

高压直流输电

林永生 胡良珍 严朗威 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书介绍一种新的输电方式——高压直流输电。

本书从高压直流输电的特点、概况到具体的设计、运行、保护和测试都作了详细的叙述。为便于了解这项新技术的特点,从最基本的概念讲起,对计算方法力求条理清楚,结合实际并举有实例。

本书可供电力系统科技人员,有关大专院校师生和换流技术的专业人员参考。

封面设计 卜允台

高 压 直 流 输 电

林永生 胡良珍 严朗威 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.5 字数 268,000

1982年10月第1版 1982年10月第1次印刷

印数 1— 6,300

书号: 15119·2211 定价: (科五) 1.20 元

目 录

第一章 高压直流输电概况

第一节 直流输电的基本情况	1
第二节 国外应用直流输电的概况	4
第三节 直流与交流输电的技术经济比较	11

第二章 高压直流输电换流器的工作原理

第一节 整流器的工作原理	16
第二节 逆变器的工作原理	21
第三节 弱系统中电容对换相过程的影响	24
第四节 换流器的理论关系式	26
第五节 直流输电系统的等值回路	28

第三章 高压直流输电的设计

第一节 直流输电系统的主接线	33
第二节 换流站平面布置原则	34
第三节 直流输电线路	37
1. 直流架空送电线路	37
2. 直流电缆线路	43
3. 以大地或海水作为回路	44

第四章 高压直流输电的主要设备

第一节 可控硅换流阀	49
1. 冷却方式和可控硅元件的要求	49
2. 可控硅阀串、并联元件数的选择	49
3. 均压回路及其参数的选择	53
4. 换流器的基本振荡和阻尼方式	60
5. 触发回路	64
第二节 换流变压器和直流滤波电抗器	70
1. 一般要求	70
2. 换流变压器	70
3. 直流滤波电抗器	72
第三节 调谐装置及无功功率补偿	74
1. 交流回路调谐装置	74
2. 直流回路调谐装置	80
3. 无功功率补偿	82

第五章 高压直流输电的运行

第一节 高压直流输电的控制	84
1. 直流输电的基本控制特性	84

2. 直流输电的快速相位控制	87
3. 谐波不稳定性及其改善方法	90
4. 同步频率倍增器	92
第二节 高压直流输电的调节	95
1. 定电流调节	95
2. 定熄弧角调节	100
3. 潮流翻转控制	104
4. 定功率(频率)调节	105
5. 换流器的起停	108
6. 交流系统阻尼控制	109
7. 无功功率和交流电压的调节	110

第六章 高压直流输电的故障与保护

第一节 直流输电的过电流	114
1. 换流器故障	114
2. 直流线路故障	122
3. 换流站交流侧故障	124
4. 双桥桥间短路故障	125
第二节 直流输电的过电流保护	125
1. 整流器和逆变器的事故发展控制	126
2. 过电流保护方法	127
第三节 直流输电的过电压	133
1. 波形基本为直流电压的过电压	133
2. 波形基本为交流工频电压的过电压	134
3. 波形基本为操作波的过电压	135
4. 陡波过电压	135
第四节 直流输电的过电压保护	136

第七章 高压直流输电的测试

第一节 直流输电的测量	139
1. 直流参数的测量	139
2. 高电压下阀“工况”的测量	147
第二节 直流输电的试验	149
1. 可控硅阀的试验	149
2. 换流站内其它主设备的试验	155
3. 直流线路的试验	158

第八章 高压直流输电的展望——多端直流输电

第一节 多端直流输电的需要	160
第二节 多端直流输电的连接方式	160
第三节 多端系统的控制	161
1. 并联多端系统的控制模式和运行	161
2. 多端系统的数控方式	165
第四节 多端系统的直流线路保护	169
1. 新的多端系统直流线路保护	169
2. 实验结果	172
第五节 小结	174
参考文献	174

第一章 高压直流输电概况

第一节 直流输电的基本情况

直流输电是将发电厂发出的交流电,经整流器变换成直流输送至受端;然后再用逆变器变换成交流送至用户使用(图 1-1)。

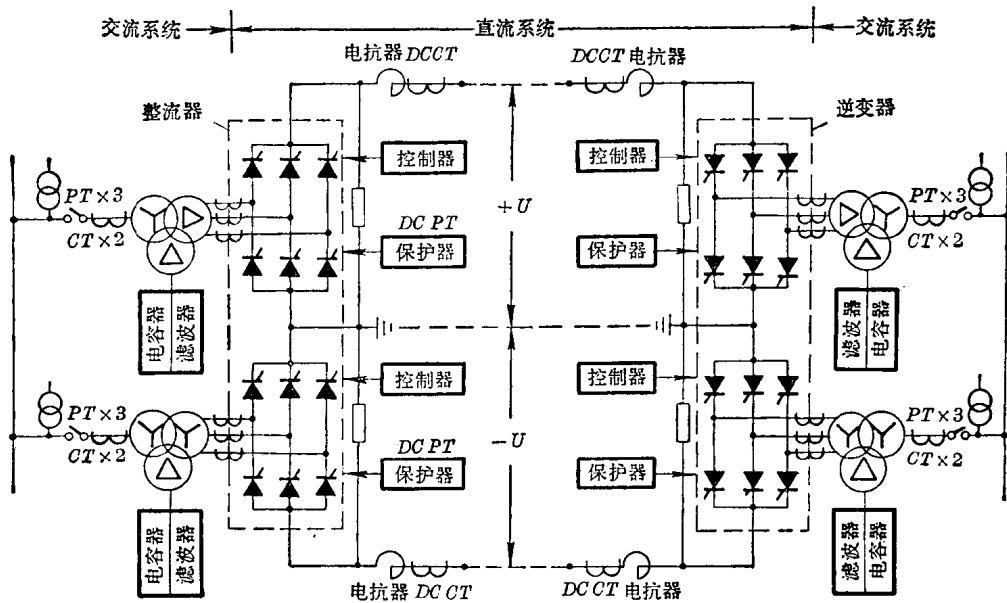


图 1-1 直流输电主回路图

直流输电在我国是一项新技术,在一定条件下,它具有很大的经济技术效益。我国幅员广阔,水力资源丰富,沿海岛屿星罗棋布,有不少场合适宜采用直流输电。因此,在研究提高交流电网电压的同时,也应积极开展直流输电的研究工作。

