

HUANLIU BIANYAQI
TIHUAN YUNXING JISHU

换流变压器 替换运行技术

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局 编



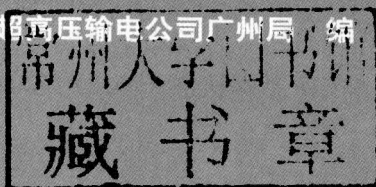
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



BIANYAQI
JUNXING JISHU

换流变压器 替换运行技术

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

南方电网超高压公司已有多个换流站投入运行,研究换流站换流变压器互为备用的可行性和技术难点不仅具有理论意义,也可作为应急事故预案的一部分。本书共有九章,包括绪论,换流变压器简介,换流变压器替换运行的仿真建模,换流变压器替换前后电压电流特性,换流变压器替换前后的谐波与损耗特性,替换前后的触发角、熄弧角及无功补偿特性,HVDC降压运行时换流变压器替换的仿真分析,换流变压器替换对继电保护的影响,换流变压器的运输与更换方案。对换流变压器互为备用的可行性和技术难点进行了深入理论研究和探讨,为紧急状况下换流站备用换流变压器互为支援提供一种新的技术方案。

本书可供从事高压直流输电规划、设计、研究和运行的工作人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

换流变压器替换运行技术/中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局编. —北京:中国电力出版社,2012.1

ISBN 978-7-5123-2581-4

I. ①换… II. ①中… III. ①换流变压器-运行-技术 IV. ①TM422

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第003326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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012年5月第一版 2012年5月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 12.25印张 267千字
印数0001—1000册 定价40.00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

编 委 会

主 任 张 鹏

副主任 邓庆健 郑望其

委 员 林 睿 左干清

顾 问 林志波 龚天森 钱 海 张雪波

主 编 刘红太 林 睿 左干清

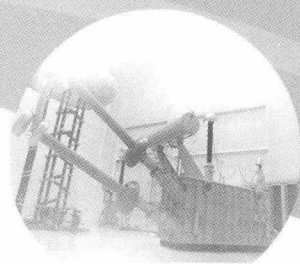
参 编 盛 康 张培东 任鑫芳 罗宇航 董跃周

叶建铸 李 鹏 欧开健 夏成军 胡蕴斌

石延辉 杨荆林 王 颂 梁家豪 孙 勇

谢 超 郝志杰 汲 广 袁 鹏 陈春晓

序 言



近些年,高压直流输电技术日臻成熟,其在技术经济上的优势使之成为解决电力资源分布不均衡、实现跨区域电力优化配置的重要手段。截至 2011 年底,我国已建成投入运行的特高压、超高压直流输电系统已达 16 个。

高压直流输电技术的广泛应用,深刻影响了电网结构和特征。在南方电网,甚至出现了“强直流、弱交流”情形。无论电网调度部门,还是设备运行单位都面临新课题。

换流变压器是直流输电系统中的关键设备,其故障将给系统稳定运行带来风险。实践证明,换流变压器故障率比较高,一旦故障停运,处理时间往往较长,对系统影响较大。随着换流变压器投入数量增多,运行时间长久,其丧失备用的几率加大。因此,有必要对换流变压器的远备用或替换运行开展可行性研究。

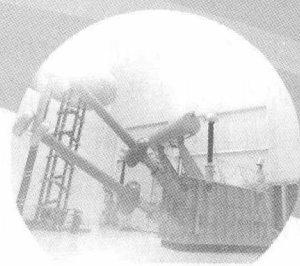
南方电网超高压输电公司广州局(简称“广州局”)承担南方电网西电东送受端输电设施运行维护。近 10 年,伴随 $\pm 500\text{kV}$ 天广直流、高肇直流、兴安直流、 $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流等四回直流输电系统的建设、运行,培养了一支高水平的直流输电技术专家队伍,成为南方电网公司乃至国内较早成长起来的直流输电专业技术人才。

