



高压电工基础

肖如泉 王诗雪 何金良 阳 然 编著

G A O Y A D I A N G O N G
J I C H U



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高压电工基础

肖如泉 王诗雪 何金良 阳 然 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

这是一本介绍高电压技术基础的书。从人们对高压电工技术的认识规律出发,了解高电压技术在国民经济中的重要作用,本书从以下几方面进行介绍:绪论部分介绍了我国高电压的一些情况;第一篇叙述了电力系统过电压的产生、传播规律和防护;第二篇讲述了高电压绝缘,内容包括气体、液体、固体和组合绝缘;第三篇对高电压试验技术作了较全面的介绍,并对一些新技术作了一些说明;第四篇介绍了高电压的安全问题。

本书可作为高等学校电工类专业的教材,亦可供电工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压电工基础 / 肖如泉等编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013. 1
ISBN 978-7-5170-0535-3

I. ①高… II. ①肖… III. ①高电压—电工技术
IV. ①TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第008836号

书 名	高压电工基础
作 者	肖如泉 王诗雪 何金良 阳然 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.75印张 448千字 2插页
版 次	2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	56.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

从20世纪末到21世纪初，我国经济发展迅速，有人预言，21世纪可以称为中国的世纪，在电力工业方面，我国也有了新的发展，尤其在高电压输电方面，最高运行电压已提高到了特高压的档次。由于我国西部资源丰富，而东部地区又非常需要电能，所以必需用高压输电的方式，将电能供给东部地区，交流输电电压由原来的500kV升高到750kV、1000kV，直流输电电压由±500kV升高±800kV（这也是世界之最佳的输电电压）。由于输电电压的提高，给我国的电力系统、电力制造部门提出了更高的要求。

为了保护环境，减少大气污染，大量的风电，太阳能发电，以及核电等也投入到电力工业的行列，使电力工业有了更大的发展。

高电压技术除在电力工业运用广泛，在医疗、机械加工、环境保护及其他高新技术中都得到了广泛的应用，因此形成了高压电工技术的学科。十多年前，作者曾编写《高压电工学》一书，经多所高校使用后的反映和电力系统技术人员使用情况来看，该书深入浅出，符合人们对高电压技术的认识规律。虽然反映较好，但经过十多年的发展，我国国家标准也有了一些变化，另外，在内容上也需要作一些修改和补充，且因本书的内容是高电压技术的经典理论和基础的知识，所以，将本书更名为《高压电工基础》。

《高压电工基础》是按人们对高电压的认识规律来编写的，其绪论部分介绍了我国高压电力系统中高电压的情况，并论述了为什么要用高电压输电，当输电距离越远，输送的功率越大时，其输电电压将更高，同时还介绍了我国电力系统输电电压的等级。第一篇着重论述了过电压的概念，什么是过电压，过电压是怎么产生的，过电压有什么传播规律，过电压如何防护。第二篇介绍了高电压绝缘，为了在正常工作电压或有过电压情况下保证电力系统正常运行，必须要有可靠的绝缘，否则就不能保证电力供应。本篇介绍了绝缘的基本知识，还论述了气体绝缘、液体绝缘、固体绝缘的击穿理论，由于实际产品都是由各种绝缘组合而成的，还介绍了组合绝缘（电力电容器、电力变压器、高压绝缘子）的情况。第三篇论述了高电压试验技术，并介绍了各种电气设备绝缘的试验方法，其中还包括无破坏型的检查试验，带有破坏性质的耐受试验和击穿试验，各种设备的绝缘必须按照有关的国家标准，

经过严格的试验方能投入电力系统运行。该篇还论述了高电压试验设备和测量设备。第四篇介绍了高电压的人身和设备安全问题，安全问题必经强调，安全距离，电磁环境都是很重要的。

作者希望《高压电工基础》一书能在 21 世纪新形势下用作高等学校电工类专业的教学用书，亦可用于电工技术工程科技人员的参考用书，本书在编写过程中得到了北京市天润中电高压电子有限公司及高电压技术研究所的支持，并提供了许多有关资料，为出版做出了突出贡献，在此衷心的感谢。

