4.3 吸潮性能	66
------------------	----

2.4.4 生化性能	66
------------------	----

小结	66
----------	----

习题	67
----------	----

第 3 章 电气设备的绝缘试验	69
-----------------------	----

本章知识架构	69
--------------	----

本章教学目标与要求	69
-----------------	----

3.1 绝缘电阻及吸收比的测量	70
-----------------------	----

3.1.1 绝缘电阻的测量	70
---------------------	----

3.1.2 吸收比的测量	71
--------------------	----

3.1.3 测量绝缘电阻的规定	72
-----------------------	----

3.1.4 影响测量绝缘电阻的 因素	72
-----------------------------	----

3.2 泄漏电流的测量	73
-------------------	----

3.2.1 试验接线	73
------------------	----

3.2.2 影响测量泄漏电流的 因素	75
-----------------------------	----

3.3 介质损失角 $\tan\delta$ 的测量	75
----------------------------------	----

3.3.1 测量介质损失角 $\tan\delta$ 的 意义及适用范围	75
---	----

3.3.2 西林电桥的基本原理	76	4.1.2 波动方程	104
3.3.3 影响 $\tan\delta$ 测量的因素	77	4.1.3 波阻抗与电阻的区别	105
3.4 局部放电的测量	77	4.2 行波的折射和反射	106
3.4.1 局部放电的物理过程	77	4.2.1 折射、反射系数	106
3.4.2 局部放电的测量原理及其 主要参数	78	4.2.2 几种特殊条件下的折、 反射	107
3.4.3 局部放电的测量方法	79	4.2.3 彼德逊法则(简化线路波过 程计算的等值电路)	110
3.4.4 局部放电测量中的抗干扰 措施	81	4.3 无穷长直角波通过串联电感和 并联电容	111
3.4.5 测试结果的分析与评定	81	4.3.1 无穷长直角波通过串联 电感	111
3.5 绝缘油的气相色谱分析	82	4.3.2 无穷长直角波通过并联 电容	112
3.5.1 充电电气设备内部产生 气体	82	4.4 行波的多次折、反射	113
3.5.2 气相色谱分析法简介	82	4.5 无损耗平行多导线系统中的波 过程	116
3.6 交流耐压试验	85	4.6 波在传播过程中的衰减与 畸变	120
3.6.1 工频高压的产生	85	4.7 变压器绕组中的波过程	121
3.6.2 工频高压试验原理	85	4.7.1 单相变压器绕组中的波 过程	121
3.6.3 工频高压的测量	86	4.7.2 三相变压器绕组中的波 过程	125
3.6.4 操作规定	88	4.7.3 冲击电压在绕组之间的 传递	126
3.6.5 试验中可能出现的问题	88	4.8 旋转电机绕组的波过程	128
3.6.6 试验结果分析	89	小结	128
3.7 直流耐压试验	89	习题	129
3.7.1 直流高压的产生	90		
3.7.2 直流高电压的测量	90		
3.7.3 直流高压试验的特点及 适用范围	91		
3.8 各种试验方法的特点	91		
3.9 绝缘在线监测	92		
3.9.1 在线监测技术现状	92		
3.9.2 红外监测的利用	92		
3.10 试验记录、试验报告及试验结果 分析	93		
小结	95		
习题	98		

第4章 线路和绕组中的波过程

本章知识架构	101
本章教学目标与要求	101
4.1 均匀无损单导线中的波过程	102
4.1.1 波传播的物理概念	102

第5章 雷电及防雷保护装置

本章知识架构	131
本章教学目标与要求	131
5.1 概述	132
5.2 雷电放电过程	133
5.3 雷电参数	136
5.4 避雷针和避雷线的保护范围	137
5.4.1 避雷针概述	137
5.4.2 避雷针的保护范围	138
5.4.3 避雷线	139
5.5 避雷器	140



