

交直流混合电网计算 分析方法

叶 鹏 孙 峰 李家珏 李浩洋 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前 言

电力工业是关系国计民生的基础产业，改革开放 40 多年以来，我国电力工业走过了一条辉煌的改革发展之路，电网结构不断优化，电力工业装备和技术水平已跻身世界大国行列。我国已成为世界上直流输电线路最多、直流输送容量最大的国家。由此形成的大规模交直流电力系统，其运行的复杂性和难度在国际上是罕见的。由于交直流混合电网对于电力工业的重要意义，有关的理论和技术研究已经成为近年来的热门课题，并且取得了许多新的进展和成果。

交直流混合联网方式会在全网中发挥巨大的作用，在区域电网内大容量输电中也发挥着不可替代的作用。随着越来越多的直流系统投入运行，大规模的交直流混合电网已逐步形成。交直流混合电网的输电模式、工作机理、运行方式、动态特性和控制策略等与传统交流电力系统都有较大差异，相应的分析计算方法和传统电网也不尽相同。研究适合交直流混合电网的计算分析方法，对电网的规划、运行和控制尤其具有重要的理论意义和实际指导价值，对深入解析现代电网的运行特性，促进新能源在电网中的消纳和应用也同样具有借鉴意义。

本书作者多年来一直从事电力系统及其自动化方向的教学和科研工作。作者根据自己的理论研究和理解，结合实际工程项目，同时也参考了众多相关文献编写了此书。本书共分为七章，其主要内容有：直流输电系统的计算分析模型、交直流混合电网潮流分析方法、交直流混合电网无功控制策略、交直流混合电网静态电压稳定性计算、交直流混合电网暂态特性计算和稳控

策略、交直流混合电网频率特性和减载策略等。交直流混合电网已成为当今电网不可或缺的主要部分，有了这些知识将对我们以后更好地分析交直流混合电网打下坚实的基础。

本书第1、2、3章由叶鹏编写，第4、5章由孙峰编写，第6章由李家珏编写，第7章由李浩洋编写。

本书可供交直流电网领域的科研工作者参考，也可供交直流混合电网工程计算分析参考，供从事电网规划和运行的电网公司专业技术人员及管理人员使用。由于作者水平和经验有限，书中难免存在缺点或错误，望读者批评指正。

编著者

目 录

CONTENTS

第 1 章 直流输电系统概述	001
1.1 引言	001
1.2 直流输电的特点	002
1.2.1 直流输电的优势	002
1.2.2 直流输电的不足	005
1.3 直流输电系统的结构	006
1.3.1 单极直流输电系统	007
1.3.2 双极系统接线方式	009
1.3.3 背靠背直流系统	012
1.3.4 多端直流输电系统	012
1.4 直流输电的发展历程	014
参考文献	019
第 2 章 直流输电系统的计算分析模型	021
2.1 引言	021
2.2 直流输电系统的工作原理	021
2.3 直流输电系统的数学模型	026
2.3.1 直流输电系统的稳态模型	026
2.3.2 直流输电系统的准稳态模型	028
2.3.3 柔性直流输电系统的准稳态模型	034
2.4 直流输电系统的机电 - 电磁暂态混合仿真	037
2.4.1 机电 - 电磁暂态混合仿真的基本原理及其接口技术	037

2.4.2	基于 ADPSS 的交直流输电系统模型	039
2.4.3	交直流电网机电-电磁暂态混合仿真	042
	参考文献	046
第3章	交直流混合输电系统潮流分析	047
3.1	引言	047
3.2	交直流混合输电系统潮流计算	047
3.3	基于 PSASP 的交直流潮流交替解耦算法	051
3.3.1	PSASP 简介	051
3.3.2	交直流混合输电系统算例分析	054
3.4	多端直流系统的接线及调节方式	057
3.4.1	多端直流系统的接线方式	057
3.4.2	并联型多端直流系统的调节方式	058
3.4.3	多端直流输电潮流计算方法	059
3.4.4	多端直流输电算例分析	064
3.5	考虑直流控制逻辑的潮流计算	069
3.5.1	直流系统的控制	069
3.5.2	直流系统运行状态的变化	071
3.5.3	交直流系统潮流计算中状态转换策略的研究	073
3.5.4	考虑直流控制逻辑的潮流计算算例分析	078
3.6	交直流输电系统的灵敏度分析	080
	参考文献	083
第4章	交直流混合电网无功控制策略	084
4.1	引言	084
4.2	交直流输电工程无功配置方案	084
4.2.1	高压交流输变电工程无功优化配置研究	084
4.2.2	直流工程无功配置方案	088
4.3	交直流混合电网无功运行和控制特性	090
4.3.1	交直流输电无功平衡计算	090
4.3.2	高压直流输电系统无功平衡分析	091
4.3.3	高压直流输电系统无功平衡策略	091
4.4	交直流电网无功优化控制模型	092
4.4.1	交直流混合电网无功优化控制基本思想	092
4.4.2	交直流电网电压优化目标	093
4.4.3	约束条件	094