广州局在总结南方电网直流输电系统运行维护工作的基础上,结合大量运行实例,潜心钻研、分析、论证换流变压器替换运行技术,研究成果在这本《换流变压器替换运行技术》得到了全面呈现。本书分为换流变压器替换运行仿真建模、换流变压器替换前后电压电流特性、换流变压器替换前后谐波与损耗特性、替换前后触发角、熄弧角及无功补偿特性、降压运行时换流变压器替换的仿真分析、换流变压器替换运行对继电保护的影响、换流变压器运输与更换等九章,系统论证了换流变压器替换运行技术的可行性,深入探讨了替换运行后可能出现的问题并提出解决方法和实施方案。该书可为从事电网规划、电力设计、电力基建、运行维护、变压器制造方面的专业技术和管理人员,以及高校师生提供技术参考及工程实践范例,也可为装备制造业实现标准化设计和生产提供有益借鉴。

中国南方电网超高压输电公司广州局局长

张明

前言



1972年,加拿大伊尔河直流输电工程首次采用可控硅技术,随后,直流输电技术在西方得到较大发展。我国直流输电技术起步较晚。1989年,葛上 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程投入运行,但运行指标不佳。2000年,天广 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程投入运行。此后直流输电技术在我国蓬勃发展,高压直流输电技术日臻成熟,其在技术经济上的优势使之成为解决电力资源分布不均衡,实现跨区域电能优化配置的重要手段。目前我国的直流输电系统不论是数量还是规模都已是世界最高水平。截至2011年底,我国已建成投入运行的特高压、超高压直流输电系统已达16个。

高压直流输电技术的广泛应用深刻影响了电网结构和特征。在南方电网,甚至出现了“强直流、弱交流”情形。无论电网调度部门,还是设备运行单位都面临新课题。

换流变压器是直流输电系统中的关键设备,占换流站总投资的 $1/4$,其故障将给系统稳定运行带来风险。实践证明,换流变压器故障率比较高,一旦故障停运,处理时间往往较长,对系统影响较大。随着换流变压器投入数量增多,运行时间越来越长,丧失备用的几率加大。因此,有必要对换流变压器的远备用或替换运行开展可行性研究。

从天广直流工程开始到特高压楚雄换流站和穗东换流站,12年来,南方电网已经有16台换流变压器因质量问题退出运行(广州6台,肇庆1台,楚雄2台,兴仁1台,马窝6台)。换流变压器因质量问题需停运维修,给直流输电系统带来很大损失。2007年10月18日,肇庆换流站Y/Y型换流变压器C相1.1套管发生故障,造成换流变压器严重损坏,致使肇庆站Y/Y型换流变压器丧失备用,2年后才完成新换流变压器组装,恢复备用。楚雄站极一高端换流变压器因质量问题无法带电,造成云广直流极一高端推迟大半年投运。可见,换流变压器故障的概率远高于最初的预想,并且后果非常严重,处理周期长,恢复运行或备用时间动辄以年计。若直流输电系统发生因换流变压器故障长期单极运行的情况,不但经济损失非常巨大,亦会对政治、社会产生影响。故有必要研究 $N-2$ 的情况下如何应对事故,快速恢复直流输电系统运行。

南方电网超高压输电公司广州局在总结南方电网直流输电系统运行维护工作的基础上,结合大量运行实例,潜心钻研、分析、论证换流变压器替换运行技术,所有这些研究成果凝结成这本《换流变压器替换运行技术》。

全书共分九章,各章主要内容如下:第一章主要介绍了高压直流输电工程概况、高压直流输电的系统构成、高压直流输电工程的特点、高压直流输电的工程应用情况、国

内换流变压器的运行概况，分析研究换流变压器替换运行的意义。第二章介绍换流变压器的基本原理、功能及特点，换流变压器的型式与接线方式，换流变压器的主要参数选择，换流变压器的直流偏磁情况。第三章对换流变压器替换运行的仿真建模进行总体分析，并介绍仿真系统搭建情况。第四章对换流变压器替换前后电压电流特性进行分析，并对所提出的降低中性点电流措施进行分析。第五章对换流变压器替换前后的谐波与损耗特性进行详细计算分析，并对降低谐波损耗，降低噪声的措施进行分析。第六章对换流变压器替换前后的触发角、熄弧角及无功补偿特性以及控制措施进行分析。第七章从电流、电压、谐波、触发角、熄弧角以及无功补偿等技术指标对 HVDC 降压运行方式或交流系统遭遇极端电压时，换流变替换运行的适应性进行仿真分析。第八章就换流变压器替换对继电保护的影响进行论证分析。第九章提供了两个换流变压器运输的工程实例方案分析，并提供换流变压器现场回装和更换工作方案供工程实践参考。

