



中国电力企业联合会
CHINA ELECTRICITY
COUNCIL

电力工程造价专业
资格认证考试指定用书

电力工程造价执业教育丛书

电网工程 换流站安装

中国电力企业联合会 电力工程造价与定额管理总站 编
电力建设技术经济咨询中心



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



中国电力企业联合会
CHINA ELECTRICITY
COUNCIL

电力工程造价专业
资格认证考试指定用书

电力工程造价执业教育丛书

电网工程 换流站安装

中国电力企业联合会 电力工程造价与定额管理总站 编
电力建设技术经济咨询中心



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《电力工程造价执业教育丛书》是根据电力工程造价职业岗位技能知识结构编写而成。

本丛书以工程造价知识、电力专业知识为基础,结合电力建设工程费用计算标准、定额及工程量清单计价规范的要求,力求系统完整,通俗易懂,使电力工程造价人员能识图、懂工艺、会预算、知管理。

本册为《电网工程·换流站安装》,全书共分五章。第一章系统地介绍了电网工程换流站的基础知识,包括直流输电系统概述,换流站电气系统等;第二章主要介绍了换流站设备的功能特点、配置原则等;第三章主要介绍了换流站的设计概述与识图;第四章主要介绍了换流站施工中施工机具、施工组织、施工工艺与方法及换流站的调试;第五章主要介绍了换流站的检修。

本丛书作为电力工程造价专业资格认证考试指定用书,同时作为电力工程建设、设计、施工、监理、咨询等单位的技术经济人员岗位技能学习、继续教育用书,还可作为高等院校工程与经济类专业师生的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电网工程·换流站安装/中国电力企业联合会电力工程造价与定额管理总站,中国电力企业联合会电力建设技术经济咨询中心编. —北京:中国电力出版社,2012.4

(电力工程造价执业教育丛书)

ISBN 978-7-5123-2878-5

I. ①电… II. ①中… ②中… III. ①换流站-电力工程-设备安装-工程造价-中国-教材 IV. ①F426.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第058911号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012年4月第一版 2012年4月北京第一次印刷

889毫米×1194毫米 16开本 10.5印张 296千字

印数0001—1000册 定价50.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

电力工程造价执业教育丛书

编 委 会

主任委员 魏昭峰

副主任委员 沈维春

编	委	郭 玮	黄成刚	张天文	许子智	陈 洁
		李国胜	李国华	奚 萍	雷雪琴	安建强
		顾 游	易建山	傅剑鸣	汤定超	张海庭
		肖 红	温卫宁	叶大革	黄 昆	牛东晓
		张慧翔	马黎任	李大鹏	赵文建	朱林生

专 家 组

(按姓氏笔画排序)

文上勇	王振鑫	王道静	卢金平	申 安	刘 毅	刘 薇
吕世森	何永秀	张伟中	张轶斐	陈开如	周 霞	易 涛
罗 涛	金莺环	金耀谦	柳瑞禹	赵建勇	赵喜贵	郭 兵
钱 丽	陶鹏成	黄文杰	董士波	褚得成	赖启杰	廖毅强

编 写 组

组 长 张慧翔
副 组 长 解改香 李希光
成 员 叶锦树 王维军 叶子菀 廖世园 陈水广
王 卉 陈 伟 张盛勇 周宝明 焦艳燕
徐 辉 邹 扬 马卫坚 王 培 徐慧超
张 波 刘 强 陈海涵 孟大博 李春蔚
朱大光 姚 毅

本 册 编 审 人 员

主 编 陈 伟
副 主 编 廖晓红 廖世园
编写人员 尹传烨 黄 娜 杨 毅 费 薇 肖辉祥
刘 念
主 审 廖毅强 赖启杰 康 健 卢金平 孙利平
王 丽

序

近年来,我国电力工业保持了持续快速发展的良好态势,“十一五”期间,每年新增发电装机容量近1亿kW,风电装机容量连续五年实现翻倍增长,水电装机容量和核电在建装机容量均居世界第一位,电网建设不断增速,电压等级不断提升,1000kV特高压交流试验示范工程和 ± 800 kV特高压直流示范工程相继建成投运,电力工业正从大机组、超高压、西电东送、全国联网的发展阶段,向绿色发电、特高压、智能电网的发展新阶段加快迈进。电力工程造价管理以更好地服务电力工业发展为宗旨,与时俱进,锐意创新,计价标准体系日趋健全,从业人员业务能力逐步提升,执业操守日渐规范,为强化电力工程建设投资管理作出了重要贡献。

“十二五”时期是我国全面建设小康社会的关键时期,也是深化改革开放、加快发展方式转变的攻坚时期。电力工业面临着严峻的改革和发展任务,必须加快转变电力工业发展方式,依托科技创新和体制机制创新,全面提高电力生产与利用效率,逐步实现从大到强转变。面对新形势下的新挑战,电力工程造价管理工作必须立足自身能力建设,不断完善技术、经济和法律法规等知识体系,及时跟踪技术、工艺和管理等发展的新趋势,以执业技能和工作水平提升带动电力行业工程造价管理工作不断升级。

“抓住机遇,迎接挑战,走人才强国之路,是增强综合国力和国际竞争力,实现中华民族伟大复兴的战略选择”。《国务院关于加强职业培训促进就业的意见》指出大力加强职业培训工作是“贯彻落实人才强国战略,加快技能人才队伍建设,建设人力资源强国的重要任务”。电力工程造价人员作为咨询业专才,承担着电力行业工程造价的计定、管理和控制等多重任务,对保证电力建设市场和谐、有序、健康发展,提高建设项目投资效益和企业经济效益发挥了重要作用。为提升电力行业工程造价人员业务素质和执业水平,中国电力企业联合会组织编写的这套《电力工程造价执业教育丛书》,可作为电力工程造价从业人员执业技能教育的培训教材,同时也作为继续教育学习和日常工作查阅的电力技术经济工具用书。

本丛书重新规划构架了电力行业工程造价人员知识结构体系,将基本建设全过程造价管理延伸至建设项目全寿命周期造价管理。本丛书采用模块化结构编写方式,使知识要点更加清晰,便于工程造价人员全面系统掌握工程造价基础理论和专业技能等方面的知识。本丛书凝聚了电力行业建设管理、设计、施工和咨询等领域和高等院校数十位专家的智慧与汗水,希望本丛书的出版能为推进电力工程造价管理工作的系统化、规范化、专业化和全面化作出新的贡献!

