

高压直流输电

HVDC Transmission

[新西兰]J. 阿律莱加著

任 震等译

样书

21.1

重庆大学出版社

高压直流输电

(新西兰) J. 阿律策加 著 任 震 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
后勤工程学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12 字数: 300 千

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

印数: 1—3,500

标准书号: ISBN 7-5624-0005-9 统一书号 15408·16
 TM·1 定 价: 2.00 元

内 容 提 要

本书着重介绍现代高压直流输电技术发展特点，静止功率变换原理，消除谐波的方法，高压直流系统的控制、故障及其对策，交直流系统间的相互作用，换流站主设备的设计，过电压及绝缘配合，交直流输电的比较，高压直流输电技术的发展动向。

本书可供从事直流输电科研、规划、设计、调试、运行的工程技术人员和高等学校电力系统及其自动化以及相关专业的教师、研究生和高年级学生参考。

譯 者 前 言

本书是根据1983年在伦敦出版的英国电气工程师协会(IEE) 电力工程丛书的第六卷(书名为: High Voltage Direct Current Transmission) 译出的。

原著者从高压直流输电技术发展的特点着手, 以简洁的文字分析和阐明了现代高压直流系统一系列重大技术问题: 从汞弧阀到固态技术, 静止功率变换, 消除谐波的原理及方法, 系统的控制模式和机理, 交直流系统间的相互作用, 换流站主设备的设计、故障及其对策, 过电压及绝缘配合, 交直流输电的比较, 高压直流输电技术今后发展的新动向等。全书结构严谨, 层次分明, 取材新颖, 是一本反映现代高压直流输电技术、学术水平较高的专著和教材。

本书由重庆大学直流输电研究室翻译。其中: 序言、第一、三、五、十章以及中英词汇对照由任震, 第二、四、六、九章由王官洁, 第七、八章由冉立执笔翻译。序言、第一~五、十章以及中英词汇对照由秦翼鸿校核, 第六~九章由任震校核。译稿完成后, 任震对全书进行了校订。

由于水平有限, 书中难免存在缺点和错误, 深望读者批评指正。

译 者

1985年12月于重庆大学

目 录

序 言	(1)
第一章 高压直流技术的发展	
1. 1 引言	(3)
1. 2 历史背景简述	(3)
1. 3 汞弧閘	(4)
1. 4 汞弧系統	(5)
1.4.1 瑞典—果特兰 (Gotland) 綫路 (1954年)	(6)
1.4.2 英吉利海峡 (1961年)	(6)
1.4.3 伏尔加格勒—頓巴斯 (1962~1965年)	(6)
1.4.4 新西兰系統 (1965年)	(6)
1.4.5 康梯—斯堪 (Kontj—Skan) (1965年)	(6)
1.4.6 佐久間 (Sakuma) 互联 (1965年)	(6)
1.4.7 撒丁—意大利 (本土) (1967年)	(6)
1.4.8 太平洋聯絡綫 (1970年)	(7)
1.4.9 金斯諾思 (Kingsnorth) 系統 (1974年)	(7)
1.4.10 尼尔逊 (Nelson) 河—双极 1 (1973~1977年)	(7)
1. 5 固态技术	(7)
1. 6 晶閘管的盛行	(8)
1.6.1 伊尔河 (Eel River) (1972年)	(9)
1.6.2 卡布拉—巴薩 (Cabora—Bassa) (1977~1979年)	(9)
1.6.3 因加—沙巴 (Inga—Shaba) (1981年)	(9)
1.6.4 斯卡格拉克 (Skagerrak) (1976~1977年)	(9)
1.6.5 斯夸尔比尤特 (Square Butte) (1977年)	(9)
1.6.6 尼尔逊河—双极 2 (1978~1985年)	(10)
1.6.7 伊泰普 (Itaipu) 系統	(10)
1.6.8 耶基巴斯图兹 (Ekibastuz) —欧洲中部 (Cenfre)	(10)
1.6.9 新海峡 (New Cross—Channel) 綫路	(10)
1. 7 运行可靠性	(10)
1. 8 今后的发展	(11)
1. 9 参考文献	(11)
第二章 静止功率变换	
2. 1 引言	(13)
2. 2 基本变换原理	(13)
2. 3 换流器結構的选择	(14)
2. 4 理想换相过程	(14)
2.4.1 控制极的控制作用	(14)
2.4.2 閘电流和电压波形	(17)

