

DL00/03

# 直流输电基础

戴熙杰 主编

水利电力出版社

# 目 录

## 前 言

第一章 绪论	1
1-1 直流输电发展概况	1
1-2 直流输电系统的构成	13
1-2-1 直流输电的基本概念; 1-2-2 两端直流输电系统;	
1-2-3 多端直流输电系统	
1-3 直流输电和交流输电的比较	27
1-3-1 直流输电与交流输电的经济比较和等价距离; 1-3-2	
直流输电的优缺点	
1-4 直流输电技术的主要用途及其在我国的应用	38
第二章 换流技术与直流输电系统	43
2-1 概述	43
2-2 整流电路	44
2-2-1 单桥整流器的等值电路; 2-2-2 无相控整流器; 2-2-3	
有相控整流器	
2-3 整流器的运行特性	73
2-3-1 单桥整流器的稳态等值电路; 2-3-2 单桥整流器的外	
特性; 2-3-3 整流器稳态工况的理论计算公式	
2-4 逆变的概念	78
2-4-1 越前触发电角 $\beta$ ; 2-4-2 单桥逆变器与整流器的连接;	
2-4-3 单桥逆变器的换相和越前关断角 $\delta$ ; 2-4-4 单桥逆变器的	
直流电压平均值; 2-4-5 逆变器的阀电压、阀电流和交流侧电流	
2-5 单桥逆变器的运行特性	96
2-6 双桥换流器	98
2-6-1 双桥换流器的接线及其电压、电流; 2-6-2 双桥换流	

器的运行特点	
2-7 换流器的谐波特性 .....	112
2-7-1 换流器交流侧的特征谐波电流; 2-7-2 换流器直流侧的特征谐波电压	
2-8 谐波的抑制 .....	122
2-8-1 谐波的影响和危害; 2-8-2 谐波的抑制方法	
2-9 换流器的功率因数和无功补偿 .....	127
2-9-1 整流器的功率因数; 2-9-2 逆变器的功率因数和无功功率的补偿	
2-10 直流输电系统的运行方式及运行特性 .....	133
<b>第三章 控制 .....</b>	<b>138</b>
3-1 概述 .....	138
3-2 换流器的控制 .....	140
3-2-1 换流器触发脉冲相位控制; 3-2-2 换流器直流电流的控制;	
3-2-3 逆变器关断角控制	
3-3 直流系统的控制 .....	153
3-3-1 直流系统的基本控制; 3-3-2 换流变压器分接头切换控制; 3-3-3 直流系统控制特性的改进措施; 3-3-4 直流系统的功率控制; 3-3-5 直流系统启动、停止和功率反转控制	
3-4 换流站无功功率和交流电压的控制 .....	170
3-5 交流系统频率和稳定性的控制 .....	172
3-5-1 交流系统频率的控制; 3-5-2 交流系统稳定性的控制	
3-6 控制系统的分层结构 .....	177
3-7 直流系统对通信的要求 .....	181
<b>第四章 故障与保护 .....</b>	<b>184</b>
4-1 概述 .....	184
4-2 换流器故障 .....	185
4-2-1 逆变器的换相失败故障; 4-2-2 误开通和不开通故障;	
4-2-3 阀短路故障; 4-2-4 换流器直流端短路	
4-3 直流线路短路故障 .....	203

4-4	交流系统故障	205
4-4-1	整流侧交流系统故障；4-4-2 逆变侧交流系统故障	
4-5	直流输电系统继电保护	213
4-5-1	直流系统继电保护的配置；4-5-2 各种主要保护动作后采取的典型处理措施；4-5-3 直流系统继电保护动作后的处理过程	
4-6	故障发展控制与旁通对应用	220
4-6-1	阀故障的发展控制；4-6-2 旁通对的应用	
4-7	直流线路故障后的恢复过程	225
4-8	交流系统故障后的恢复过程	228
第五章	直流输电线路	230
5-1	直流架空线路	230
5-2	直流电缆线路	243
5-3	大地回路	251
5-4	接地装置	259
第六章	换流站及其设备	266
6-1	概述	266
6-2	主接线	268
6-3	换流阀	272
6-3-1	换流阀；6-3-2 可控硅阀元件及其特性；6-3-3 阀的触发系统；6-3-4 阻尼和均压；6-3-5 均压电路；6-3-6 可控硅元件的过电压保护；6-3-7 元件故障检测	
6-4	换流变压器	321
6-4-1	换流变压器的作用及特点；6-4-2 换流变压器的选择；6-4-3 换流变压器的布置	
6-5	平波电抗器	330
6-6	滤波装置及无功补偿设备	336
6-7	测量设备	349
6-7-1	直流电流互感器；6-7-2 直流电压互感器	
6-8	直流断路器	355