该书可为从事电网规划、电力设计、电力基建、电力运行维护、变压器制造方面的专业技术和管理人员，以及高校师生提供技术参考及工程实践范例，也可为装备制造业实现标准化设计和生产提供有益借鉴。

由于编者的理论水平和实践经验有限，书中在仿真建模，换流阀系统、控制保护系统与换流变压器三者间交叉互动影响等方面难免有考虑不周之处，望相关单位和专家谅解。对于本书的不足和错漏之处也望各位专家不吝赐教。

编 者
2012 年 2 月

目 录



序言

前言

第一章 绪论	1
第一节 高压直流输电工程概述.....	1
第二节 国内换流变压器的运行概况.....	9
第三节 研究换流变压器互换运行的意义	10
第二章 换流变压器简介	12
第一节 换流变压器的基本原理、功能及特点	12
第二节 换流变压器的型式与接线方式	15
第三节 换流变压器的主要参数选择	17
第四节 换流变压器的直流偏磁	23
第三章 换流变压器替换运行的仿真建模	27
第一节 PSCAD/EMTDC 与 RTDS 简介	27
第二节 换流变压器互换运行的初步可行性分析	29
第三节 仿真建模	34
第四章 换流变压器替换前后电压电流特性	38
第一节 概述	38
第二节 互换前后网侧电压	39
第三节 替换前后三相电流	40
第四节 互换前后中性点电流	43
第五节 挡位平移抑制中性点电流	44
第五章 换流变压器替换前后的谐波与损耗特性	46
第一节 高压直流输电系统的谐波	46
第二节 换流装置交流侧的特征谐波	47
第三节 谐波对换流变压器的影响	54
第四节 换流变压器谐波损耗的计算方法	57

第五节	换流变压器替换前后的谐波与损耗仿真分析	66
第六章	替换前后的触发角、熄弧角及无功补偿特性	79
第一节	基本概念	79
第二节	换流站无功补偿特性	80
第三节	触发角和熄弧角控制	82
第四节	换流变压器分接头控制	83
第五节	触发角、熄弧角及无功功率的仿真分析	87
第六节	可供采取的措施	109
第七章	HVDC 降压运行时换流变压器替换的仿真分析	116
第一节	电压电流特性	116
第二节	替换运行后系统降压运行的谐波特性	122
第三节	触发角、熄弧角及无功补偿特性	130
第四节	极端电压	135
第八章	换流变压器替换对继电保护的影响	136
第一节	换流变压器继电保护的特点	136
第二节	换流变压器保护的配置原则	137
第三节	换流变压器替换运行对保护的影响	140
第九章	换流变压器的运输与更换方案	148
第一节	运输方式选择分析	148
第二节	运输线路选择分析	149
第三节	运输设备分析	150
第四节	大件运输案例分析一：兴仁至安顺换流变压器运输方案	152
第五节	大件运输案例分析二：深圳至肇庆换流变压器运输方案	157
第六节	换流变压器拆卸方案	173
第七节	换流变压器现场回装和更换工作方案	181
参考文献		186

绪 论

第一节 高压直流输电工程概述

高压直流输电技术在远距离大容量输电和电力系统联网工程中得到了广泛应用。20 世纪 80 年代,我国开始建设直流输电工程。1989 年 9 月 17 日,国内第一条超高压直流输电线路葛洲坝—上海南桥正式投入运行,实现了华中电网与华东电网的互联,也为我国储备了高压直流输电技术和人才。截至 2011 年底,我国已建成并正式投入运行的直流输电系统见表 1-1。其中,中国南方电网已建成并正式投入运行的直流输电系统包括天广直流、贵广 I 回直流、贵广 II 回直流、云广特高压直流等超/特高压直流输电系统以及三峡送电广东的三广直流输电系统,形成了直流多落点的交直流并联运行大电网。