4.5 无功优化的计算策略	094
4.5.1 粒子群优化算法	095
4.5.2 量子遗传优化算法	096
4.6 无功/电压协调优化控制策略及实施	098
参考文献	100
第5章 交直流输电系统静态稳定性计算	102
5.1 引言	102
5.2 连续型潮流计算方法	102
5.3 考虑交直流输电系统的连续型潮流法	105
5.3.1 改进连续潮流法的原理	105
5.3.2 交直流系统的预测计算	106
5.3.3 交直流系统的校正计算	107
5.3.4 离散控制变量的处理方式	107
5.4 交直流输电系统连续型潮流法实现步骤	109
5.5 基于连续型潮流法的交直流输电系统静态稳定性计算	110
5.5.1 直流换流母线电压稳定裕度计算	111
5.5.2 交流输电断面增长方式对直流系统电压稳定裕度的影响	113
5.5.3 调相机对特高压直流系统电压稳定裕度的影响	116
参考文献	118
第6章 交直流混合电网暂态特性和稳控策略	120
6.1 引言	120
6.2 交直流混合电网故障特性分析	120
6.2.1 系统故障后交直流混合电网功角特性	120
6.2.2 系统故障后交直流混合电网的电压特性	125
6.2.3 直流故障的频率特性	130
6.3 直流系统单极闭锁故障及稳控策略	133
6.3.1 单极闭锁故障下电网电压稳定性及控制策略	133
6.3.2 单极闭锁故障下频率稳定性及控制策略	134
6.4 直流系统双极闭锁故障及控制策略	136
6.4.1 双极闭锁故障下某电网电压稳定性及控制策略	136
6.4.2 双极闭锁故障下频率稳定性及控制策略	137
6.5 系统级联故障特性及稳控策略	139
6.5.1 交直流电网级联故障的表现形式	140
6.5.2 交直流系统级联故障	141

6.5.3 直流系统级联故障	143
6.5.4 交流与多直流级联故障	144
参考文献	144
第7章 交直流混合电网频率特性和减载策略	146
7.1 引言	146
7.2 交直流混合电网参数辨识	146
7.2.1 频率敏感参数辨识的工程应用需求	146
7.2.2 交直流混合电网调速系统参数辨识方法	147
7.3 频率仿真轨迹的仿真准确度的评价方法	150
7.3.1 电力系统静态频率特性	150
7.3.2 电力系统动态频率特性	151
7.3.3 频率动态仿真误差模型的建立	152
7.4 电网负荷重要性及区域负荷对频率灵敏度的划分	155
7.5 整定方案及待优化参数	156
7.6 电网的频率安全稳定评价标准及量化指标	158
参考文献	160

第 1 章

直流输电系统概述

1.1 引言

国内外对直流输电系统的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代，世界上第一条直流输电线路建成于 1954 年，用于连接瑞典的哥特兰岛及瑞典本土^[1]。1966 年之后，巴西、苏联、德国等国家也开展了特高压直流输电的相关研究工作。20 世纪 80 年代世界各国曾一度出现了特高压直流输电技术的研究热潮。国际大电网会议（Cigre）与国际电气与电子工程师协会（IEEE）均在 80 年代末得出结论：根据当时已有电力技术和运行实践经验， ± 800 kV 电压等级的直流输电系统是最合适的特高压直流输电电压等级，2002 年国际大电网会议又再次强调了这一结论^[2]。

随着国民经济总量的不断增长，我国的用电需求越来越高，而我国的自然条件以及地区电力能源和用电负荷中心分布不平衡的基本国情使得发展远距离、大容量的高压直流输电工程成为必然，为了节约发达地区稀缺的土地资源与减少输电线路的能量损耗，我国迫切需要大力运行一种相较于传统输电技术更高效、更经济的输电技术。而高压直流输电技术恰好符合我国的基本国情和时代要求，因此我国近年来大力开展高压直流输电工程并取得举世瞩目的成就。

