



国家电网
STATE GRID

直流换流站运维技能培训教材

直流控制保护

国家电网公司运维检修部 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



直流换流站运维技能培训教材

直流控制保护

国家电网公司运维检修部 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为提高直流换流站运维人员的操作技能,国家电网公司运维检修部组织编写了《直流换流站运维技能培训教材》,本套教材包括《直流换流站设备状态检修管理标准及工作标准》、《换流站运行》、《直流控制保护》、《换流阀及阀控系统》、《阀冷却系统》五个分册。

本书为《直流控制保护》分册,分直流输电原理、MACH2 控制保护系统和SIMADYN D 控制保护系统三篇。直流输电原理篇包括绪论、直流输电原理、直流控制系统、直流保护四章;MACH2 控制保护系统篇包括理论知识和技能实践两章;SIMADYN D 控制保护系统篇包括理论知识和技能实践两章。

本套教材面向生产一线,实用性强,可供直流换流站运维人员技能培训和 Learning 使用。

图书在版编目(CIP)数据

直流控制保护 / 国家电网公司运维检修部组编. —北京:
中国电力出版社, 2012.10

直流换流站运维技能培训教材

ISBN 978-7-5123-3574-5

I. ①直… II. ①国… III. ①直流换流站—控制—技术
培训—教材 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 237432 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>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 11 月第一版 2012 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 25.25 印张 432 千字

印数 0001—1500 册 定价 140.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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 帅军庆

副 主 任 张启平 邓永辉 葛兆军

委 员 冀肖彤 曾南超 姚为正 李海英 张爱玲

邓占锋 李继辉 丁 雁 吴石光 张 涛

李帅兵

本册编写人员 李帅兵 常 勇 鄂士平 张 民 卢 宇

曹 森 韦 鹏 姚 孟 姚其新 王永平

徐 文 郑 华 单 哲 刘旭辉 郝俊芳

2003 年以来,随着三峡电力外送,国家电网公司直流输电进入了快速发展时期,目前已投运直流输电工程 14 个、换流站 25 座,输送容量达 4225 万 kW,国家电网公司已成为世界上运行直流输电规模最大的电网公司。随着公司“一特四大”战略的实施,直流输电将呈现广阔的发展前景。

直流输电承担着大型能源基地电力外送和跨大区联网重任,是实现资源优化配置的重要手段,事关大电网安全稳定运行,确保其长期安全可靠运行意义重大。

为加强直流换流站运维人员的技能培训,国家电网公司组织运维单位、设备厂家、科研院所编制了《直流换流站运维技能培训教材》,并邀请 16 位公司系统内专家、设备厂家和运维单位技术人员录制了 60 学时的《直流换流站运维技能培训讲座》,全面、系统地介绍了直流换流站运行、控制保护、换流阀及阀控系统、阀冷却系统的运维技术。相信该套教材的出版将进一步加快直流运维人才的培养,提高直流运维人员技能水平和驾驭直流输电系统安全运行的能力。

申军庆

二〇一二年十一月

直流输电工程输送容量大、输电距离长、技术先进、设备复杂，引起直流闭锁的环节多，对现场运维工作要求高。直流输电在我国发展速度快，运维人才缺乏问题日益突出。由于缺乏系统的培训资源，在一定程度上限制了运维人员技术水平的提高，亟须编制一套系统的、贴合现场实际的直流换流站运维技能培训教材。

为此，国家电网公司运维检修部组织运维单位、设备厂家和科研院所编写了《直流换流站运维技能培训教材》，并邀请 16 位系统内著名专家、设备厂家和运维单位资深技术人员录制了 60 学时的配套教学光盘。教材涵盖了直流换流站运行、直流控制保护、换流阀及阀控系统、阀冷却系统的运维技术，特别是对现场作业技能进行了详细的描述，编写力求准确、清晰，面向生产一线，突出现场实用性。

书本教材包括《直流换流站设备状态检修管理标准及工作标准》、《换流站运行》、《直流控制保护》、《换流阀及阀控系统》、《阀冷却系统》五个分册。教学光盘包括直流输电原理，端对端和背靠背直流系统运行，MACH2 和 SIMADYN D 技术直流控制保护，ABB、SIEMENS 和 AREVA 技术换流阀及阀冷却系统。