由于作者水平有限，难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2012 年 10 月

目 录

前言

绪论	1
第一节 电的优越性	1
第二节 高电压应用的必要性	2
第三节 高电压技术在电力工业中的应用	2
第四节 高压电工基础的主要任务	12

第一篇 过 电 压

第一章 过电压的产生	17
第一节 过电压的概念	17
第二节 过电压的种类	18
第三节 雷电的形成与雷电参数	19
第四节 雷电过电压	22
第五节 有关雷电过电压的几个重要参数	26
第六节 内部过电压	28
第二章 过电压波传播的规律	38
第一节 行波在均匀无损单导线中传播的规律	38
第二节 行波的折射与反射及彼德逊法则	46
第三节 行波通过电感和旁过电容	52
第四节 行波通过其中一有限长线段时的折、反射	55
第五节 行波在无损平行多导线系统中传播的基本规律	57
第六节 电力系统过电压研究方法简介	60
第三章 过电压的防护	61
第一节 过电压防护措施	61
第二节 输电线路的防雷保护措施	73
第三节 发电厂和变电所的防雷保护	75
第四节 变电所内防御侵入波的措施	76
第五节 变压器的防雷保护	78
第六节 旋转电机的防雷保护	79
第七节 内部过电压的防护措施	80
第八节 低压弱电设备的防雷过电压保护	83

第二篇 高电压绝缘

第四章 电介质的基本知识	88
第一节 电介质、电介质的极化	88
第二节 介电常数	91
第三节 电介质的电导	93
第四节 电介质的能量损耗	95
第五节 对电介质性能的全面要求	97
第五章 气体绝缘	100
第一节 气体中带电质点的产生与消失	100
第二节 均匀电场的放电和放电理论	102
第三节 不均匀电场的放电	107
第四节 在雷电波、操作波作用下气体的放电	111
第五节 沿固体介质表面的放电	113
第六节 影响气体放电的因素	116
第七节 提高气体间隙击穿电压和沿面闪络电压的措施	123
第六章 液体绝缘	130
第一节 变压器油及其特性	130
第二节 变压器油的击穿理论	132
第三节 影响变压器油击穿的主要因素	132
第四节 提高变压器油击穿电压的措施	134
第七章 固体绝缘	136
第一节 固体绝缘的击穿理论	136
第二节 影响固体绝缘击穿的因素	138
第三节 提高固体绝缘击穿电压的措施	139
第八章 组合绝缘	140
第一节 电力电容器	140
第二节 电力变压器	146
第三节 高压绝缘子	154
第九章 电力设备试验电压的确定	171

第三篇 高电压试验

第十章 无破坏型试验	175
第一节 绝缘电阻的测量	175
第二节 泄漏电流的测量	178
第三节 介质损耗因数 ($\tan\delta$) 的测量	180

第四节	局部放电的测量	187
第五节	绝缘油的试验	191
第十一章	绝缘的耐压试验	195
第一节	交流耐压试验	195
第二节	直流耐压试验	206
第三节	冲击试验	219
第四节	雷电截波的产生	237
第五节	操作波的产生	238
第六节	冲击电流试验	239
第七节	高频高压试验与试验装置	239
第十二章	电气设备绝缘试验的发展趋势	244
第一节	在线监测技术	244
第二节	设备运行状况在线诊断和分析的专家系统	245

第四篇 高电压的安全

第十三章	人身安全和安全电压	248
第一节	人体阻抗	248
第二节	安全电压	249
第十四章	安全距离和接地	253
第一节	安全距离	253
第二节	接地与接零	253
第十五章	安全用具	255
第一节	验电器具、操作杆、放电杆	255
第二节	绝缘手套、绝缘靴及其试验	256
第十六章	高电压试验的安全	258
第十七章	安全教育和培训	261
附录 1	球隙放电电压	262
附录 2	《电力设备预防性试验规程》 (DL/T 596—1996、Q/CSG 10007—2009) 节选	266
参考文献	291

绪 论

随着国民经济的飞速发展，高电压技术已得到越来越广泛的应用，尤其在电力工业部门，高电压技术具有举足轻重的地位。水力、火力、核能以及其他形式的能量大都要转换成电能并升高电压以后进行传输。传到用户后，再把电压降下来方能使用。由于电力工业及高新技术的发展，致使高电压技术形成了一门与电力工业及高新技术紧密相连的而又具有一定独立性的学科。另外，还在生物工程及生物医疗仪器、水果保鲜、石油开采、环境治理等高新技术领域得到越来越广泛的应用，因而形成了一门高压电工学科。