6-9	通信系统	358
6-10	射频干扰及其抑制	359
6-11	换流站的平面布置	360
第七章 换流站过电压防护与绝缘配合		364
7-1	概述	364
7-2	入侵换流站的雷电过电压	364
7-3	直流输电系统内部过电压	366
7-4	过电压防护措施	374
7-5	换流站的绝缘配合	381

6-9	通信系统	358
6-10	射频干扰及其抑制	359
6-11	换流站的平面布置	360
第七章	换流站过电压防护与绝缘配合	364
7-1	概述	364
7-2	入侵换流站的雷电过电压	364
7-3	直流输电系统内部过电压	366
7-4	过电压防护措施	374
7-5	换流站的绝缘配合	381

# 第一章 绪 论

## 1-1 直流输电发展概况

直流输电发展大致可分为早期阶段、研究阶段、重新兴起阶段和迅速发展阶段4个时期。

早期阶段（20世纪30年代以前的时期）这个时期的输电方式是直流输电。1882年法国曾用2000V直流发电机，经56km直流输电线路，把直流电力送给用户。实现了世界上第1次直流输电。为了延长送电距离，将直流发电机串接，以提高电压，1912年出现了电压为100kV、送电功率为15MW、长度为190km的直流输电线路。但由于当时直流电机串接运行复杂，可靠性低，而发展高电压大容量直流发电机，又存在换向困难等技术问题，因此，直流输电的发展受到了限制。19世纪末，人们逐步掌握了交流电路原理，并研制成功了三相交流发电机、变压器和感应电动机，在当时情况下，交流电无论在发电、变压和用电方面都比直流电方便、可靠。从而交流输电开始取代了直流输电。

研究阶段（20世纪30年代至50年代）在这个阶段，人们探索用各种器件构成的换流器作为直流高压电源，以替代直流发电机，从而研制了可控汞弧阀换流器，为以后发展高电压、大功率直流输电开辟了道路。

直流输电虽由于种种原因使其发展受到影响，但它毕竟有交流输电所不能取代的特点，例如：交流架空线路远距离输电的输送容量会受到同步运行稳定性的限制；用电缆向海

岛输送电力时，如果采用交流电，由于电缆在交流下产生电容电流，使电缆线路的长度受到限制，而且交流电缆投资也较大。因此，美国、瑞典、联邦德国等国仍继续研究直流输电技术。1935年，美国采用汞弧阀建立了15kV、100kW的直流输电系统。1943年，瑞典研制成功了栅控汞弧阀，建立了一条90kV、6.5MW、58km的直流输电线路。与此同时，德国试制了单阳极汞弧阀。虽然这个阶段的研究工作很有成效，但高电压大容量的换流阀尚未问世，仍然限制着直流输电的发展。不过，这一切为下阶段直流输电的兴起作了很好的技术准备。

重新兴起阶段（1954~1970年） 1954年，瑞典投入了一条100kV、20MW、海底电缆长95km的直流输电线路，由本土向果特兰岛送电，这是世界上第一条采用汞弧阀的工业性直流输电线路。它引起了一些工业发达国家的重视，这些国家都相继建设了一些直流输电工程。1961年，英法两国用海底电缆建成了英法海峡±100kV、160MW、65km的直流输电工程，把英国和法国两个交流电力系统连接了起来。英法海峡直流输电工程的建成，再次推动了直流输电的发展。以后又出现了连接新西兰南北岛屿的直流输电工程（±250kV、600MW、线路长609km，其中电缆39km），连接意大利本土和撒丁岛的直流输电工程（200kV、200MW、线路长413km，其中电缆121km）。日本引进了瑞典的直流输电设备和技术，建设了佐久间变频站（±125kV、300MW），把50Hz和60Hz的两个交流电力系统连接了起来，解决了日本多年来未解决的问题。在60年代，直流输电工程几乎都是含海底电缆的输电工程，这是因为跨越较宽阔的海域，如果用直流电缆输电其优点更为突出。

