

HIGH VOLTAGE

Measurement
Testing and Design

高电压测试与设计

T. J. 格拉尔 A. J. 帕尔曼著 顾乐观 陈先禄等译

335.1

样书
重庆大学出版社

内 容 提 要

本书内容新颖,系统性强,对高电压技术进行了全面论述。全书共分八章。第一章简要地叙述了高电压技术的发展历史、高压电气设备及高压电网中的过电压;第二章详尽地论述了气体、液体、固体及组合绝缘的击穿机理;第三章描述了电场的各种实验和理论计算方法;第四、第五两章叙述了产生和测量高压的方法;第六章介绍了高压电气设备的试验方法;第七章详细地阐述了局部放电测量;第八章叙述了电力设备的设计及高压技术的应用,每章内列有适量的经验数据以供使用。各章末均附有最新参考文献,书尾附有习题及解答供练习和研究。

本书适合作为大专院校研究生和本科生参考教材,对电力、电工界的工程技术人员具有一定的参考价值。

高 电 压 测 试 与 设 计

T.J.格拉尔 A.J.帕尔曼著、顾乐观 陈先禄等译

责任编辑 贾肇武

重庆大学出版社出版

新华书店重庆发行所发行

重庆电力印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.75 字数: 261千

1989年 5 月第 1 版 1989年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—5000

标准书号: ISBN 7-5624-0146-2 定 价: 2.19元
TM·8

译 者 序

为了适应高电压技术领域内教学、科学研究及工业生产不断发展的需要,重庆大学高压教研室组织有关同志合译了《高电压测试与设计》一书。该书由英国都柏林大学电气工程系T.J.格拉尔(T.J.Gallagher)和伦敦大学玛丽皇后学院电子电气工程系A.J.帕尔曼(A.J.Pearmain)共同撰写,于一九八三年出版。该书全面深入地论述了高电压工程物理基础、高电压试验设备和测量技术、高电压设计及其应用,内容新颖广泛,系统性强,适合作为大专院校硕士研究生和高年级本科生的参考教材,对在电力、电工部门从事设计、制造、运行、试验和科学研究的工作人员都具有一定的参考价值。

本书的前言、第一章的部份内容(1.1~1.4)、第四章和第六章由陈先禄同志翻译;第一章的其余部份内容(1.5~1.7)由代玉松同志翻译;第二章由孙才新同志翻译;第三章由朱曦同志翻译;第五章、附录、习题及解答由张金玉同志翻译;第七章由张建辉同志翻译;第八章由刘树凡同志翻译。

全书由顾乐观教授审阅校订,陈先禄、张金玉同志参加校阅工作。在校阅过程中得到重庆大学出版社贾肇武编辑的大力支持和热情帮助。

由于译者水平有限,错漏之处在所难免,请广大读者批评指正。

译 者

一九八八年五月

前 言

本书的目的在于对高电压技术进行全面的论述。在过去的20年里，已经出版了好几本书，但它们仅涉及到本门学科的一些主要分支，并且主要是面向研究人员或设计师的。本书试图将高电压技术的各主要研究课题汇集为一卷。为此对每一分支都给予概要的叙述，并附有深入研究的最新参考文献。本书适合作为大学或多学科工科大学电气工程系最后一年级大学生或一年级硕士研究生的教材。书中的部分内容已用作都柏林大学最后一年大学生一学期和伦敦玛丽皇后学院硕士研究生两学期的课程内容。此外，希望本书对电气工程师们有所帮助，尤其是对那些在公用事业公司中与输配电网络可靠运行有关的工程师们，因为系统的可靠性在很大程度上取决于高电压下绝缘的性能。

本书的每一章仅涉及到学科的一个特定方面，包括内容丰富的参考文献在内可作为一独立的单元来学习。在第一章中，叙述了高电压技术的发展简史，以及高压电网中电气设备的概况。本章结尾描述了由于雷击和开关操作引起的瞬时过电压。第二章详细地阐述了高压电气设备中气体、液体、固体和组合绝缘在强电场作用下的击穿机理。第三章描述估计允许电场强度的各种实验和理论方法。第四、第五章讨论了产生和测量高电压的方法。第六章介绍电气设备的高电压试验。因为局部放电测量是判断绝缘好坏的重要手段，所以在第七章中专门分析这个问题。最后一章包括的内容有高压电力设备的设计和高电压技术的应用。本书的结尾附有供学生解答的习题及其解答。