表 1-1 我国直流输电系统基本情况表 (截至 2011 年底)

序号	系统名称	极 (单元)	投运日期	额定电压 (kV)	额定输送容量 (MW)	线路长度 (km)
1	葛南直流 输电系统	极 I 极 II	1989 年 9 月 1 日 1990 年 8 月 1 日	± 500	528 528	1110.65
2	天广直流 输电系统	极 I 极 II	2000 年 12 月 26 日 2001 年 6 月 26 日	± 500	900 900	963
3	龙政直流 输电系统	极 I 极 II	2003 年 6 月 1 日 2003 年 6 月 1 日	± 500	1500 1500	860.44
4	江城直流 输电系统	极 I 极 II	2004 年 6 月 1 日 2004 年 6 月 1 日	± 500	1500 1500	940.72
5	高肇直流 输电系统	极 I 极 II	2004 年 9 月 24 日 2004 年 5 月 31 日	± 500	1500 1500	891
6	灵宝背靠背 直流输电系统	单元 I 单元 II	2005 年 7 月 1 日 2009 年 12 月 15 日	120 127	360 750	0
7	宜华直流 输电系统	极 I 极 II	2006 年 12 月 1 日 2006 年 12 月 1 日	± 500	1500 1500	1048.51

续表

序号	系统名称	极 (单元)	投运日期	额定电压 (kV)	额定输送容量 (MW)	线路长度 (km)
8	兴安直流 输电系统	极 I 极 II	2007 年 12 月 22 日 2007 年 6 月 21 日	±500	1500 1500	1194
9	高岭背靠背 直流输电系统	单元 I 单元 II	2008 年 11 月 1 日 2008 年 11 月 1 日	±125	750 750	0
10	楚穗直流 输电系统	极 I 极 II	2010 年 6 月 18 日 2009 年 12 月 28 日	±800	2500 2500	1374
11	德宝直流 输电系统	极 I 极 II	2010 年 4 月 21 日 2010 年 4 月 21 日	±500	1500 1500	534.34
12	复奉直流 输电系统	极 I 极 II	2010 年 7 月 21 日 2010 年 7 月 21 日	±800	3200 3200	1891.3
13	伊穆直流 输电系统	极 I 极 II	2010 年 9 月 30 日 2010 年 9 月 30 日	±500	1500 1500	906.19
14	宁东直流 输电系统	极 I 极 II	2010 年 11 月 28 日 2011 年 2 月 28 日	±660	2000 2000	1333
15	柴拉直流	极 I 极 II	2011 年 12 月 9 日	±400	1200	1038
16	中俄直流 联网	极 I 极 II	2011 年 12 月 31 日	±500	750	0

注 德宝直流输电系统、复奉直流输电系统、伊穆直流输电系统、楚穗直流输电系统均为 2010 年以后双极投产。

我国计划在 2020 年前投运的直流输电工程将超过 30 个。近期规划发展的直流输电工程主要包括用于连接华中与西北、华北与东北、国家电网公司与南方电网公司之间及中俄的背靠背直流联网工程，内蒙古及陕甘宁地区的煤电通过高压直流或特高压直流向京津唐、山东等地输电，四川水电向华东、华中地区送一电的特高压直流输电工程，西藏水电、新疆火电通过特高压向华东、华中及华北输送电力，云南、西藏电力通过特高压向南方电网送电及俄罗斯、越南等邻国的电力融通。可以看到，直流输电将成为我国电网的重要组成部分。

一、高压直流输电的系统构成

直流输电工程以直流电的方式实现电能传输。直流输电与交流输电相互配合构成现代电力传输系统。目前电力系统中发电和用电的绝大部分均为交流电，要采用直流输电必须进行换流。也就是说，在送端需要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。整流站和逆变站可统称为换流站。实现整流和逆变变换的装置分别称为整流器和逆变器，它们统称为换流阀。