采用直流输电主要有以下优点:

1. 线路造价低

从架空输电线和电缆二个方面进行比较。

对于架空输电线,交流输电线路要用三根导线,而直流输电线路只要用二根导线;当采用大地或海水作回路时,甚至只要一根导线即可。因此,在输送相同功率的条件下,直流输电就可节省大量有色金属、钢材、绝缘子等物力与人力。换句话说,如果输电线路建设费用相等,则直流输送的功率可为交流输送功率的 1.5 倍。

由于直流架空输电线仅使用二根导线组成回路,因此在导线上的电阻功率损耗较交流输电为小;同时,它没有感抗和容抗,在线路上也就没有无功损耗;它也没有集肤效应,导线的截面能得到充分利用。另外,直流架空线路由于具有“空间电荷效应”,它的电晕损耗和无线电干扰都比交流线路小。这样,不但在初投资,而在年运行费用上,直流架空输电线都比

交流架空输电线来得经济。

对于电缆：直流电缆比交流电缆的造价在同样电压等级下要低得多。因为绝缘介质的直流强度远高于交流强度；对于通常的油浸纸电缆，直流的允许工作电压约为交流允许工作电压的3倍，例如，交流35kV的电缆就可以用于直流100kV左右。因此，直流电缆输电的投资比交流输电要省得多。

2. 适宜远距离隔海输电

如果交流线路每公里串联的等值电感为 L ，并联等值电容为 C ，线路运行电压为 V ，电流为 I ，则

每公里线路产生的无功功率为

$$Q_C = \omega CV^2$$

每公里线路消耗的无功功率为

$$Q_L = \omega LI^2$$

如果产生的无功功率正好等于消耗的无功功率，则

$$\omega CV^2 = \omega LI^2$$

$$V/I = \sqrt{L/C} = Z_s$$

Z_s 称为波阻抗，由这个阻抗计算出来的功率称为自然功率，即

$$P = VI = V^2/Z_s$$

由此可知，如果线路输送的功率大于自然功率，线路消耗的无功功率就大于线路产生的无功功率，受端的电压将低于发端的电压。反之，则受端的电压会高于发端的电压，这就是所谓“费兰弟效应”。

应当指出，电缆的波阻抗为 $15 \sim 25 \Omega$ ，要比架空线 ($300 \sim 400 \Omega$) 小十几倍，所以它的自然功率就要比架空线大十几倍，而为了避免电缆的芯线过热，电缆输送的功率总是远低于自然功率。因此，为了能正常运行，只有沿线路定距离安装并联电抗器来加以补偿，才能抑制线路末端或中间电压的过份升高。这对海底电缆就办不到。如果采用直流输电，敷设海底直流电缆，那么上述困难就完全不存在了。

3. 没有系统稳定问题

在交流电力系统中，所有联接在电力系统中的同步发电机都要保持同步运行。而所谓系统稳定，就是指在系统受到扰动后(不管这种扰动是大是小)所有互联的同步发电机具有保持同步运行的能力。由于交流输电线路具有电抗，输送的功率有一定的极限。当系统受到某种扰动后，就有可能使线路上的输送功率超过它极限；这时，送端的发电机和受端的发电机失去同步，造成系统的瓦解。为了保证系统正常运行，必须使输送功率限制在“动稳定”的极限以下，最低限度也必须满足“静稳定”的要求。

输送功率特性，可用下式表示：

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_L} \sin \delta_{12} = P_M \sin \delta_{12}$$

式中： E_1 、 E_2 ——送端和受端发电机的电势；

X_L ——线路、发电机、变压器的电抗；

δ_{12} ——二电势的相角差；

$$P_M = \frac{E_1 E_2}{X_L}, \text{ 称为静态稳定极限。}$$

线路越长, X_L 越大, 稳定极限也就越小。为了提高静态稳定极限, 必须采取一定的措施, 例如使用串联电容器补偿线路电抗。但是这样相应增加了投资。

如果采用直流输电线联接二个系统进行输电, 由于直流线路没有电抗, 所以不存在上述的稳定问题。因而, 直流输电就不受距离的限制, 也不需其他措施, 同时它还可联接二个不同频率的系统。

4. 限制短路电流

如果用交流输电线连接二个交流系统, 将使短路电流增大, 有时增大到超过原有断路器的遮断容量, 这就要更新大量设备。然而用一条直流线路来连接二个交流系统时, 直流系统的“定电流控制”将快速的把短路电流限制在额定电流左右, 即使在暂态过程也不超过 2 倍额定值。直流线路这种限制短路电流的功能, 对于二个大系统的连接具有很大的实用意义。

5. 调节快速、运行可靠

直流输电通过可控硅换流器能容易地快速调整有功功率和实现“潮流翻转”(功率流动方向的改变), 这不仅在正常运行时能保证稳定的输出, 而且在事故情况下, 可由健全正常的交流系统对另一端事故系统进行紧急支援; 或者在交直流线路并列运行时, 当交流线路发生短路, 可短暂增大直流输送功率以减少发电机转子加速, 因而能提高系统的可靠性。