2.5	实际换相过程	(18)
2.5.1	换相电压	(19)
2.5.2	换相电抗	(19)
2.5.3	换相电路的分析	(21)
2.6	整流器运行	(23)
2.6.1	平均直流电压	(24)
2.6.2	交流电流	(24)
2.7	逆变器运行	(25)
2.8	功率因数和无功功率	(27)
2.9	换流器的谐波	(28)
2.9.1	特征谐波	(29)
2.9.2	非特征谐波	(35)
2.10	参考文献	(39)
第三章 谐波的消除		
3.1	引言	(40)
3.2	脉波数的增加	(40)
3.3	交流滤波器设计	(41)
3.3.1	设计准则	(41)
3.3.2	设计系数	(41)
3.3.3	网络阻抗	(43)
3.3.4	电路模拟	(45)
3.3.5	调谐滤波器	(45)
3.3.6	自调谐滤波器	(48)
3.3.7	高通滤波器	(48)
3.3.8	现代滤波器布置方式举例	(48)
3.3.9	C型阻尼滤波器	(49)
3.3.10	12脉波换流器的简易滤波	(50)
3.4	直流侧滤波器	(50)
3.5	消除谐波的其它方法	(51)
3.5.1	磁通补偿	(53)
3.5.2	谐波注入	(53)
3.5.3	直流纹波注入	(54)
3.6	参考文献	(56)
第四章 高压直流换流器和系统的控制		
1.	换流器控制	(58)
4.1	基本原理	(58)
4.2	分相控制	(58)
4.3	等距离触发控制	(59)
4.3.1	定电流回路	(61)
4.3.2	逆变器熄弧角控制	(61)
4.3.3	从熄弧角控制向电流控制的转换	(62)
4.3.4	其它等距离触发控制系统	(62)

4.3.5	在12脉波换流器组中的应用	(64)
4.4	性能比较	(64)
4.5	模拟控制和数字控制	(65)
II.	直流系统控制	(66)
4.6	基本原理	(66)
4.7	直流潮流的特性和方向	(66)
4.7.1	潮流翻轉	(69)
4.7.2	基本特性曲线的改进	(69)
4.7.3	分接头开关控制	(70)
4.7.4	不同的控制等级	(70)
4.7.5	潮流控制	(71)
4.7.6	远距离通讯的要求	(72)
4.8	参考文献	(73)
第五章	交流和直流系统间的相互作用	
5.1	引言和定义	(75)
5.2	电压的相互作用	(76)
5.2.1	动态电压调整	(77)
5.2.2	动态补偿	(79)
5.3	谐波的不稳定性	(79)
5.3.1	由分相触发控制引起的不稳定性	(79)
5.3.2	换流变压器饱和的影响	(82)
5.3.3	铁芯饱和的不稳定性	(84)
5.3.4	不稳定问题的小结	(85)
5.4	直流功率调整	(86)
5.4.1	频率控制	(86)
5.4.2	功率—频率控制	(86)
5.4.3	交流系统的动态稳定性	(86)
5.4.4	大信号调整	(87)
5.4.5	直流互联系统的可控阻尼	(87)
5.4.6	次同期谐振的阻尼	(88)
5.4.7	有功和无功功率的配合	(89)
5.4.8	整体控制的配置	(89)
5.4.9	交流系统的暂态稳定性	(91)
5.5	参考文献	(91)
第六章	主设计研究	
6.1	引言	(93)
6.2	晶闸管换流器	(93)
6.2.1	晶闸管的结构	(93)
6.2.2	12脉波换流元件	(94)
6.2.3	多桥换流器	(95)
6.2.4	阀的冷却系统	(98)
6.2.5	阀的控制回路	(98)

