

第1章 直流输电系统概况

直流输电工程是以直流电的方式实现电能输送的工程。在进行远距离、大容量输电时，它能够实现不同额定频率交流系统的互联，提高交流系统互为备用和紧急情况下系统相互支援的能力。我国幅员广大，土地辽阔、沿海岛屿星罗棋布，我国水力资源主要分布在西南地区，煤炭资源70%集中在山西和内蒙古，而工业负荷却集中在沿海地区，因此直流输电有着广阔的发展前景。

1.1 国外直流输电系统发展

电力传输首先是从直流电开始，最早的直流输电是用直流发电机直接向负荷供电。1882年法国物理学家德普勒用装设在米斯巴赫煤矿中的直流发电机，以1.5~2.0 kV电压，沿着57 km的电报线路，把电力输送到在慕尼黑举办的国际展览会上，完成了人类有史以来的第一次直流输电试验。

由于科学技术和工业生产发展的需要，使得社会对电力的需求也急剧增大。由于用户的电压不能太高，因此要提高输送的功率就要加大电流。电流越大，输电线路发热就越厉害，损失的功率就越多；而且电流大，损失在输电导线上的电压也大，用户得到的电压就会降低，离发电站越远的用户得到的电压也就越低。直流输电的弊端限制了电力的应用，这促使人们探讨用交流输电的问题。1889年在法国通过用直流发电机串联得到高电压，如从毛梯埃斯(Mouties)到里昂(Lyon)的125 kV, 20 MW, 230 km的直流输电工程等。由于不能直接给直流电升压，进一步提高大功率发电机的额定电压又存在着绝缘等一系列技术难题，使得输电距离受到极大的限制，不能满足输送容量增长和输电距离增加的要求。高电压大容量直流电机的换向有困难，运行方式复杂，可靠性差，所以直流输电没有得到进一步的发展。与此同时，交流发动机、变压器和感应电动机的快速发展使得交流电的发电、变电、输送、分配和使用都很方便、经济、安全和可靠，因此交流

电几乎完全代替直流电并发展成为今天的规模巨大的电力系统。

20 世纪 50 年代，电力需求增长很快，随着电力系统的大规模发展，输电功率和输电距离进一步增加，交流输电也遇到了一系列不可克服的技术难题，其局限性在生产实践中表现得特别明显。此时，大功率电力电子技术的研究成功为高压直流输电突破了早期直流技术的壁垒，于是直流输电技术又重新为人们所重视。从 1954 年世界上第一项直流输电工程在瑞典投入商业运行以来，高压直流输电技术已经在远距离大容量输电、海底电缆送电、电力系统非同步互联等领域得到了广泛的应用。

换流器作为直流输电系统最核心的设备，其技术发展直接决定了直流输电的发展进程，根据换流器的发展进程可以将直流输电系统的发展分为以下几个时期：

(1) 汞弧阀换流时期：1901 年发明的汞弧整流管只能用于整流，不能逆变。1928 年研制成功了具有栅极控制能力的汞弧阀，它不但可用于整流，而且还可以进行逆变。大功率汞弧阀的问世使直流输电成为现实。但是，汞弧阀制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率高、可靠性较低、运行维护不便等因素，使直流输电的发展受到限制。

(2) 晶闸管换流时期：20 世纪 70 年代以后，电力电子技术和微电子技术的迅速发展，高压大功率晶闸管的问世，晶闸管换流阀和微机控制技术在直流输电工程中的应用，这些进步有力地促进了直流输电技术的发展。晶闸管换流阀不存在逆弧问题，而且制造、试验、运行维护和检修都比汞弧阀更加简单和方便。晶闸管换流阀比汞弧阀更有明显的优势，之后修建的直流工程均采用晶闸管换流阀。

(3) 新型半导体换流设备的应用：20 世纪 90 年代以后，新型氧化物半导体器件——绝缘栅双极晶体管（IGBT）得到广泛的应用。由于 IGBT 单个元件的功率小、损耗大，不利于大型直流输电工程采用。随后又成功研制出集成门极换相晶闸管（IGCT）和大功率碳化硅元件，该元件电压高、通流能力大、损耗低、体积小、可靠性高，并具有自关断能力。

1.2 国内直流输电系统发展

我国最早的直流输电工程是葛洲坝至上海 ± 500 kV 的双极直流输电工程。该工程在 1990 年投运，额定容量为 1200 MW，输送直流电流为 1200 A，输电距离为 1045.7 km；其中，葛洲坝为整流站，上海是逆变站。2009 年为 800 kV 特高压直流输电示范工程年，四川向家坝至上海带电调试成功，额定容量为 6400 MW，线路全长 1907 km，该工程标志着我国特高压直流输电技术正式商业使用。目前我国主要的直流输电工程如表 1-1 所示。