前 言

为贯彻实施国家人才强国战略，培养电力工程造价管理领域高技能专业人才，规范电力工程造价从业人员专业资格认证工作，提高培训教材编制的实效性和系统性，促进职业培训工作的健康有序发展，中国电力企业联合会电力工程造价与定额管理总站、中国电力企业联合会电力建设技术经济咨询中心组织编写了《电力工程造价执业教育丛书》（简称本丛书）。

本丛书涵盖了电力工程概论、电力工程造价基础知识、火力发电工程、核电工程、新能源工程、电网工程、通信工程七大领域，其中，火力发电工程包括建筑、机务与电气三册，电网工程包括建筑、变电站安装、换流站安装、架空输电线路、电缆输电线路和配电网六册。各专业册教材采用模块化设计，包含了专业基础知识、设备与材料、设计、施工、检修与技术改造等内容。

本丛书编制工作于2011年1月启动，组建了编委会、专家组和编写组，来自电力建设、设计、施工、咨询、高校等领域和单位的数十名专家参与了教材的研究策划和撰稿工作，经过各方密切配合，多方征求意见，反复修改完善，前后历时一年多，终定其稿。本丛书在充分汲取以往教材优点的基础上，密切结合电力工程造价管理工作的特点和发展趋势，系统介绍了工程造价基础理论和专业技能。本丛书不仅是电力工程造价从业人员上岗资格认证的考试教材，也可为电力行业从事工程造价工作的管理和技术人员以及高等院校师生提供工作和学习参考。

本丛书在编写过程中得到了国家电网公司、中国南方电网有限责任公司、中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国广东核电集团有限公司和华北电力大学等单位领导的大力支持，在此表示衷心感谢！同时，对为教材编制提供素材和参与审查的所有人员表示诚挚谢意！

本丛书在编写过程中尽管各方面给予了大力支持和关注，编写组亦十分认真努力，但由于编制人员在理论与实践结合、各专业领域沟通协作等方面仍存在认识不足之处，且电力工程造价从业人员所需专业知识深度需要经过反复摸索才能确切把握，因此，疏漏和不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

中国电力企业联合会电力工程造价与定额管理总站
中国电力企业联合会电力建设技术经济咨询中心

2012年3月

目 录

序
前言

第一章 换流站基础知识	1	第三章 换流站的设计	54
第一节 直流输电概述	1	第一节 电气设计基本知识	54
第二节 换流站电气系统	21	第二节 换流站设计与识图	63
第二章 换流站设备	28	第四章 换流站施工	100
第一节 换流阀	28	第一节 施工机具	100
第二节 换流变压器	35	第二节 施工组织	103
第三节 平波电抗器	38	第三节 施工工艺与方法	104
第四节 交流滤波器	41	第四节 换流站调试	122
第五节 直流滤波器	42	第五章 换流站的检修	133
第六节 无功补偿装置	44	第一节 换流站检修概述	133
第七节 换流站避雷器	45	第二节 换流站一次设备检修	134
第八节 换流站直流开关	46	第三节 换流站极控制和保护系统检修 ...	150
第九节 直流测量装置	48	第四节 换流站辅助系统检修	152
第十节 接地极	50	参考文献	156

换流站基础知识



知识目标

1. 明确换流站的作用及换流站组成部分;
2. 了解国内外高压直流输电的发展历程、现状;
3. 熟悉高压直流输电的特点;
4. 了解换流站电气系统的组成。



教学重难点

1. 重点与难点: 换流站电气系统的组成。



教学内容与学时建议

1. 换流站概述, 4 学时;
2. 换流站电气系统, 4 学时。

本章主要介绍直流输电发展历程、现状, 直流输电的特点以及换流站电气系统的组成。

第一节 直流输电概述

电力技术的发展是从直流电开始的, 早期的直流输电是不需要经过换流, 直接从直流电源送往直流负荷, 即发电、输电和用电均为直流电。随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的迅速发展, 发电和用电领域很快被交流电所取代。同时变压器又可方便地改变交流电压, 从而使交流输电和交流电网得到迅速的发展, 并很快占据了统治地位。随着换流技术的发展, 换流设备价格的降低、尺寸的缩小以及可靠性的提高, 高压直流输电 (HVDC) 在大容量远距离输电方面应用更为广泛, 另外直流输电还有交流输电所不能取代之处, 如远距离电缆送电、不同频率电网之间的联网等。直流输电与交流输电相互配合共同构成了现代电力系统的输电网。

目前, 电力系统中的发电机和用户绝大部分采用交流电, 因此必须要对交流电和直流电之间进行换流。在送端将交流电变换为直流电称为整流, 经过直流输电线路将电能送往受端; 而在受端又必须将直流电变换为交流电称为逆变, 然后才能送到受端的交流系统中去, 供用户使用。送端进行整流变换的地方叫整流站, 而受端进行逆变变换的地方叫逆变站。整流站和逆变站统称为换流站。实现整流和逆变变换的装置分别称为整流器和逆变器, 它们统称为换流器。