6.2.6	閘的保护功能	(98)
6.2.7	晶閘管閘的試驗	(99)
6.2.8	換流电路与元件	(100)
6.2.9	晶閘管換流站的布置	(102)
6.2.10	換流元件的相对費用	(103)
6.3	汞弧电路元件	(104)
6.3.1	閘組	(104)
6.3.2	換流站	(106)
6.3.3	汞弧換流器的布置	(106)
6.4	換流变压器	(106)
6.5	平波电抗器	(107)
6.6	架空綫路	(107)
6.7	电纜輸电	(108)
6.8	接地极	(109)
6.9	背靠背晶閘管換流系統的設計	(110)
6.10	参考文献	(112)
第七章	故障的发展和保护	
7.1	引言	(114)
7.2	換流器扰动	(114)
7.2.1	失通和誤通	(114)
7.2.2	換相失敗	(115)
7.2.3	逆弧	(117)
7.2.4	内部短路	(118)
7.2.5	旁通作用	(119)
7.2.6	晶閘管桥中的旁通作用	(120)
7.3	实际扰动的仿真	(120)
7.4	交流系統故障	(122)
7.4.1	三相故障	(122)
7.4.2	不对称故障	(123)
7.5	直流綫路故障的发展	(124)
7.5.1	故障检测	(124)
7.5.2	故障的清除和恢复	(125)
7.5.3	全动态響應	(125)
7.6	过电流保护	(127)
7.6.1	閘組保护	(128)
7.6.2	直流綫路保护	(129)
7.6.3	滤波器保护	(129)
7.7	参考文献	(130)
第八章	暂态过电压和绝缘配合	
8.1	引言	(132)
8.2	直流側扰动激发的过电压	(133)
8.3	交流扰动激发的諧波过电压	(134)

8.4	换流器扰动引起的过电压	(135)
8.5	直流系统所产生的快速暂态过程	(136)
8.5.1	雷电冲击	(136)
8.5.2	操作型冲击	(137)
8.6	交流系统所产生的冲击	(138)
8.7	与换流站相关的快速暂态现象	(139)
8.7.1	汞弧换流器	(139)
8.7.2	晶闸管换流器	(140)
8.8	绝缘配合	(142)
8.8.1	系统设计	(142)
8.8.2	冲击避雷器	(143)
8.8.3	冲击避雷器的应用	(143)
8.9	参考文献	(146)
第九章	直流输电与交流输电的比较	
9.1	一般原理	(149)
9.2	大量电能的传输	(150)
9.2.1	交流和直流输电特性的比较	(151)
9.2.2	交流和直流线路的功率传输能力	(152)
9.2.3	等效可靠性准则	(153)
9.2.4	损耗的影响和折扣(贴现)率	(154)
9.2.5	其它条件	(154)
9.2.6	在较低电压等级下的馈电	(155)
9.2.7	环境影响	(155)
9.3	系统互联	(156)
9.4	参考文献	(157)
第十章	研究和发展	
10.1	引言	(159)
10.2	直流断路器	(160)
10.2.1	高压直流断路器在两端互联系统中的应用	(160)
10.3	多端直流输电	(161)
10.3.1	技术比较	(162)
10.3.2	经济比较	(163)
10.3.3	故障检测	(163)
10.3.4	操作要求	(163)
10.4	发电机一整流器单元	(164)
10.4.1	采用可控整流器的单元接线	(165)
10.4.2	采用二极管整流器的单元接线	(165)
10.5	强迫换相	(166)
10.6	现有交流输电转变为直流输电	(167)
10.7	紧凑型换流站	(169)
10.8	基于微处理机的数字控制	(170)
10.9	一般结论	(172)

10. 10 参考文献	(172)
中英词汇对照	(173)