表 1-1 我国直流输电工程

序号	工程名称	额定电压 /kV	额定容量 /MW	时间
1	葛南直流输电工程	± 500	1200	1989
2	天广直流输电工程	± 500	1800	2000
3	龙政直流输电工程	± 500	3000	2003
4	江城直流输电工程	± 500	3000	2004
5	三广直流输电工程	± 500	3000	2004
6	贵广 I 直流输电工程	± 500	3000	2004
7	贵广 II 直流输电工程	± 500	3000	2004
8	灵宝背靠背直流工程	± 120	360	2005
9	宜华直流输电工程	± 500	3000	2006
10	高岭背靠背直流工程	± 125	750	2008
11	伊穆直流输电工程	± 500	3000	2010
12	德宝直流输电工程	± 500	3000	2010
13	± 800 kV 复奉直流输电工程	± 800	6400	2010
14	云广直流输电工程	± 800	5000	2010
15	林枫直流输电工程	± 500	3000	2011
16	银东直流输电工程	± 660	4000	2011
17	柴拉直流输电工程	± 400	600	2012
18	± 800 kV 锦苏特高压直流工程	± 800	7200	2012
19	黑河背靠背输电工程	± 125	750	2012
20	± 800 kV 天中直流输电工程直流工程	± 800	8000	2014
21	± 800 kV 宾金特高压直流输电工程	± 800	8000	2014
22	普侨直流输电工程	± 800	5000	2015
23	牛从直流输电工程	± 500	6400 (双回容量)	2015
24	金中直流输电工程	± 500	3200	2016
25	永富直流输电工程	± 500	3000	2016

1.3 直流输电系统结构及其优缺点

1.3.1 直流输电系统结构

直流输电系统的结构可以分为双端系统和多端系统两类。目前国内外实际运营的直流输电系统大多为双端系统，其结构如图 1-1 所示。

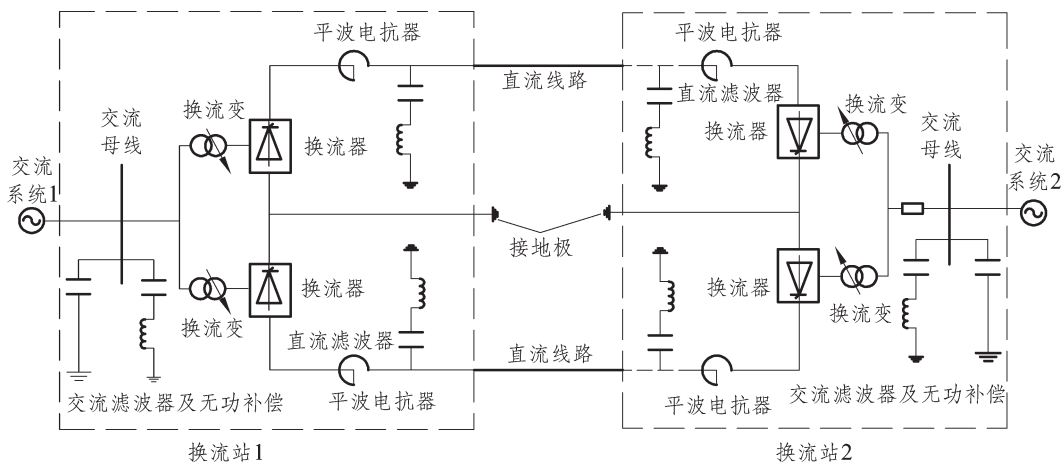


图 1-1 直流输电系统结构

一个完整的直流输电系统主要由三部分组成：换流站 1、直流输电线路和换流站 2。其中，换流站 1 和换流站 2 的直流场设备种类和布局基本一样，交流场则根据交流进线和出线的线路多少略有不同。每个换流站均可以运行在整流和逆变工况下。系统正常运行时，换流 1、2 系统根据潮流传输方向不同而分别运行在不同的整流和逆变方式下。换流站主要由以下设备构成：

(1) 交流场：换流站的交流场与一般 500 kV 变电站布局基本相同，它主要是为换流器输送和接受电能。

(2) 交流滤波器：由于换流器在换流时会产生大量的谐波电压和谐波电流并且吸收大量的无功功率，因此换流站通过交流滤波器滤除换流器产生的谐波并补偿换流器消耗的无功功率。在强交流系统中通常采用并联电容形式的补偿。