直流输电工程的系统结构可分为两端（或端对端）直流输电系统和多端直流输电系统两大类。两端直流输电系统是只有一个整流站（送端）和一个逆变站（受端）的直流输电系统，即只有一个送端和一个受端，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。例如，一个三端直流输电系统包括三个换流站，与交流系统

有三个端口相连，可以有两个换流站作为整流站运行，一个换流站作为逆变站运行，即有两个送端和一个受端；也可以有一个换流站作为整流站运行，两个作为逆变站运行，即有一个送端和两个受端。目前世界上已运行的直流输电工程大多为两端直流输电系统，只有为数不多的三端直流输电工程，如意大利撒丁岛（Sardinia）直流输电工程，虽然加拿大和美国合作的魁北克—新英格兰（Quebec—New England）直流输电工程开始设计为五端系统，后因控制协调很难进行而改为三端，此外，纳尔逊河双极 1 和双极 2 以及太平洋联络线（Pacific Intertie）直流工程也具有多端直流输电的运行性能^[2,3]。

（一）两端直流输电系统

两端直流输电系统的构成主要有整流站、逆变站和直流输电线路三部分。对于可进行功率反送的两端直流输电工程，其换流站既可以作为整流站运行，又可以作为逆变站运行。整流站和逆变站的主接线和一次设备基本相同（有时交流侧滤波器配置和无功补偿有所不同），其主要差别在于控制和保护系统的功能不同，图 1-1 为两端直流输电系统构成原理图。

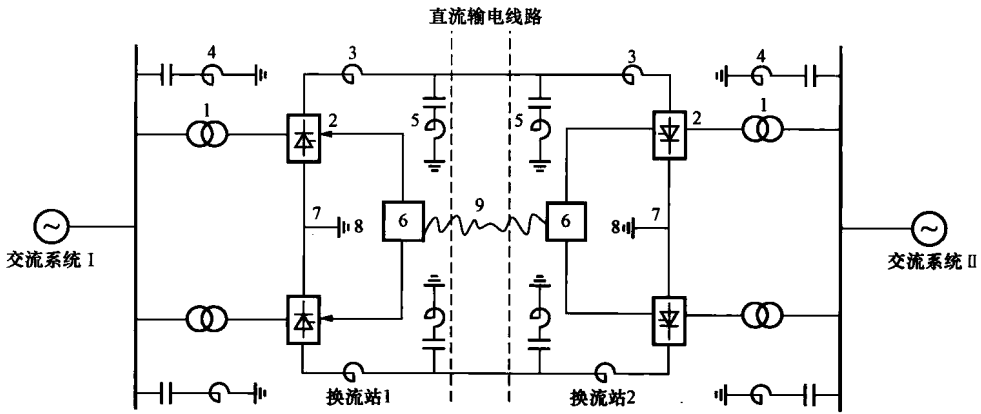


图 1-1 两端直流输电系统构成原理图

- 1—换流变压器；2—换流阀；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

送端和受端的交流系统和直流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。同时送端电力系统作为直流输电的电源，提供传输的功率，而受端相当于负荷，接受由直流输电送来的功率。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工程的设计和运行都有很大影响。再者，直流输电系统的设计和要求很大程度上影响两端交流系统的运行性能。因此，直流输电系统的设计和要求很大程度上取决于两端交流系统的特点和要求。

直流输电的控制保护是实现直流输电正常启动和停运、正常运行、运行参数改变与自动调节、故障处理与保护等必不可少的组成部分，是决定直流输电工程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。此外直流输电工程为了利用大地或海水为回路提高直流输电运行的可靠性和灵活性，还需要接地极和接地极引线。因此，一个直流输电工程，除整流站、逆变站和直流输电线路外，还有接地极、接地极引

线和一个满足运行要求的控制保护系统等。

两端直流输电系统又可以分为单极系统（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。单极输电系统可采用正极性或负极性。换流站出线端对地电位为正称为正极，为负称为负极。与正极或负极相连的导线称为正极导线或负极导线。单极直流架空线路多采用负极性。虽然单极系统运行的可靠性和灵活性都不如双极系统好，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。此外当双极系统单极运行时，还可以接成双导线并联大地回路方式运行。图 1-2 为三种方式的示意图。