**迅速发展阶段（1970年以后的时期）** 在这个阶段，可控硅换流器研制成功，并应用于直流输电工程。电子和计算机技术的迅速发展有效地改善了直流输电的控制性能，提高了运行的可靠性，加速了直流输电的发展，扩大了它在远距离输电和非同步联络站等方面的应用范围。

由于汞弧阀在运行中容易发生逆弧，而且需要有真空装置和复杂的温度控制，起动时又需要较长的预热时间等，使直流输电的发展受到限制。20世纪70年代初，性能更为优越的可控硅整流元件（简称可控硅元件，又称为晶闸管）组成的可控硅换流器问世后逐渐替代了汞弧阀，应用于直流输电系统，因为可控硅换流器不存在这些缺点，而且制造、检修和维护也都比汞弧阀方便。1970年，瑞典首先采用可控硅换流器叠加在原有汞弧阀换流器上，对果特兰岛直流输电系统进行了扩建增容，增容部分的直流电压为50kV、电流为200A、送电功率为10MW，扩建成为150kV、30MW的直流输电系统。1972年投入的加拿大伊尔河非同步联络站（80kV、320MW）是世界上第一个全部采用可控硅换流器的直流输电工程。1976年以后，世界上建成的直流输电工程几乎全部采用可控硅换流器。虽然可控硅换流器存在着过载能力较小、对过电压比较敏感等缺点，但只要在设计时对可控硅换流器的容量留有裕度并采取适当的保护措施，便可达到较高的运行可靠性。可控硅换流器的应用，使直流输电有了较快的发展。1960~1975年间，直流输电容量的年平均增长速度仅450MW，而1976~1980年间，年平均增长速度达1500MW。

70年代，直流输电开始用于远距离大功率输电。如连接美国太平洋沿岸北面的波特兰和南面的洛杉矶的太平洋沿岸

表 1-1-1

## 已 投 运 直 流 输

序号	地区	国 家	工 程 名 称	距离(电缆) (km)
1	北 欧	瑞 典	哥特兰岛 I	96(96)
2		丹麦、瑞典	康梯—斯塔	180(85)
3		丹麦、挪威	斯卡格拉克	240(127)
4		瑞 典	哥特兰岛 II	96(96)
5	西 欧	英国、法国	英法海峡联络线	65(65)
6		英 国	金斯诺思	82(82)
7		意 大 利	撒丁岛—意大利本土	413(121)
8	东 欧	苏 联	伏尔加格勒—顿巴斯	470(0)
9		芬兰、苏联	维 堡	0
10		奥 地 利	迪尔拉尔	0
11	北 美	加 拿 大	温哥华 I	74(33)
12			伊 尔 河	0
13			纳尔逊河 I	890(0)
14			温哥华 II	74(33)
15			纳尔逊河 II	930(0)
16			夏 托 盖	0

## 电 工 程 概 况①

---

序号	地区	国家	工程名称	距离(电缆) (km)
17	北美	美国	太平洋岸联络线	1362(0)
18			斯蒂加尔	0
19			斯夸尔比尤特	749(0)
20			安德伍—明尼亚波利斯(CU)	710(0)
21			EPRI小换流站(试验)	0.6(0.6)
22			埃迪康蒂	0
23			俄克拉尼奥	0
24			布莱克沃特	0
25	南美	巴西、巴拉圭	阿卡里	0
26		巴西	伊泰普II	783(0)
27	非洲	莫桑比克、南非	卡布拉巴萨	1414(0)
28		扎伊尔	英加沙巴	1700(0)
29	亚洲	日本	佐久间	0
30			新信浓	0
31			北海道—本洲	168(44)
32	大洋洲	新西兰	库克海峡	609(39)

① 本表根据1985年底统计资料编制。

② “最大”的含意为在允许过载情况下最大的额定值。

续表

额定电压 (kV)	额定容量 (最大) <sup>②</sup> (MW)	换流阀	投运年份	用 途
±400/±500	1440/1840	汞弧·可控硅	1970/1985	系统联络
50	100(110)	可控硅	1977	系统联络
±250	500(550)	可控硅	1977	电源送电
±400	1000(1100)	可控硅	1979	电源送电
100/400	100	可控硅	1981	电源送电
82	200	可控硅	1983	系统联络
82	200(220)	可控硅	1985	系统联络
56	200	可控硅	1985	系统联络
26	50	可控硅	1981	50Hz/60Hz联络
±300/±600	1575/3150	可控硅	1984/1986	电源送电
±533	1920	可控硅	1977~1979	电源送电
±500	560	可控硅	1982	供给负荷
125×2	300	汞弧	1965	50Hz/60Hz联络
125×2	300	可控硅	1977	50Hz/60Hz联络
250	300	可控硅	1979/1980	系统联络
±250	600	汞弧	1965	系统联络