(3) 换流变压器：主要为换流器提供合适的交流电压。

(4) 换流器：主要完成“交-直”和“直-交”的电能转换。

(5) 平波电抗器：它具有高达 1.0H 的电感值，被串联在换流器的直流侧，主要有以下作用：

- ① 降低直流线路中的谐波电压和电流；
- ② 防止换流器换相失败；
- ③ 防止轻负荷时电流不连续；
- ④ 限制直流线路短路期间整流器中的峰值电流。

(6) 直流滤波器：换流器在直流侧产生大量的谐波电压和谐波电流，这些谐波可能导致电容器和附近的电机过热，并且干扰远动通信系统。因此，在直流侧都装有滤波装置。

(7) 接地极：大多数的直流联络线设计采用大地作为中性导线，至少在较短的一段时间内是

这样。与大地相连接的导体需要有较大的表面积，以便使电流密度和表面电压梯度最小，这个导体被称为电极。如前所述，如果必须限制流经大地的电流，可以用金属性回路的导体作为直流线路的一部分。

(8) 直流输电线：它们可以是架空线，也可以是电缆。除了导体数和间距的要求有差异外，直流线路与交流线路十分相似。

为了保证系统功率的平衡，无论是双端系统还是多端系统，其中必须有一个换流站采用定直流电压控制模式，而其他换流站的工作模式可因应用场合的不同而有不同选择。双端的直流输电系统中一旦有一个换流站因故障而退出运行时，整个直流输电系统都将停止运行，严重时将影响电网的正常运行。

1.3.2 直流输电系统的优缺点

目前主要采用高压直流进行长距离、大容量输电线路和大区电网间的互联。在进行输电线路建设时，线路的经济性和对环境的影响是主要考虑的对象，互联线路则需要把整个电网的稳定放在首位。与交流输电相比较，直流输电具有下列优点。

1. 经济性

首先，线路造价低，节省电缆费用。直流输电只需两根导线，若采用大地或海水作回路只用一根导线，能够节省大量线路投资，因此电缆费用省得多。其次，运行电能损耗小，传输节能效果显著。直流输电导线根数少，电阻发热损耗小，没有感抗和容抗的无功损耗，且传输功率的增加使单位损耗降低，大大提高了电力传输中的节能效果。最后，线路走廊窄，节省征地费用。以同级 500 kV 电压为例，直流线路走廊宽仅 40 m，对于数百千米或数千千米的输电线路来说，其节约的土地量是很可观的。

2. 可以实现异步联网

交流输电系统中，所有连接在电力系统中的同步发电机必须保持同步运行。由于交流系统具有电抗，输送的功率有一定的极限，当系统受到某种扰动时，有可能使线路上的输送功率超过它的极限。这时，送端的发电机和受端的发电机可能失去同步而造成系统的解列。当采用直流系统连接两个交流系统时，频率不同或相同的交流系统可以通过直流输电或“交流-直流-交流”的“背靠背”换流站实现异步联网运行，既得到联网运行的经济效益，又避免交流联网在发生事故时的相互影响，不存在同步的问题。

换流站能够方便、快速地调节有功功率和实现潮流翻转，不仅在正常运行时保证稳定地输出

功率，而且在事故情况下，可通过正常的交流系统一侧由直流线路对另一侧事故系统进行支援，从而提高系统运行的可靠性。当直流输电系统的一极出现故障，另一极仍能以大地或水为回路，继续输送一半的功率，提高了运行的可靠性。

在进行海底输电时，由于海下输电必须采用电缆。电缆线路的电容比架空线路大得多，较长的海底电缆交流输电很难实现，而采用直流电缆线路就比较容易。

直流输电与交流输电相比，有如下缺点：

(1) 与直流输电线路经济优越性相对的是，换流站内的换流装置昂贵，抵消了一部分在架空线路上所节约的成本。同时，换流装置要消耗大量的无功功率。

(2) 直流输电换流器需要消耗一定的无功功率，一般情况下约为直流输送功率的50%~60%。因此，换流站的交流侧需要安装一定数量的无功补偿设备，一般由具有电容性的交流滤波器提供无功功率。

(3) 直流输电线路难以引出分支线路，绝大部分只用于端对端送电，而交流输电工程只要存在变电站，就可以在变电站中引出出线供给当地电力供应，相对而言直流工程在灵活性上有所欠缺。

(4) 换流器运行时在交流侧和直流侧都将产生谐波电流和电压，使电容器和发电机过热，换流器控制不稳定，对通信系统产生干扰。一般在交流侧安装滤波器限制谐波影响。直流线路在运行时，导线周围空间产生离子场，线下合成场强对人体会产生影响。线路和换流站设备产生的无线电会对无线电通信产生干扰，产生的噪声会使附近的居民以及换流站的工作人员受到伤害。接地极附近地下（或海水中）的直流电流对金属构件、管道、电缆等埋设物有腐蚀作用；地中直流电流通过中性点接地变压器使变压器直流偏磁，产生局部过热、振动、噪声等；以海水作为回路时，会对通信系统和航海磁性罗盘产生干扰。