

直 流 输 电

浙江大学发电教研组直流输电科研组

水利电力出版社

目 录

前 言

第一章 绪论	1
1-1 直流输电发展简史	1
1-2 直流输电的基本概念	6
1-3 直流输电和交流输电的比较	8
1-4 直流输电的优缺点和适用场合	16
1-5 直流系统的构成方式	17
1-6 直流输电的发展前景	23
第二章 换流器的工作原理	25
2-1 概述	25
2-2 单桥整流器的工作原理	26
2-3 单桥逆变器的工作原理	55
2-4 换流器的工况图	65
2-5 多桥换流器	74
2-6 人工换相	82
第三章 直流输电系统的调节方式和调节特性	90
3-1 直流输电系统的基本调节方式及其特性	90
3-2 直流输电系统基本调节的原理和特性	95
3-3 换流变压器分接头的调节	118
3-4 直流输电系统的起停和潮流反转控制	121
3-5 直流输电系统输送功率的调节	126
3-6 换流器串联、并联联结和双极性系统的调节	131
3-7 直流系统和交流系统联合调节	131
3-8 多端直流输电系统的基本调节方式和特性	155
第四章 直流输电系统的故障分析和保护方式	164
4-1 桥臂短路	164
4-2 换流桥直流母线短路	177
4-3 换相失败	180
4-4 误开通故障	186
4-5 不开通故障	187
4-6 桥阀故障的差动保护与逻辑保护	188
4-7 直流线路的短路故障及其保护	202
4-8 换流站交流侧故障与保护	209
4-9 旁通对的应用	214
4-10 直流输电系统主要保护的配置	216

第五章 直流输电系统中的谐波、滤波器和无功功率补偿	222
5-1 概述	222
5-2 换流装置交流侧的特征谐波	223
5-3 换流装置直流侧的特征谐波	233
5-4 换流装置的非特征谐波	248
5-5 谐波的危害	253
5-6 减小谐波的方法	254
5-7 换流装置的无功功率特性和补偿方法	256
5-8 交流侧滤波器的设计	265
5-9 直流侧滤波器的设计	275
第六章 换流站及其主要设备	280
6-1 概述	280
6-2 换流器	282
6-3 换流变压器	322
6-4 直流电抗器	328
6-5 直流线路的振荡和线路阻尼器	338
6-6 测量设备	339
6-7 直流断路器	352
6-8 换流站的平面布置	355
6-9 换流站的无线电干扰和抑制措施	358
第七章 直流输电线路	362
7-1 直流架空线路	362
7-2 直流电缆线路	376
7-3 大地回路	387
第八章 直流输电系统的过电压保护和绝缘配合	405
8-1 概述	405
8-2 直流输电系统中的过电压	405
8-3 过电压保护措施	413
8-4 直流系统绝缘的电气强度	420
8-5 换流站的绝缘配合	424
附录 I 直流输电工程概况	432
附录 II 各种换流器电路的比较	480

第一章 绪 论

1-1 直流输电发展简史

人们对电力的应用和认识以及电力科学的发展都是首先从直流电开始的。19世纪初期发展起来的信号传输——电报，虽然传输的电流是很微弱的，但是人们从此得到启发，并引用于电力传输。法国物理学家德普勒提出：如果输电电压选择得足够高，即使沿着电报线路也可能输送较大的功率到较远的距离。他并于1882年，用装设在米斯巴赫煤矿中的直流发电机，以1500~2000伏电压，沿着57公里的电报线路，把电力送到在慕尼黑举办的国际展览会上，完成了第一次输电试验，也是有史以来的第一次直流输电试验。

此后，直流输电的电压、功率和距离曾分别达到125千伏，20兆瓦和225公里（见表1-1第一项）。但由于当时是采用直流发电机串联组成高压直流电源，受端电动机也是用串联方式运行的。不但高电压大容量直流电机的换向有困难，而且串联的运行方式比较复杂，可靠性差，因此直流输电在当时没有得到进一步的发展。

表 1-1 直流输电试验性工程一览表

试验性工程所在地	建成年份	电压(千伏)	容量(兆瓦)	线路长度(公里)	线路类型	换流设备种类
法 国 穆蒂尔——里昂	1906~ 1927	57.6~ 125	4.3~ 19.3	184.5~ 225	电缆、大地 作回流电路	直流电机串联组成
德 国 里尔吉——密斯堡	1932~ 1942	± 40	16	4.6 (5.0)	电 缆	空气吹弧换流阀(1942年 以后改用汞弧阀)
美 国 梅卡尼克斯维尔—— 斯克内克塔迪	1936	27 (30)	5.0 (4.7~ 5.2)	27	架 空 线	闸流管(1940年以后用引 燃管代替)，40/60赫变频
瑞 士 维汀根——苏黎世	1939	50	0.5	30	架 空 线	有栅控的铁壳汞弧阀，单 极线路——大地回流电路
德 国 夏洛滕堡——莫阿比特，柏林	1944	100	15	4.6	架 空 线	汞 弧 阀
德 国 爱尔巴——柏林	1945	± 220	60	115 (112)	电 缆	汞 弧 阀
瑞 典 脱罗里赫坦——密里路特	1945 (1943~ 1947)	± 45	6.5	50	架 空 线	汞 弧 阀
苏 联 卡希拉——莫斯科	1950	200	30	112	电 缆	汞弧阀，现已改用可控 硅阀

注 由于各资料中纪录数字有所不同，有差别的数字加括号同时列出以供参考。

与此同时，随着生产的发展和电能需求的不断增长，在十九世纪八十和九十年代，人们逐步掌握了多相交流电路原理，创造了交流发电机、变压器和感应电动机。因为交流电的发电、变压、输送、分配和使用都很方便，而且经济、安全和可靠。因此，交流电就几乎完全代替了直流电，并发展成今日规模巨大的电力系统。