随着电力电子技术的快速发展，换流器件由传统的汞弧阀转变为性能更加优良的晶闸管，进一步降低了交流与直流之间换流站的建设成本。而后，随着研究的进一步深入，电压源换流器（Voltage Sourced Converter, VSC）出现，使得高压直流输电技术进一步飞速发展^[3]。

当然，直流输电也不能完全取代交流输电，而是作为交流输电的补充，可以在交流系统中采用直流系统输送部分电力或者用直流连接两个交流系统。电力系统的各个环节，仍然维持以交流电网为主的格局。

1.2 直流输电的特点

1.2.1 直流输电的优势

在可比条件下与高压交流输电相比，高压直流输电具有许多优点^[4]：

(1) 输送相同功率时，线路的造价低。

对于两极输电的直流系统和三相送电的交流系统，前者用到 2 根导线，后者用到 3 根导线。如果每根导线的截面和绝缘水平均相同，则直流线路每根导线输送的功率 P_d 为

$$P_d = V_d I_d \quad (1.1)$$

而交流线路每根导线输送的功率 P_a 为

$$P_a = V_a I_a \cos\varphi \quad (1.2)$$

式中， V_d 为直流线路的对地电压； V_a 为交流线路对地电压的有效值，即相电压的有效值； I_d 为直流线路电流有效值； I_a 为交流线路电流有效值； $\cos\varphi$ 为交流线路的功率因数，对交流远距离输电通常较高，这里取 $\cos\varphi = 0.945$ 。

当两者采用相同的电流密度时，每根导线载流相等，即有 $I_d = I_a$ 。如果交流线路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 $k_d V_d$ ，假定过电压倍数 $k_d = k_a$ （对于超高压架空线路，有 $k_a = 2 \sim 2.5$ ， $k_d = 2$ ），因此当线路具有相同的绝缘水平时有 $V_d = \sqrt{2}V_a$ ，从而有

$$P_d = 1.5P_a \quad (1.3)$$

可见只有 2 根导线的直流线路与有 3 根导线的交流线路可输送的总功率相当。因此直流输电可以节省大量的有色金属、钢材、绝缘子和线路金具，同时减少大量的运输安装费用。

另外，直流输电对其线路走廊、铁塔高度和占地面积等方面均比交流输电具有优越性。直流输电可以充分利用线路走廊资源，其线路走廊宽度约为交流输电线路的 1/2 且送电容量大，单位走廊宽度的送电功率约为交流的 4 倍。如直流 ± 500 kV 线路走廊宽度约为 30 m，送电容量达 3 GW；而交流 500 kV 线路走廊宽度为 55 m，送电容量却只有 1 GW。

(2) 线路有功损耗小。

由上述分析可知，2 根导线的直流输电与 3 根导线的交流输电的输电能力相当，因此在输电损耗方面，直流输电将比交流输电少 1/3 左右；同时，由于直流线路没有感抗和容抗，线路上也就没有无功损耗；在电晕损耗方面，当导线表面电场强度相同时，直流架空线路年平均电晕损耗仅为交流线路的 50% ~ 65%；在无线电干扰方面，直流线路也比交流线路要小。因此直流线

路与交流线路相比，无论是投资方面还是运行费用方面均更为经济。

(3) 适合于海下输电。

海下输电必须采用电缆。直流电缆线路不受电容电流困扰，没有磁感应损耗和介质损耗，基本上只有芯线电阻损耗，绝缘水平相对较低。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一样。以同样厚度、同样截面积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的条件下，2根芯线的直流电缆的输送功率比3根芯线的交流电缆输送功率大得多，所以采用直流电缆在投资上比采用交流电缆经济得多。直流电缆的年运行费比相应的交流电缆也要低。因为运行中交流电缆除了芯线的电阻损耗之外，还有绝缘介质损耗以及铅包皮和铠装中的磁感应损耗；而直流电缆基本上只有电阻损耗。此外，直流电缆绝缘的老化要慢得多，使用寿命更长。直流线路导线之间和导线对地之间虽然存在着电容，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。而高压交流输电中产生很大的电容电流，一方面会引起沿线电压的变化，必须采用并联电抗器进行补偿，另一方面会降低输电功率。以220 kV电缆线路为例，每相每千米的电容电流为23 A左右，当电缆长达40 km时每相电容电流就达到920 A，几乎占用了芯线的全部载流量，可以承担的负载电流就很小了。而海底电缆在中途采用并联补偿非常困难，所以当海底电缆较长时，采用交流输电是不可能的。

(4) 不受系统稳定极限的限制。

在交流输电系统中，所有连接在电力系统中的同步发电机必须保持同步运行，即“系统稳定”，就是指在系统受到扰动后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其极限。这时送端的发电机和受端的发电机可能失去同步而导致系统解列，造成严重的停电事故。