如果采用双极型的直流输电, 一根导线是正极, 另一根是负极, 中性点接地(如图 1-1), 在正常时中性点没有电流通过, 当一根导线发生故障时, 另一根导线即能以大地作回路, 继续输送一半的功率, 这样也提高了运行的可靠性。

但是, 直流输电也有以下弱点:

1. 换流装置较昂贵

目前, 我国采用由可控硅元件组成的换流装置, 高压可控硅元件的电压为 2000 V, 电流为 200~500 A, 这就要求由数百个元件串联组成一个桥阀。由于这种高压可控硅元件目前成品率还不高, 因此使直流线路的建设费相应提高。

2. 消耗一定的无功功率

直流输电的换流装置要消耗一定数量的无功功率, 它取决于实际运行时的控制角和迭弧角, 一般情况下, 约为直流功率的 50~60%。逆变侧的换流装置运行时的逆变角 β 比整流器的控制角 α 较大, 所以消耗的无功功率也较多。

3. 产生谐波影响

换流器在交流侧和直流侧都将产生谐波电压和谐波电流, 从而使电容器和发电机过热; 使换流器的控制不稳定, 对通信系统产生干扰。为了限制这些谐波并降低其不良影响, 一般都在交流侧安装调谐滤波器。这种滤波器由电容、电感、电阻串并联组成, 其中电容能兼作无功补偿。对于直流架空线路, 在直流侧有时也需装设滤波器。

4. 缺乏直流开关

由于直流不存在零点, 以致熄弧比较困难。尽管已试制成中、小容量的直流断路器, 但尚未成熟可供使用。目前把换流器的控制脉冲信号闭锁, 能起到部分开关功能的作用, 但在

多端供电时,就不能单独切断事故线路,而要切断整个线路。

根据以上分析,直流输电适用范围如下:

- (1) 长距离、大功率的电力输送;
- (2) 采用海底电缆隔海输送电力;
- (3) 在出线走廊比较拥挤的地区,必须用电缆代替高压架空线进入城市时;
- (4) 两大系统联络线或不同频率的二个电网的连接;
- (5) 配合新能源(例如磁流体发电与电气体发电都是高压直流电)输电。

第二节 国外应用直流输电的概况

国外应用直流输电已经有 20 多年,在技术上有了很大发展,1960~1975 年高压直流输电容量的年平均增长率为 450 MW/年,而 1975~1980 年已经建成或计划建成的容量已超过 1,500 MW/年。早期作为换流器的汞弧阀,已为性能更优越的可控硅阀所代替;光导、数字技术的应用,使换流阀的控制、调节、保护更趋完善;目前换流装置的可用率已达 99% 以上。

以下对国外直流输电的应用现状作简略的介绍:

1. 进展情况

表 1-1 中列出了直流输电工程项目的概况。自从 1954 年瑞典由哥特兰岛至本土的第一条工业性直流输电线路投入运行以来,至今又有 19 个换流站约 11,000 MW 容量的设备投入运行;尚有 11 个换流站 57,840 MW 的设备容量正在建设和计划中。

表 1-2 是按这些已投入运行和正在建设工程的使用目的来划分的。但是这样的分类不是很严格的,因为同一工程有时具有多重的目的。

2. 运行可靠性

近几年来,换流设备的性能有了较大的改进,特别是可控硅阀的发展和日趋完善,大大提高了换流设备的可靠性,阀的故障已不是造成直流系统停用的主要因素。根据 1975 年的统计,已投运的直流系统平均停用率为 14% (即可用率 86%,未考虑备用设备),其中换流阀造成的停用率仅 0.3%。造成停用的原因及比重如表 1-3。

上述统计表明,由换流站故障造成直流系统停用的比重仅为 1.4%,也就是说,其可靠性达 98.6%,如有备用则换流站的可靠性问题,已不是影响选用直流输电的因素了。此外,随着可控硅阀的广泛采用和它的性能进一步提高,由计划检修造成的停用率也将逐步降低。

因为影响直流系统可用率的因素是多方面的,为了全面反映实际情况,国际大电网会议曾建议采用三个可用率指标:

(1) 平均可用率 统计数字包括各种因素造成的停用,如计划检修,线路和换流站故障等。

(2) 平均系统可用率 统计数字中应扣除各种计划停用,只包括各种故障停用。

(3) 平均换流站可用率 统计数字只包括换流站故障造成的停用,不包括线路故障。

表 1-4 是若干直流输电工程三个可用率的统计例子。由表可看出各直流工程平均换流站的可用率是很高的,特别是采用可控硅阀的均在 99% 以上。

表 1-1 已投运和正在建设、计划建设的直流输电工程

序号	系统名称	输送距离 (kM)			阀型	电压 (kV)	功率 (MW)	投入年份或(计划投入年份)
		架空线	电缆	总计				
已 运 行	1 哥特兰(瑞典)	0	96	96	汞弧/可控硅	100/150	20/30	1954/1970
	2 英法海峡	0	7+50+8	65	汞弧	±100	160	1961
	3 斯大林格勒-顿巴斯	470	0	470	汞弧	±400	720	1962~65
	4 康梯-斯堪(丹麦-瑞典)	55+40	25+60	180	汞弧	250	250	1965
	5 佐久间(日本)	0	0	0	汞弧	2×125	300	1965
	6 库克海峡(新西兰)	535+35	39	609	汞弧	±250	600	1965
	7 撒丁岛(意大利)	86+156+50	16+105	413	汞弧	200	200	1967
	8 温哥华一回(加拿大)	41	33	74	汞弧	260	312	1968~69
	9 太平洋联络线(美国)	1362	0	1362	汞弧	±400	1440	1970
	10 伊尔河(加拿大)	0	0	0	可控硅	2×80	320	1972
	11 纳尔逊河(加拿大)	895	0	895	汞弧	±300/±450	1080/1620	1973/1976
	12 金斯诺司(英国)	0	60+22	82	汞弧	±266	640	1975
	13 卡布拉巴萨(莫桑比克-南非)	1414	0	1414	可控硅	±266(±533)	960(1920)	1976(1979)
	14 温哥华二回(加拿大)	41	33	74	可控硅	280	370	1977
	15 斯蒂格尔(美国)	0	0	0	可控硅	2×25	100	1977
	16 斯盖尔巴特(美国)	734	0	734	可控硅	±250	500	1977
	17 斯卡盖拉克(挪威-丹麦)	20+80	130	230	可控硅	±250	500	1977
	18 新信依(日本)	0	0	0	可控硅	2×125	300	1977
	19 纳尔逊河二回(加拿大)	895	0	895	可控硅	±500	1800~2000	1978
正 建 设	20 安德渥-明尼波里(美国)	660	0	660	可控硅	±400	1000	1973~79
	21 北海道-本州(日本)	150	45	195	可控硅	125/±250	150/600	1979
	22 英加-沙巴(扎伊尔)	1700	0	1700	可控硅	±500	560/1120	1980
	23 加耳岛(加拿大)	750/1060	20	770/1080	可控硅	±400	800/1600	1980/1985
计 划 中	24 芬兰-苏联	0	0	0	可控硅		714/1070	1980
	25 厄基巴斯土兹-中俄罗斯(苏)	2400	0	2400	可控硅	±750	6000	1981~85
	26 纳尔逊河三回(加拿大)	900	0	900	可控硅	±500	1800	1983~85
	27 英法海峡二回				可控硅	250	1000	80年代初
	28 奥地利-捷克斯洛伐克	0	0	0			400~500	1983
	29 巴西伊泰普工程	850	0	850		±500~600	3150	1983
	30 哈萨克斯坦-中西伯利亚(苏)	4500	0	4500		±1100~1250	40000	本世纪末

注: 上表中输送距离 0 系指变频站。

表 1-2 按使用目的分类的直流输电工程

使用目的	工程名称	使用目的	工程名称
1. 远距离大功率输电	斯大林格勒-顿巴斯, 新西兰南北岛, 太平洋互联线, 纳尔逊河, 卡布拉巴萨, 英加沙巴, 斯盖尔巴特	3. 城市地下电缆输电	金斯诺司
		4. 非同期联络	伊尔河, 斯蒂格尔
2. 海底电缆输电	哥特兰岛, 英法海峡, 康梯-斯堪, 新西兰南北岛, 撒丁岛, 温哥华岛, 斯卡盖拉克, 北本线	5. 不同频率系统的联接	佐久间, 新信依
		6. 减小短路容量	金斯诺司

表 1-3 直流输电系统停用的原因分析

停用原因	停用率	停用原因	停用率
换流阀故障	0.3%	换流站交流设备故障	0.6%
换流阀控制设备故障	0.1%	输电线路故障	5.6%
其它直流设备故障	0.4%	计划检修	7%

表 1-4 1967~1976 年各工程的各类可用率

系统名称	平均可用率 %	平均系统可用率 %	平均换流站可用率 %
哥特兰	96.3	98.3	99.5
英法海峡	79	81.8	91.1
	73	76.1	81.9
斯大林格勒-顿巴斯	87.9	99.2	99.4
	84.3	97.6	96.2
康梯-斯堪	93.1	97.4	99.6
	85.2	87.4	96.8
佐久间	95.0	99.96	99.96
库克海峡	92.8	99.4	99.7
撒丁岛	67.9	72.6	82.9
温哥华一回	88.8	99.4	99.4
太平洋联络线	89.7	98.9	99.1
	86.2	98.3	98.8
伊尔河	97.1	99.2	99.2
纳尔逊河	82.7	96.7	96.8
金斯诺司	37.7	47.8	75.5
斯卡盖拉克	96.0		

3. 换流站概况

直流输电的心脏部分是换流器，可控硅阀的出现完全取代了汞弧阀。最早的可控硅阀是 1970 年高特兰岛工程增加容量时开始使用的，它的容量是 10 MW (50kV、200 A)。同年，日本在佐久间也开始使用于 37.5 MW (125 kV、300 A) 容量进行工业中间试验。以后，各国相继进行了大功率可控硅阀的研究。表 1-5 列举了世界各国正在运行、建设、计划中的可控硅阀情况。

已经运行的最大单位容量可控硅阀是南非卡布拉巴萨工程所使用，它的额定容量是 240 MW (西门子、AEG、BBC 三公司制造，133 kV、1800 A)，最终的容量是 8 个阀体串联达 1920 MW (± 533 kV、1800 A)。正在建设的最大单位容量可控硅阀属美国安德渥-明尼波里工程，它使用的是 250 MW 阀 (ASEA 公司制造，200 kV、1250 A)。

最近加大容量的趋向是从结线方式上加以改进。因为与其增加单位阀体的容量，不如以二阀作 12 相运行的方式，这有助于减少或取消 6 次谐波。日本新信依变频站就是这种方式，它把 150 MW 的二个阀作为 300 MW 一个单元来使用。前面提到的安德渥-明尼波里工程，也是以二个阀作为 500 MW 一个单元来使用。

可控硅元件的额定值和串并联数目是阀体设计的基本内容。作为确定串联或并联元件数的标准，引入了电压设计系数 [$VDF = \text{元件的额定电压} \times \text{串联数} / \text{阀的额定电压}$] 和电流设计系数 [$CDF = \text{元件的额定电流} \times \text{并联数} \times 3 / \text{阀的额定电流}$] 两个概念。