尽管如此，世界上有许多科学家和工程技术人员根据直流输电和交流输电各自的特点，特别是交流远距离输电会受到同步运行稳定性的限制，预见到继续发展直流输电的必要性，并陆续地建设了一些试验性工程（参阅表 1-1）。其间曾采用气吹电弧整流器（麦克斯型整流器），闸流管和引燃管作为交直流变换的换流设备。直到高电压大容量的可控汞整流器的研制成功，才为高压直流输电的发展创造了必要的条件。20 世纪 50 年代以后，电力的需求增长得更快，电力系统的规模发展得更大，交流输电的局限性在生产实践中也表现得更为明显，于是直流输电技术又重新为人们所重视。

1954 年，瑞典在本土和果特兰岛之间建成一条海底电缆直流输电线，是世界上第一条工业性的高压直流输电线。此后，许多国家也积极地开展了高压直流输电的研究和建设。六十年代可控硅整流元件（简称可控硅元件，又称晶体闸流管或晶闸管）的出现，为换流设备的制造开辟了新的途径，高压直流输电也出现了新的前景。图 1-1 中的曲线表明全世界直流输电工程总容量逐年增长的情况。目前（1980 年）世界上已投入运行和正在建设即将投入运行的高压直流输电工程和“交流-直流-交流型”非同步联络站共有 20 余项，总输送容量约一万兆瓦（详见表 1-2）。图 1-2 为各项工程的地理分布图。各项工程的概况可参阅本书附录 FI。其中，美国太平洋岸联络线和正在逐步扩建的莫桑比克卡布拉巴萨直流输电系统是目前规模最大的工程。而且还有不少规模更大的工程正在规划设计之中，估计今后将以每年 1600 兆瓦的平均速率增长。

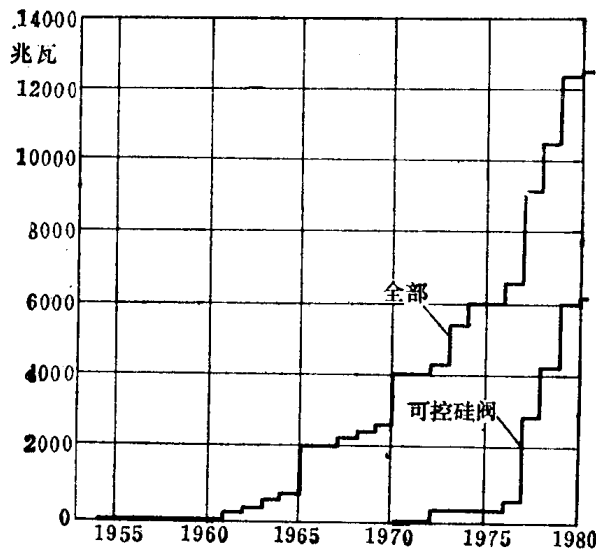


图 1-1 全世界直流输电工程总容量的增长情况

表 1-2 世界各国高压直流输电系统一览表
(主要根据1980年国际大电网会议资料)

状况	序号	工程名称	国别	功率 (兆瓦)	电压 (千伏)	电流 (安)	线路长度(公里)			阀型	投入运行年份
							架空线	电缆	总长		
已 投 入 运 行	1	果特兰岛——瑞典本土	瑞典	20/30	100/150	200	0	96	96	汞 汞弧+可控硅	1954/1970
	2	英法海峡	英、法	160	±100	800	0	7+50+8	65	汞弧	1961
	3	伏尔加格勒——顿巴斯	苏	720	±400	900	470	0	470	汞弧	1962~1965
	4	康梯——斯塔	瑞典—丹麦	250	250	1000	55+40	25+60	180	汞弧	1965
	5	佐久间(50/60赫变电站)	日本	300	2×125	1200	0	0	0	汞弧	1965
	6	库克海峡(南北岛)	新西兰	600	±250	1200	535+35	39	609	汞弧	1965
	7	撒丁岛——意大利本土	意大利	200	200	1000	86+156+50	16+105	413	汞弧	1967
	8	温哥华岛 I	加拿大	312	260	1200	41	33	74	汞弧	1968/1969
	9	太平洋岸联络线 I	美	1440 2000	±400 ±500	1800	1362	0	1362	汞 汞弧+可控硅	1970 1984
	10	伊尔河(非同步联络站)	加拿大	320 (350)	2×80	2000	0	0	0	可控硅(风冷)	1972
	11	纳尔逊河 I 第一期 最终	加拿大	810 1620	+150 -300 ±450	1800	890	0	890	汞弧	1973 1975~1977
	12	金斯顿	英	640	±266	1200	0	59+23	82	汞弧	1974
	13	斯卡格拉克	挪威—丹麦	500 1000	±250	1000	85+28	127	240	可控硅(风冷)	1976~1977