T.J. 格拉尔 都柏林大学

A.J. 柏尔曼 伦敦玛丽皇后学院

一九八二年六月

目 录

第一章 高 电 压 技 术

1.1 引言	(1)
1.2 电压等级分类	(1)
1.3 高电压的发展历史	(3)
1.4 电网	(5)
1.5 高电压系统中的设备	(6)
1.5.1 同步发电机	(6)
1.5.2 变压器	(7)
1.5.3 断路器	(10)
1.5.4 避雷器	(12)
1.5.5 输电线的屏蔽	(13)
1.5.6 架空线	(14)
1.5.7 电缆	(18)
1.6 过电压	(22)
1.6.1 雷闪放电	(23)
1.6.2 雷电频数	(24)
1.6.3 雷电参数	(26)
1.6.4 行波及其波形	(27)
1.6.5 操作过电压	(28)
1.7 绝缘配合	(29)

第二章 电气绝缘材料

2.1 引言	(32)
2.2 气体的绝缘特性	(33)
2.2.1 电子碰撞电离	(33)
2.2.2 光电离	(33)
2.2.3 负离子的形成	(34)
2.2.4 简化的汤逊击穿理论	(35)
2.3 影响击穿电压的实际因素	(37)
2.3.1 电晕放电	(37)
2.3.2 不均匀电场	(38)
2.3.3 击穿时延	(40)
2.3.4 压缩气体	(40)
2.3.5 真空绝缘介质	(41)
2.4 液体绝缘材料	(42)

2.4.1 变压器油	(43)
2.4.2 绝缘液体的电气参数	(43)
2.4.3 液体的击穿	(46)
2.4.4 合成液体	(47)
2.5 固体绝缘材料	(47)
2.5.1 固体的分类	(47)
2.5.2 固体的击穿	(48)
2.6 液-固体绝缘材料	(52)

第三章 电场描绘

3.1 引言	(54)
3.2 曲线方格: 近似图解法	(54)
3.3 模拟方法	(56)
3.3.1 导电纸	(56)
3.3.2 电解槽	(56)
3.4 解析方法	(57)
3.4.1 拉普拉斯方程的直接解法	(57)
3.4.2 采用保角变换	(58)
3.5 数值方法	(61)
3.5.1 蒙特卡罗法	(61)
3.5.2 积分法	(62)
3.5.3 差分法	(63)
3.5.4 数字方法短评	(65)
3.6 高电压设计中场图描绘的应用	(65)

第四章 高电压的发生

4.1 引言	(67)
4.2 交流电压	(67)
4.2.1 单级升压变压器	(67)
4.2.2 串级变压器	(68)
4.2.3 试验变压器的电压控制	(68)
4.2.4 串联谐振电路	(69)
4.3 直流电压	(70)
4.3.1 半波和全波整流	(70)
4.3.2 倍压器和串级电路	(71)
4.3.3 静电发生器	(72)
4.4 冲击电压	(73)
4.4.1 单级发生器	(73)

4.4.2 多级马克斯 (Marx) 发生器	(75)
4.5 实用的多级发生器	(77)
4.5.1 发生器的额定参数	(77)
4.5.2 发生器的触发	(79)
4.5.3 冲击波的记录	(80)
4.5.4 冲击波的极性	(80)
4.6 冲击电流	(81)

第五章 高电压测量

5.1 引言	(82)
5.2 静电电压表	(82)
5.3 球隙放电	(83)
5.4 用安培表和串联电阻测量电压	(84)
5.5 低压测量设备与分压器	(84)
5.5.1 电阻分压器	(84)
5.5.2 电容分压器	(87)
5.5.3 混合式分压器	(88)
5.5.4 低压测量设备	(88)
5.6 峰值电压测量	(90)
5.7 场磨(感生)电压表	(91)
5.8 电压互感器	(92)
5.9 电流测量	(93)
5.9.1 电流互感器	(93)
5.9.2 分流器	(94)
5.9.3 罗哥夫斯基线圈	(95)
5.9.4 霍尔效应传感器	(95)
5.9.5 法拉第效应电流互感器	(95)
5.10 介质损耗测量	(95)
5.10.1 西林电桥	(96)
5.10.2 测量低损耗的电桥	(97)

第六章 高压试验

6.1 引言	(98)
6.2 试验的种类	(98)
6.3 工频试验	(99)
6.3.1 干耐压试验	(99)
6.3.2 湿耐压试验	(100)
6.3.3 独立电源耐压试验	(100)

6.4 冲击耐压试验	(101)
6.4.1 变压器绕组中的冲击电压分布	(102)
6.4.2 变压器试验	(103)
6.4.3 输电线路绝缘子	(105)
6.4.4 电缆	(108)
6.4.5 断路器	(109)