交流电力系统中输送的功率为

$$P = \frac{E_s E_R}{x} \sin \delta = P_M \sin \delta \quad (1.4)$$

式中， E_s 、 E_R 分别为交流系统送端和受端的电动势； x 为系统两个电动势之间的总等值电抗，包括输电线路、发电机和变压器的电抗； δ 为系统两个电动势之间的相角差； P_M 为输送功率的静态稳定极限。

由式(1.4)可知，线路越长， x 越大，静态稳定极限也越小，从而限制了长距离的交流输电。如果以直流线路连接两个交流系统，由于直流线路没有电抗，因而也就不存在稳定问题，使得直流输电不受输电距离限制。直流

系统本身配有调制功能，可以根据系统的要求做出反应，对机电振荡产生阻尼，阻尼低频振荡，提高电力系统暂态稳定水平。此外，由于直流输电与系统频率、系统相位差等无关，从而可以采用直流线路连接两个频率不同的交流系统，还可以用来提高与直流线路并列运行的交流输电系统的稳定性。

(5) 直联电网对电网间干扰小。

现代电力技术的发展方向是大电网互联，但对于几个大电网，如果采用交流联网，互联电网间正常运行变化相互干扰，各个电网的故障相互影响，容易造成联络线功率大幅度波动，甚至剧烈振荡，增加了系统发生稳定破坏事故的概率。而采用直联电网方式，能有效地隔断各互联的交流同步电网之间的相互影响，有利于提高电能质量，特别是当一个系统发生连锁反应故障时，可以避免和减轻对另一个系统的影响。实行非同步联网运行的两端电网可以分别按各自的频率和电压独立运行，各自进行调频、调压、独立调度，互不干扰。这有利于联合电网以及所联各网的调度管理，也是减少互联系统大面积停电事故次数和损失的一个有力手段。

随着地区经济的发展，我国已自然形成了东北、华北、西北、华中、华东、南方及一些省区的区域电网。合理地互联这些电网，可取得良好的水火互补、错峰填谷、减少备用容量、事故支援等经济效益，并减小大面积停电的概率，便于电网各自管理，故高压直流（包括直流背靠背）技术十分适于联网。

(6) 直流输电的接入不会增加原有电力系统的短路电流容量。

采用交流线路连接两个交流系统时，系统容量的增加将增大短路电流，从而可能超过原有断路器的遮断容量，引发设备更换的需求。采用直流线路连接两个交流系统则没有这方面的问题：直流系统不传送短路功率，其“定电流控制”将快速地把短路电流限制在额定电流值之内，即使在暂态过程中也不超过2倍额定值。这种“隔离作用”使两网都不会增加短路容量，从而避免了需要更换更大容量的开关设备。

(7) 输送功率的大小和方向可以快速控制和调节，运行可靠。

直联电网的输送功率可按规定和需要来控制，不受两端交流电网的条件影响，而且直流输电通过晶闸管换流器可以方便迅速地调节有功功率以及实现潮流翻转，既可以在正常运行时稳定地输出功率，也可以在事故情况下通过直流线路实现表现正常的交流系统对另侧事故系统的紧急支援。如果设备绝缘薄弱或线路沿线某段大雾，还可降压运行，从而提高了运行的可靠性。

直流输电联网对互联的两个交流电网起着“隔离作用”，使故障电网对另一电网的影响很小，从而可减少联合大电网大面积停电事故发生的概率，提

高大系统运行的可靠性。由于直流输电导线少，其架空线路绝缘子数量也比交流线路要少，从这方面讲线路发生故障的概率也相应减少。对于交直流线路并联运行的情况，当交流输电线路因扰动引起输送功率变化时，可迅速地调节直流输电的功率，以抵消交流输电系统因扰动引起的功率变化量。而当交流系统发生故障时，可以暂时适当增大直流输电功率，以减小发电机转子的加速，从而提高系统运行的可靠性。

另外，对于双极直流输电系统，当一极故障时，另一极仍可以用大地或者海水作为回路继续输送一半的功率；而三相交流线路因故障断开一相时，则不允许长时间非全相运行，如果要保证不间断送电，就需要架设双回路。英国、法国、意大利等国专家开发了一种用于输电系统生命周期的环境和经济分析（LEETS）工具，该工具由软件执行，旨在评估在大型高压交流输电系统中接入高压直流输电系统的效益和影响。LEETS 可用于评估高压直流输电工程的建造、运行和生命周期的最后阶段。据称，用高压直流输电系统将整个欧洲电网连接起来，可以节省总装机容量的10%。当前，大部分电网采用高压交流输电系统，如果加入高压直流输电系统，将显著减少CO₂的排放量。采用高压直流输电系统的动力，来自电力系统解除管制、更高的灵活性、环境因素、交流系统安全性等。