续表

状况	序号	工程名称	国别	功率 (兆瓦)	电压 (千伏)	电流 (安)	线路长度(公里)			网型	投入运行 年份
							架空线	电缆	总长		
已投入运行	14	斯蒂加尔(非同步联络站)	美	100 (110)	2×25	2000	0	0	0	可控硅(风冷)	1977
	15	卡布拉萨 第一期 第二期 最终	莫桑比克 南非	960 1440 1920	±266 ±400 ±533	1800	1414	0	1414	可控硅(油冷)	1976 1977 1979
	16	温哥华岛II	加拿大	370 (476)	-280	1320	41	33	72	可控硅(风冷)	1977~1979
	17	斯夸尔比尤特	美	500 (550)	±250	1000	749	0	749	可控硅(风冷)	1977
	18	新信浓(50/60赫联络站)	日本	300	2×125	1200	0	0	0	可控硅(油冷)	1977
	19	纳尔逊河II 第一期 最终	加拿大	900 (1000) 1800	±250 ±500	1800	930	0	930	可控硅(水冷)	1978 1985
	20	CU工程(安德伍 利斯)	美	1000 (1100)	±400	1250	710	0	710	可控硅(风冷)	1979
	21	北海道 本州 第一期 第二期 最终	日本	150 300 600	125 250 ±250	1200	27+97	44	168	可控硅(风冷)	1979 1980 —
	22	芬兰 芬兰(非同步联络站)	芬兰 苏联	1070	3×±85	2100	0	0	0	可控硅(水冷)	1981
	23	因加 沙巴 第一期 最终	扎伊尔	560 1120	±500	560 1120	1700	0	1700	可控硅(油冷)	1981
	24	阿卡里(50/60赫联络站)	巴拉圭 巴西	50	26		0	0	0	可控硅	1981
	25	伊泰普 第一期 最终	巴西	3150 6300	±600 2×±600	2600 2600	783/806	0	783/806	可控硅	1983 1985
	26	迪尔拉尔(非同步联络)	奥地利	550			0	0	0	可控硅	1983

正在建设或积极研究之中

续表

状况	序号	工程名称	国别	功率 (兆瓦)	电压 (千伏)	电流 (安)	线路长度(公里)			网型	投入运行 年份
							架空线	电缆	总长		
积极 正在研 究建 设之 或中	27	耶塞巴斯图兹 欧洲部分中心	苏	6000	±750	4000	2414	0	2414	可控硅(水冷)	1984
	28	英法海峡联络线II	英—法	2000	2×±250	2000	0	17+46+5	68	可控硅(空冷)	1984
	29	纳尔逊河III	加拿大	2000	±500	2000	930	0	930	可控硅	1990
在 拟 议 之 中	30	群岛 第一期 最终	加拿大	800 1600	±400	1000	780 1095	19	799 1114	可控硅	(1980) (1985)
	31	太平洋岸联络线扩建	美	2000	±500	2000	1700	0	1700	可控硅	1984
	32	邱吉尔瀑布—纽约	加拿大 美国	4500	±500		2500	150	2650		
	33	美国本土—阿拉斯加	美	40000							
	34	马尼托巴—美国	加拿大 美国	1000	(±450)	(1100)	1720	0	1720		
	35	意大利—南斯拉夫	意大利 南斯拉夫	720	300		215	120	315		
	36	西班牙—摩洛哥	西班牙 摩洛哥	200	220			32	32		
	37	印度	印度	2000	±400	2500	900	0	900		
	38	哈萨克斯坦—中西伯利亚	苏	4000~20000	±1100~ ±1500		4500	0	4500	可控硅	本世纪末

注 1. 第1~29项工程所在的地理位置已在图1-2中以相同的序号标明。2. 容量一栏中加括号者为最大持续容量。

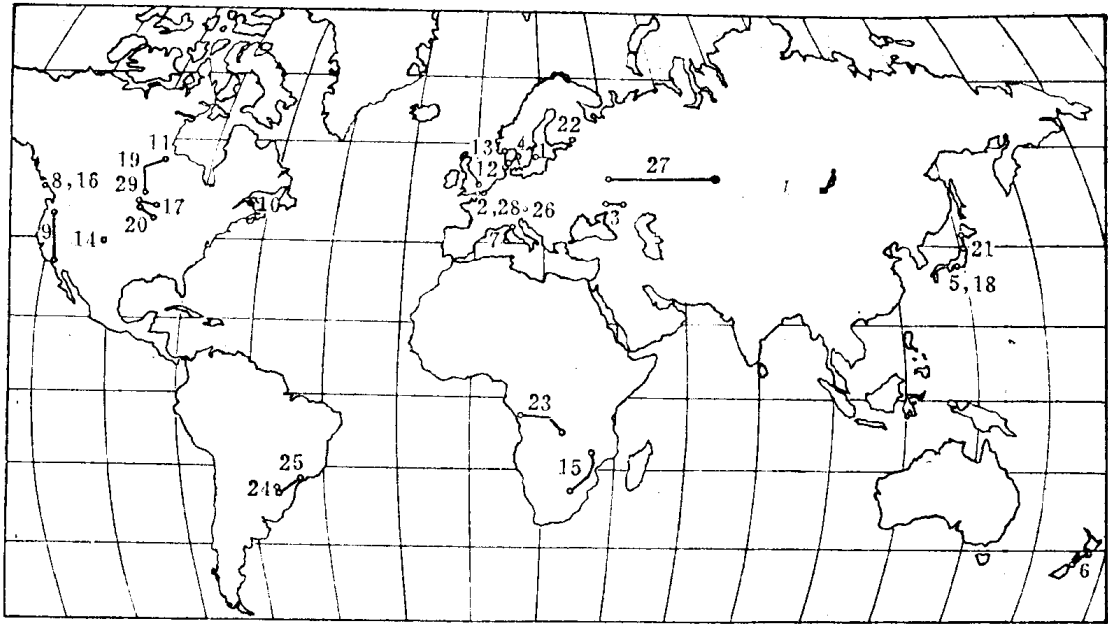


图 1-2 直流输电工程分布图

1-2 直流输电的基本概念

直流输电的基本原理如图1-3(a)所示。它代表一个最简单的直流输电系统。其中包括两个换流站 ZH_1 及 ZH_2 和直流线路。两个换流站的直流端分别接在直流线路的两端。它们的交流端则分别连接到两个交流电力系统I和II。换流站装有换流器，它的功用是实现交流电和直流电之间的变换。