第七章 局 部 放 电

7.1 引言	(111)
7.2 放电过程	(111)
7.2.1 空隙放电过程	(111)
7.2.2 电极放电过程	(112)
7.2.3 空隙放电模型	(113)
7.2.4 放电能量	(114)
7.2.5 介质损坏	(115)
7.3 放电探测	(115)
7.3.1 可见放电效应	(115)
7.3.2 介质中的功率损耗	(116)
7.3.3 直接电流和电压脉冲方法	(117)
7.3.4 平衡法	(118)
7.3.5 电力设备中的放电测量	(119)
7.3.6 校正方法	(120)
7.4 放电定位	(121)
7.4.1 电方法	(121)
7.4.2 声方法	(122)
7.4.3 其它方法	(122)
7.5 表面放电	(123)
7.6 直流电压系统中的放电	(124)
7.6.1 放电过程	(124)
7.6.2 放电探测	(124)
7.6.3 结论	(125)

第八章 高压设计及应用

8.1 引言	(126)
8.2 高压套管	(126)
8.2.1 普通套管	(126)
8.2.2 分段绝缘套管	(127)
8.2.3 其它设计依据	(128)

8.3 电力电缆.....	(128)
8.3.1 历史问题与解决办法.....	(128)
8.3.2 自给充油电缆设计.....	(129)
8.3.3 高压充油电缆.....	(130)
8.3.4 固体绝缘电缆.....	(131)
8.3.5 附属设备.....	(132)
8.3.6 压缩气体绝缘设计.....	(133)
8.3.7 直流输电电缆.....	(134)
8.3.8 其它电缆设计.....	(135)
8.4 变压器.....	(135)
8.4.1 变压器绝缘材料.....	(135)
8.4.2 绕组设计.....	(136)
8.4.3 冲击电压问题.....	(136)
8.5 断路器.....	(137)
8.5.1 断路器的绝缘.....	(137)
8.5.2 油断路器.....	(138)
8.5.3 空气断路器.....	(139)
8.5.4 六氟化硫断路器.....	(139)
8.5.5 真空断路器.....	(140)
8.6 架空线.....	(140)
8.6.1 导线排列.....	(140)
8.6.2 绝缘子.....	(141)
8.7 应用.....	(144)
8.7.1 静电除尘器.....	(144)
8.7.2 喷漆和粉末涂层.....	(144)
8.7.3 分离矿物.....	(145)
8.7.4 宇宙飞船的动力.....	(145)
8.7.5 高能物理.....	(145)
8.8 静电危害.....	(146)
8.8.1 有害电荷源.....	(146)
8.8.2 有问题的场所.....	(146)
8.8.3 公害的防止.....	(146)
附录1 单级冲击发生器的分析.....	(148)
附录2 电阻器的屏蔽.....	(150)
习题.....	(153)
习题解答.....	(158)

第一章 高 电 压 技 术

1.1 引 言

最初，高电压技术之所以能够得到发展，是因为需要用高电压才能较经济地传输大量的电能。目前，高电压技术已经由能量的输送扩展到包括电工和自然科学在内的许多其它领域。例如，电路分析方法已经被用来预测高压同步发电机、变压器和输电线路的电气特性；要准确地确定电压和电流值，必然需要可靠的测量技术。当用高电压试验方法来确定电力设备的可靠性时，需要高精度的电子仪器来记录快速的瞬变过程。在高电压技术中，物理和化学也起到重要的作用。对于高电压工程师来说，影响绝缘材料电气性能的物理和化学现象具有重要的意义。电气设备可靠性的薄弱环节仍然是绝缘，而材料科学对改进高压装置绝缘系统的设计起着重大的作用。

高电压技术的多学科性质十分明显地在各种不同的生产过程中显示了出来。例如，在环境清洁保护中，它起着重要的作用；静电除尘器每年从工厂和发电厂所产生的烟气中排除掉大量污染空气的烟尘，高压臭氧发生器能够在城市污水通过污水处理装置时清除掉令人讨厌的污水臭气。其它常见的采用高电压技术的静电工艺有喷漆、粉末涂层和静电印刷。医学及科学界的X光设备、电子显微镜等装置以及核研究都需要高压电源。现代电子工业利用高电压技术进行半导体离子注入，为电视机、示波器等提供高压电源。以上这些仅仅是利用高压的一部分工业和工艺。高电压技术的不断发展不仅对电力工业很重要，而且对许多其它的现代工业也很重要。

1.2 电压等级分类

国际电工委员会(IEC,1970年)定义交流超过1000V，直流超过1200V为高压。为便于讨论，本书认为电压超过10000V才算高压。但是，既使这样认为也还将需要修改。目前，用于电力传输的电压已经超过700kV，习惯上将这样高幅度的电压分为若干等级。表1.1列出了这些等级以及在各级范围内最常见的三相交流电压。本书不可能详细讨论仅属于某一电压级范围内的特殊问题，而只能讨论整个高电压技术领域内的一般原理。书中列出的参考文献为进一步专题阅读提供原始的参考资料。