1.2.2 直流输电的不足

直流输电与交流输电相比，也存在如下缺点^[4]：

(1) 换流站设备昂贵。换流装置都由许多高电压、大电流量闸管元件串联组成一个桥阀，并附带有均压电阻器、电容器、电抗器、冷却装置以及电子触发板等，约占总投资的1/3。

(2) 换流装置需要消耗大量的无功功率。一般情况下，整流器和逆变器所需无功功率分别为有功功率的30%~50%和40%~60%。

(3) 换流装置在运行中产生大量谐波，会在交流侧和直流侧产生谐波电压和谐波电流，使电容器和发电机过热，使换流器本身的控制不稳定，对通信系统产生干扰，影响系统的运行，为此须增加大量滤波器装置。

(4) 换流装置过载能力较小。例如，三峡—常州、三峡—广东±500 kV高压直流输电标称额定值均为30 W，它们的设计允许3 480 MW的持续过负载能力和4 500 MW的5 s短时过负载能力。直流输电如果需要具有更大的过负荷能力，则必须在设备选型时预先考虑，此时需要增加投资。

(5) 由于目前高压直流断路器技术不够成熟，限制了多端直流系统的发展。由于直流输电电流不像交流电流有过零点，故较难熄弧。一般是通过闭锁换流器的控制脉冲，使电流降到零，起到部分开关功能的作用。因此在多

端供电时，不如交流方便。

(6) 以大地或者海水作为回路时会对沿途的金属构件、管道等产生腐蚀作用，对航海导仪表产生影响。以单极大地回路的方式运行时，电流将沿大地返回，在返回的途中电流总是趋向于沿阻抗低的导体流动，如金属管道、电（光）缆金属护套等。而电流在地中金属导体中的流动会使金属发生电化学腐蚀，同时还存在着自身电流场的腐蚀。因为负荷电流经过大地返回时在两个接地电极之间的区域内形成了一个直流干扰电流场，这种电流场的存在也会造成地下金属的腐蚀。从材料化学的角度，自身电流场的腐蚀本质上是一种电解反应中的阳极金属溶解损耗，这种腐蚀的本质与高压直流系统接地电极的阳极材料腐蚀又是完全相同的，接地极由于其尖端电流密度大，在这种强场的作用下金属材料损耗的速度更快。

(7) 控制装置复杂。虽然直流输电系统能方便而迅速地调节与控制功率、电流、电压频率及无功功率，但控制装置复杂，通常需采取双重化措施，以保证可靠运行。

(8) 引起变压器噪声水平增大。直流输电单极运行时沿线附近的变压器将受到影响，主要表现为变压器的噪声水平会增大，中性点直流电流会增加。以天广直流输电系统为例，其单极容量为 90 MW，直流电压为 500 kV，直流电流约 1 800 A。当直流单极运行时，其附近的大亚湾核电站的变压器噪声明显增大，振动值也较高（接近 1.5 倍）^[14]。主要原因是：单极运行时会有较大的直流电流经过变压器中性点注入变压器，导致铁芯饱和，于是变压器在一个方向进入深度饱和运行状态，结果引起偶次谐波急剧增加，导致变压器振动。如果在这种状态下长期运行，会导致油温升高、夹件松动，甚至影响主变绝缘。

(9) 引起发电机的次同步振荡。次同步振荡（SSO）最早出现于带串联电容补偿的输电系统，随后在高压直流输电系统中发现不恰当的控制参数也会引起发电机组轴系扭振。有研究表明，交、直流输电系统的参数、运行工况、控制方式、控制参数等都会影响发电机组的电气阻尼特性。

1.3 直流输电系统的结构

直流输电系统由整流站、直流线路和逆变站三部分组成，如图 1.1 所示^[5]。图 1.1 中交流电力系统 1 和 2 通过直流输电系统相连。交流电力系统 1、2 分别是送、受端交流系统，送端系统送出交流电经换流变压器和整流器转换成直流电，然后由直流线路把直流电输送给逆变站，经逆变器和换流变压器再将直流电转换成交流电送入受端交流系统。图 1.1 中完成交、直流变