换流器由一个或多个换流桥串联（或并联）组成。目前用于直流输电的换流桥均采用三相桥式换流电路，每一个桥有六个桥臂，由于桥臂有可控的单向导通特性，所以称为阀或阀臂。阀臂则由汞弧阀或可控硅元件串联构成。

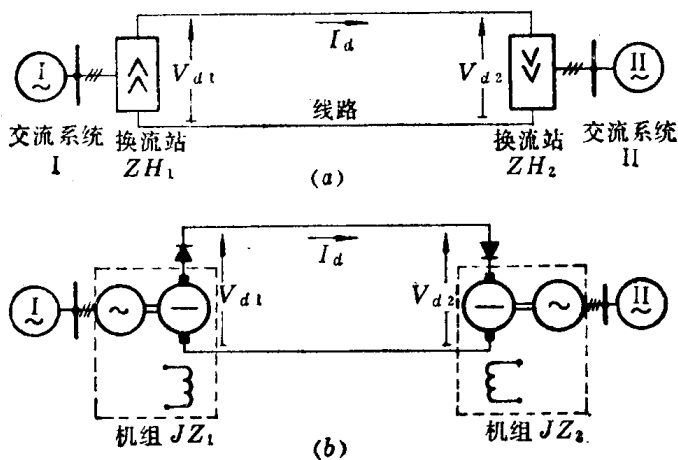


图 1-3 直流输电的示意图

- (a) 最简单的直流输电系统原理图；
- (b) 交流-直流-交流型的机电比拟系统

从电力系统I向电力系统II输送电力时，换流站 ZH_1 把送端电力系统I送来的三相交流电流变换成直流电流，通过直流线路把直流电流和功率输送到换流站 ZH_2 ，再由 ZH_2 把直流电流又变换成三相交流电流。从交流变换成直流和从直流变换成交流的过程分别称为整流和逆变。

直流输电系统中的换流站可以用图1-3(b)交流-直流-交流

型机电系统中的同步交流电机-直流机组 JZ_1 和 JZ_2 来比拟。系统I向系统II输送电力时，换流站 ZH_1 作为整流站运行，相当于机组 JZ_1 作为同步电动机-直流发电机组运行；换流站 ZH_2 作为逆变站运行，相当于机组 JZ_2 作为直流电动机-同步发电机组运行。二者加在直流线路上的直流电压各为 V_{d1} 和 V_{d2} ，从图1-3可知线路电流：

$$I_d = \frac{V_{d1} - V_{d2}}{R} \text{ 或 } V_{d1} - V_{d2} = I_d R \quad (1-1)$$

式中 R —— 线路的电阻。

直流线路和交流线路不同，它只输送有功功率，不送无功功率。换流站 ZH_1 送到直流线路的功率和换流站 ZH_2 从直流线路接受的功率分别为：

$$P_{d1} = V_{d1} I_d \text{ 和 } P_{d2} = V_{d2} I_d \quad (1-2)$$

两者之差为线路损耗。

当换流站 ZH_2 作为逆变站运行时，它的直流电压 V_{d2} 的方向是跟作为整流站运行的换流站直流电压 V_{d1} 和直流电流相反的。和直流电动机相似，有时也称逆变站的直流电压为反电压。当直流电压 V_{d1} 大于反电压 V_{d2} 时，就有电流沿着图1-3所示的方向流通。只要改变两端直流电压 V_{d1} 和 V_{d2} ，就可调节电流 I_d ，从而也就改变直流线路的功率 P_{d1} 或 P_{d2} 。如果需要，通过调节可保持输送的功率或电流不变。

在交流-直流-交流型的机电系统中，直流电压的改变是调节直流电机磁场绕组的电流来实现的。而换流站直流电压的变化则是靠调节换流器阀的触发开通相位来实现的。

应该指出：如果 V_{d2} 的极性不变，即使把它调节得大于 V_{d1} 时，换流站 ZH_2 仍不能向换流站 ZH_1 送出反向的电流和功率。这是由于换流器只能单向导通的缘故。用直流机组来比拟时还应该串联两极管来代表换流站单向导通的特性（如图1-3所示）。因此，要改变功率的输送方向，对机电系统来说要把两个直流电机磁场绕组中的电流都加以倒向，使直流电机端电压的极性反向。在极性改变之后，如果 V_{d2} 大于 V_{d1} ，那末机组 JZ_2 仍可沿着两极管可导通方向向机组 JZ_1 送出功率。这时，机组 JZ_2 从原来作为直流电动机-同步发电机组运行改变为同步电动机-直流发电机组运行，机组 JZ_1 则相反地改为直流电动机-同步发电机组运行。与此相似，当输送功率反向时，换流站 ZH_2 从逆变站改作为整流站运行；同时换流站 ZH_1 也改作为逆变站运行。这和机组既可作为同步电动机-直流发电机组也可以作直流电动机-同步发电机组一样，一个换流站既可以作为整流站也可作为逆变站运行。但在调节方法上，直流输电系统则必须大幅度地调节换流器的触发开通的相角，将两端换流站的直流电压极性同时倒反，而且使 V_{d2} 大于 V_{d1} ，以实现输送功率的反向。这一点在换流器工作原理和调节的有关章节中还要详细讨论。

用同步交流电机-直流机组来比拟换流站难免还有一定的局限性，即同步交流电机可以利用励磁的调节来改变它的功率因数，使功率因数既可滞后也可越前。换流站中的换流器则不同，它在运行中一般总要向交流侧取用无功功率（滞后的），其原因将在换流器工作原理这一章中说明。