表 1-1-2

## 建设和计划中的

序号	地区	国 家	工 程 名 称	距离(电缆) (km)
1	北	丹麦、瑞典	康梯—斯堪	180(85)
2		丹 麦	大贝尔特海峡	65(30)
3	欧	瑞典、芬兰	芬兰—瑞典	220(185)
4		丹麦、挪威	斯卡格拉克II	240(127)
5	西	英国、法国	英法海峡联络线II	72(72)
6	欧	法 国	科西嘉岛分支	0
7		意 大 利	撒丁岛II	385(121)
8	东	苏 联	耶基巴斯图兹—中俄 罗斯	2414(0)
9	欧	奥 地 利	维也纳—希多斯托	0
10		希腊、保加利亚	希腊—保加利亚	0
11	北 美	加 拿 大	马塔瓦斯卡	0
12			纳尔逊河III	930(0)
13			昂代—丘吉尔	250
14			科默福特—桑迪庞德	200
15	北美	加拿大、美国	魁北克—新英格兰	0
16	北美	美 国	迈尔斯城	0
17			沃克康蒂	256(0)

# 直流输电工程①

额定电压 (kV)	额定容量 (最大) <sup>②</sup> (MW)	预定投运 年 份	用 途
285	300	1988	系统联络
280	350	1989/1990	系统联络
350	420	1989/1990	系统联络
320	320	1990/1995	系统联络
±270×2	2000	1985/1986	系统联络
200	50	1986	撒一意多端直流输电
200	300	1989	撒丁岛扩建, 供给负荷
±750	6000	1985~1988	电源送电, 第一阶段 1500MW
145	550	1987	系统联络
未 定	300	未 定	系统联络
144	350	1985	系统联络
±500	2000	1992/1997	电源送电
	25		
	1400	1990	
±450	690/2090	1986/1992	系统联络, 将来为多端 直流输电
82	200(240)	1985	系统联络
±400	500~1500	1985/1986	系统联络

序号	地区	国 家	工 程 名 称	距离(电缆) (km)
18	北 美	美 国	海 格 特	0
19			西 德 尼	0
20			因特芒廷	794(0)
21			太平洋岸联络线II	未 定
22			利伯蒂—米德	400(0)
23	北 美	美 国	怀俄达克	720(0)
24		美 国	瑞 伊	
25		墨 西 哥	奇科阿森	
26	南 美	巴西、阿根廷	乌拉圭亚纳	0
27		巴 西	伊泰普II	806(0)
28	亚 洲	中 国	舟山群岛	56(12)
29		中 国	葛洲坝—上海	1080(0)
30		印 度	里汉德—德里	915(0)
31		印 度	辛 劳 利	
32		印 度	文迪亚查尔	
33		土耳其、塞浦路斯	土耳其—塞浦路斯	(120)
34		马来西亚	沙撈越—马来西亚半岛	1648(648)
35	大洋洲	澳大利亚	布罗肯希尔	

① 本表根据1985年底统计资料编制。

② “最大”的含意为在允许过载条件下的最大额定值。

续表

额定电压 (kV)	额定容量 (最大) <sup>②</sup> (MW)	预定投运 年 份	用 途
56	200	1985	系统联络
未 定	200	1986	系统联络
±500	1600	1987	电源送电
±500	1100	1988	系统联络
±364/±500	1600/2200	1989/1990	系统联络
	200		系统联络
	200		系统联络
±500	900/1800	1985/1990	系统联络
	50	1986/1987	50Hz/60Hz联络
±600	3150	1987	电源送电
100	50	1987	供给负荷
±500	1200	1988/1989	电源送电, 第一阶段600 MW
±500	1500	1988	
	500	1987	系统联络
70	250×2	1988	系统联络
150	100	1989	
±400×2	2000	1995	
	40	1986	