序 言

继1954年高压直流输电的第一次商业性应用获得成功之后，我从前的两位同事C. 阿丹姆森 (Adamson) 和N. G. 亨果雷尼 (Hingorani) 在《高压直流电力输送》一书中，集中反映了当时大部分极为有用的资料，该书于1960年问世。

十年之后，刚去世的现代交流电力系统的一位先驱者 E. W. 肯巴克 (Kimbark) 完成了书名为《直流输电》第一卷这一杰出的专著，书中记载了新技术的发展状况。

1975年，当时的现代直流系统另一位先驱者 E. 乌尔曼 (Uhlmann) (在他的综合性的论著中显示了丰富的经验) 在题为《直流输电》一书中包含了极有价值的资料，这在当时是绝无仅有的。

自从乌尔曼博士作出贡献以来又差不多过去了十年，也是珍珠街直流发电厂成功投运一个世纪，可看到最近的十年，固态技术得到了加强，而且高压直流换流器的快速可控性也受到了普遍的承认。

因此，把这些成就反映在另外一本书中也许是比较重要的，同时，我感到对我完成这一工作受到鼓舞的是乌尔曼博士在他的书的序言中的这样一句话：“……将来写出涉及到这个领域的所有方面的一本完整的书，正是我的愿望”。

写作本书有这样两个目的：第一，从教学的观点出发，阐述静止功率变换的基本原理以及大型换流站和电力系统之间所产生的相互作用，高压直流输电是一门理想的课程。因此，本书应当是在电力系统和电力电子学的教学中，对于高年级和研究生课程现行基本教材的一个有价值的补充。第二，满足从事实际工作的工程技术人员的特殊要求，本书在这一方面包括了使得高压直流输电成为一种有竞争力的技术的重要发展成就。

我必须感谢过去二十多年来这个领域中许多专家所给予的有价值的帮助。在曼彻斯特理工学院 (UMIST) 早年的生涯中，我特别要感谢 C. A. 阿丹姆森、N. G. 亨果雷尼、J. 吕弗 (Reeve)、P. C. S. 克列希拿耶 (Krshinayya)、M. 默雷斯 (Morales)，尤其是我的妻子格列塔 (Greta)，她在传播出自曼彻斯特理工学院极为丰富的高压直流输电的资料方面默默无闻地做了大量工作。与通用电气公司的 J. D. 爱因斯沃斯 (Ainsworth) 经常性的讨论，常常对于纠正我偏激的学术观点，有很大帮助。

在最近一个时期，我衷心感谢使我对高压直流输电保持兴趣的新西兰电力公司所给予的一贯的鼓励和支持，其中特别是 P. W. 勃赖克莱 (Blakeley)、K. D. 麦柯 (McCool)、K. S. 图纳 (Turner)、M. D. 海弗南 (Heffernan)、B. J. 哈克 (HarKer)、M. T. 奥柏林 (O'Brien)、P. S. 巴内特 (Barnett) 和 C. V. 克雷 (Currie)。我还要感谢我现在的研究生，特别是 A. P. B. 约斯坦 (Joosten)、J. C. 格雷哈姆 (Graham) 和 H. 哈希亚 (Hisha)，在我的写作过程中所提出的批评性意见。

要对在本书的写作过程中所用到的所有资料来源都一一致谢是有一定困难的；然而，我特别要提出在高压直流输电方面做了大量工作的国际大电网会议14工作组、近来作出了许多

贡献的玻蒂纹(Bodeven)公司(加拿大)的J. P. 鲍沃斯(Bowles)以及与GEC(英国史坦福(Stafford))的J. D. 爱因斯沃斯有价值的私人交往。