从表1.1中可以看到，国际上的电压等级有些混乱。然而，考察这些数据会发现几个有趣的地方。在不同的国家中，标准电压等级的差异是由于它们不同的最高运行电压值所造成的。每个国家的输电系统都具有最低的和最高的电压值，一般在这样的极值中大约具有20%的偏差。每一系统的额定电压既可以取极限值，也可以取中间值。这就是表1.1中数字出现混乱的原因之一。另外一个原因可能是来自于经济观点，因为制造厂家只有采用与国外竞争者不同的额定电压来设计其产品才能保持他们的既得利益。表1.1中只提到两种频率，显然，要求所有的国家无论是大国还是小国，在频率方面标准化是合理的。否则，电力系统之间的

表1.1 一些欧美国家的标准运行电压（其它如澳大利亚、加拿大和日本等国也采用类似的标准）

电 压 等 级	额 定 线 电 压	
	欧 洲 (50Hz)	美 国 (60Hz)
低 压 (LV)	220/240 V	120 (单相) V
	380/415	208
	650	600
	1000	
中 高 压 (MHV)	5 kV	2.4 kV
	11	6.9
	22	12.47
	33	23
	66	34.5
高 压 (HV)	110 kV	69
	132	115 kV
	156	138
	220	161
超 高 压 (EHV)	275 kV	230
	380	287 kV
	400	345
	800 (苏联)	500
特 高 压 (UHV)	1000~1600kV, 正在研究中	

相互连接就需要贵重的变频设备。

仔细观察将注意到：表1.1中的电压等级大约以2倍的关系跃变。这没有理论上的原因，而只有一些实用和经济上的因素是造成这种阶跃特性的原因。首先出于设计师们的知识和经验，认为现有电压等级的这种翻倍相当安全。其次，在本世纪50~60年代初期，在工业化国家中电力消耗量平均每10年翻一倍，为了满足这种需要，就产生了以不断升高电压来传输电能的动机。采用高电压输电在经济方面的理由极为明显，(翰勒斯1972年)。对于一定功率而言，电压较高，需要的电流较小，因此要求导体的截面较小，从而成本就低。同时，与电流有关的铜耗（通常称为 I^2R 损耗）也会降低。因为这些损耗的费用约占传输电能总费用的3~4%，所以能节约一点都是很有价值的。图1.1清楚地说明，交流系统采用较高的输电电压是经济可行的，因为输电电压水平的提高，传输功率的水平也相应提高。

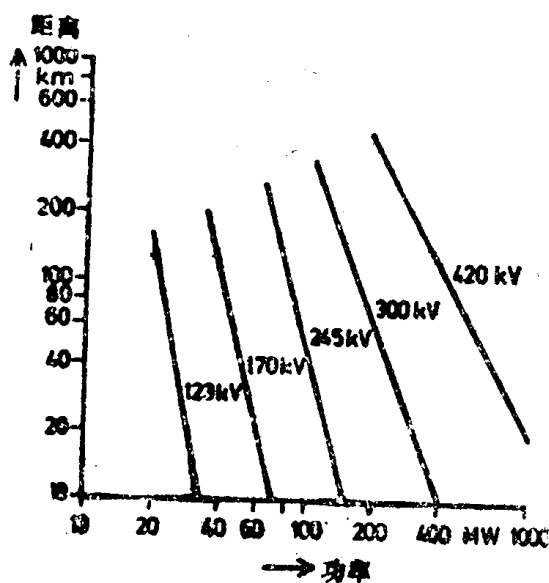


图1.1 经济的交流输电电压和传输功率与距离的关系

1.3 高电压的发展历史

耗电量的显著增长可以通过考查交流电压-交流电流输电系统的发展历史来估计。图1.2说明了向更高电压发展的趋势。1910年左右，采用的电压高达100kV，大约从1920年起，一些更高电压的系统在世界各地出现。大约50MW的功率，传输距离接近50km。在1930~1950年期间，全世界建立了许多水电系统，其运行电压在200~300kV之间，传送功率250MW，传送距离达400km。1954年，380kV的电压被采纳为国际标准，在1960年代期间，传送功率超过1000 MW，距离超过1000km，系统电压先采用550kV，随后采用765kV或800kV。目前