第一节 电的优越性

先从电力工业来说，自然界有许多种能源，如地下的煤矿、天然气、石油；地上的水能，如我国的长江、宜昌的葛洲坝、三峡等；还有风能、核能等。诸多能源，一般的来说，不太好直接利用，即使利用，也要经过不少的运输环节。如非常丰富的长江水力资源，每天都川流不息，但如何利用它呢？很显然，只有通过水轮发电机，发出电以后，方能得到利用；又如煤，开采出来以后，一方面要运输，另外，也不能到处用烧煤来转换成别的能量，只有将煤燃烧，使之变成电能，方能方便使用。所以，诸多能源都是转换成电能以后方被人们更好地利用。那么电能有什么优越性呢？可以归纳为：

(1) 便于传输。以煤为例，煤的产地一般离工业中心及大城市比较远，要用工具来运输，这样要用许多运输工具，如火车、汽车、船只等；而电能则不需要，只要架起几根输电线就全代替了。

(2) 便于转换。以水力资源为例，假若要把水力资源直接变成热能或机械能，是很难想象的。而电能却能很方便地转换成其他形式的能量，如转换成热能（电炉子、电热毯、电饭煲、电炒锅等），也可转换成机械能，如用马达（电动机）将电能变成机械能，然后可以带动机床的运动，电气化火车的运转等。当然还可以转换成其他形式的能量，如光能、声能等。

(3) 便于控制。从历史上也可以知道，水、火如猛兽，像森林之火、洪涝灾害等，这些都很难被人们控制。而电能却可以由人们很好地控制它，像电灯，只要有一个开关，就可以很方便地控制，有的还采用了调光的设备，可实现自动或半自动控制光强。

仅从以上三个方面，人们可以看到，电能是何等优越的能源啊！它既容易传输，又便于转换，还能被人们控制。所以，电能得到了广泛的应用，而且多数能源，大都是先转换成电能以后，通过传输、转换，再被人们利用的。

第二节 高电压应用的必要性

从上节可知，电有许多优越性，所以得到了广泛的应用。在 20 世纪初，人们发明了发电机以后，只在小范围内使用，那时电压很低。随着电力工业的发展，人们就想把电能输送到较远的地方去使用。尤其像有丰富资源的地方，如葛洲坝水利枢纽，大型产煤基地（山西—内蒙古地区），总是将水力资源和火力资源变成电能以后，输送到几百甚至几千公里以外的地方去使用。假若采用很低电压来输送的话，电能相当大一部分被线路损耗掉，很难传输到远方。下面举一简单的例子来说明，假若有一条输电线路，如图 0-1 所示。

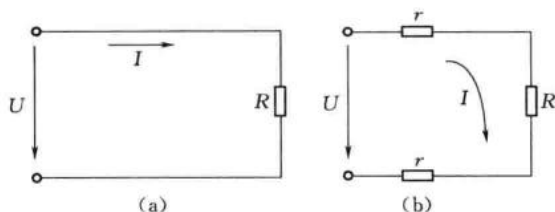


图 0-1 输电线路示意图

(a) 输电线路；(b) 等值电路

R —负载电阻； r —导线电阻

先假设电压 $U=500\text{V}$ ，电源容量可输出 100kVA ，输电线的长约 $1\sim 2\text{km}$ ，其电阻 r 约为 1Ω ，其等值电路如图 0-1 (b) 所示，此时线路的电流可达

$$I = \frac{100 \times 10^3}{500} = 200 \text{ (A)}$$

而输电线电阻 r 上的压降将达到 $2r \times I = 400\text{V}$ ，很显然，大部分电压将被降到输电线上去了，而负载电阻 R 却只能得到

100V 的电压，这是不可取的。

假若我们把输电线路的电压提高，同样输出 100kVA 的功率，我们把电压提高到 10kV ，那么线路将通过 10A 的电流，输电线上的压降将只有 $2r \times I = 20\text{V}$ 。这样，负载电阻 R 上的电压将大大提高了。也就是说，大部分电能就可以输送到用户了。