换的站称为换流站，将交流电变换为直流电的换流站称为整流站，而将直流电变换为交流电的换流站称为逆变站。

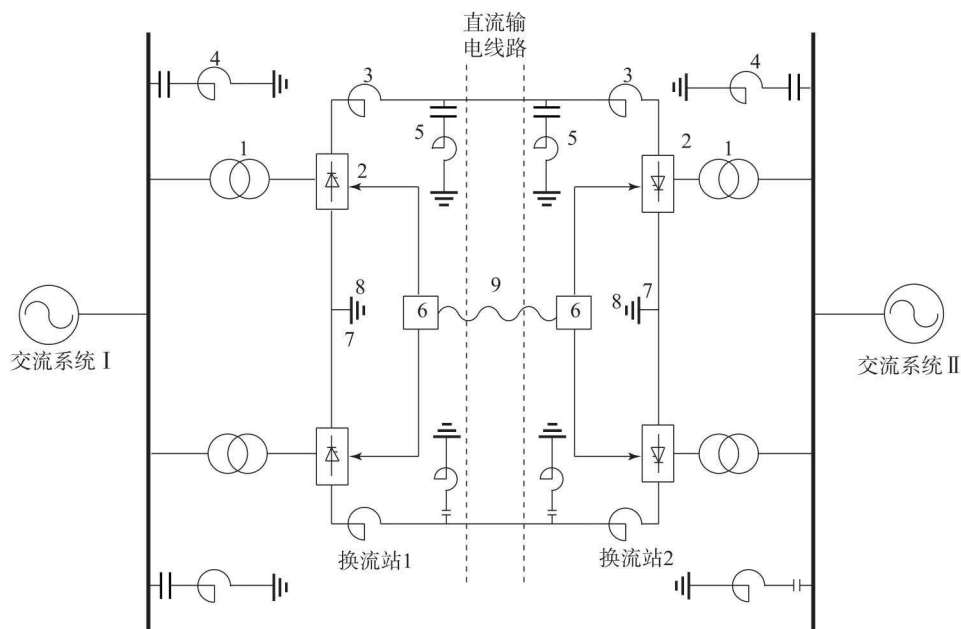


图 1.1 两端直流输电系统构成原理图

- 1—换流变压器；2—换流器；3—平波电抗器；4—交流滤波器；5—直流滤波器；
6—控制保护系统；7—接地极引线；8—接地极；9—远动通信系统

直流输电系统按照其与交流系统的接口数量分为两大类，即两端（或端对端）直流输电系统和多端直流输电系统。两端直流输电系统只有一个整流站和一个逆变站，它与交流系统只有两个接口，结构最为简单，是世界上已运行的直流输电工程普遍采用的方式。多端直流输电系统与交流系统有三个及以上的接口，它有多于一个整流站和逆变站，以实现多个电源系统向多个受端系统的输电。

两端直流输电系统又可分为单极（正极或负极）、双极（正、负两极）和背靠背直流输电系统（无直流输电线路）三种类型。

1.3.1 单极直流输电系统

单极直流输电系统中换流站出线端对地电位为正的称为正极，为负的称为负极。与正极或负极相连的输电导线称为正极导线或负极导线，或称为正极线路或负极线路。单极直流架空线路通常多采用负极性（即正极接地），这是因为正极导线电晕的电磁干扰和可听噪声均比负极导线的大。同时由于雷

电大多为负极性，使得正极导线雷电闪络的概率也比负极导线的高。单极系统运行的可靠性和灵活性不如双极系统好，因此，目前单极直流输电工程不多。

单机系统的接线方式可分为单极大地（或海水）回线方式和单极金属回线方式两种。另外，当双极直流输电工程在单极运行时，还可以接成双导线并联大地回线方式运行^[5]。图 1.2 所示为这三种方式的示意图。