此外，当换流器运行时在它的交、直流两侧都会产生谐波。

图1-4(a)是直流输电系统的基本结线图，图中整流站和逆变站（或者它们的换流器）

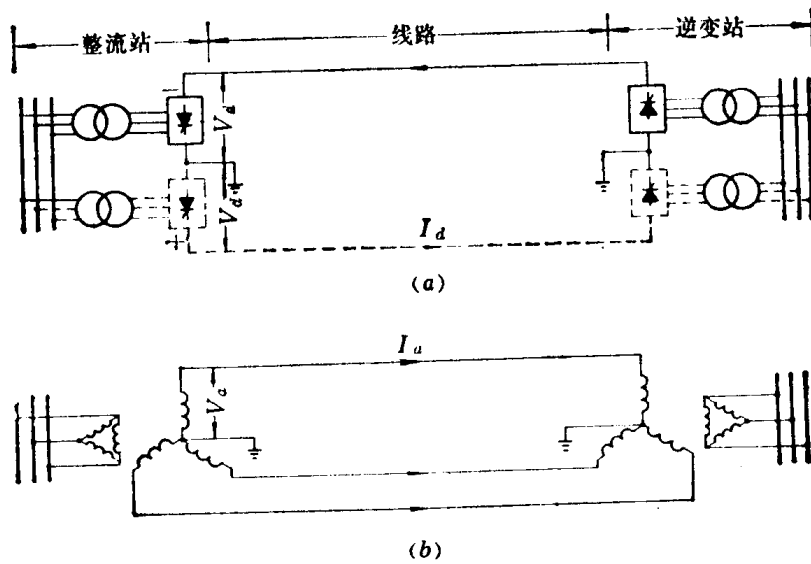


图 1-4 直流输电系统和交流输电系统的比较
(a) 直流输电系统接线图; (b) 交流输电系统接线图

的两个直流端点，分别接到线路的两根导线，这些端点称为极。换流器的中间一点接地，以大地作为回流电路。接地点把换流器分成两半，分别称为正极和负极换流器。它同时也把换流站分成为两个“半站”。如果线路两根导线对地的电位分别为+100千伏和-100千伏时，则称为±100千伏**双极直流线路**；如果把两端换流站包括在一起，则总称为±100千伏双极直流输电系统。在一般情况下，两根极导线中的直流电流大小相等，方向相反，没有电流通过接地点和大地，这和对称的交流输电系统类似。因此，接地点有时仍沿用“中性点”这个名称。

1-3 直流输电和交流输电的比较

直流输电在技术上和经济上有许多不同于交流输电的特点，因此，在目前交流输电技术虽然已经广泛应用的情况下，有的工程由于经济或技术上的原因采用直流输电却较为合理。以下把两种输电方式加以比较，将有助于对直流输电概貌和特点的了解。

1-3-1 线路

如图1-4所示，直流线路可用两根导线，三相交流线路则须用三根导线。如果每根导线具有相同的截面和绝缘水平，那么直流线路每根导线输送的功率为：

$$p_d = V_d I_d$$

交流线路每根导线输送的功率为：

$$p_a = V_a I_a \cos\varphi$$

式中 V_d ——直流线路的对地电压；

V_a ——交流线路对地电压的有效值，即相电压的有效值；

I_d, I_a ——直流和交流线路的电流有效值,

$\cos\varphi$ ——交流线路的功率因数。

当两种线路采用相同的电流密度时, 每根导线所载电流相等, 即 $I_d = I_a$ 。

如果交流和直流线路所需的绝缘水平按过电压倍数而定, 分别为 $\sqrt{2}k_a V_a$ 和 $k_a V_a$ 。对于超高压架空线路, 交流线路过电压倍数取 $2 \sim 2.5$, 直流线路则约为 2 倍。作为一次近似, 假定过电压倍数 $k_d = k_a$, 因此当线路具有相同的绝缘水平时, 则有

$$V_d = \sqrt{2} V_a$$

所以

$$\frac{p_d}{p_a} = \frac{V_d I_d}{V_a I_a \cos\varphi} = \frac{\sqrt{2}}{\cos\varphi}$$

在交流远距离输电的情况下, $\cos\varphi$ 一般较高, 取为 0.945, 则

$$\frac{p_d}{p_a} = \frac{\sqrt{2}}{0.945} = 1.5$$

或

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{2p_d}{3p_a} = 1$$

也就是只有两根导线的直流线路输送的总功率 p_d 和三根导线的交流线路输送的总功率 p_a 相等。因此单位长度的直流线路所需的有色金属和绝缘材料可比交流线路节省三分之一。如果采用架空线, 直流线路的杆塔荷载较小, 线路所需的走廊也较窄。

反过来也可以说是: 如果线路建造费用相同时, 直流输电所能输送的功率约为交流输电功率的 1.5 倍。

另一方面, 由于直流线路少一根导线, 在输送功率相同的条件下, 直流线路导线电阻的功率损耗也比交流线路的少三分之一。此外, 由于集肤效应, 大截面导线的交流有效电阻比直流电阻略大, 也增大了线路的功率损耗。

这两方面是直流线路的建设费用和运行费用比较经济的基本原因。除此之外, 架空线路和电缆线路还有各自不同的特点。

架空线路 高压架空线路的电晕损耗与导线尺寸、气候因素有关, 当导线表面电场强度相同时, 直流线路年平均电晕损耗大约仅为相应的交流线路的 50~65% 左右。这主要是因为直流和交流电晕的机理不同, 而且在恶劣气候下, 直流电晕损耗要比交流小得很多。

直流架空线路电晕引起的无线电干扰在晴天时大约等于或略小于相应的交流架空线路, 而雨天时交流线路的干扰水平要比直流线路高得多。在一定意义上, 电晕引起的无线电干扰比电晕损耗更为重要, 因为后者只是经济上的损失, 而前者则会造成环境的污染, 在输电电压不断提高的情况下, 这问题更须加以重视。