另外，从许多高新技术领域来看，高电压技术也是必不可少的。如正负电子对撞机，要产生高速正、负电子对撞，实际上就是一套利用高电压产生高速正、负电子对撞的机器。又如，目前医疗器械中经常使用的体外碎石机，也是利用高电压技术，将优质的脉冲电容器充以直流高压以后，产生放电，形成强烈的冲击电流波，将此种强烈的波聚焦到人体的结石部分，使人体内的结石震碎，再想法从人体中排出，这样大大减轻了病人的痛苦。从以上可以看出，高电压技术得到了广泛的应用，尤其在电力工业领域中，若没有高电压技术，也就谈不上电力工业了。

第三节 高电压技术在电力工业中的应用

一、交流高压技术的应用

电力工业中，高电压技术非常重要，20 世纪以来，由于用电量剧增，人们利用各种能源转换成电能，然后传输到各个用户。在我国，水力发电、火力发电、核能发电等非常普遍。如三峡的开发，使长江水进一步为人们所利用。巨大的能量转换成电能以后，只有

通过高电压方能传到各地用户。














表 0-1 列出了输电的电压、输电容量和输电距离的一组数据。

表 0-1 额定电压、输电距离与传输功率的关系

额定线电压 (kV)	传输功率 (kW)	输电距离 (km)
6	100~1200	4~15
10	200~2000	6~20
35	2000~10000	20~50
110	10000~50000	50~150
220	100000~500000	100~300
330	200000~1000000	200~600

对于更高的电压可用图 0-2 来表示。从表 0-1 和图 0-2 可看出, 当输电距离越远, 输电的容量越大时, 输电的电压就越高。

表 0-2 常用电力设备名称和代号

名 称	符 号	代 号
发电机		G
电力变压器		T
断路器		QF
隔离开关		QS
避雷器		F
电流互感器		TA
电压互感器		TV
电力电容器		C
熔断器		FU
电力电缆 (单线)		W
电力电缆 (三线)		W
电抗器		L
金属氧化物避雷器		MOA

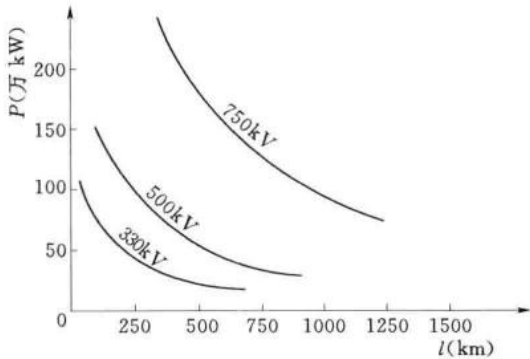


图 0-2 输电电压与输电距离和
输电容量的关系曲线

我国是一个幅员辽阔的国家，我国有些什么样的电压等级呢？目前我国国家标准规定了以下的电压等级：3kV*、(6kV)、10kV、(20kV)、35kV、60kV、110kV、220kV、330kV、500kV (*表示该等级的应用逐渐变少了)。

由于我国电压等级比较多，在考虑不同电压等级的问题时，将电压分成几个段来考虑，一般可分成：220kV 以下的高电压为一般高压，330kV 以上称之为超高压，750kV 以上称之为特高压。

在电力系统中，若选用不同的电压等级，需要有不同的电压等级的电力设备，如电力变压器、电力电容器、断路器等。这些设备在电力系统中，往往用不同的符号来代替。表 0-2 仅介绍几种常用电力设备的符号和代号。