表 1-5 世界各国可控硅阀概况表

序号	系统名称	制造厂	阀的额定值			绝缘/冷却方式	触发方式	阀的连接	综合容量 (MW)	最终容量		投入年份
			MW	kV	A					kV	MW	
1	新信依	东芝, 日立	150	125	1200	油/油冷	电磁	单桥	300 (12相)	2×125	300/600	1977
2	北本线	东芝, 日立	150	125	1200	空气/风冷	光	2桥串联	150 (6相)	125/±250	150/600	1979
3	哥特兰	ASEA	10	50	200	空气/风冷	光	2桥串联	10 (6相)	150	30	1970
4	斯卡盖拉克	ASEA	125	125	1000	空气/风冷	光	4桥串联	250 (12相)	250	500	1977
5	卡布拉巴萨	AEG, BBC, 西门子	240	133	1800	油/油冷	电磁*	2桥串联	240 (6相)	±266/±533	960/1920	1976
6	英加-加巴	ASEA	140	250	560	空气/风冷	光	4桥串联	280 (12相)	±500	560/1120	1980
7	伊尔河	GE	80	40	2000	空气/风冷	光	4桥串联	160 (12相)	2×80	320	1972
8	英法海峡(法侧)		80	100	800	空气/风冷	光	单桥	80 (6相)	±100	160	1974
9	斯盖尔巴特	GE	125	125	1000	空气/风冷	光	4桥串联	250 (12相)	±250	500	1977
10	安德涅-明尼波里	ASEA	250	200	1250	空气/风冷	光	4桥串联	500 (12相)	±400	1000	1979
11	斯蒂格尔	GE	50	25	2000	空气/风冷	光	单桥	—	2×25	100	1977
12	温哥华二回	CGE	185	140	1320	空气/风冷	光	2桥串联	185 (6相)	280	370	1977
13	纳尔逊河二回	AEG, BBC, 西门子	225	125	1800	空气/水冷	光	4桥串联	450 (12相)	±250/500	900/1800	1973

* 用光传递。

其中, 单只可控硅元件的额定值是关键, 提高可控硅单只元件的额定值就能减少串(并)联元件的个数, 使换流阀的控制回路和均压回路都将大大减少。目前, 元件的大容量化已取得很大的进展。例如: 日本在佐久间工程已使用了 2.5 kV、400 A 等级的可控硅; 在新信依工程中使用 2.5 kV、1500 A 和 4 kV、800 A 的可控硅元件; 设计中的北本线正在研究使用更大容量的元件。西德西门子、AEG、BBC 三公司在卡布拉巴萨工程中使用了 1.65 kV、900 A 的可控硅元件, 在纳尔逊河工程元件参数提高为 3.2 kV、800 A。

电压设计系数(VDF)的确定, 主要是根据避雷器的保护水平、均压回路的设计和系统情况而有所不同, 一般取 3~4 左右。电流设计系数(CDF)的确定, 在阀的设计中对故障电流有二种考虑: (1) 利用可控硅的控制极闭锁来切断故障电流, 这样正常运行电流就可能要比额定电流小, 以免故障时结温过高, 使可控硅元件失去控制性能(即额定电流由事故情况决定); (2) 交流侧安装快速短路器(投入时间为几毫秒), 使故障时能自动人工接地, 将短路电流引入大地, 这样阀的正常运行电流等于额定电流, 比较经济。卡布拉巴萨工程就是采用这种保护方式。但是这种方式控制较复杂, 而且短路器容易发生误动作, 因此在以后纳尔逊河工程中, 已改用第(1)种保护方案。电流设计系数随着变压器阻抗与冷却方式的变化而不同, 一般取 3~4 左右。

可控硅阀的绝缘方式有空气绝缘和油绝缘二种, 考虑到将来换流站布置小型化的要求, GE 公司已在进行六氟化硫绝缘的研究。关于冷却方式, 基本上是油绝缘的采用油冷却, 空

气绝缘的用空气冷却或水冷却。

可控硅阀的结构,过去都是一个桥阀使用一个绝缘台。现在为了节省占地面积,将同相的2个桥阀装在一个绝缘台上(双层阀),或将12相运行的4个空冷阀迭在一个绝缘台上(四层阀)。

可控硅阀的触发方式有CT型的电磁感应与光电两种。光电方式是利用发光元件把触发电脉冲转变成光脉冲,然后由光导纤维传送至高压桥阀。由于发光元件的寿命不长,可靠性不高,所以早期大多采用电磁方式。目前光电元件的输出功率、寿命都有很大提高,因而空气绝缘的换流阀全部采用光电方式。对于油绝缘阀,因为光电回路要在油中使用尚有困难,故仍采用电磁方式。随着科学技术的进一步发展,可以预期在不久的将来可以用光直接触发可控硅。

可控硅阀群的联接方式可以串联也可以并联,对换流站来说,阀群不论串联或并联都能增加容量。但串联连接控制比较容易,端子间绝缘要求较低,桥阀的对地绝缘也可用分段绝缘来达到,所以一般都用串联连接。但考虑到在分阶段增加容量或部分停止运行时能减少线路损失,以及便于阀群周围的设备能按统一规格配制等情况,也有采用并联方式。

换流器的快速控制是直流输电的优点之一。过去通常是按照交流电压各相的波形逐个对桥阀实行触发控制,当交流电压不对称时,容易发生谐波的不稳定性。现在改用等距离触发控制,就减少了发生非特征谐波的可能性,即使在小系统里也能抑制高次谐波的不稳定现象。