电缆线路 电缆的绝缘在直流电压和交流电压作用下的电位分布、电场强度和击穿强度都不相同。以同样厚度的油浸纸绝缘电缆为例, 用于直流时的允许工作电压比在交流下约高 3 倍。因此, 在有色金属和绝缘材料相同条件下, 两根芯线的直流电缆线路输送的功率 P_d 比三根芯线的交流电缆线路输送功率 P_a 大很多。在一些工程中曾考虑把原有的交流电缆改用于直流, 输电能力可提高 1.8~2.5 倍。所以, 在跨越海峡等必须用电缆线路输电的

情况下，如果采用直流输电，线路部分的造价可比交流输电低得多。

运行中，电缆用于交流时，除了芯线的电阻损耗之外，还有绝缘中的介质损耗以及铅包皮和铠装中磁感应损耗。用于直流时，则基本上只有芯线的电阻损耗，而且绝缘的老化也慢得多。因此，直流电缆线路的年运行费用要比相应的交流电缆低得多。

线路的电容电流 直流线路导线之间和导线对地之间虽然也存在着电容，但由于直流线路在正常运行时电压纹波很小，所以基本上没有电容电流。

当交流远距离线路输送的功率不等于自然功率时，线路中的电容电流通过线路的电抗，会引起沿线电压有较大的变化。在轻载的情况下，线路上某些地方的电压可能升高到不能允许的程度，而必须用并联电抗器加以补偿。直流线路则不存在这种问题，沿线电压较平稳。

电缆线路的电容要比架空线路大得多，因此超高压交流电缆线路单位长度的电容电流很大，以220千伏电缆线路为例，每相每公里为23安左右，当电缆长达40公里时，每相电容电流可达950安，几乎占用了芯线的全部载流容量，因而能承担的负载电流就很小了。如果是海底电缆，在中途采用并联电抗补偿有实际困难，所以较长的海底电缆用交流输电实际上是不可能的，而直流电缆线路就比较适宜。

回流电路 如图1-4(a)所示，直流线路可利用大地或海水作为回流电路。当双极线路中有一个极因故障检修而退出运行时，或在单极线路中，大地或海水回流电路将通过全部直流电流，把电流引入大地或海水，就需要设置电极，这部分费用在整个线路造价中只占很小的部分。

当直流电流在地中流动时，对沿途的金属构件和管线有电解腐蚀作用，这可采取一定措施加以减小和防止。

以海水作为回路时，要注意到海水电极附近海洋生物的保护。此外，在海底单芯电缆上方航行的船舶磁罗盘，也会受到干扰，但一般不至于成为问题。

交流输电线路则不允许用地作为三相中的某一相电路运行，因为这样做对于通讯线路的干扰将超过允许的水平，而且三相阻抗的不同，将使交流电力系统变得不对称。

可靠性和灵活性 由于直流线路的导线少，其架空线路绝缘子的数量也比交流线路少，从这方面讲发生故障的机率也相应地减少。

当直流线路的一个极发生持续性故障时，可利用另一个健全极和大地回流电路输送原来功率的一半。在导线发热条件允许的情况下，甚至还可通过倒换操作将原来分别接在两个极的换流器都并联接在健全极和大地回路之间，因而仍可输送全部的功率。

三相交流线路如因故障断开一相时，不能长期以非全相持续运行。如果要保证不间断地送电，就必须架设双回路线路。

1-3-2 两端设备

直流输电系统两端的换流站设备比交流输电系统中的变电所复杂，有不少设备是交流变电所没有的，其中主要是换流器和谐波滤波器。所以它的造价比交流变电所高。

换流器 70年代以前都采用汞弧换流器，以后新建的则绝大多数采用可控硅元件构成

的换流器。目前换流器的造价还比较贵，但可控硅换流器的造价随着电子工业的发展有不断下降的趋势。

换流器的过载能力较小，可控硅换流器除了过载能力小之外，而且对于过电压也较敏感，但采取有效的保护措施后，它的可靠性已不断地提高。以伊尔河工程为例，1974—1975年间，一个实效运行月（指换流器累计运行 30×24 小时）的可控硅元件损坏率仅为 $0.004\% \sim 0.005\%$ 。采用可控硅阀的直流输电系统目前已有相当高的可用率，世界各国直流输电工程1978年的电能可用率绝大多数均在 94.2% 以上^①。

滤波器 换流器在运行中会在交流侧和直流侧产生谐波电流和谐波电压。这些谐波的存在会产生不良的后果，特别在和直流系统相连系的、而且延伸很广的交流系统中，将使电力设备发生额外损耗而过热；对直流和交流线路沿线附近的音频通信系统产生干扰；还可能引起局部谐波过电压。为了减少交流电网的谐波，换流站的交流侧要安装滤波器（交流滤波器中的电容器同时也能供给一部分无功功率）。在直流侧的主电路中必须串联直流电抗器作为平波之用，有时也还需要加装滤波器。

无功补偿设备 直流线路本身在运行中不需要无功功率，但是两端换流器在运行中需要较大的无功功率。在额定情况下运行时，换流器所需的无功功率约为直流功率的 $40 \sim 60\%$ ，一般整流器所需的无功功率比逆变器稍小一些。除了交流滤波器中电容器能提供一部分无功功率之外，有时还需要加装电力电容器和同步调相机。整流站的无功功率有一部分可以由发电机或系统供给。

当交流输电线的输送功率超过自然功率时，需要在线路两端安装无功补偿设备，或在线路中串联电容器（如果需要装设），以补给线路的无功功率损耗。当负荷小于自然功率时，又要求在线路两端安装同步调相机、静止补偿器或并联电抗器，来吸收线路多余的无功功率。