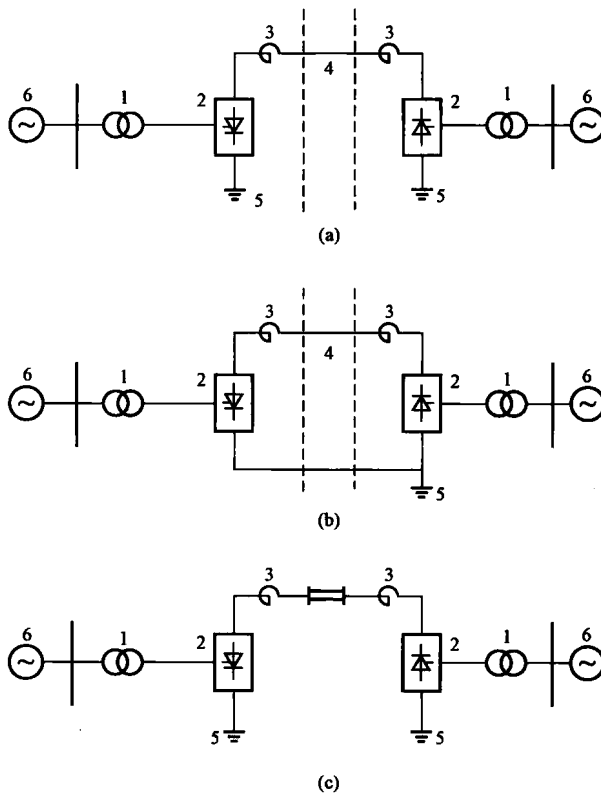


图 1-2 单极直流输电系统接线示意图

（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路方式

1—换流变压器；2—换流阀；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

（2）双极系统。双极系统接线方式是直流输电工程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 为双极直流输电系统接线示意图。

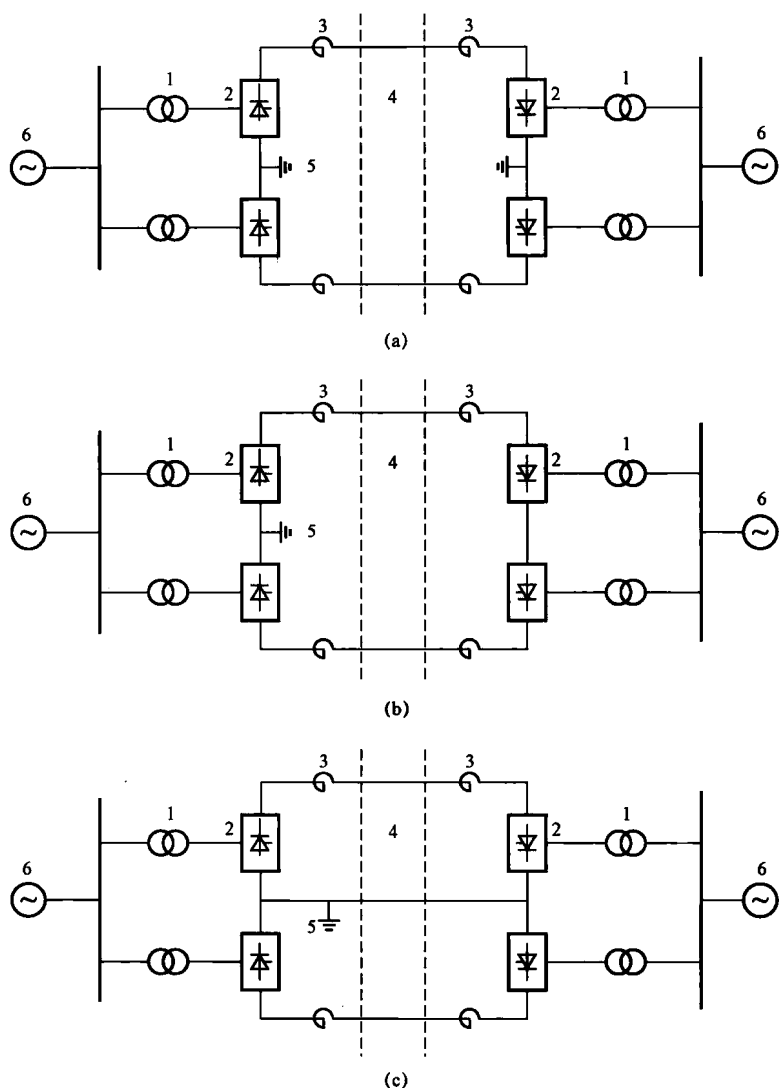


图 1-3 双极直流输电系统接线示意图

(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—换流阀；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