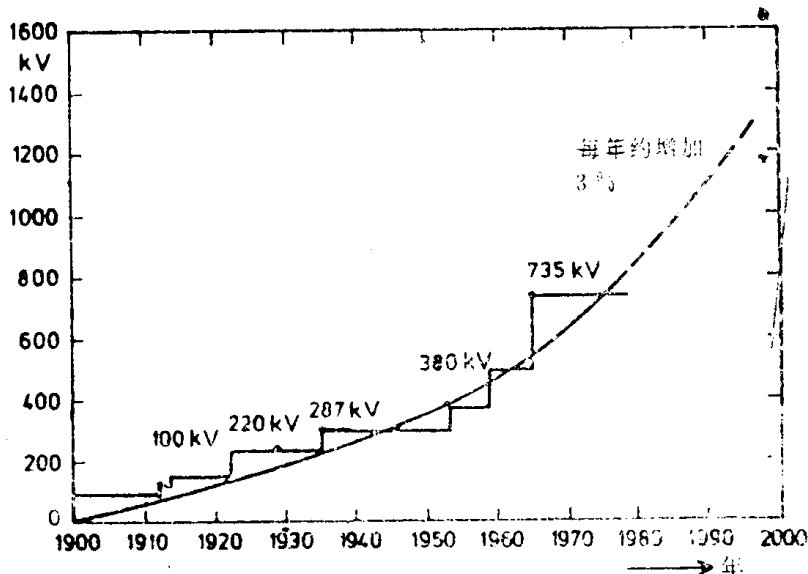


图1.2 交流系统输电电压的发展

研究之中的特高压输电电压超过1000kV，预计传送功率为10,000MW，电压高达1600kV的实验基地已投入运行（布西克和斯特蒙尔1978年；劳埃和查法尼拉1981年；雷特拉克和布尔登1981年）。

最早的一些电源系统采用恒定电压及直流(d.c)来传输和配电。然而，随着变压器的出现，这些直流系统就很快地为交流系统所代替，这是因为采用更高的电压在经济上更具有吸引力。尽管如此，近年来高压直流HVDC输电正在恢

复它早期的运行特点。之所以如此大量地采用直流，是由于开关装置或阀已经获得大的发展，使得从交流变换到直流或者从直流逆变到交流更加容易。早期的阀是汞弧整流器，而现在它已被可控固态整流器（SCR）或可控硅所取代。图1-3列出了这些固态换流器的高可靠性以及其它技术经济上的优点，这些优点使得直流输电在一定条件下比交流输电更加优越。

然而直流输电不是没有缺点，和交流系统不同，沿直流输电线路各点要分接出功率来比较困难，因此，直流线路通常是将电能从发电厂直接送到负荷中心。此外，虽然直流线路费用较低（两根导线代替交流系统的三根导线），但是由于换流设备结构复杂且又昂贵，直流电站的费用却比交流电站的费用要高。正因为如此，存在着这样一个临界距离，在此距离下直流输电比交流输电更经济，由于可控硅额定容量的提高和直流开关设备的发展，这个距离已经减小到500km和800km之间（波夫，1981年。）

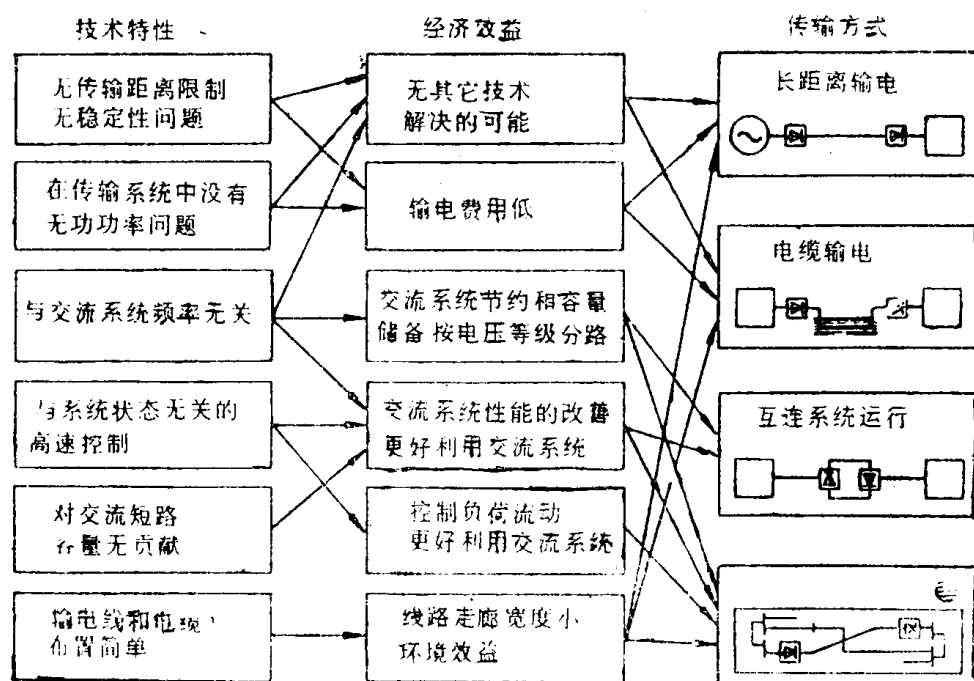


图1.3 高压直流输电的技术特性、经济效益和传输方式

当一条96km的海底电缆在瑞典和波罗的海的戈特兰岛之间敷设完好后，第一个大型直流系统就建成了。这根单芯电缆可以在100kV电压下传递20MW的电能。但是这样大的电流经过地下或海洋会使地下管道产生严重的电解腐蚀并且对通讯线路产生干扰等。由于这个原因，绝大多数现代直流输电线都是双极的。公共的接地电极只在导线间传导一些不平衡电流，在正常运行时，此电流值很小。另外，输电铁塔容易架设两根导线，可以成倍地传输电能，如果有一根导线故障，另外一根还能够带上一半的负荷。