一、直流输电系统构成

直流输电系统按结构可分为两大类: 两端直流输电系统和多端直流输电系统。两端直流输电系统是

只有一个整流站和一个逆变站的直流输电系统，它与交流系统只有两个连接端口，是结构最简单的直流输电系统。多端直流输电系统与交流系统有三个或三个以上的连接端口，它有三个或三个以上的换流站。目前世界上绝大多数直流输电系统为两端直流输电系统，只有少数为多端直流输电系统。

(一) 两端直流输电系统

两端直流输电系统由整流站、逆变站和直流输电线路三部分组成。具有功率反送功能的两端直流输电系统的换流站，既可以作为整流站运行，又可以作为逆变站运行。功率正送时的整流站在功率反送时为逆变站，而正送时的逆变站在反送时为整流站。整流站和逆变站的主接线和一次设备基本相同，其主要差别在于控制和保护系统的功能不同。图 1-1 所示为两端直流输电系统构成的原理图。在图 1-1 中，如果从交流系统 I 向交流系统 II 送电，则换流站 1 为整流站，换流站 2 为逆变站；当功率反送时，则换流站 2 为整流站，换流站 1 为逆变站。

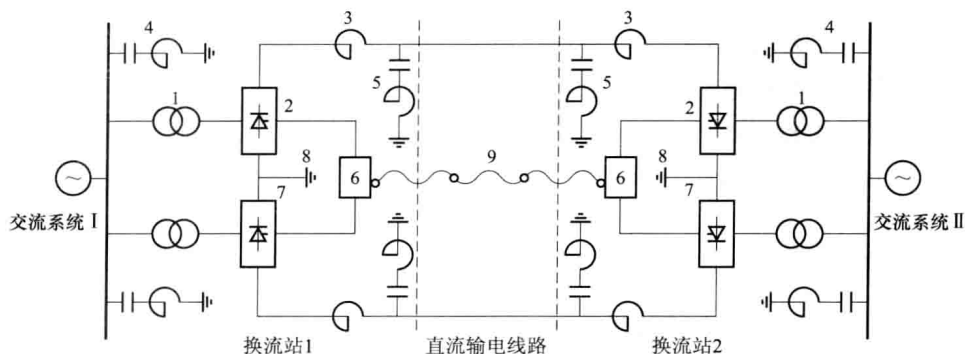


图 1-1 两端直流输电系统构成的原理图

- 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

根据直流输电系统所连接两个交流系统的功率输送的方向，把提供电源的一端称为送端，而接受和消纳由直流输电送来的功率的一端称为受端。送端和受端交流系统与直流输电系统有着密切的关系，它们给整流器和逆变器提供换相电压，创造实现换流的条件。因此，两端交流系统是实现直流输电必不可少的组成部分。两端交流系统的强弱、系统结构和运行性能等对直流输电系统的设计和运行均有较大的影响；另一方面，直流输电系统运行性能的好坏也直接影响两端交流系统的运行性能。因此，直流输电系统的设计条件和要求在很大程度上取决于两端交流系统的特点和要求。例如，换流站的主接线和主要设备的选择，特别是交流侧滤波和无功补偿配置方案、换流站的绝缘配合和主要设备的绝缘水平、直流输电控制保护系统的功能配置和动态响应特性等与两端交流系统有着密切的关系。通常在进行系统设计时，两端交流系统用等值系统来表示。

直流输电的控制保护系统是实现直流输电正常起动与停运、正常运行、运行参数改变与自动调节、故障处理与保护等所必不可少的组成部分，是决定直流输电系统运行性能好坏的重要因素，它与交流输电二次系统的功能有所不同。此外，为了利用大地（或海水）为回路来提高直流输电运行的可靠性和灵活性，直流输电系统还需要有接地极和接地极引线。因此，一个两端直流输电系统，除整流站、逆变站和直流输电线路以外，还有接地极、接地极引线和满足运行要求的控制保护系统等。

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

1. 单极系统

单极直流输电系统可以采用正极性或负极性。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，也可以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），这是因为正极导线的电晕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均不如双极系统好，实际工程中大多采用双极系统。双极系统是由两个可独立运行的单极系统所组成，便于工程进行分期建设，同时在运行中当一极故障停运时，可自动转为单极系统运行。因此，虽然所设计的单极直流输电系统不多，但在实际运行中单极系统的运行方式还是常见的。

单极系统的接线方式有单极大地（或海水）回线方式和单极金属回线方式两种。另外，当双极直流输电系统在单极运行时，还可以接成双导线并联大地回线方式运行，实质上，这是利用已有的输电导线为降低线路损耗而采用的一种单极大地回线方式。

（1）单极大地回线方式。如图 1-2（a）所示，单极大地回线方式是利用一根导线和大地（或海水）构成直流侧的单极回路，两端换流站均需接地。这种方式的大地（或海水）相当于直流输电线路的一根导线，流经它的电流为直流输电系统的运行电流。由于地下（或海水中）长期有大的直流电流流过，这将引起接地极附近地下金属构件的电化学腐蚀以及中性点接地变压器直流偏磁的增加，从而造成的变压器磁饱和等问题，这些问题有时需要采取一定的技术措施。对于单极大地回线方式的直流输电系统，其接地极设计所取的连续运行电流即为系统连续运行的直流电流。