前面叙述了我国电力系统的电压等级及一般常用的电力设备。这些电力设备在该设备标称电压下工作时，除了在额定工作电压下能正常工作以外，还会有些什么样的电压作用呢？假若这些电压比正常工作电压还低的话，不会对正常运行的电力设备绝缘构成什么威胁；假若有些电压比正常工作电压高，有时甚至高很多的话，很显然，对电力设备的绝缘将构成严重的威胁，甚至发生击穿的现象，这样，电力设备就无法运行了。为此，我们要研究电力设备上到底会有些什么电压作用。由于超过电力设备正常工作电压的那些电压，对电力设备绝缘将会造成危害，也是我们高压电工基础中需要重点研究的问题。我们将它们取名为过电压。过电压到底包括哪些呢？人们经过多年的测量、分析和研究，一般可以分为两个方面：一方面是电力系统外部侵袭来的称之为外部过电压；另一方面是电力系统内部产生的称之为内部过电压。由于这两种过电压的形成、产生不一样，它们的波形也是不一样的。至于过电压的形成、种类、波形等，以后的学习中将会学到，在此就不详叙了。为了能满足电力系统的安全运行，所有电力设备都要达到一定的绝缘强度，也就是说，不但要满足长期正常工作电压的作用，也要满足当系统中出现外部及内部过电压时，有一定耐受电压的能力。当然，对这个能力不能要求太高，因为要求太高了，会大大增加电力设备的体积、重量和成本。假若耐受电压的能力太低了，当电力系统出现了过电压时，电力设备很容易损坏，影响电力系统的正常运行，将会给国民经济带来重大的损失，甚至是不可估量的损失。高电压工作者采用了一些限制过电压的措施，使电力系统中在不同电压等级下，外部及内部过电压限制在电力设备最大承受的范围内。只要电力设备能通过一定过电压的试验，保证电力系统的正常运行。所以，国家标准规定了不同电压等级的电力设备的耐压的试验值，如表 0-3、表 0-4 所示。

在表 0-6、表 0-7 中，规定了各种电力设备的试验电压值，至于各种试验电压所采用的波形、幅值、试验和测量方法等，规定了大于 1kV、小于 252kV 和大于 252kV 电气设备的绝缘水平，在以后的章节中，将陆续向大家介绍。

表 0-3

各类设备的雷电冲击耐受电压

单位: kV

系统 标称电压 (有效值)	设备 最高电压 (有效值)	额定雷电冲击(内、外绝缘)耐受电压(峰值)						截断雷电冲击 耐受电压 (峰值)
		变压器	并联 电抗器	耦合电容器、 电压互感器	高压电力 电缆 ^②	高压电器	母线支柱 绝缘子、 穿墙套管	变压器类设 备的内绝缘
3	3.5	40	40	40	—	40	40	45
6	6.9	60	60	60	—	60	60	65
10	11.5	75	75	75	—	75	75	85
15	17.5	105	105	105	105	105	105	115
20	23.0	125	125	125	125	125	125	140
35	40.5	185/200 ^①	185/200 ^①	185/200 ^①	200	185	185	220
		325	325	325	325	325	325	360
66	72.5	350	350	350	350	350	350	385
		450/480 ^①	450/480 ^①	450/480 ^①	450	450	450	530
110	126	550	550	550	550			
		850	850	850	850	850	850	950
220	252	950	950	950	950 1050	950	950	1050
		1050				1050	1050	1175
330	363	1175	1175	1175	1175 1300	1175	1175	1300
		1425			1425	1425	1425	1550
500	550	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1675
			1675	1675	1675	1675	1675	

① 斜线下之数据仅用于该类设备的内绝缘。

② 对高压电力电缆是指热状态下的耐受电压值。

表 0-4

各类设备的短时(1min)工频耐受电压(有效值)

单位: kV

系统标称 电压 (有效值)	设备最高 电压 (有效值)	内、外绝缘(干试与湿试)				母线支柱绝缘子	
		变压器	并联电抗器	耦合电容器、高压 电器、电压互感器 和穿墙套管	高压 电力电缆	湿试	干试
1	2	3 ^①	4 ^①	5 ^②	6 ^②	7	8
3	3.5	18	18	18/25		18	25
6	6.9	25	25	23/30		23	32

续表

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	内、外绝缘 (干试与湿试)				母线支柱绝缘子	
		变压器	并联电抗器	耦合电容器、高压 电器、电压互感器 和穿墙套管	高压 电力电缆	湿试	干试
10	11.5	30/35	30/35	30/42		30	42
15	17.5	40/45	40/45	40/55	40/45	40	57
20	23.0	50/55	50/55	50/65	50/55	50	68
35	40.5	80/85	80/85	80/95	80/85	80	100
66	72.5	140	140	140	140	140	165
		160	160	160	160	160	185
110	126.0	185/200	185/200	185/200	185/200	185	265
220	252.0						
		360	360	360	360	360	450
		395	395	395	395	395	495
					460		
330	363.0	460	460	460	460		
		510	510	510	510 570		
500	550.0						
		630	630	630	630		
		680	680	680	680		
				740	740		