(3) 背靠背直流系统。背靠背直流系统是输电线路长度为零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。背靠背系统的整流站和逆变站的设备通常均装设在一个站内。在背靠背换流站内，整流器和逆变器直流侧通过平波电抗器相连，构成直流侧的闭环回路；而交流侧分别与各自的被联网相连，从而形成两个电网的非同步联网。图 1-4 为背靠背换流站原理接线图。

(二) 多端直流输电系统

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，还可以联系多个交流系统或者交流系统分为多个孤立运行的电网。多端直流输电系统的换流站，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

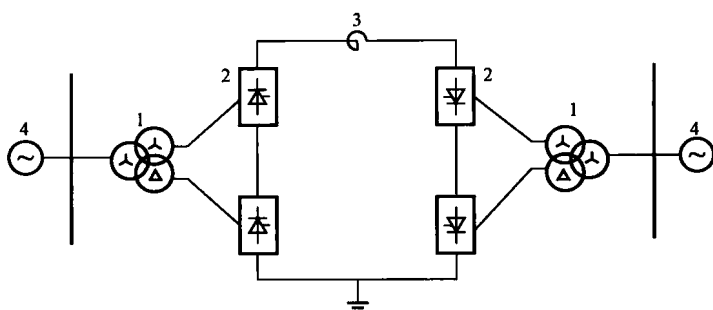


图 1-4 背靠背换流站原理接线图

1—换流变压器；2—换流阀；3—平波电抗器；4—两端交流系统

站运行的换流站总功率必须相等，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^[2,3]。

二、高压直流输电工程的特点

高压直流输电工程的主要特点与其两端需要换流和输电部分为直流这两个基本点有关。高压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，绝大部分高压直流输电工程采用普通晶闸管换流阀（无自关断能力、频率低）进行换流，基于新型电力电子器件（如 IGBT、IGCT、碳化硅等）的换流阀也在迅速发展和应用（如轻型直流输电）。下面介绍基于晶闸管换流阀的高压直流输电工程的优缺点。

（一）直流输电的优点

（1）直流输电的架空线路只需要正负两极导线，杆塔结构简单，线路造价、损耗小。与交流输电相比，输送同样的功率，直流架空线路可节约 1/3 的钢芯铝线、1/3~1/2 的钢材，线路造价为交流输电的 2/3，并且在此条件下的线路损耗为交流的 2/3。同时，直流输电所占的线路走廊也较窄。在直流电压的作用下，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。电缆耐直流电压能力比耐交流电压能力约高 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送容量大得多。

此外直流电缆线路只需 1 根（单极）或两根（双极）电缆，而交流线路则需要 A、B、C 三相 3 根电缆。因此直流电缆线路造价比交流低得多。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大得多，对于交流线路由此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，芯线的全部负荷能力均被电容电流所占据，此时电力已不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，其输送距离不受限制，有

利于进行远距离电缆输电。

(3) 直流不存在交流输电的稳定问题, 有利于远距离大容量送电。交流输电输送功率可用式 $P = (E_1 E_2 / X_{12}) \sin \delta$ 表示, 式中 E_1 、 E_2 分别为送端和受端交流系统的等值电势; δ 为 E_1 和 E_2 两个电势之间的相位差, 称为功率角; 等值电势 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, $P = P_M = E_1 E_2 / X_{12}$, 其中 P_M 为 X_{12} 输电线路的静态极限。输电线路的输送功率均小于 P_M 。因此在运行中如果输送功率接近于 P_M , 当系统有故障或扰动时, 则可能导致两端交流系统失去同步运行稳定性, 需要采取提高稳定性的措施, 如增设串联补偿电容、增加输电线路回路数等。这将使输电系统的投资增加, 而直流输电的两端交流系统经过整流和逆变的隔离, 不存在同步运行的稳定问题, 其输送容量和距离不受稳定性的限制, 对于远距离大容量输电非常有利。