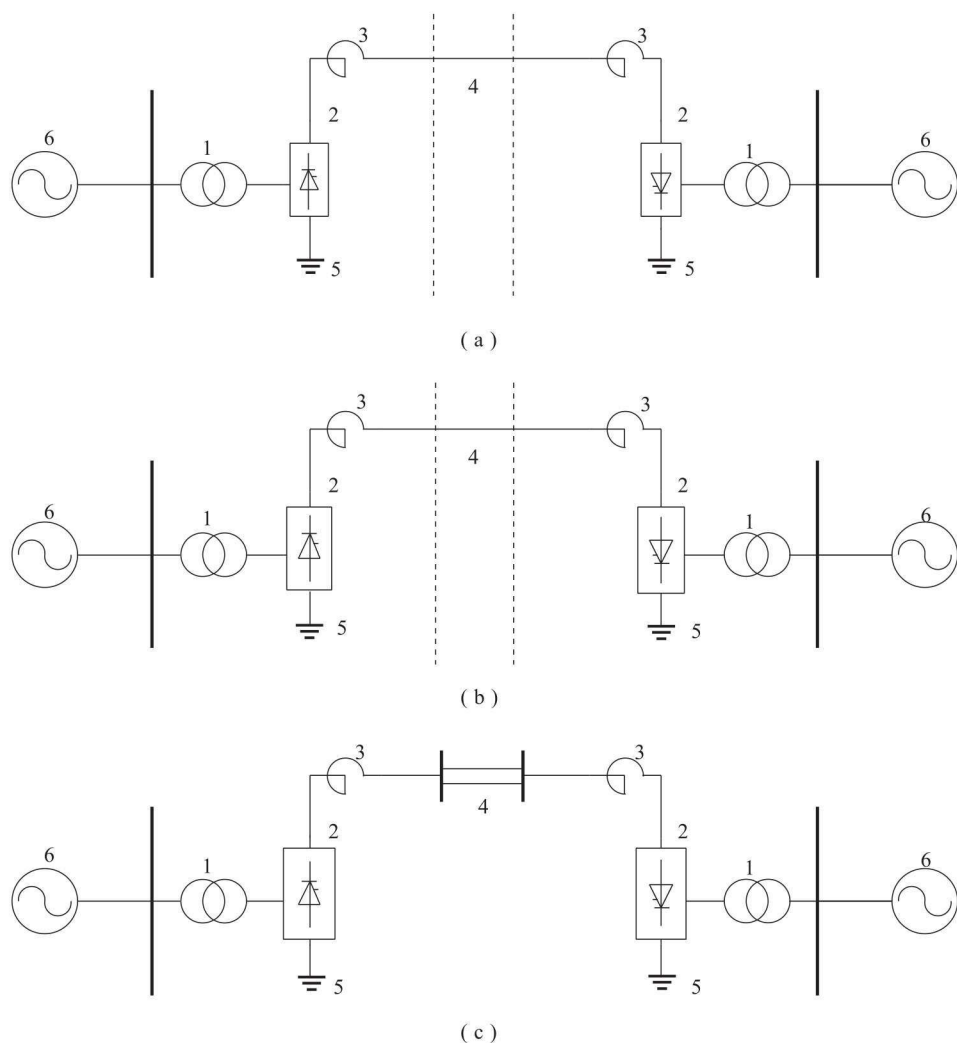


图 1.2 单极直流输电系统接线示意图

(a) 单极大地回线方式；(b) 单极金属回线方式；(c) 单极双导线并联大地回线方式

1—换流变压器；2—换流器；3—平波电抗器；4—直流输电线路；

5—接地极系统；6—两端交流系统

1. 单极大地回线方式

单极大地回线方式是两端换流器的一端通过极导线相连，另一端接地，利用大地（或海水）作为直流的回流电路，如图 1.2（a）所示。这种方式的线路结构简单，利用大地作为回线，省去一根导线，线路造价低。但地下（或海水中）长期有大的直流电流流过，大地电流所经之处，将引起埋设于地下或放置在地面的管道、金属设施发生电化学腐蚀，使中性点接地变压器产生直流偏磁而造成变压器磁饱和等问题。这种方式主要用于高压海底电缆直流工程，如瑞典-丹麦的康梯-斯堪工程，瑞典-芬兰的芬挪-斯堪工程，瑞典-德国的波罗的海工程，丹麦-德国的康特克工程等。

2. 单极金属回线方式

单极金属回线方式如图 1.2（b）所示，采用低绝缘的导线（也称金属返回线）代替单极大地回线方式中的大地回线。在运行中，地中无电流流过，可以避免由此所产生的电化学腐蚀和变压器磁饱和等问题。为了固定直流侧的对地电压和提高运行的安全性，金属返回线的一端接地，其不接地端的最高运行电压为最大直流电流在金属返回线上的压降。这种方式的线路投资和运行费用均较单极大地回线方式的高。通常只在不允许利用大地（或海水）为回线或选择接地极较困难以及输电距离又较短的单极直流输电工程中采用。但在双极运行方式中需要单极运行时可以采用。

3. 单极双导线并联大地回线方式

单极双导线并联大地回线方式如图 1.2（c）所示，这种方式是双极运行方式中需要单极运行时采用的特殊方式，与单极大地回线方式相比，由于极导线采用两极导线并联，极导线电阻减小 $1/2$ ，因此，线路损耗减小 $1/2$ 。