5.5.1 避雷器及其基本要求	140	6.1.9 输电线路的防雷措施	171
5.5.2 金属氧化物非线性 电阻片	141	6.2 配电网的防雷保护	174
5.5.3 氧化锌避雷器的基本工作 原理及特点	143	6.2.1 配电线路的防雷保护	174
5.5.4 氧化锌避雷器的主要特性 参数	145	6.2.2 配电所的防雷保护	174
5.6 提高氧化锌避雷器保护性能的 措施	148	6.3 发电厂、变电所的防雷保护	175
5.7 接地装置	150	6.3.1 发电厂、变电所的直击雷 保护	175
5.7.1 接地及接地电阻	150	6.3.2 35kV 及以上变电所的 进线段保护	176
5.7.2 接地分类	151	6.3.3 35kV 小容量变电所的 进线段保护	178
5.7.3 接地电阻与电容的 关系	152	6.3.4 三绕组变压器的防雷 保护	179
5.7.4 接地体间的屏蔽效应	153	6.3.5 旋转电机的防雷保护	179
5.7.5 典型接地体的接地 电阻	153	6.3.6 直配电机的防雷保护	180
5.8 降阻剂	154	6.4 建筑物防雷	182
5.8.1 降阻剂的降阻机理	154	6.4.1 普通建筑物的防雷	183
5.8.2 降阻剂的分类和应用	156	6.4.2 特殊建筑物的防雷	184
5.8.3 降阻剂的选择	158	小结	185
小结	159	习题	186
习题	161	第 7 章 电力弱电系统防雷保护	188
第 6 章 电力系统防雷	162	本章知识架构	188
本章知识架构	162	本章教学目标与要求	188
本章教学目标与要求	162	7.1 低压供电系统的防雷保护	189
6.1 输电线路的防雷保护	163	7.1.1 雷电对供电系统的 影响	189
6.1.1 输电线路防雷的原则	163	7.1.2 供电系统的雷电保护	189
6.1.2 输电线路感应过电压	163	7.2 弱电系统防雷保护器件	190
6.1.3 无避雷线时的感应过 电压	164	7.2.1 气体放电管	190
6.1.4 有避雷线时的感应过 电压	165	7.2.2 氧化锌压敏电阻	191
6.1.5 无避雷线时的直击雷过 电压	165	7.2.3 齐纳 TVS(Transient Voltage Suppressor)二极管	194
6.1.6 有避雷线时的直击雷过 电压	167	7.2.4 SPD 浪涌防护器	195
6.1.7 建弧率	170	7.3 电子设备的防雷保护	197
6.1.8 输电线路雷击跳闸率的 计算	171	7.3.1 I 级防护	197
		7.3.2 II 级防护	197
		7.3.3 III 级保护	198
		7.4 微机保护与综合自动化系统的 接地	199
		小结	200

习题	205	8.6.3 中性点接地方式对内过电压的影响	214
第8章 操作过电压及其防护	206	8.7 绝缘配合的原则及方法	216
本章知识架构	206	8.7.1 绝缘配合的原则	216
本章教学目标与要求	206	8.7.2 绝缘配合的基本方法	217
8.1 概述	207	8.8 输电线路和变电所的绝缘配合	218
8.2 空载线路合闸过电压	208	8.8.1 绝缘子串的选择	218
8.2.1 正常空载线路合闸过电压	208	8.8.2 空气间距的选择	221
8.2.2 重合闸过电压	209	8.8.3 变电站电气设备绝缘水平的确定	222
8.2.3 空载线路合闸过电压的影响因素及限制措施	210	8.9 中性点接地方式对绝缘水平的影响	225
8.3 切除空载线路过电压	210	8.9.1 中性点接地的优点	225
8.4 切除空载变压器过电压	211	8.9.2 中性点直接接地的缺点	226
8.5 操作过电压的限制措施	212	8.10 电气设备试验电压的确定	226
8.5.1 利用断路器并联电阻限制分合闸过电压	212	小结	227
8.5.2 利用避雷器限制操作过电压	213	习题	232
8.6 中性点接地方式对内过电压的影响	214	习题参考答案	233
8.6.1 中性点接地方式的分类	214	附录	254
8.6.2 中性点接地方式的特点	214	参考文献	258

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(Frankfort)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 与交流输送电压 U 的二次方成正比, 即 $P=U^2/Z$, 其中 Z 为线路波阻抗。对架空线, 各电压等级下的波阻抗和输送容量见表 2。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。前苏联于 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。前苏联曾有人建议在 2020 年左右建设 1800~2000kV 线路,以送出西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。中国一向号称幅员辽阔,实际上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 的输电线路,800kV 也在南方电网中建设之中。另外,我国百万伏级的特高压输电等级也已经论证了多年。

3) 直流输电、紧凑型输电及灵活输电

直流电压因为不能利用变压器,所以交流输电最先得得到迅速发展。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见表 3。我国近几年围绕三峡工程修建的几条 ± 500 kV 线路采用的就是 3000A 电流,每条线路的输送容量达 3000MW。