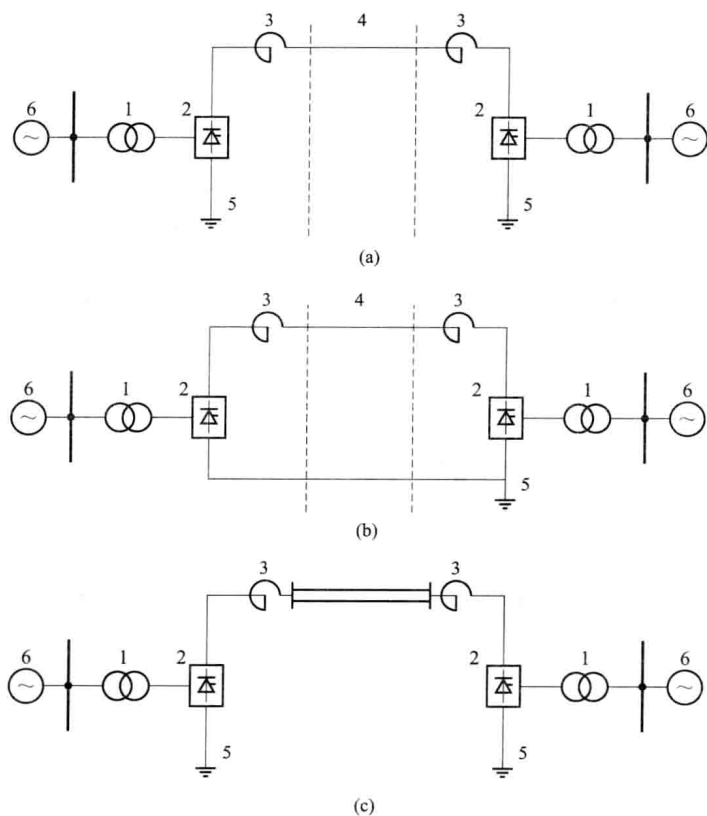


图 1-2 单极直流输电系统接线示意图

（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—接地系统；6—两端交流系统

单极大地回线方式的线路结构简单，可利用大地这个导体，省去一根导线，线路造价低，但其运行的可靠性和灵活性均较差，同时对接地极的要求较高，使得接地极的投资增加。这种方式的应用场合主要是高压海底电缆直流输电系统，因为省去一根高压海底电缆所节省的投资是相当可观的。采用这种方式的直流输电工程有、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及丹麦—德国的康特克工程等。



(2) 单极金属回线方式。如图 1-2 (b) 所示, 单极金属回线方式是利用两根导线构成直流侧的单极回路, 其中一根低绝缘的导线 (也称金属返回线) 用来代替单极大地回线方式中的地回线。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, 金属返回线的一端需要接地, 其不接地端的最高运行电压为最大直流电流时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。通常是在不允许利用大地 (或海水) 为回线或选择接地板较困难以及输电距离又较短的单极直流输电系统中采用。

2. 双极系统

双极系统接线方式是直流输电系统通常所采用的接线方式, 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。

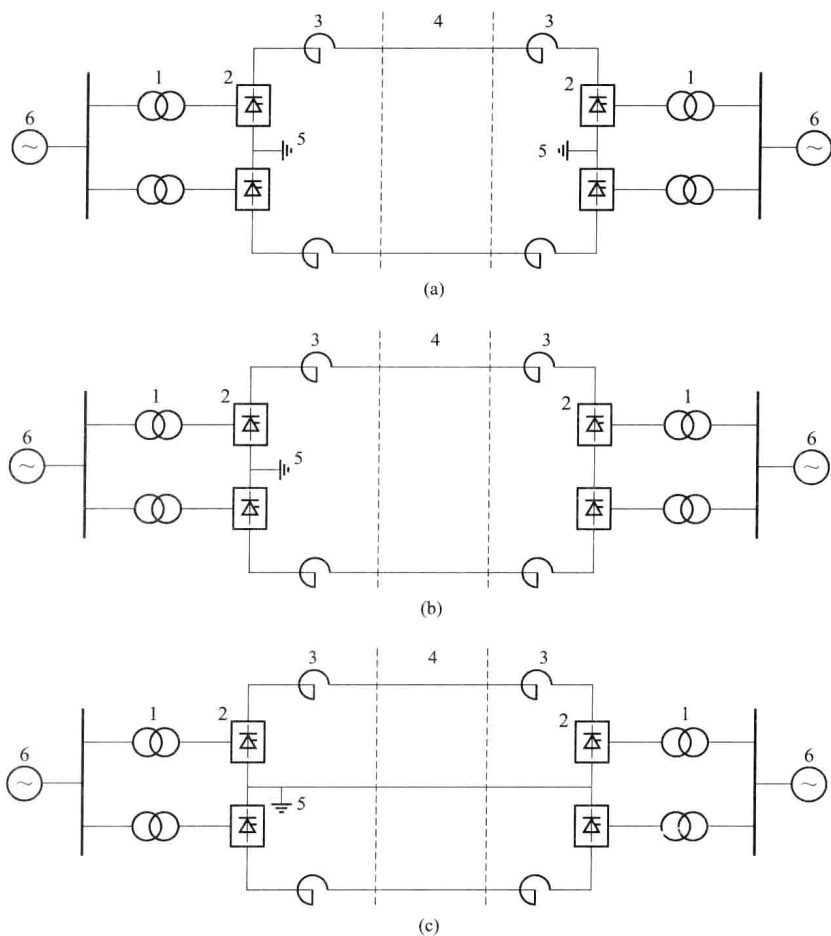


图 1-3 双极直流输电系统接线示意图

(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—接地系统; 6—两端交流系统

(1) 双极两端中性点接地方式 (可简称双极方式)。双极两端中性点接地方式是大多数直流输电系统所采用的正负两极对地, 两端换流站的中性点均接地的系统构成方式, 如图 1-3 (a) 所示, 利用正负两极导线和两端换流站的正负两极相连, 构成直流侧的闭环回路。两端接地极所形成的地回路, 可作为输电系统的备用导线。正常运行时, 直流电流的路径为正负两根极线。实际上它是由两个独立运行的单极大地回路系统构成。正负两极在地回路中的电流方向相反, 地中电流为两极电流之差值。双极中的任一极均能构成一个独立运行的单极输电系统, 双极的电压和电流可以不相等。双极的电压和电流均相等时称为双极对称运行方式, 不相等时称为电压或电流的不对称运行方式。双极对称运行时, 地中无