过去汞弧阀为了抑制频繁的逆弧,有必要限制控制角,目前可控硅阀就没有这个问题。因而应用直流输电本身具有能在大范围内进行功率控制的功能可达到提高系统运行特性的效果。例如:被连系统的频率控制、阻尼系统振荡、提高系统过渡过程的稳定性以及控制无功功率等等。

为了使换流装置能稳定运行,要求交流侧连接点的短路容量有一定大小,通常是换流功率的5倍。根据换流装置的控制特性和交流系统特性,有时3倍也能稳定运行。这个极限究竟能降低到什么程度,还有待进一步研究。另外,短路容量太小,当功率瞬时减少时,会引起交流电压大幅度上升,这将提高用来保护换流器的避雷器的额定值,从而提高了阀的价格。

目前直流输电未能广泛应用的一个原因,就是直流断路器制造困难,而直流断路器对于提高多端输电、输电线多回化以及换流装置并联等方面的可靠性是十分重要的。在直流断路器的研究中有二种方案:一种是美国的;一种是欧洲集团的。

美国 Hughes 和 GE 两公司采用全电压、高速度切断故障电流方案,它是利用电磁场相互作用原理使放电管动作,由于放电管和并联的电容器具有非线性电阻的作用,在接受信号后几个毫秒内即能将故障切除。GE公司已试制成功以4个真空断路器串联成80kV的直流断路器。其原理是:在真空断路器断口两侧并联一个经充电的电容器,当切断直流电路时,利用该电容器向直流电流相反的方向放电,从而建立一个电流零点。

欧洲是由 ASEA 和 AEG、西门子、BBC 等公司共同进行研究。这个集团考虑用负荷断路器来抑制故障电流,正在试验研究制造400kV级的断路器。主遮断部份是用少油断路器,而与其并联的电容器及直流避雷器则用来吸收能量及遮断残余电流。

其它方式有纳尔逊河双极2回线送电工程。它采用的方式是当线路故障时,将整流器

的控制角加大，并将故障线路的快速开关打开，然后再重新起动。这样，在事故发生后约 270 毫秒即能恢复 90% 的功率。快速开关只要使用空气断路器即可，没有必要使用直流断路器。

绝缘设计对电力设备的投资影响很大，可控硅阀的阳极和阴极间所要求的绝缘强度决定了元件的串联数目。汞弧阀由于具有自保护性能(即由于发生逆弧把反向过电压消除，而逆弧通常并不使阀体损坏)，所以在阳极和阴极间是不装设避雷器的。可控硅阀的情况就不同，它一旦被反向击穿就成为永久损坏，因此在阳极和阴极间必须装设优良性能的避雷器，来确保阀体安全和降低绝缘水平。

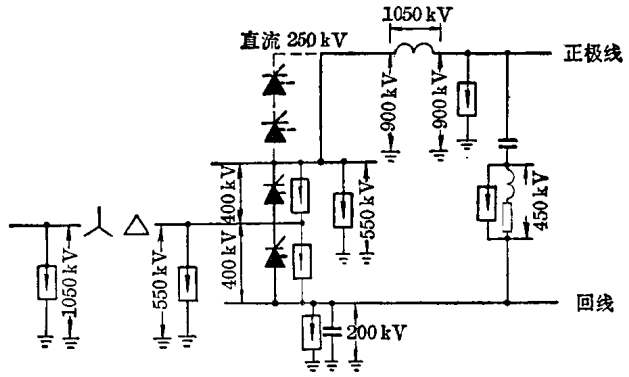


图 1-2 日本北本线的避雷器配置图

为了使其它各点的绝缘设计合理，也必须把避雷器作恰当的布置。图 1-2 是日本北本线避雷器配置的例子。

装在可控硅阀阳极和阴极间的避雷器，其恢复电压的波形中有 120° 为零，这对于切断续流是有利的。但阀在换相时，有较大的振荡电压迭加在上面；在控制角等于 90° 时，有 1.3 倍左右线电压的峰值电压加在避雷器上；要使放电电压的下限避开它，可能影响保护水平。在小系统情况下，当传输功率负荷急剧变动时，交流电压上升很大，这对阀的绝缘设计也起着重要的影响。

另外，在缩小直流输电设备占用空间的工作中，值得注意的是高次谐波调谐滤波器。从目前的情况来看，它要占地 30% 左右，为了减少所占的空间，可采用 12 相运行来降低高次谐波，从而可减少滤波器；也可采用油浸来缩减它的体积。

4. 直流输电线路概况

直流输电可以利用大地作为回路，这将大大降低线路建设费用。所以，在初期很多采用单极(一根导线)和大地(海水)构成回路。随着输送功率的增大，出现了双极(两根导线)输电，中性点二端接地的方式，这样，如果单极故障，健全极就能以大地作回路继续运行。但是，根据“太平洋联络线”的运行经验，长时期以大地作回路运行，对故障点周围地区的地下管道是不利的。如果由于换流站部分换流器停止工作，必须长时间作单极运行时，则需对“停止极”的送电线进行必要的改造，使成为导体回路来运行。

温哥华工程在增设为双极送电时，仅仅在使用备用电缆作中性线时，才允许长时间单极运行。其他如纳尔逊河、斯盖尔巴特、CU 等工程也和太平洋联络线一样，倾向于不长时间以大地作回路运行。

正在设计或建设中的直流架空线输电工程，其电压最高的是苏联厄基巴斯土兹-中俄罗斯的 ± 750 kV 工程；其次是南非-莫桑比克的 ± 533 kV 卡布拉巴萨工程，该工程线路长达 1,414 公里，是已投入运行线路中最长的一条。

根据 1973~1974 年国际大电网会议报告，太平洋联络线约发生过 130 件单极送电线事故，几乎全是盐害事故，其中约有 70% 的事故是瞬时停电经 250 毫秒左右再起动成功的。苏联曾经同时发生过一次二极事故，而太平洋联络线一次也没有发生过，也没有因单极事故使