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是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家已有试验线路。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 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. 我国电力工业的现状与展望

1) 发电量

表 4 列出了 1980 年以来部分年份我国发电量的增长情况, 平均年增长率约为 9%, 而同期全世界总发电量的年增长率都低得多, 例如 1984 年为 5.7%, 1990 年为 25%, 1993 年为 11%, 1994 年甚至为负增长。表 5 列出了世界各主要工业发达国的发电量。我国自 1995 年—1996 年起, 年发电量已跃居世界第二位, 而且增长迅速, 2002 年我国年发电量已达 16000 亿 kW·h。

表 4 1980 年以来我国年发电量

年 份	1980	1985	1990	1995	1998	2000	2002	2007
发电量/亿 kW·h	3006	4107	6213	10069	11670	13250	16000	32559

表 5 1994 年、2002 年主要工业发达国家年发电量

国 家	美 国	日 本	俄罗斯	加拿大	德 国	法 国	英 国
1994 年/亿 kW·h	32827	9643	8759	5335	5268	4514	3080
2002 年/亿 kW·h	38600	10424	—	5792	5196	5210	3584

2) 装机容量

1996 年年底我国发电设备装机容量已达 23 亿 kW, 居世界第二位, 2002 年达 353 亿 kW。表 6 列出了我国自 1980 年以来的发电设备装机容量; 表 7 列出了 1994 年世界各主要工业发达国家发电设备装机容量。

表 6 1980 年以来我国发电设备装机容量

年 份	1980	1985	1990	1995	1998	2000	2002	2007
装机容量/亿 kW	0.659	0.871	1.379	2.172	2.6	3.14	3.53	7.13

表 7 1994 年主要工业发达国家发电设备装机容量

国 家	美 国	日 本	俄罗斯	德 国	加拿大	法 国	英 国
装机容量/亿 kW	8.031	2.209	2.044	1.212	1.122	1.072	0.689

3) 电压等级、输电线路长度与变电设备容量

目前, 西北电网的电压等级为交流 750kV, 330kV, 220kV, 110kV, 35kV, 10kV, 其他地区电网现有的输变电及配电电压等级为交流 500kV, 220kV, 110kV, (66kV) 35kV, 10kV 以及 ±500kV; 南方电网正在建设 ±800kV 系统; 1999 年我国各电压等级下输电线路的长度, 以及各电压等级下的变电设备容量见表 8。

表 8 1999 年我国 35kV 及以上电压等级输电线路长度及变电设备容量

电压等级/kV	35	66	110	220	330	500	总 计
线路长度/km	281884	60574	190961	121790	7949	22927	686085
变电容量/MVA	178540	42280	324060	280270	12480	80120	917750

4) 缺电问题与城乡电网改造

缺电问题自 1970 年左右至今已困扰我国 30 多年了, 缺电范围之广, 时间之长世所罕见。1998 年随着我国工业告别短缺经济, 各地似乎不缺电了; 但由于我国人均电量实在太低, 因此电力工业在我国实际上仍处于长期短缺的状况, 2002 年以来随着经济的快速发展, 许多地区再一次表现出较为严重的缺电状况。

从表 9 发电量与国内生产总值年增长的对比明显可见, 电力工业长期跟不上国民经济的发展速度, 成为导致缺电的重要原因。另外, 我国在发电、输电、配电方面长期投资比例失调, 电网建设投资太低也是导致电网有电但用户缺电的重要原因。比如美国在发电、输电、配电的投资比例约为 1 : 0.43 : 0.7, 英国约为 1 : 0.45 : 0.78, 日本约为 1 : 0.47 : 0.68, 而我国大规模城乡电网改造前多年间约为 1 : 0.21 : 0.12。近几年来, 国家大规模开展了城乡电网改造, 目的就是试图扭转以往投资比例失调的重要举措, 但由于历史欠账太多, 因此, 电网建设与改造将是一项长期的工作。

表 9 我国国内生产总值(GDP)及发电量年增长率情况比较

年 份	1980—1985	1986—1990	1991—1995	1996—2000	2001	2002
GDP 年增长率/%	10.71	7.78	12.0	8.28	7.3	8
发电量年增长率/%	6.4	8.6	10.1	6.3	5.8	12