最后,我衷心感谢我的秘书A. 华亨(Haughan)夫人,她在书稿的整理工作中所给予的有效合作。

第一章 高压直流技术的发展

1.1 引言

由于全世界高压直流系统多年来可靠运行的成功经验，现在可以有把握地重申在这个领域的早期著作中比较慎重得出的几个论点。

通常得出的有利于直流方案的几个主要论点是：

- (a) 直流输电与同样的交流线路相比，损耗与费用较低；但换流站的费用和损耗却比较高。
 - (b) 采用电缆的远距离交流输电是不现实的，然而对于直流却不存在这种限制。
 - (c) 直流可构成非同步互联，而且不会明显地提高故障水平。
 - (d) 直流电路中的潮流易于实现快速控制。因此，如用适当的控制，直流系统可用来改善交流系统的稳定性。
 - (e) 有或无输电距离的直流换流站可用于不同频率或不同控制原理的交流系统的互联。
- 本书试图以技术，特别是晶闸管技术的现状，来论证上述观点。

1.2 历史背景简述

早在1881年，M. Deprez 受到直流发电机弧光试验的启发，发表了高压直流输电的第一个理论研究报告。他很快把理论用于实践，并于1882年前夕把2千伏1.5千瓦的功率输送了超过35英里的距离。

此后的十年由于变压器的可用性和感应电动机的发展，表明这是一个交流兴起的时代。1887年爱迪生(J. Edison)提出下列警告：“注意！交流电是危险的。它们只适用于电椅……”。

从1889年开始，R. Thury 继续了 Deprez 的研究，通过采用串联的直流发电机而获得了较高的输电电压。他在欧洲的许多装置中，直流输电技术最好的例子是从毛梯埃斯(Moutiers)至里昂(Lyon)的线路，最终容量为20兆瓦、125千伏、距离230多公里^[*]。该系统以恒定电流运行并用来作为对原有交流系统的增强性措施。这也许是交、直流同时共存第一次得到公认，正如 Thury 本人把这称为“为了互相支持和帮助，这两个系统友好地握手了……”。

随着作为发电的原动机的汽轮机的出现，久利系统(Thury System)的限制就日益突出。过去采用驱动发电机的低速水轮机时没有什么特殊问题，而现在对直流发电汽轮机的应用则取决于高速减速齿轮的可用性。然而到那时为止，取得了另外几项有意义的进展^[1]。

影响发电和输电的设计经济性的约束条件是完全不同的。因此，一成不变地照搬受发电

* 1公里=10³m, 1英里=1609.34m, 译者注。

机影响的要求应用于输电系统，通常对电力系统几乎不会有什么经济效益。

交流远距离输电（特别是通过地下电缆）需要经常性的并联补偿，而且会引起稳定问题。交流互联增加了整个系统的故障水平。直流输电则不受这些问题的束缚，而且损耗和设计成本都较低。

这些优点早已得到了确认，而且认真地采用了这种观点：交流发电，换流为直流输电，然后再逆变为交流。然而，交流-直流和直流-交流的静止换流的应用是昂贵的，而且方案比较通常也不是简单明了的。这个问题将在第九章中讨论。

在随着现代高压直流输电技术的发展而划分的许多阶段中，下列几点是值得提的：

- (a) “二十年代”，Calverley和Highfield用“转换器”进行了把高压交流涡轮发电和高压直流输电的优点结合起来的第一次尝试。这个概念是以高速同步旋转的电刷装置进行换相的一系列变压器为基础的。
- (b) 1901年Hewitt的汞汽整流器和1928年栅极控制的采用，奠定了可控整流和逆变的基础。
- (c) 1940年之前，美国进行了闸流管试验而在欧洲却进行了汞池装置的试验。
- (d) 如美国、苏联和瑞典等具有远距离输电的国家对高压直流的发展表示出极大的兴趣。第二次世界大战期间，苏联制造出试验性单阳极阀，而从1940年开始瑞典的通用电气公司（ASEA）进行了更为充分的研究工作。
- (e) 在战时德国，空军部长相信地下输电几乎不会受到空袭，因而鼓励高压直流技术的发展。

在柏林的Charlottenburg区和Moabit区之间建立了15兆瓦、100千伏试验性输电系统。设计原型确定为60兆瓦、400千伏、大约为110公里的系统，其中一部分在大战临近结束时建成的。