大容量的架空双极设备包括：（1）在美国的加利福尼亚和俄勒冈之间的太平洋联络线，（1970年），它以±400kV电压传输1440MW功率，距离超过1337km；（2）加拿大尼尔森河工程（1973年，1976年），具有两极导线，以±450kV电压运行，每极导线传送1620MW的功率；非洲的加波拉巴萨系统（1975-1979年），它以±533kV的电压传输1920MW的功率，距离超过1400km（1974年），考虑到线路长，加强城市电网及交流系统间的非同期连接等

问题，直流系统仍将是交流系统的主要替代对象。

1.4 电 网

把电压水平分成如表1.1所示的不同等级，就可组成供电系统的总线路图。一个典型系统的简单线路图如图1.4所示。现代供电网络通常是很复杂的，其中有许多发电站，不同的电压等级和大量的联接节点及配电节点。在发电站，原动机提供机械能，通过同步发电机把它转变成15kV左右电压的电能。为了减少输电损耗，使用变压器把这个电压升高到高压或超高压水平。“高压”和“超高压”的区分定在300kV左右。在这个电压以下，输电系统的绝缘主要由雷电过电压确定，但300kV以上由操作过电压确定绝缘水平（见1.6）。最优输电电压主要是由输送的功率和传输的距离所确定的。长线路（100km~1500km）输送大量功率，一般运行在超高压水平，这是因为，这样线路截面最小，功率损耗也最小。短线路通常位于或靠近大城市区域，可以运行在高压或超高压水平，在这些情况更加强调高电流定额，致力于使高压开关和变电站的造价降到能接受的限度。由布思(Booth et al. 1962年)的一篇经典性论文中，详细说明了英国把原有的275kV系统提高到400kV的原因。

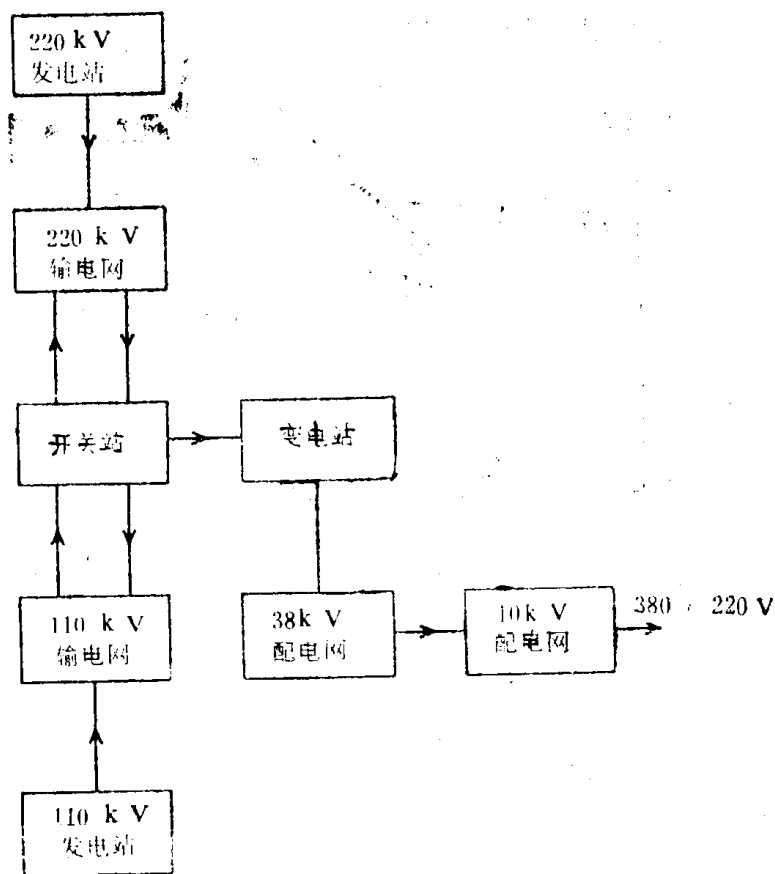


图1.1 220kV电源系统

高于220kV的输电电压与其它发电站构成的系统相连接

图1.4的输电系统使用了开关站去联接不同的发电厂，使电力流向诸如城市，乡镇和大

工业区之类的负荷中心。在这些中心，电压被降下来（通常是38kV或66kV的中等值），电力被送入配电系统（图1.4）。在配电系统的变电站，进一步把电压降至10kV供给附近的网络。这些网络又有另外的变电站，这些变电站把电压降至380/220V的常用低压(LV)，提供给直接邻近的用户。顺便说一下，欧洲的220~240V电压水平与更低更安全的美国120V标准比较，这种电压使家庭用户触电和经常发生死亡的情况更为严重，是不太理想的。在Weedy（1979年）的书中全面地介绍了电力系统的问题。