注 表中给出的 330~500kV 设备之短时工频耐受电压仅供参考。

① 该栏中斜线下的数据为该类设备的内绝缘和外绝缘干状态之耐受电压。

② 该栏中斜线下的数据为该类设备的外绝缘干耐受电压。

表 0-5

电力变压器中性点绝缘水平

单位: kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	中性点接地方式	雷电冲击全波和 截波耐受电压 (峰值)	短时工频耐受电压 (有效值) (内、外绝缘,干试与湿试)
110	126	不固定接地	250	95
220	252	固定接地	185	85
		不固定接地	400	200
330	363	固定接地	185	85
		不固定接地	550	230
500	550	固定接地	185	85
		经小电抗接地	325	140

表 0-6 电压范围 I ($1\text{kV} < U_m \leq 252\text{kV}$) 的设备的标准绝缘水平

单位: kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定雷电冲击耐受电压 (峰值)		额定短时工频 耐受电压 (有效值)
		系列 I	系列 II	
3	3.5	20	40	18
6	6.9	40	60	25
10	11.5	60	75 95	30/42 ^③ ; 35
15	17.5	7.5	95 105	40; 45
20	23.0	95	125	50; 55
35	40.5	185/200 ^①		80/95 ^② ; 85
66	72.5	325		140
110	126	450/480 ^①		185; 200
220	252	(750) ^②		(325) ^②
		850		360
		950		395
		(1050) ^②		(460) ^②

注 系统标称电压 3~15kV 所对应设备的系列 I 的绝缘水平, 在我国仅用于中性点直接接地系统。

- ① 该栏斜线之下数据仅用于变压器类设备的内绝缘。
 ② 220kV 设备, 括号内的数据不推荐选用。
 ③ 为设备外绝缘在干燥状态下之耐受电压。

表 0-7 电压范围 II ($U_m > 252\text{kV}$) 的设备的标准绝缘水平

单位: kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定操作冲击耐受电压 (峰值)					额定雷电冲击 耐受电压 (峰值)		额定短时工频 耐受电压 (有效值)
		相对地	相间	相间与相 对地之比	纵绝缘 ^②		相对地	纵绝缘	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ^③
330	363	850	1300	1.50	950	850	1050	见 4.7.1.3 条 的规定	(460)
		950	1425	1.50		(+295) ^①	1175		(510)
500	550	1050	1675	1.60	1175	1050 (+450) ^①	1425		(630)
		1175	1800	1.50			1550		(680)
							1675	(740)	

- ① 栏 7 中括号中之数值是加在同一极对应相端子上的反极性工频电压的峰值。
 ② 纵绝缘的操作冲击耐受电压选取栏 6 或栏 7 之数值, 决定于设备的工作条件, 在有关设备标准中规定。
 ③ 栏 10 括号内之短时工频耐受电压值, 仅供参考。

二、直流高压输电的应用

随着国民经济的发展,交流输电虽能满足电力工业的需要,但也存在一些不足之处,如造价高、线路损耗大,对于用电缆输电时,很不经济。因此,出现了高压直流输电方式,虽然直流输电有一定难度,但有许多优点,本书对直流输电作一简单的介绍。

(一) 直流输电的基本原理

直流输电的基本原理如图 0-3 所示,它表示一个简单的直流输电系统。



图 0-3 简单直流输电系统原理图

图 0-3 中包括两个换流站 CS_1 和 CS_2 及直流输电线路。两个换流站的直流端分别接在直流线路的两端,而交流端则分别连接到两个交流电力系统 I 和 II。换流站中主要装有换流器,其作用是实现交流电与直流电的相互转换。

换流器由一个或多个换流桥串联或并联组成,目前用于直流输电系统的换流桥均采用三相桥式换流电路,每个桥具有 6 个桥臂。由于桥臂具有可控的单向导通能力,所以又称为阀或阀臂。

从交流电力系统 I 向系统 II 输送电能时,换流站 CS_1 把送端系统 I 送来的三相交流电流转换成直流电流,通过直流输电线路把直流电流(功率)输送到换流站 CS_2 ,再由 CS_2 把直流电流转换成三相交流电流。通常把交流转换成直流称为整流, CS_1 也称为整流站;把直流转换成交流称为逆变, CS_2 又称为逆变站。