由于编写时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2012 年 11 月

序
前言

第一篇 直流输电原理

第一章 绪论	3
--------------	---

第二章 直流输电原理	8
------------------	---

第三章 直流控制系统	29
------------------	----

第一节 控制系统分层	29
------------------	----

第二节 附加控制功能	32
------------------	----

第三节 直流工程控制系统配置方案	37
------------------------	----

第四章 直流保护	44
----------------	----

第一节 故障类别及故障特征	44
---------------------	----

第二节 保护功能	51
----------------	----

第二篇 MACH2 控制保护系统

第一章 理论知识	61
----------------	----

第一节 控制保护系统总体结构	61
----------------------	----

第二节 控制保护系统冗余实现	67
----------------------	----

第三节 控制系统功能实现	76
--------------------	----

第四节 保护系统功能实现	121
--------------------	-----

第五节 控制保护系统自检功能	144
----------------------	-----

第二章 技能实践	148
----------------	-----

第一节 常用软件使用	148
------------------	-----

第二节 典型故障处理	157
------------------	-----

第三篇 SIMADYN D 控制保护系统

第一章 理论知识	225
----------------	-----

第一节 控制保护系统总体结构	225
----------------------	-----

第二节 控制保护系统冗余实现	229
----------------------	-----

第三节 控制系统功能实现	235
--------------------	-----

第四节 保护系统功能实现	260
--------------------	-----

第五节 控制保护系统自检功能实现	305
------------------------	-----

第二章 技能实践	309
----------------	-----

第一节 常用软件使用	309
------------------	-----

第二节 典型故障处理	343
------------------	-----

参考文献	395
------------	-----



第一篇

直流输电原理

第一章

绪 论

一、直流输电的发展及其优缺点

人们对电力的应用和认识首先是从直流电开始的,但是随着生产的发展以及对电能需求的不断增加,直流输电由于其自身的限制已经不能满足输电要求。随着技术的发展,人们逐步掌握了多相交流电路原理,并且发明了交流发电机、变压器以及感应电动机。交流输电几乎完全取代了直流输电,并发展成现在的规模巨大的交流电力系统。

尽管如此,直流输电并没有被完全放弃,许多科学家及工程人员都预见到直流输电的必要性。一方面是由于交流输电自身的问题,比如长距离、大容量的功率输送问题、不同交流电网的同步互联问题以及交流电网足够大以后短路容量太大的问题。另一方面,直流输电又有许多优点,它能长距离、大容量的输送功率,能够连接两个不同步的电网且不增加系统的短路容量。同时随着直流输电技术的不断进步以及其在许多方面具有交流系统无法比拟的优越性,使得直流输电越来越为人们所接受。图 1-1-1 所示是两端直流输电系统的构成原理图。

与交流输电相比,直流输电具有以下优缺点:

1. 直流输电的优点

- (1) 有利于改善两侧交流系统的稳定性。
- (2) 具有良好的故障恢复特性;针对绝缘的恶化,可以在降压情况下继续运行。
- (3) 调节速度快,可以进行功率紧急支援。
- (4) 不会增大交流系统的短路容量。