至目前, 我国城镇居民生活用电比例虽已有很大提高, 但仍很低。1999 年我国人均电量仅 945kW · h, 人均生活用电量不到 115kW · h。虽然 2020 年我国的年发电量预计可达 36000 亿 kW · h 左右, 但我国 2020 年的人口将达 16 亿左右, 即人均电量也不过 2250kW · h。而 1994 年加拿大人均电量已达 15580kW · h, 美国达 11890kW · h, 俄罗斯达 6130kW · h, 见表 10。因此, 2020 年中国的人均电量依然非常低, 中国电力工业仍需不断发展。

表 10 1994 年中国及各主要发达国家年人均电量

国 家	加拿大	美 国	法 国	俄罗斯	英 国	日 本	德 国	中 国
kW · h/人年	15580	11890	6250	6130	6070	5920	5750	640

5) 中国电力工业展望

“十五”期间, 我国 GDP 年增长率如果达 7%~8%, 则电力的年增长率将达 6%以上; “十五”以后, GDP 及发电量的年增长率将有所降低。2010 年发电量预计可达 25000 亿 kW · h, 2015 年有可能达 30000 亿 kW · h, 2020 年有可能达 36000 亿 kW · h。

从高压输电的角度看, 中国电力工业、电力系统的发展有几条基本国情是改变不了的。首先要大容量输电, 因为缺电; 其次是远距离输电。我国用电中心在东部, 而一次能源中心在西部。我国水电可开发总资源 3.78 亿 kW, 相当于年发电量 1.92 万亿 kW · h, 但 2002 年我国水电装机容量约 8700 万 kW, 仅占可开发量的 23%。火电在陕西、内蒙、山西, 水电在西南(云、贵、川、藏水能蕴藏量占全国的 70%), 几千千米的距离是必须跨越的。因此, 交直流超高压甚至特高压输电在中国是必然的, 势在必行的。

按照世界电力系统电压等级发展的规律, 一个新电压等级可以满足 20 多年的需要, 即国民经济发展 20 多年后, 当对电力的需求增长 4~5 倍时, 应当出现一个新的电压等级

才能保证电力的合理输送,新老电压等级之比一般为 $1.7\sim 3$,大致上翻一番。新电压等级选低了,过不了多少年又要上新电压等级,太浪费;新电压等级选高了,实现起来难度太大,可靠性受到影响。对我国来说,当前要紧的是抓紧开展前期研究,一个新电压等级必须有20多年的前期研究才可能最终实现。

在缺电问题基本得到解决之后,电能质量的提高又将是我国电力系统一项长期而艰巨的工作。这项工作不仅耗时巨大,而且耗资巨大,但同时也可给各种新技术的应用提供广阔的天地。各种后续能源的利用、分散式能源的控制、电力市场化的改革将给我国电力系统带来深远的影响。

3. 高电压、高场强下的特殊问题

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,而且还很不好解决,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。

2) 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。

3) 过电压防护问题

高电压设备上的工作电压已经很高了,设备造价也已很高了。例如,一台500kV、360MVA的电力变压器,2007年的出厂价格约为2600余万元。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。

4) 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。高电压、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 输电线正下方地面的最大场强约 100V/cm ,但随着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 年代初前苏联、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、日等国对动物(白鼠等小型哺乳动物、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, $7\sim 8\text{ kV/m}$ 的场强不大可能影响作物生长。在树顶 $20\sim 25\text{ kV/m}$ 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。

4. 高电压下的特殊现象及其应用

每门学科都有自己的理论、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、汽化、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。



国际特高压输电发展现状

从 20 世纪 70 年代开始,前苏联、日本、美国、意大利等国家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。

前苏联:第一条交流特高压工程的诞生地

前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 段特高压线路,总长度 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。

前苏联发展特高压输电,是由其能源分布和负荷中心位置所决定的。前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前苏联的东部地区。但是,75% 的电力负荷却位于欧洲部分,处于前苏联的西部。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。

前苏联大量研究结果表明,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,前苏联在规划建设埃基巴斯图兹等总装机容量在 2000 万 kW 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,前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,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,取得了大量研究成果,为特高压建设奠定了坚实的基础。1972~1978 年,前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 23787 小时。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 11379 小时。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,证明了前苏联和俄罗斯的 1150kV 特高压输电技术具有较高的运行



可靠性。

1990年,前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kW的输电方案。工程中所采用的直流设备均为前苏联自行研制,并通过了型式试验。