- (f) 1945年以后，在苏联中断了的阀方面的研究作为较广泛的高压直流发展项目的一个部份又得到恢复。1950年^[2]输送30兆瓦、200千伏、距离超过112公里的莫斯科和卡希拉（Kashira）地下输电系统投入了运行。
- (g) 然而，正是瑞典应当被认为是现代高压直流输电技术发展的先锋，在下一节中我们再作说明。

1. 3 汞 弧 阀

虽然，直流输电在经济上的优点在电技术的早期阶段已为人共知；但是，它的实际应用却一直等到具有适用额定值的电子阀问世。

在早期应用于电力电子工业中的各种开关原理之中，要算汞弧整流最适合承载大电流。所提供的带有控制极（即栅极）的多相汞池阴极阀已广泛地应用于工业和铁道部门逾五十年之久。

瑞典取得了适用于高电压的汞弧阀的最成功的进展，截止1939年，ASEA的U. Lamm博士发明了具有单相阀结构的分级电极系统，它为更大峰值反向电压奠定了基础。

ASEA的高压阀装置的基本元件和主要附属设备可用图1-1来说明^[3,4]。同早期的

技术一样，这种阀包括具有由辅助弧维持的阴极辉点的汞池阴极，它使得电子连续发射。正是这种阳极设计与较早期的中压阀完全不同，它旨在消除电子反向发射，以免引起反向导电，即逆弧。

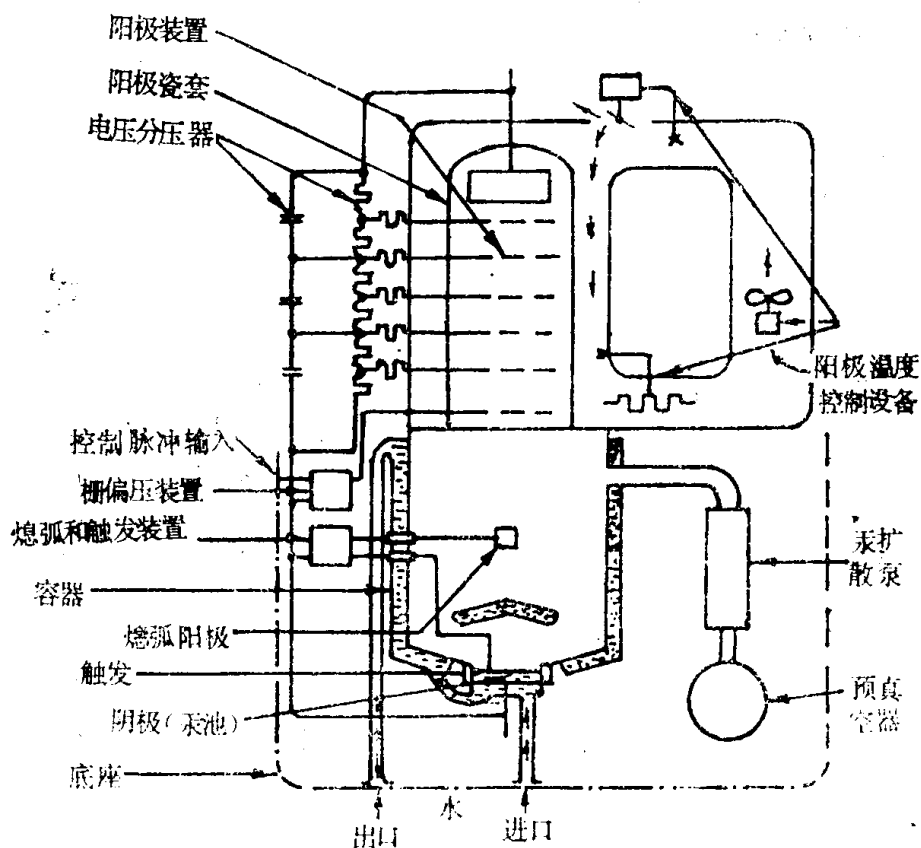


图1-1 高压汞弧阀装置

采用分级电极，就可能使阳极附近的反向电压更加接近均匀分布。这可减少带电粒子撞击阳极材料的能量以及由此而引起的逆弧的可能性。分级电极连接到外接的阻容电压分压器，它连同各阳极电容限制各阳极间的电压差大约在5千伏之内。阳极瓷套形成一个真空紧密密封套，其作用对于阳极装置中的不同电极来说，就类似于支持绝缘子。由额定电流所决定的、多至六个并联阳极置于不锈钢容器的顶部。