健全极发生异常过电压而发生线路事故；也没有因极性不同而使二线的闪络次数有很大差异。

在清洁地区绝缘子的直流耐压同交流有效值相等或者更高；在严重污秽地区则比交流有效值低。所以，在防污设计时要特别注意。换流站在运行后因污秽而发生闪络事故时，一般是采取增加绝缘子、涂硅或加强清洗等对策。表 1-6 列出了各工程的防污设计及其主要的运行经验。

表 1-6 直流架空输电线的防污设计举例

工程名称	直流电压 (kV)	泄漏距离 (cm/kV)	事故情况和对策
斯大林格勒-顿巴斯	±400	1.8	(1) 在比较清洁地区,发生污闪事故; (2) 换流站 (1.7 cm/kV) 发生事故很多, 将绝缘子增加为 2.6 cm/kV; (3) 准备对以后直流线路提高为 2.1 cm/kV。
新西兰南北岛	±250	内陆 2.2 海边 5.0	(1) 南岛的电缆头设置了固定式清洗装置; (2) 近海边绝缘由 5.1 cm/kV 增加为 6.15 cm/kV; (3) 线路电缆头发生了 24 次事故。
康梯斯堪	250	内陆 2.3 海边 3.8	(1) 丹麦侧换流站 (2.3 cm/kV), 因发生事故增为 3~4 cm/kV; (2) 无法加强绝缘的场合就采用涂硅。
撒丁岛	200	内陆 3.7 轻污秽 4.2 海边 5.6	(1) 在撒丁岛、线路开关站和换流站发生了事故; (2) 电缆端开关站 (4 cm/kV) 涂了硅, 后改为屋内式; (3) 海边线路加强清洗和涂硅。
温哥华岛	260	2.74	发生过 2 次污闪事故
太平洋联络线	±400	2.28~3.18	(1) 线路由于汽车的排气发生频繁污闪; (2) 以后进行了清洗。
北本线	±250	轻污秽 3.8 中污秽 5.5 重污秽 6.4 海边 6.9	

在使用电缆输电时,运行情况与架空线不同。在直流输电设备中,造成平均可用率降低的主要原因是海底电缆事故,而且几乎都是由捕鱼作业、抛锚等引起的机械损伤;其他,还有一些电缆接头的事故。总之,都不是由于直流所引起的问题。但是,直流输电应用于长距离海底电缆的场合还是很多的,因此提高它的可靠性还是十分重要的。表 1-7 是直流电缆的应用实例。

从上表中可见,采用的电缆种类绝大部分是固体电缆和充油电缆,例外的只有新西兰采用的充气电缆。充油电缆适合于高电压,日本正在研究直流 500 千伏充油电缆。

电缆绝缘介质的直流强度高于交流强度,所以在绝缘设计上有利。但是,和交流电缆不同的地方是,当反极性雷电波侵入时,工作电压和它极性相反,要综合考虑这两者的因素,即绝缘的冲击耐压水平必须达到 KV_a+V_s 的数值。 V_s 是侵入的反极性雷电波,它受避雷器保护水平的限制,通常约等于 $2V_a$ 。 V_a 是直流电压, K 是小于或等于 1 的系数,若电缆运行时绝缘层的温差较大,则 K 等于 1。

表 1-7 直流电缆的应用实例

工程名称	电 压 (kV)	电 流 (A)	送电功率 (MW)	全 长 (kM)	最大水深 (M)	电缆的种类	导体尺寸 (mm ²)
哥特兰岛	150	200	30	96	100	固体	90
英法海峡	±100	800	160	7+50+8	60	固体	339、344
新西兰南北岛	±250	1200	600	39	260	充气	517
康梯斯塔	250	1000	250	25+65	60	固体,充油	625、310×2
撒丁岛	200	1000	200	16+105	450	固体	420×2
温哥华岛	260	1200	312	33	200	固体	400×2
金斯诺司	±266	1200	640	22+60	(陆上)	充油	800
斯卡盖拉克	±250	1000	500	130	550	固体	800
温哥华二期	280	1320	370	32	180	充油	400×2
北本线	±250	1200	600	44	300	充油	600

第三节 直流与交流输电的技术经济比较

在高压直流输电的发展过程中,一直引起世界各国注意的就是它与交流输电的经济性问题。因此,在发展的各个阶段,经济性比较总是一项探讨的课题,各国比较的内容与方法虽不完全相同,但其基本内容还是相似的。

1. 技术经济比较方法

直流与交流输电的技术经济比较方法和电力工业中其它的技术经济比较相同。首先,对不同的方案在技术上均要满足供电的基本技术要求,这样才能具有在经济上进行比较的可比性。如直流输电与交流输电在技术上均能达到传送同样的容量,这就是两者的可比性。而要达到传输同样容量,需要在技术上增加措施的投资以及维护、运行等每年消耗的费用等进行比较就是经济性比较。在电力工业方面经济比较计算方法中,目前经常采用的是抵偿年限法。当然,这种方法并不十分完善,但其优点是比较简单和直观,一般作为衡量两个不同方案的经济性,还是有它一定的参考价值。其计算方法即为当某一方案的投资 Z 和年运行费用 F 均较另一方案为小的时候,即认为该方案在经济上较另一方案优越。但当一个方案的投资大而年运行费却较小,另一方案的投资小而年运行费却较大时,则两者按下列公式计算进行比较。

$$N = \frac{Z_1 - Z_2}{F_2 - F_1} = \frac{\Delta Z}{\Delta F}$$

式中: Z_1, Z_2 ——两个方案的投资;