电流流过,实际运行中存在两极不平衡电流在地中流过,其值通常小于额定电流的1%。因此,在双极对称方式运行时,可基本上消除由于地中电流所引起的电腐蚀等问题。当双极电流不对称运行时,两极中的电流不相等,地中电流为两极电流之差值。为了减小地中电流的影响,在运行中尽量采用双极对称运行方式,如果由于某种原因需要一个极降低电压或电流运行,则可转为双极电压或电流不对称运行方式。

双极方式的直流输电系统,当输电线路或换流站的一个极发生故障需退出工作时,可根据具体情况转为三种单极方式运行,即:①单极大地回线方式;②单极金属回线方式;③单极双导线并联大地回线方式。通常是在故障极停运时,健全极的电流通过两端接地极和大地(或海水)所构成的回路返回,首先自动形成单极大地回线方式运行,同时可利用直流输电系统的过负荷能力,使健全极在短时间内输送的功率大于其额定值,以减小对两端交流系统的冲击,然后根据具体情况来确定直流输电系统运行方式。为了提高双极直流输电系统的可用率,在双极对称运行时,一端接地极系统故障,可将故障端换流站的中性点自动接到换流站内的接地网上临时接地,并同时断开故障的接地极,使其退出工作,以便进行检查和检修,这样可保持双极对称方式正常运行。

双极直流输电系统的两端接地极系统可根据系统所要求的单极大地回线运行时间的长短来进行设计。如果单极大地回线方式只作为当一极故障时向单极金属回线方式转换的短时过渡方式来考虑,则可大大降低对接地极的要求。因此,对于不同的系统要求,双极两端中性点接地的直流输电系统的接地极系统的差别也较大。

(2) 双极一端中性点接地方式。这种接线方式只有一端换流站的中性点接地,如图1-3(b)所示,其直流侧回路由正负两极导线组成,不能利用大地(或海水)作为备用导线。当一极线路发生故障需要退出工作时,必须停运整个双极系统,而没有单极运行的可能性。当一极换流站发生故障时,也不能自动转为单极大地回线方式运行,而只能在双极停运以后,才有可能重新构成单极金属回线的运行方式。因此,这种接线方式的运行可靠性和灵活性均较差。其主要优点是可以保证在运行中地中无电流流过,从而可以避免由此所产生的一些问题。这种系统构成方式在实际工程中很少采用,只在英法海峡直流输电工程中得到了应用。

(3) 双极金属中线方式。双极金属中线方式是利用三根导线构成直流侧同路,其中一根为低绝缘的中性线,另外两根为正负两极的极线,如图1-3(c)所示。这种系统构成相当于两个可独立运行的单极金属回线系统,共用一条低绝缘的金属返回线。为了固定直流侧各种设备的对地电位,通常中性线的一端接地,另一端的最高运行电压为流经金属中线最大电流时的电压降。这种方式在运行中地中无电流流过,它既可以避免由于地电流而产生的一些问题,又具有比较可靠和灵活的运行方式,当一极线路发生故障时,则可自动转为单极金属回线方式运行;当换流站的一个极发生故障需要退出工作时,可首先自动转为单极金属回线方式,然后还可转为单极双导线并联金属回线方式运行。其运行的可靠性和灵活性与双极两端中性点接地方式相类似。由于采用三根导线组成输电系统,其线路结构较复杂,线路造价较高。通常是当不允许地中流过直流电流或接地极极址很难选择时才采用。例如,英国伦敦的金斯诺斯地下电缆直流输电工程、日本纪伊直流输电工程以及加拿大—美国的魁北克—新英格兰多端直流输电工程的一部分是采用这种系统构成方式。

3. 背靠背直流系统

背靠背直流系统是无直流输电线路的两端直流输电系统,它主要用于两个非同步运行的交流电力系统之间的联网或送电,也称为非同步联络站。如果两个被联电网的额定频率不相同(如50Hz和60Hz),也可称为变频站。背靠背直流系统的整流站和逆变站的设备通常均装设在一个站内,也称背靠背换流站。在背靠背换流站内,整流器和逆变器的直流侧通过平波电抗器相连,构成直流侧的闭环回路;而其交流侧则分别与各自的被联电网相连,从而形成两个电网的非同步联网。为降低换流站产生的谐波,通



常选择 12 脉动换流器作为基本换流单元。图 1-4 所示为背靠背换流站的原理接线。换流站内的接线方式有换流器组的并联方式和串联方式两种。背靠背直流输电系统的主要特点是直流侧可选择低电压大电流（因无直流输电线路，直流侧损耗小），可充分利用大截面晶闸管的通流能力，同时直流侧设备（如换流变压器、换流阀、平波电抗器等）也因直流电压低而使其造价也相应降低。由于整流器和逆变器均装设在一个阀厅内，直流侧谐波不会造成对通信线路的干扰，因此省去直流滤波器，减小平波电抗器的电感值。背靠背换流站的造价比常规换流站的造价降低约 15% ~ 20%，采用背靠背系统进行非同步联网在电力系统运行上具有较多的优点。