1.3.2 双极系统接线方式

双极系统接线方式是直流输电工程普遍采用的接线方式，可分为双极两端中性点接地方式、双极一端中性点接地方式和双极金属中性线方式三种类型。图 1.3 所示为双极直流输电系统接线示意图。

1. 双极两端中性点接地方式

双极两端中性点接地方式（简称双极方式）的正负两极通过导线相连，两端换流器的中性点接地，如图 1.3（a）所示。实际上它可看成是两个独立的单极大地回路方式。正负两极在地回路中的电流方向相反，地中电流为两极

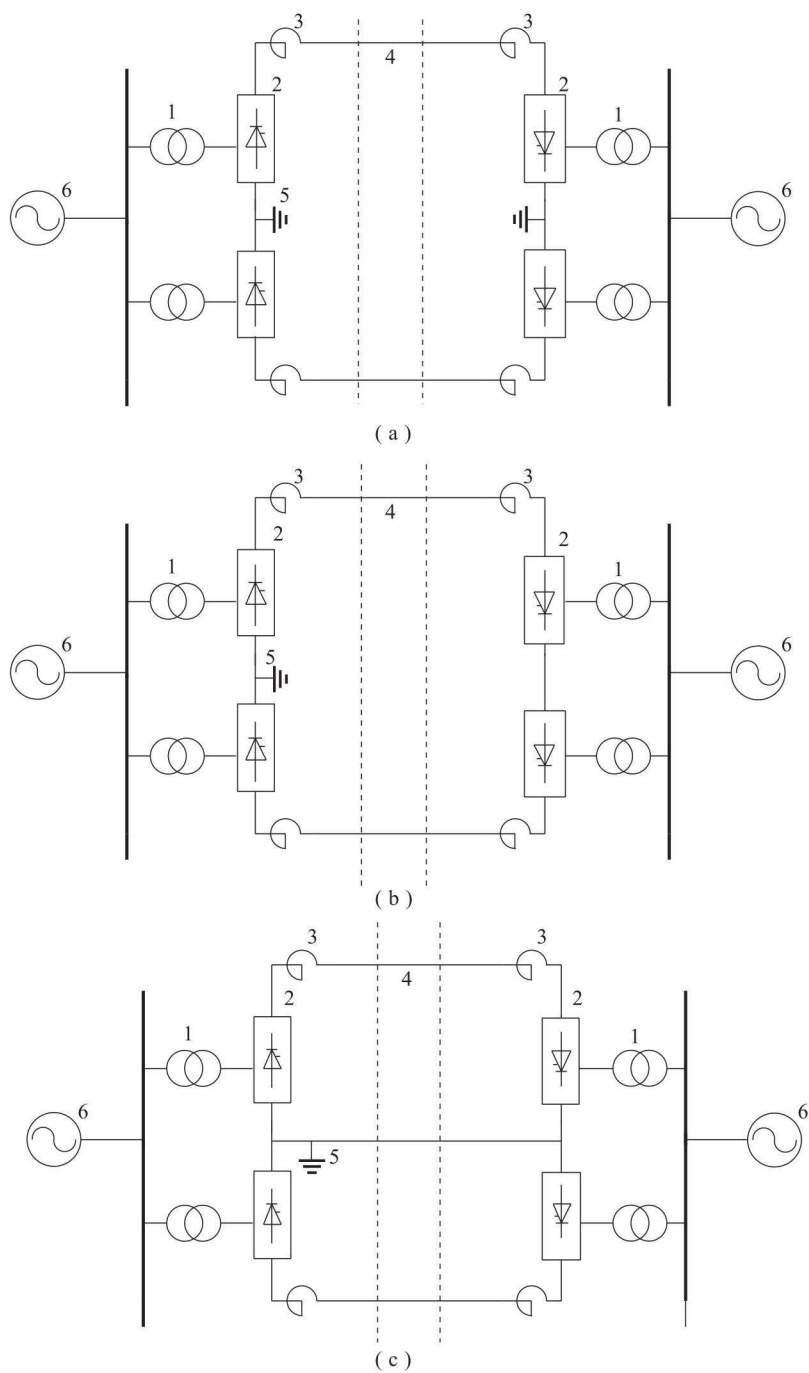


图 1.3 双极直流输电系统接线示意图

(a) 双极两端中性点接地方式；(b) 双极一端中性点接地方式；(c) 双极金属中线方式
 1—换流变压器；2—换流器；3—平波电抗器；4—直流输电线路；5—接地极系统；6—两端交流系统