① 根据1980年世界大电网会议资料，各国采用可控硅阀的直流输电工程1978年电能可用率统计数据如下：

工 程 名 称	电 能 可 用 率 ^① %	
	考虑线路强迫停运的影响	不考虑线路强迫停运的影响
伊 尔 河	97.1	97.1
斯卡格拉克	95.4	—
戴维A.汉密尔(斯蒂加尔)	96.7	96.7
卡布拉巴萨(受端一侧)	98.6	98.6
温哥华II	88.3	88.3
斯夸尔比尤特	97.0	98.0
新 信 浓	98.2	98.2
纳尔逊双极	94.2	94.2

① 电能可用率——系统能以额定容量运行的等效时间所占考察时间段的百分数。即

$$\text{电能可用率} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{全部等效停运小时数}}{\text{考察时间段小时数}} \right)$$

其中 等效停运时间——实际停运时间乘由于停运而损失的输电容量与总的额定输电容量的比值，以便将停运时间折合到全部额定容量的等效停运时间。

考察时间段小时数——在所考察时间段中的日历小时数。全年时段小时数为8760。

交流输电和直流输电都需要有可调节的无功功率电源，但是直流输电两端所需的无功功率只随输送功率大小而增减，和线路长度无关。交流输电线在额定情况下运行所消耗的无功功率，大约为28兆乏/兆瓦·公里，线路愈长，则所需补偿的无功功率愈多，图1-5表明当线路长度超过400~500公里以上时，交流输电所需补给的无功功率将超过直流输电所需补给的无功功率。

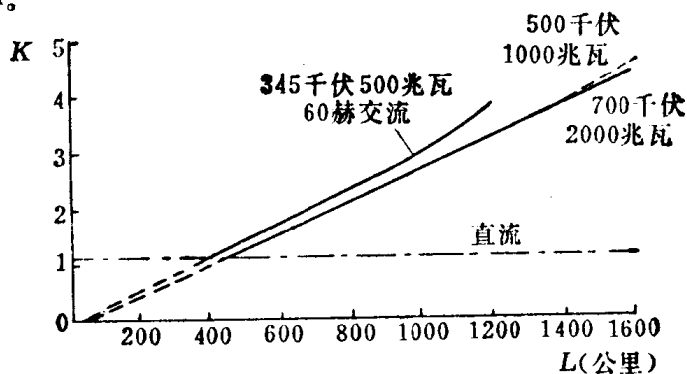


图 1-5 超高压交流和直流线路运行在额定值时，所需的无功功率和线路长度的关系
K—需供给的无功功率与输送功率的比值；L—线路长度

1-3-3 总费用和等价输电距离

在输送功率相等和可靠性相当的情况下，直流输电和交流输电相比，虽然换流站的费用比变电所的费用要贵得多，但是直流输电的单位长度造价比交流线路的低。如果输电距离增加到一定值时，直流线路所节省的费用刚好抵偿了换流站所增加的费用（即交、直流输电的线路和两端设备的总费用相等），这个输电距离就称为交、直流输电的等价距离。如果把交、直流两种输电方式在输送一定功率时，所需的费用和输电距离之间的关系绘成如图1-6所示的曲线，两曲线交点的横坐标就是等价距离。显然，当输电距离大于等价距离时，采用直流输电比交流输电经济，反之则采用交流输电。由于各国和各个工程的具体条件不同，各种费用都有一定的变化范围，所以图1-6(a)中的两曲线实际上应该用有一定宽度的带来表示。

国际大电网会议曾有资料表明：在1968年以后一段时间里，采用架空线路输送540~2160兆瓦功率时，等价距离约在640~960公里之间。一般情况每一单位长度的直流电缆线路比交流电缆线路要节省得多，所以电缆线路的等价距离要比架空线路的小得多，约在56~90公里之间；而海底直流电缆单位长度的费用比海底交流电缆单位长度的费用节省得更多，它的等价距离则约为一般电缆线路的一半。今后随着换流器价格的下降，等价距离还会缩短。最近西德AEG、BBC、西门子三公司的直流输电工作组所提出的架空线路等价距离逐年下降趋势的曲线如图1-6(b)所示。从技术经济比较来看，直流输电除了适用于大功率远距离输电之外，还适用于海底电缆送电，以及受线路走廊和其他技术原因的限制而必须采用地下电缆送电的场合，例如向用电密度高的大城市送电。

直流输电还便于分阶段建设，分期投资。可以先建设一个极，如图1-4a中的实线部分所示，然后再增设另一个极（虚线部分）。换流器也可以采用逐步增多串联（或并联）换流器个数的方法，来提高直流输电系统的额定电压（或电流），增加输送功率。