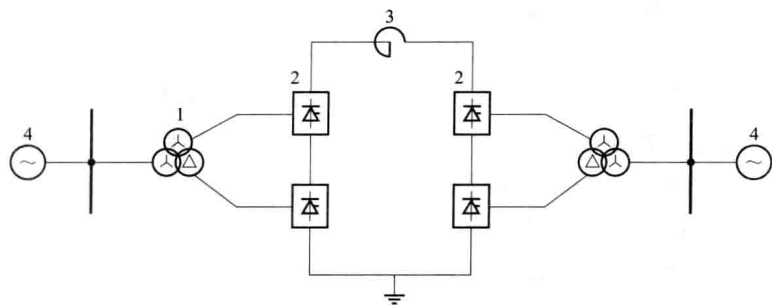


图 1-4 背靠背换流站原理接线图

1—换流变压器；2—换流器；3—平波电抗器；4—两端交流系统

（二）多端直流输电系统

多端直流输电系统是由三个或三个以上换流站以及连接换流站之间的高压直流输电线路所组成，它与交流系统有三个或三个以上连接端口。多端直流输电系统可以解决多电源供电或多落点受电的输电问题，它还可以联系多个交流系统或者将交流系统分成多个孤立运行的电网。在多端直流输电系统中的换流站，可以作为整流站运行，也可以作为逆变站运行，但作为整流站运行的换流站总功率与作为逆变站运行的总功率必须相等，即整个多端系统的输入和输出功率必须平衡。多端直流输电系统换流站之间的连接方式可以采用并联方式或串联方式，连接换流站之间的输电线路可以是分支形或闭环形等。

（1）串联方式的特点是各换流站均在同一个直流电流下运行，换流站之间的有功调节和分配主要是靠改变换流站的直流电压来实现。通常可用调节换流器的触发角 α 或换流变压器的分接开关来改变直流电压。分接开关的调节范围有限（一般为 20% ~ 30%）， α 角也受到最大 $\alpha_{\max}$ 角，（一般为 $50^\circ \sim 60^\circ$ ）的限制，从而使换流站的最小功率受到限制。同时在大 α 角下运行时，换流站消耗的无功功率也增加很多。串联方式的直流侧电压较高，在运行中的直流电流也较大，因此其经济性能不如并联方式好。当换流站需要改变潮流方向时，串联方式只需改变换流器的触发角，使原来的整流站（或逆变站）变为逆变站（或整流站）运行，不需改变换流器直流侧的接线，潮流反转操作快速方便。当某一换流站发生故障时，可投入其旁通开关，使其退出工作，其余的换流站经自动调整后，仍能继续运行，不需要用直流断路器来断开故障。当某一段直流线路发生瞬时故障时，可调节换流器的触发角，使整个直流系统的直流电压降到零，待故障消除后，直流系统可自动再启动。当一段直流线路发生永久性故障时，则整个多端系统需要停运。为避免这种情况发生，必要时可采用双回线的串联系统，此时线路投资将明显增加。

（2）并联方式的特点是各换流站在同一个直流电压下运行（忽略直流线路压降），换流站之间的有功调节和分配主要是靠改变换流站的直流电流来实现。可调节控制器的触发角 α 以及换流变压器的分接开关来改变直流电流。由于换流器外特性的斜率小，使得在 α 角调节范围不大情况下即可满足直流电流从最大值到最小值的调节要求。配合换流变压器分接开关的调节，则可保持 α 角在较小的范围内运行，从而使换流器的功率因数高，消耗的无功功率少，换流设备的运行条件也好。另外，由于并联方式在运

行中保持直流电压不变, 负荷的减小是用降低直流电流来实现, 因此其系统损耗小, 运行经济性也好。由于并联方式具有上述优点, 因此目前已运行的多端直流系统均采用并联方式。并联方式的主要缺点是当换流站需要改变潮流方向时, 除了改变换流器的触发角, 使原来的整流站 (或逆变站) 变为逆变站 (或整流站) 以外, 还必须将换流器直流侧两个端子的接线倒换过来接入直流网络才能实现, 因此, 并联方式对潮流变化频繁的换流站是很不方便的。另外, 在并联方式中当某一换流站发生故障并需退出工作时, 需要用直流断路器来断开故障的换流站。在目前大功率直流断路器尚未发展到实用阶段的情况下, 采用直流输电的快速控制也可以满足运行的要求。通常是将整流站的 α 角移相到 $120^\circ \sim 150^\circ$, 使其变为逆变站运行, 从而使直流电压和电流均很快降到零, 然后用高速自动隔离开关将故障的换流站断开, 最后对健全部分进行自动再启动, 使直流系统在新的工作点恢复工作。整个过程可在 $150 \sim 200\text{ms}$ 内完成。

多端直流输电系统比采用多个两端直流输电系统要经济, 但其控制保护系统以及运行操作较复杂。今后随着具有关断能力的换流阀 (如 IGBT、IGCT 等) 的应用以及在实际工程中对控制保护系统的改进和完善, 采用多端直流输电的系统将会更多。

二、直流输电系统特点

直流输电技术的发展与换流技术的发展, 特别是大功率电力电子技术的发展有着密切的关系。目前, 绝大部分直流输电系统采用普通晶闸管换流阀 (无自关断能力、频率低) 进行换流。