1.5 高压系统中的设备

高压电力系统设备的特性及其运行将在第8章详细介绍。而我们认为，首先，对高压技术的初学者介绍这些设备的一些重要内容是有益的。图1.5是同步发电机、电力变压器、开关装置和输电线路之间一种可能的接线方式。图1.5仅画出了主要元件，而控制、仪表设备，如电流和电压互感器，继电器、电缆和串、并联电抗器都给省略了。

1.5.1 同步发电机

在1970~1980年的十年间，由于容量在一百万至二百五十万千瓦的核电站的发展，需要由蒸汽轮机驱动的旋转发电机（同步发电机）的参数有相应的发展(图1.5中，发电机由字

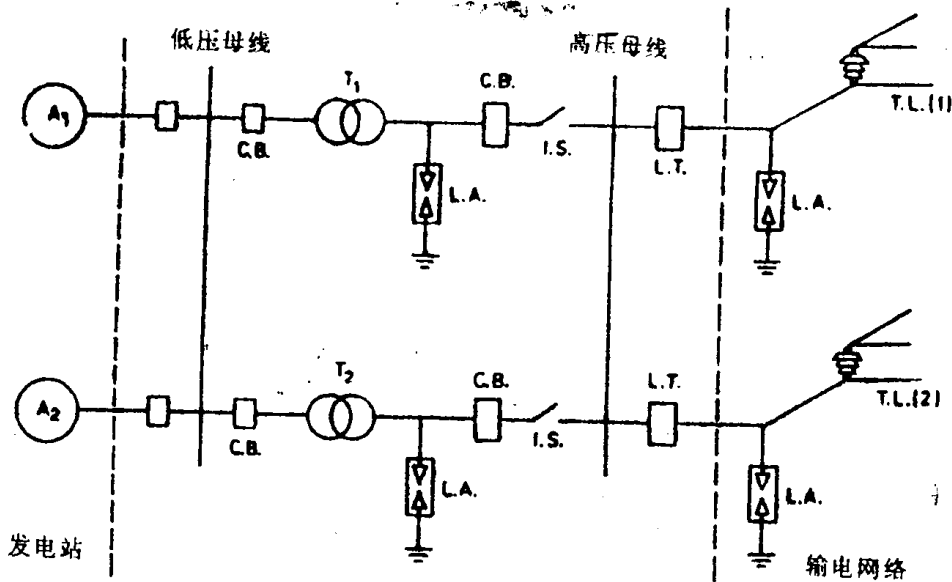


图1.5 高压电网的元件

A——汽轮同步发电机；CB——断路器；T——变压器；LA——避雷器；IS——隔离开关；LT——用于通讯的线路阻波器；TL——输电线路。

母A表示)。现在已安装了单机容量大于1000MVA的发电机，最大为由Kraftwerk Union制造的单机容量一百五十万千瓦的汽轮交流发电机，该机已运行于西德Biblis核电站。这些大型同步发电机是三相四极发电机，工作电压一般在15kV~24kV之间。利用强制冷却方法，改进定子和转子的设计，工程师们几乎把同步发电机的性能提高三倍而不增加其尺寸。发电

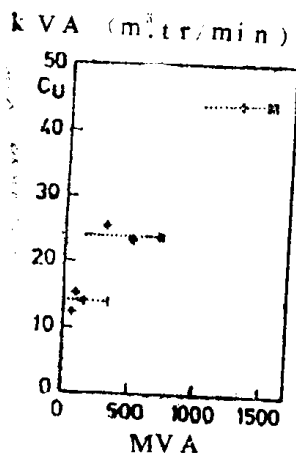


图1.6 利用系数与交流发电机功率的关系

机每千克重量功率输出的增益是非常重要的，这是因为不但材料省，而且通过公路和铁路把发电机从制造厂运到发电站的过程要求限制其重量和尺寸，(可以得到缓解)。机器冷却效果的参数由图1.6所示，图中，利用系数 C_u 是功率的函数， C_u 是单位体积转子对应的力矩值，并作为机器性能的一个指标。图1.6的第I级 C_u ，相当于用3bar(巴)*低压氢气半直接冷却发电机定子和间接冷却转子，第II级相当于用5巴的高压氢气直接冷却定子和转子。图1.6的第三级为1330MVA发电机用6.5巴氢气直接冷却转子，而定子线圈用水内冷。图1.7为1330MVA汽轮发电机的照片。