用于外部的圆柱形瓷套的质量基本上决定了高压直流阀的寿命。在加在阀上的直流电压分量的影响下，就会发生某种离子迁移现象，这将使一端的离子减少，而另一端的离子增加。这种影响会引起导电的变化，从而产生不均匀的电压分布。在近来的设计中，采用电阻很大的瓷套，显著地减少了这个现象。

另外一个重要问题是整个阀材料的浇注，这将影响从开通到阻断时期带电粒子撞击阀壁。这个影响将限制汞弧桥的最大直流电压为150千伏左右，而且维修工作量也很大。

1.4 汞弧系统

四十年代末，分级电极汞弧阀的高速发展，为1954年的高压直流技术的第一次商业性应

用铺平了道路。这种型式立即随着额定参数增加了的其它工程而得到发展。

以高压直流技术为基点的汞弧阀的成功可用几个早期的工程得到最好的说明。现在，给出能概要地证明它们的存在是正确的一些主要因素，而要了解这些因素的技术背景将是后面几章要讨论的主题。

1. 4. 1 瑞典-果特兰 (Gotland) 线路 (1954年)

以20兆瓦、100千伏直流单导线海底线路向果特兰岛供电要比在岛上另建一座火力发电厂经济。输电距离(96公里)对于交流电缆输电来说是太长了。

1. 4. 2 英吉利海峡 (1961年)

互联英国和法国的、利用峰荷和发电容量可以错开这一优点的160兆瓦、 ± 100 千伏直流海底线路，勉强适用于这一输电距离(仅64公里)，特别还因为对船舶罗盘的干扰问题，北海不能用来作为回路。然而，由于英国的电力系统没有自动负荷频率控制，因此，用交流电缆互联对较小的功率交换是难以控制的。对于整个英国电网这样的控制设备要比直流方案昂贵得多。

1. 4. 3 伏尔加格勒-顿巴斯 (1962~1965年)

这是第一个架空输电系统，並用来作为原有交流弱输电系统的增强性措施。输电距离为470公里，而线路额定值为720兆瓦、 ± 400 千伏和900安。该系统采用了单阳极(空冷)和油冷外壳的另一种汞弧阀设计。在该双极系统中，每极采用四个桥，並以参数为50千伏和900安的阀，每两个连成串联。

1. 4. 4 新西兰系统 (1965年)

部分为架空线(570公里)、部分为海底电缆(40公里)的600兆瓦、 ± 250 千伏直流线路用来从南岛的水电资源区输送剩余电能至北岛。在所给定的比较短的海底互联的条件下，采用惯用的交流方式的方案是可行的。但是，Cook海峡的陡岩使得只能采用电压较低的交流电缆，从而导致许多回路並联。基于这样的情况以及相当长的架空线路，直流方案更为经济。

1. 4. 5 康梯-斯堪 (Konti-Skan) (1965年)

这是瑞典和丹麦之间的互联工程，它是部分为架空线路、部分为海底电缆的250兆瓦、250千伏单极直流线路(用大地作回路)。虽然有足够长的距离(87公里)，但电缆线路分成了两部分，从而交流互联是可行的。事实上，直流的经济上的优势也是很微弱的，但是，它具有的优点是为将来发展到500兆瓦(采用第二个极)，这一额定功率已超过了互联这两个国家交流系统的稳定极限。

1. 4. 6 佐久间 (Sakuma) 互联 (1965年)

这是日本的50周和60周电力系统之间的、线路距离为零的变频站，任一方向的交换功率多达300兆瓦(电压为 ± 125 千伏)，适应于任一系统受到干扰或者缺乏电能的情况。在这种情况下，交流-直流-交流换流站是唯一的选择了。