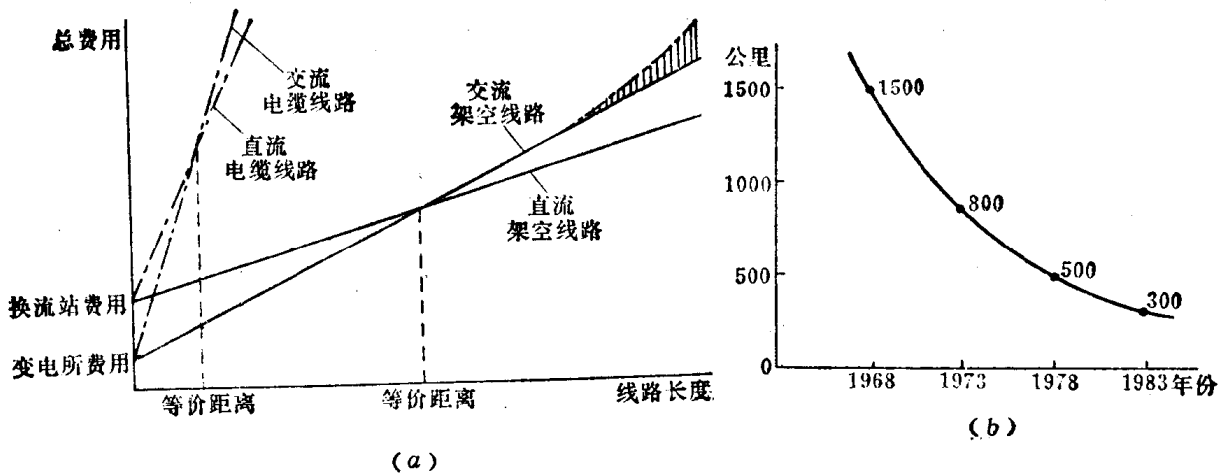


图 1-6 直、交流输电的费用和输电距离的关系

1-3-4 潮流的调节

一个发电厂（或送端系统）通过交流输电线向受端交流电力系统送电时，输送的功率为

$$P = \frac{EU}{X_{\Sigma}} \sin \delta \quad (1-3)$$

式中 E —— 送端发电厂的等值电势；

U —— 受端系统的等值电势；

δ —— 两个电势之间的相位差，又称功率角；

X_{Σ} —— 两个电势之间的总等值电抗，包括送端发电厂（或送端系统）和受端系统的等值电抗与输电线路和升降压变压器的电抗。

由于系统中各种交流电力设备额定电压的限制，两端的电压不允许有大幅度的变化。即使较大幅度地调节电压，也只能在短时间内使输送的有功功率有所改变，但最终的结果只是改变了无功潮流。要调节输送的有功功率总是要改变功率角 δ 的大小，也就是必须调节输入到发电机的机械功率。发电机转子具有惯性，改变功率角 δ 需要时间，所以交流输电功率的调节是比较缓慢的。

直流输电线路输送的电流和功率（式1-1）由两端的直流电压所决定，与两端交流系统的频率和电压相位完全无关。直流线路电压的变化不会直接影响系统中交流电力设备的运行电压，也不像交流线路那样受较大的限制，只要不超过允许的最高电压都可以根据需要加以改变，以调节直流线路的电流和功率。另一方面两端直流电压的变化是通过换流站中所配备的电子型调节器改变换流器的触发相位来实现的，调节器的时间常数较小，所以直流线路电流和功率的调节过程较快。

调节直流线路功率时，发电机可以不必立即承担全部的功率变量，只是使两端系统中发电厂负荷和频率改变到新的平衡状态，一端系统频率升高，另一端系统频率降低；然后，两端交流系统可各自改变发电厂的输出功率使频率恢复。

直流输电系统的调节方式是多种多样的。根据技术经济的要求，既可按直流电流、功率或电压等参量进行调节，也可以按交流系统的频率、电压以及输电线功率角等参量进行调节，还可以按这些参量及其变化率的种种组合进行调节。

1-3-5 运行的稳定性

当送端发电厂（或电力系统）通过交流远距离输电线路和受端系统连接起来同步运行时，可能出现稳定性问题。电力系统的稳定性，首要的是指交流电力系统经受扰动之后，保持同步运行的能力。如果交流输电线输送的功率接近稳定极限时，在受到扰动之后，发电机之间可能失去同步，而导致系统解列，造成严重的停电事故。

交流电力系统的稳定性问题可利用式(1-3)的功角特性作简要说明。从这个方程可知，当 $\delta = 90^\circ$ 时，输送功率达到最大值。如果 $\delta > 90^\circ$ ，则同步功率 $\frac{dP}{d\delta} < 0$ ，失去保持同步

的能力。因而 $P_m = \frac{EU}{X_z}$ 是交流输电系统在微扰动下的稳定极限，也称为静态稳定极限。为了保证系统运行的可靠性，输送的功率应小于这个极限，并留有一定储备，使系统在受到大的扰动时，也具有恢复同步运行的能力，即要求

$$PX_z \leq (1-k)EU$$

式中 k —— 稳定储备系数。

由上式可知：如果输送功率过大或输电距离过长，也就是输送距离和输送功率乘积超过一定值时，系统稳定的储备系数将不足，因而不能保证系统运行的可靠性。总之，系统稳定性问题是实现交流远距离输电的一个限制因素。

如果用直流输电线路把两个交流系统连接起来，就不存在两端系统中的同步电机需要同步运行的问题，所以直流输电距离和容量当然不受同步运行稳定性的限制。

为了增加交流输电的能力，需要而且可能采取一定措施来提高系统的稳定性。在这些措施中，当然首先要充分发挥发电机的自动调节励磁、快速切除线路故障和自动重合闸等技术措施的作用。但有时还需要采取增设线路开关站，串联电容补偿和发电机制动等措施。甚至要提高线路的额定电压和增加线路的回路数。采取这些措施就要增加费用。图1-6中用点划线表示交流输电超过一定距离时，提高稳定措施所增加的费用。输电距离越长，相对于交流输电来说，直流输电将更为经济。这样，远距离输电不但可使边远地区大量能源（特别是水力资源）得到充分利用；而且输电距离越长，两端系统的负荷曲线由于时差（地理经度不同）或气候季节的差别（地理纬度不同）越大，总的日负荷曲线变得越平坦，发电设备的利用率也就愈高。

进一步还可利用直流输电提高交流输电系统的稳定性。如果直流输电系统和交流输电系统的一端连接在一起并列运行（图1-7a），或是两端都分别连接在一起并联运行（图1-7b），当交流输电线因扰动引起输送功率变化时，可按预定要求迅速地调节直流输电线的功率，抵消交流输电系统因扰动引起的功率变化量，减小由于发电机输出的电功率与输入的机械功率之间的不平衡而引起转子转速的变化，从而减小转子摇摆幅度并起加强阻尼