前苏联解体后,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、库尔斯克,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kW。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kW,位于太平洋沿岸的福岛第一和第二核电站分别装机470万kW和440万kW。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年~1978年)围绕输变电技术和设备的调查研究,第二阶段(1978年~1982年)围绕特高压输电技术开展基础性研究,第三阶段(1982年~1985年)围绕输电线路和变电站设备开展实用性试验研究。

在完成上述三个阶段工作的基础上,日本于1988年秋动工建设特高压线路。1992年4月28日建成从西群马开关站到东山梨变电站的西群马干线138km线路,1993年10月建成从柏崎刈羽核电站到西群马开关站的南新泻干线中49km的特高压线路部分。两段

特高压线路全长 187km, 目前均以 500kV 电压降压运行。1999 年完成东西走廊从南磐城开关站到东群马开关站的南磐城干线 194km 和从东群马开关站到西群马开关站的东群马干线 44km 特高压线路的建设, 两段特高压线路全长 238km。1995 年特高压成套变电设备在新榛名变电所特高压试验场安装完毕, 随即进行带电考核。截至 2004 年 6 月底, 特高压设备在 1000kV 电压下累计带电时间达到 1683 天。

日本原计划在 2002 年将建成的特高压线路升压到额定电压试运行。但是随着 20 世纪 90 年代经济泡沫破灭, 以及亚洲金融危机给日本带来的冲击, 日本经济出现负增长, 核电站建设计划推迟, 特高压工程建设也随之放慢, 已建成的特高压线路一直降压运行。

但是, 日本仍对特高压在国内的应用前景持乐观态度。根据日本东京电力公司的预测, 2010 年左右南磐城特高压干线将升压到额定电压运行。

值得关注的是, 为适应本国国情, 满足对特高压设备小型紧凑化的要求, 以及解决地形、气候、污秽等特有问题的需要, 日本在特高压输电方面采用了许多新技术, 包括新材料、新设备和新工艺。关键的技术有: 带分合闸电阻的断路器技术, 可将相对地操作过电压限制到 1.6 倍的先进水平; 高性能的氧化锌避雷器技术, 使变电设备小型紧凑化, 并与开关设备配合限制操作过电压; 带分闸电阻的隔离开关, 有效地限制切断母线时产生的幅值很高的陡波过电压。有利于变电设备的小型化和提高运行可靠性; 高速接地开关技术, 解决了因潜供电弧不能迅速熄灭而影响单相重合闸时间及成功率难题。

另外, 日本人口稠密, 环保要求高, 为了研究公众能接受而经济上又合理的输电技术, 他们针对特高压输电的电磁环境影响开展了深入研究。结果表明, 如果特高压线路采用合理的导线结构和布置方式, 不会对人类生活及其所依赖的生态环境造成危害, 各项环境影响的控制指标甚至可能低于已运行的 500kV、750kV 超高压线路。在特高压线路附近, 人类经常活动区域的电场强度控制为 5kV/m 以下(动植物通常在电场强度 50kV/m 以上才能显现出反应), 对人类几乎没有影响。在线路的磁场影响方面, 发现高达 1.4 毫特斯拉的磁场对实验动物的生存和遗传无影响, 而特高压线路下的最高磁场不到 0.1 毫特斯拉。

其他国家特高压技术研究和应用情况

为了加强电网建设, 满足电力需求, 世界各国积极开展特高压输电研究。除前苏联和日本之外, 美国、意大利、巴西和加拿大等国家也分别建设了特高压试验基地, 开展了特高压理论研究、工程技术研究、电气设备研制和实际模型的试验和考核, 瑞典和德国的制造厂家也积极参与了特高压试验设备的研制。研究所获得的大量成果, 为世界特高压电网发展提供了宝贵的知识财富。

美国:

尽管美国迄今尚未在工程中采用特高压输电技术, 但在特高压输电技术方面进行了深入研究, 并做了大量试验。美国从 20 世纪 60 年代后半期就开展了特高压输电技术的研究。当时, 美国经济经历了将近二十年的快速增长期, 电力工业也随之高速发展, 发电量年均增长率达到 8% 左右, 并预测未来几十年内用电将继续保持平均年增长 6% 以上的强劲势头。为了满足送电需求, 输电电压等级迅速提高, 1969 年美国最高运行电压已达到 765kV 并有向更高电压等级发展的趋势。

美国特高压研究包括两个电压水平, 一个是以美国电力公司(AEP)为代表的 1500kV