1. 4. 7 撒丁-意大利 (本土) (1967年)

单极200兆瓦、200千伏直流线路(以大地和海水作回路)主要是利用直流线路的功率-频率控制来维持撒丁岛交流网络的频率。

由于线路经过撒丁岛、海、科西嘉(Corsica)、海和意大利本土，因而输电工程交替

使用海底电缆和架空线路。121公里的总电缆长度是适用于直流的。

1. 4. 8 太平洋联络线 (1970年)

与以上所讨论的几个系统不同, 太平洋直流联络线是与两条 500 千伏交流线路 (60周) 并联运行的。采用直流方案的合理性, 部分是由于输电距离 (架空线路1372公里), 部分是由于外加控制的有效性, 它有助于对已经存在的并联交流输电系统的功率振荡起到阻尼作用。联络线是一条1440兆瓦、 ± 400 千伏双向线路, 这样可从美国西北和西南地区错开发电容量和季节性负荷之中获取效益。

1. 4. 9 金斯诺思 (Kingsnorth) 系统 (1974年)

英国的金斯诺思-贝丁顿 (Beddington)-威尔士顿 (Willesden) 640 兆瓦 (± 266 千伏) 三端直流系统的主要目的是, 在不增加短路水平的情况下, 在高负荷密度区对原有交流系统的增强性措施。这完全是由于距离而难以证明采用直流是合理的, 因为两条地下输电线的距离是已处于临界范围 (分别为59和82公里)。

1. 4. 10 尼尔逊 (Nelson) 河-双极 I (1973~1977年)

由于把大量的电力从远方水电站输送到负荷中心-Winnipeg, 因此, 这也许是高压直流输电更为有影响的应用。输电距离长达895公里, 标称容量为1620兆瓦 (电压为 ± 450 千伏), 经扩建后的最终容量大约为6500兆瓦。尼尔逊河的第一期工程采用了迄今最大的电力汞弧阀 (1500千伏、1800安)。这期工程还开创了这样的记录: 在汞弧阀与固态阀的竞争中, 它是获得成功的最后一个例子。

1. 5 固态技术

在现代微电子技术取得惊人发展的同时, 同样是以开关和硅为基本内容的电力微电子技术的变革, 尽管几乎没有什么著作, 但也一样给人以极为深刻的印象。微电子技术的主要典型必然是固态高压直流换流器, 这将在第六章中进行详细的讨论。

在五十年代末期间世的晶闸管, 即可控硅整流器 (SCR) 对静止换流器技术产生了惊人的影响。晶闸管 (图 1-2) 是一个硅四层 (p. n. p. n) 三结装置, 它用来作为可控整流器。晶闸管元件的全部伏安特性在图 1-3 中得到了说明。通过门极注入一个小电流则使正向偏压晶闸管开关从一个很高的阻抗状态到一个很低的阻抗状态, 从而这就近似于具有可说是无限大放大系数的理想开关特性。

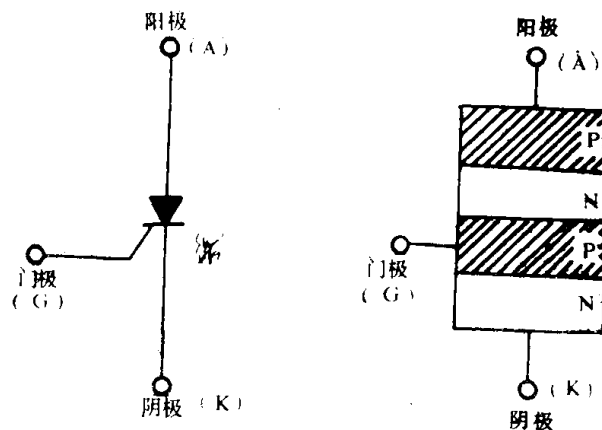


图1-2 晶闸管的基本结构和符号