1.5.2 变压器

1980年在欧洲安装的发电机容量大约是800万千瓦。相应增加的变压器容量几乎是发电机的七倍。这给各工业国家提供了投入运行变压器的情况，也显示了变压器在电力工业中的重要性和举足轻重的地位。

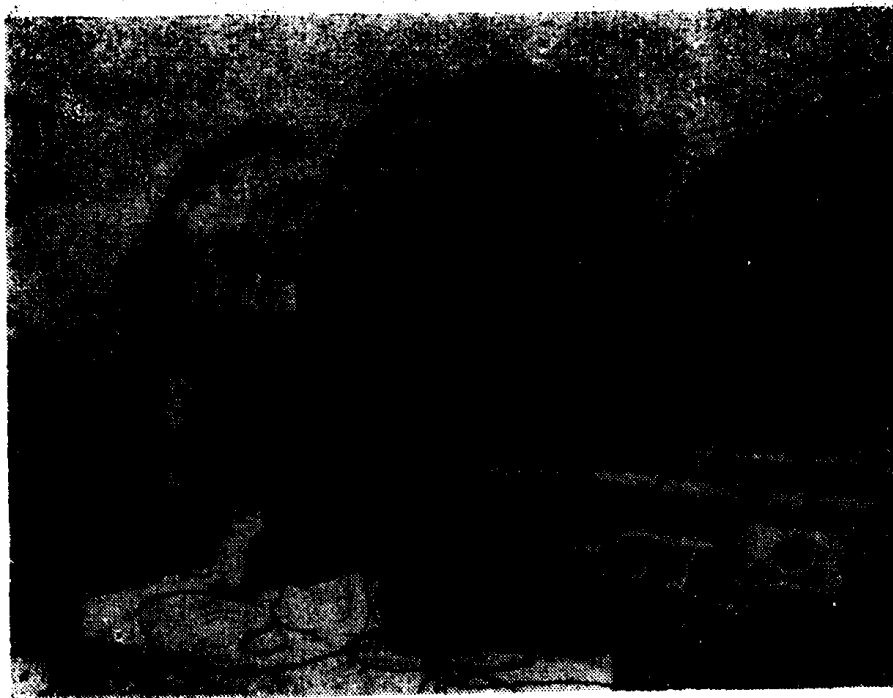
在图1.5中，变压器用字母T表示。变压器用在要改变电压的任意地方；现代单台变压器的电压、电流、功率的额定值分别超出700kV、20kA和1GW(一百万千瓦)。用于高压电力系统的变压器有两个基本类型：电站型变压器把同步发电机的输出功率以一个适当高的电压输往架空线，变电站型变压器用于联接不同电压等级的输电网络。因为变压器无运动部件，变压器的效率接近100%。

很多教科书都讲了变压器问题，学生完全熟悉其基本运行原理和等值电路等问题。这里只讲一些电力变压器的特性，在数量不多的变压器问题专著中，这些问题一般都被忽略了。几乎所有电力变压器的低压绕组(LV)都是三角形接线，而高压侧(HV)作星形接线。这种联接方式的高压绕组允许有一个改变电压的抽头，假如只有一个抽头的话，一般是装在电压较低，靠近通常接地的中性点附近。抽头是按照满负荷时电压在允许变化限度内而确定的。铁芯绕组的排列方式选择取决于需要的电感值。有一种绕组结构叫做所谓的双同心绕组，其中高压绕组分为两部分，一部分在内，另一部分在外，而低压线圈夹在其间。然而必须在绕组各部分之间提供足够的绝缘。制造大容量变压器的厂家现在一般采用密封形绕组，这样就更容易实现大规模生产技术，减少变压器总体尺寸和易于拆开修理。

虽然在英国一台三相400kV、600MVA、未注油时大约重 $2.3 \times 10^5 \text{kg}$ 的变压器实现了整体运输，但是与同步发电机一样的运输困难，限制了电站型变压器的尺寸，于是人们经常用三台相同的单相变压器按一定方式排列和结线，在现场组成三相变压器组。在事故的时候，这种组合变压器能把停电时间减到最少，这是因为其中一个损坏的变压器可很快地由备件代替。

变压器的连续运行需要自然冷却或强制循环油冷却，这些强制冷却是通过油-空气，或油-水方式进行热交换的。制造厂家用四个字母代表每一种冷却方式：前两个字母表示油冷却，后两个字母表示外冷却的中间介质，即空气或水。表1.2列出了按额定容量增加顺序排列的变压器冷却方法。对于大型设备使用OFAF或者OFWF之一，后一种方法比较先进，因

* 1bar(巴) = 10^5Pa



(a) 定子。



(b) 转子。

图1.7 1330MVA汽轮同步发电机

为只需要较小的热交换器，在发电站冷却水也是容易得到的。冷却方式本质上并不是造成变压器容量增长的根本原因。图1.8显示，一定外形尺寸的变压器额定容量从1940年~1970年