(4) 调度管理方便。由于通过直流系统互联的两端交流系统可以有不同的频率, 输送功率也可保持恒定(恒功率、恒电流等)。对于送端而言, 整流站相当于交流系统的一个负荷。对于受端而言, 逆变站则相当于交流系统的一个电源。两个电网相互之间的干扰和影响小, 运行管理简单方便。

(5) 潮流和功率控制可实现自动化。交流输电的潮流取决于网络参数、发电机与负荷的运行方式, 控制难度较大, 需由值班人员调度。直流输电系统的功率传输可全部自动控制。

(6) 直流输电采用大地为回路, 直流电流向大地深层流去, 可很好地利用大地这个良导体。利用大地作为回路可省下一极的导线, 且大地的电阻率低、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, 每个极可以作为一个独立的回路运行; 当一个极发生故障时, 健全极仍可送一部分功率, 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。双极直流输电工程可按极来分期建设, 先建一个单极运行, 再建另一个极。

(二) 直流输电的缺点

(1) 直流输电换流站比交流输电变电站的设备多、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, 而直流换流站除了换流变压器和相应的断路器外, 还有换流阀、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。因此换流站的造价比同规模交流变电站的造价高得多。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, 对运行人员的要求比较高。因此, 减少换流站的设备、简化结构、降低造价、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解决的问题。

(2) 换流阀对于交流侧来说, 除了是一个负荷(在整流站)或电源(在逆变侧)以外, 还是个谐波电流源。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, 保证换流站的交

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。换流阀对于直流侧来说，除了是一个电源或负荷，还是谐波电压源。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，在直流侧必须装设直流滤波器和平波电抗器。交流滤波器和直流滤波器使换流站的造价、占地面积和运行费用大幅提高，同时降低了换流站的运行可靠性。

(3) 晶闸管换流阀在进行换流时需要消耗大量的无功功率（占直流输送功率的40%~60%），每个换流站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，还需额外装设补偿电容器；当换流站接于弱交流系统时，为提高系统动态电压稳定性和改善换相条件，有时还需要装设同步调相机和静止无功补偿装置。这同样要增加换流站的投资和运行费用。

(4) 直流输电利用大地（或海水）为回路而带来的一些技术问题，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工程，在工程设计时，对上述问题必须进行充分的研究，并采取相应的措施。

(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供给工程使用，这是多端直流输电工程发展缓慢的重要原因。近几年来，利用直流输电的快速控制，在工程中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，仍需要在实际工程中考验和完善。

三、高压直流输电的工程应用

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的发展。目前交流输电在大多情况下投资少，运行灵活方便，技术成熟，在电力系统中得到广泛应用。但随着直流输电技术的发展，高压直流输电的应用范围将扩大。高压直流输电在我国主要有以下几个方面的主要应用^[4]。

1. 海底电缆送电

由于交流电缆存在较大的电容电流，海底电缆长度超过等价距离时，采用直流输电无论是经济上还是技术上都较为合理。我国沿海有很多岛屿，与陆地电力系统的互联，采用直流输电系统是一种较为合理的方案。

2. 远距离大功率输电

我国动力资源分布不均衡。据统计，我国水利资源70%以上分布在西南、西北地区；煤炭资源约70%集中于山西和内蒙古一带，而用电较密集的负荷中心又分布在沿海地区。因此，随着我国国民经济的发展，必须开发西部电力，并向东部负荷中心输送。例如，长江三峡水电站向华东送电，黄河上游龙羊峡、李家峡水电站向华北送电，工程的输电距离都在900km以上，输送功率大于1000MW。

3. 交流电力系统之间的非同步联络

由于我国的具体情况，跨大区的远距离输电工程往往既是输送电力的强大主干线，