(一) 直流输电优点

(1) 直流输电架空线路只需正负两极导线, 杆塔结构简单, 线路造价低、损耗小。与交流输电相比, 输送同样的功率, 直流架空线路可节省约 $1/3$ 的钢芯铝线、 $1/3 \sim 1/2$ 的钢材, 线路造价为交流输电的 $2/3$ 。并且在此条件下其线路损耗约为交流输电的 $2/3$ 。同时直流输电所占的线路走廊也较窄。在直流电压作用下, 线路电容不起作用, 不存在电容电流, 线路沿线的电压分布均匀, 不存在交流输电由于电容电流而引起的沿线电压分布不均匀问题, 不需要装设并联电抗器。

(2) 直流电缆线路输送容量大、造价低、损耗小、不易老化、寿命长, 且输送距离不受限制、电缆耐受直流电压的能力比耐受交流电压的能力约高 3 倍以上, 因此同样绝缘厚度和芯线截面的电缆, 用于直流输电比用于交流输电的输电容量要大很多。直流电缆线路只需一根 (单极) 或两根 (双极) 电缆, 而交流线路则需要 U、V、W 三相三根电缆, 因此, 直流电缆线路的造价比交流电缆线路要低许多。直流电缆线路的损耗主要是电阻损耗, 而交流电缆除电阻损耗外, 还有绝缘中的介质损耗和铅皮及铠装中的磁感应损耗。电缆线路的对地电容比架空线路要大得多, 对于交流线路来说, 对地电容所产生的电容电流很大, 电容电流势必降低电缆的有效负荷能力, 当电容电流等于电缆所允许的负荷电流时, 则芯线的全部负荷能力均被电容电流所占用, 此时电力已不可能用交流电缆来输送。因此交流电缆的输送距离将受电容电流的限制。直流电缆不存在电容电流, 则其输送距离将不受限制, 有利于进行远距离电缆输电。

(3) 直流输电不存在交流输电的稳定问题, 有利于远距离大容量送电。交流输电的输送功率 P 可用式 (1-1) 表示

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin \delta \quad (1-1)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为送端和受端交流系统的等值电动势; δ 为 E_1 和 E_2 两个电动势之间的相位差, 称为功角; X_{12} 为 E_1 和 E_2 之间的等值电抗, 对于远距离输电, X_{12} 主要是输电线路的电抗。

当 $\delta = 90^\circ$ 时

$$P_M = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \quad (1-2)$$



式中, P_M 为输电线路的静态稳定极限。

输电线路的输送功率均小于 P_M , 因为在运行中如果输送功率接近于 P_M , 当系统有小扰动时, 则可能使 $\delta > 90^\circ$, 此时两端交流系统将会失去同步运行, 可能导致两系统解列。随着输送距离的增加, X_{12} 将增加, 允许的输送功率将减小。为增加输送功率必须采取提高稳定的措施, 如增设串联电容补偿、增加输电线路回路数以减少 X_{12} , 采用快速切故障及重合闸, 送端系统快速切机、强行励磁等, 这将使输电系统的投资增加。直流输电的两端交流系统经过整流和逆变的隔离, 无须同步运行, 不存在同步运行的稳定问题, 其输送容量和距离将不受同步运行稳定性的限制, 这对于远距离大容量输电是很有利的。

(4) 采用直流输电实现电力系统之间的非同步联网, 可以不增加被连接电网的短路容量, 不需要由于短路容量的增加而要更换断路器以及电缆要求采取限流的措施; 被连接电网可以是额定频率不同 (如 50Hz、60Hz) 的电网, 也可以是额定频率相同但非同步运行的电网; 被连接电网可保持自己的电能质量 (如频率、电压) 而独立运行, 不受联网的影响; 被连接电网之间交换的功率可快速方便地进行控制, 有利于运行和管理。

(5) 直流输电输送的有功功率和换流器消耗的无功功率均可由控制系统进行控制, 可利用这种快速可控性来改善交流系统的运行性能。根据交流系统在运行中的要求, 可快速增加或减少直流输送的有功和换流器消耗的无功, 对交流系统的有功平衡和无功平衡起快速调节作用, 从而提高交流系统频率和电压的稳定性, 提高电能质量和电网运行的可靠性。对于交直流并联运行的输电系统, 还可以利用直流的快速控制来阻尼交流系统的低频振荡, 提高交流线路的输送能力。

(6) 在直流电的作用下, 只有电阻起作用, 电感和电容均不起作用, 直流输电采用大地为回路, 直流电流则向电阻率很低的大地深层流去, 可很好地利用大地这个良导体。利用大地为回路可省去一极的导线, 同时大地的电阻率低、损耗小、运行费用也低。在双极直流输电系统中, 通常大地回路是作为备用导线, 使双极系统相当于两个可独立运行的单极系统运行。当一极故障时, 可自动转为单极系统运行, 提高了输电系统的运行可靠性。

(7) 直流输电可方便地进行分期建设和增容扩建, 有利于发挥投资效益。双极直流输电系统可按极来分期建设, 先建一个极单极运行, 后再建另一个极。也可以每极选择两组基本换流单元 (串联接线或并联接线), 第一期先建一组 (为输送容量的 1/4) 单极运行; 第二期再建一组 (为输送容量的 1/2) 双极运行; 第三期再增加一组, 可双极不对称运行 (为输送容量的 3/4), 当两组换流单元为串联接线时, 两极的电压不对称, 为并联接线时, 则两极的电流不对称; 第四期则整个双极工程完全建成。