设整流站 CS_1 的直流输出电压为 V_{d1} ,逆变站 CS_2 的直流输入电压为 V_{d2} ,则从图 0-3 可知直流线路电流为:

$$I_d = \frac{V_{d1} - V_{d2}}{R}$$

或

$$V_{d1} - V_{d2} = I_d R$$

式中 V_{d1} ——整流站 CS_1 的直流输出电压;

V_{d2} ——逆变站 CS_2 的直流输入电压;

I_d ——直流线路电流;

R ——直流线路的电阻。

直流线路和交流线路不同,它只输送有功功率,不输送无功功率。换流站 CS_1 送到直流线路的功率和换流站 CS_2 从直线路接受的功率分别为

$$P_{d1} = V_{d1} I_d \quad \text{和} \quad P_{d2} = V_{d2} I_d$$

两者之差,即

$$P_{d1} - P_{d2} = V_{d1} I_d - V_{d2} I_d = I_d (V_{d1} - V_{d2})$$

为直流线路的损耗。

当直流电压 V_{d1} 大于电压 V_{d2} 时, 就有电流沿着图 0-3 的方向流通。只要改变两端直流电压 V_{d1} 和 V_{d2} , 就可以调节电流 I_d , 从而也就改变了直流线路的功率 P_{d1} 或 P_{d2} 。如果需要, 通过调节可保持输送的电流或功率不变。

(二) 我国高压直流输电的发展情况

20 世纪 50 年代, 我国关于直流输电技术的研究工作就开始起步, 但发展曲折而缓慢, 而且从设计、运行、制造等方面来看, 与世界先进水平还有相当大的差距。浙江舟山直流输电工程是我国第一个直流输电试点工程, 工程兴建的目的是为了解决舟山电力发展的需要, 同时也为发展我国的直流输电技术进行探索、积累经验。其输电参数为: 电压 $\pm 100\text{kV}$ 、容量 100MW 、距离 55km (其中水下电缆 12km)。整个工程全部由我国自行设计、制造、施工、调试和运行。

葛洲坝—上海南桥直流输电工程是我国第一个跨地区、跨系统的超高压、远距离直流输电工程, 其工程建设背景为: 华东地区是我国主要的工农业基地之一, 工农业产值均名列全国前列。由于技术水平和管理水平较高, 劳动生产率和能源损耗指标均处于领先地位, 随着改革开放的进一步深化, 华东地区能源的需求量与日俱增。但华东地区能源资源严重短缺, 直接影响到国民经济的发展和人民生活水平的提高。为了加快华东地区的开发, 并进一步为发展我国的直流输电技术总结经验, 我国决定修建葛洲坝—上海南桥高压直流输电工程。

葛洲坝—上海南桥直流输电工程的参数如下: 额定电压 $\pm 500\text{kV}$ 、输送容量 1200MW 、输送距离 1047km 。从其参数可看出, 该工程已达到国际水平。葛—上直流工程的接线图如图 0-4 所示。

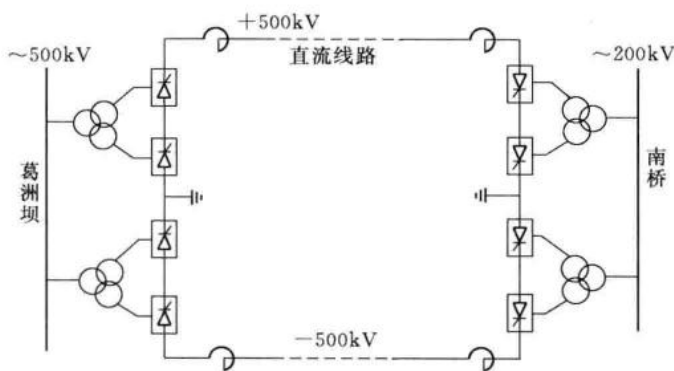


图 0-4 葛—上直流输电工程接线图

我国正在兴建的另一个高压直流输电工程是天生桥水电站至广州的直流输电工程, 这是一个交直流并联输电工程。该工程由一回输电电压为 500kV 的交流输电线路和一双极双桥直流输电系统组成。直流输电的参数为: 电压 $\pm 500\text{kV}$ 、容量 1800MW 、距离 960km 。

我国正在设计或拟议中的其他工程有: 西北—华北直流输电互联工程、宝鸡—成都直流输电工程、长江三峡—华东交直流并联输电工程等。