F_1, F_2 ——两个方案的年运行费用;

N ——抵偿年限。

N 的标准涉及国家对国民经济的政策问题,目前尚无正式规定,按一般电力系统中技术经济比较方法暂定为 6~7 年,称为标准抵偿年限。若比较结果小于标准抵偿年限,则认为投资较高而年运行费较低的方案在经济上较好;若大于标准抵偿年限,则认为投资低而年运行费高的方案在经济上是有利的。目前,还广泛应用另一种经济比较方法,就是把投资考虑了时间因素上的价值,把不同方案在各个时期的投资统一换算到某一个时间点上进行比较。其换算公式如下:

$$P = \sum_{t=1}^T \frac{Z_t}{(1+i)^t}$$

式中： Z_t ——各时期的投资；
 P ——各时期投资换算到某一时间点；
 i ——不同时期费用换算系数，也称为利息率；
 T ——建设的总时间；
 t ——各阶段投资的时间。

当然，其它比较方法中也有采用对不同方案的单位千瓦投资及单位电能投资等方法进行比较。

2. 技术经济比较内容

(1) 架空线或电缆的建设投资 架空线的建设投资中，概略地可分为几个部分组成：导线——与导线的截面积，导线每相的根数，线路的相数及回路数有关；杆塔——采用铁塔或水泥杆；金具与绝缘子——与导线每相的根数，线路的相数及回路数有关；其它与施工占地与线路架设的地区地形、交通条件等有关。

电缆的建设投资也基本相类似，如电缆的截面、根数、敷设方式、敷设地区的地形如跨海峡，进入市区等有关。

直流架空线与交流架空线相比，当导线截面积和线路绝缘水平相同时，它们所能传输的功率基本相同。但是，直流线路只要二根导线，有色金属和绝缘材料可节省三分之一，而且杆塔结构比较轻便简单，线路走廊也较狭窄，所以直流线路单位长度的造价较省。根据分析，在相同电压等级、同样传输容量下，一般直流线路的单位造价约为交流线路的60~70%。按苏联介绍的资料，对交流400千伏线路和直流±400千伏线路每公里线路造价的分析如表1-8所示。

表 1-8 交流 400 kV 与直流 ±400 kV 线路造价对照表

项 目	直 流 线 路	交 流 线 路	直 流 占 交 (%) 流 的 比 例
杆塔和基础费用(千卢布)	72	127	57
导线和地线费用(千卢布)	78	118	66
绝缘子和金具费用(千卢布)	14	20	70
其它(千卢布)	41	45	91
总造价(千卢布)	205	310	66

表 1-9 交流变电站和直流换流站的主要设备比较表

主要设备	交 流 变 电 站	直 流 换 流 站
交流断路器	装于一次及二次侧	装于换流设备的交流侧
主变压器	升高或降低电压传输	升高或降低电压并作整流变压器
换流设备		交流与直流的变换
调相及补偿设备	电压调整、补偿无功功率及串联电容补偿	供给无功功率及兼作滤波电容
滤波设备		交流侧装设滤波设备
电抗器	超高压线路中防止过电压而装设的并联电抗器	直流高压侧的直流电抗器作纹波及限流用

(2) 变电站和换流站的建设投资 直流输电中的换流站与交流输电中的变电站间的主要设备差别大致如表 1-9 所示。

在变电站和换流站中一般的变压器、断路器、电抗器和电容器都有具体的综合造价指标,目前主要是换流站中的换流阀还缺少定型产品,只能根据桥阀的要求,从单个元件价格进行推算。

根据国外对换流站各部分的投资比例分析如表 1-10 所示。

表 1-10 换流站各部分设备投资的百分比

设备名称	西 德 ±500 kV	瑞 典 ±500 kV	日 本 ±250 kV
可控硅阀	37	30	54
整流变压器及电抗器	25	20	14.5
滤波器	16	10	15.5
交流开关站	9		6.5
直流开关站	3		3
控制系统、辅助设备等等	10	40	6.5

(3) 线路及设备的年折旧维护费 折旧维护费主要分为两部分,即:输电线路和变电站及换流站的折旧和大修;输电线路和变电站或换流站的运行维护和小修。一般均以投资的百分数来表示。

部分国家对交流、直流运行的经验数据见表 1-11。

表 1-11 线路及设备的年折旧维护费占投资的百分比

名 称	瑞 典		日 本		苏 联	
	直 流	交 流	直 流	交 流	直 流	交 流
变电站或换流站	11	10.3	15	13	7	7
架空线	8.3	8.3	13	13	3.5	3.5
电缆	10	10	5	5		

(4) 电力及电能损失 由于直流和交流不同的技术性能,而导致在线路、变压器和换流阀等不同的功率和电能损失。一般在导线截面相等并输送同样功率时,直流线路通过的功率损耗约比交流线路少三分之一。另外,根据试验,当线路额定电压相等、导线表面电位梯度相等时,双极直流线路的年平均损耗仅为相应交流线路的 50~65%。

在换流站中的损耗主要是变压器的损耗和换流阀的损耗,而换流阀的损耗,采用可控硅阀要比汞弧阀的功率损耗要大。

根据苏联对一个 ±400 kV 直流输电换流站功率损耗的各部分比例分析如表 1-12。

关于直流输电与交流输电两者之间在功率损耗的比较,从几个国家的研究得出一些数据可作参考,如表 1-13 所示。

3. 输电电压与经济等价距离

对输送一定的功率和一定的输送距离,须要拟定直流输电方案和交流输电方案。一般,首先要对两种方案本身的经济合理性要有适当的分析,如系统电压的选择和导线截面的选取。当然,这本身就是一项比较复杂的研究课题。如直流方案中,经济电压问题就涉及到线