(8) 直流输电输送的有功及两端换流站消耗的无功均可用手动或自动方式进行快速控制, 有利于电网的经济运行和现代化管理。

(二) 直流输电缺点

(1) 直流输电换流站比交流变电站的设备多、结构复杂、造价高、损耗大、运行费用高、可靠性也较差。通常交流变电站的主要设备是变压器和断路器, 而直流换流站除换流变压器和相应的断路器以外, 还有换流器、平波电抗器、交流滤波器、直流滤波器、无功补偿设备以及各种类型的交流和直流避雷器等, 因此, 换流站的造价比同样规模的交流变电站的造价要高出数倍。由于设备多, 换流站的损耗和运行费用也相应增加, 同时换流站的运行和维护也较复杂, 对运行人员的要求也较高。减少换流站的设备、简化其结构、降低设备造价、改善设备的运行性能、采用新型的换流设备是今后直流输电发展中应继续解决的主要问题。

(2) 换流器对交流侧来说, 除了是一个负荷 (在整流站) 或电源 (在逆变站) 以外, 它还是一个谐波电流源。它畸变交流电流波形, 向交流系统发出一系列的高次谐波电流, 同时也畸变了交流电压波形。为了减少流入交流系统的谐波电流, 保证换流站交流母线电压的畸变率在允许的范围内, 必须装设交流滤波器。另外, 换流器对直流侧来说, 除了是一个电源 (在整流站) 或负荷 (在逆变站) 以外,



它还是一个谐波电压源。它畸变直流电压波形、向直流侧发出一系列的谐波电压，在直流线路上产生谐波电流。为了保证直流线路上的谐波电流在允许的范围内，在直流侧必须装设平波电抗器和直流滤波器。交、直流滤波器使换流站的造价、占地面积和运行费用均大幅度提高，同时也降低了换流站的运行可靠性。当采用新型高频可关断半导体器件（如 IGBT、IGCT 等）和脉宽调制（PWM）技术进行换流时，换流器所产生的谐波将大幅度降低，滤波系统则可相应地简化。

(3) 晶闸管换流器在进行换流时需消耗大量的无功功率（占直流输送功率的 40% ~ 60%），每个换流站均需装设无功补偿设备。当交流滤波器所提供的无功功率不能满足无功补偿的要求时，还需另外装设静电容器；当换流站接于弱交流系统时，为提高系统动态电压的稳定性和改善换相条件，有时还需要装设同步调相机或静止无功补偿装置。这同样要增加换流站的投资和运行费用。当采用新型可关断半导体器件或电容换相换流器时，无功补偿问题将会得到解决。

(4) 直流输电利用大地（或海水）为回路而带来了一些技术问题，如接地极附近地下（或海水中）的直流电流对金属构件、管道、电缆等埋设物的电腐蚀问题；地中直流电流通过中性点接地变压器使变压器饱和所引起的问题；对通信系统和航海磁性罗盘的干扰等。对于每项具体的直流输电系统，在系统设计时，对上述问题必须进行充分的研究，并采取相应的技术措施。

(5) 直流断路器由于没有电流过零点可以利用，灭弧问题难以解决，给制造带来困难。国外对直流断路器虽然进行了大量的研究和试制，但到目前为止仍没有满意的产品提供给工程使用，使多端直流输电工程发展缓慢。近年来，利用直流输电的快速控制，在工程上已可以解决多端直流输电的故障处理等问题，但其控制系统相当复杂，仍需要在实际工程运行中进行考验和改进。当采用新型可关断半导体器件进行换流时，直流断路器的功能将由换流器来承担，这一问题将得到解决。

三、直流输电应用与工程类型

(一) 直流输电应用

直流输电的应用范围取决于直流输电技术的发展水平和电力工业发展的需要。目前实际应用的输电方式有交流输电和直流输电两种。就目前直流输电技术的发展水平来看，直流输电还只是交流输电的补充，随着直流输电技术的发展，其应用范围将会扩大。直流输电的应用场合可分为两大类型：① 采用交流输电在技术上有困难或不可能，而只能采用直流输电的场合，如不同频率（如 50Hz、60Hz）电网之间的联网或向不同频率的电网送电；因稳定问题采用交流输电难以实现；远距离电缆送电，采用交流电缆因电容电流太大而无法实现等。② 在技术上采用两种输电方式均能实现，但采用直流输电比交流输电的技术经济性能好。对于这种情况则需要对工程的输电方案进行比较和论证，最后根据比较的结果选择技术经济性能优越的方案。

1. 远距离大容量输电

直流输电线路的造价和运行费用均比交流输电低，而换流站的造价和运行费用均比交流变电站的高。因此，对同样的输送容量，输送距离越远，直流比交流的经济性能越好。随着输送距离的增加，交流输电的容量将受其稳定极限的限制，为提高输送能力，往往需要采取各种技术措施，从而又增加了交流输电的投资。通常规定，当直流输电线路和换流站的造价与交流输电线路和变电站的造价相等时的输电距离为等价距离，如图 1-5 所示。也就是说，对于一定的输送功率，当输电距离大于等价距离时，采用直流输电比较经济。等价距离与交流 and 直流输电线路的造价、交

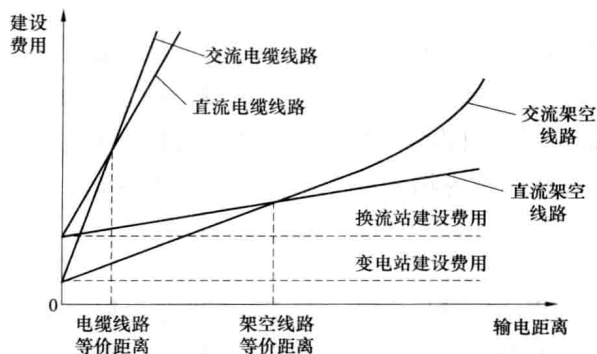


图 1-5 交直流输电建设费用与输电距离的关系图