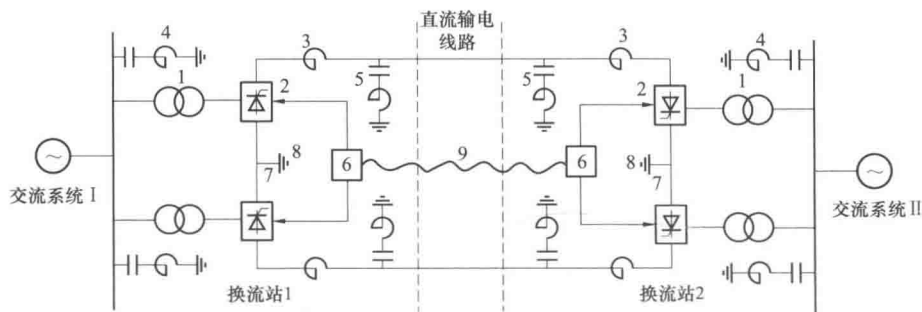


图 1-1-1 两端直流输电系统的构成原理图

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—接地极线；8—接地极；9—站间通信系统

(5) 可实现交流系统的非同步运行。

(6) 相对交流线路来说，直流输电的线路造价低。

(7) 线路的损耗小。

(8) 适合长距离电缆输电，尤其是跨海输电以及地下电缆输电。

(9) 适合进行长距离、大容量的功率输送。

2. 直流输电的缺点

(1) 换流站的投资大。

(2) 换流器换流过程中需要大量的无功功率，同时产生大量的谐波，因此不得不装设大量的滤波及无功补偿装置。

3. 直流输电的主要用途

(1) 长距离、大容量电能的输送。

(2) 海底电缆输电。

(3) 不同频率或频率相同但非同步运行的交流系统之间的互联。

(4) 用地下电缆向大城市供电。

(5) 系统互联或配电网增容时，作为限制短路电流的措施。

(6) 配合新能源输电，例如：风能、太阳能、潮汐能。

直流输电线路的造价比较低，但换流站造价较高。但对远距离输电来说，当输电线长度超过某一临界数值时，其总造价将比交流输电低。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交流变电站的造价相等时的输电距离，称为等价距离（见图 1-1-2）。一般，架空线路等价距离约在 640~960km，

地下电缆线路的等价距离为 56~90km, 海底电缆线路的等价距离为 24~48km。我国西部电力向东部输送, 如用直流输电时取得的联网效果最佳。

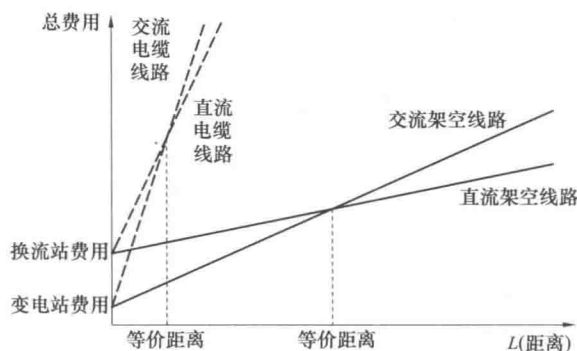


图 1-1-2 直流和交流输电等价距离

二、国外直流输电的发展历程

国外直流输电的发展历史比较久远, 根据换流器件的不同可分为以下几个时期:

（一）无换流器件时期

早期的直流输电不需要经过换流。直接从直流电源送到直流负荷, 即发电、输电和用电均为直流电。但是随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的迅速发展, 发电及供电领域很快被交流电所取代。因此, 直流输电在很长一段时间内未能得到发展。

（二）汞弧阀换流时期

1928 年具有栅极控制功能的汞弧阀的研制成功, 意味着直流输电成为现实, 它既可以用于整流, 同时也解决了逆变的问题。1954 年世界上第一个工业性直流输电工程(瑞典本土至哥特兰岛直流工程)在瑞典投入运行以后, 标志着直流输电进入了一个新的时期。直流输电开始用于长距离大功率的电力输送、海底电缆输电以及交流联网。从第一个采用汞弧阀的直流工程到 1977 年最后一个使用汞弧阀的直流工程建成, 世界上共有 12 项使用汞弧阀的直流输电工程投入运行。所有这些直流工程中, 输送容量最大和距离最长的工程是美国太平洋联络线工程(1440MW、1362km), 输电电压最高的为加拿大纳尔逊河 I 期工程($\pm 450\text{kV}$)。但是由于汞弧阀的制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率高、可靠性低以及运行

维护不便等因素，直流输电的发展受到了很大的限制。汞弧阀换流器如图 1-1-3 所示。

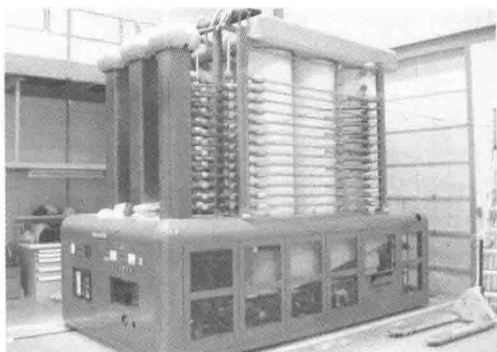


图 1-1-3 汞弧阀换流器

（三）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迅速发展，随着高压大功率晶闸管的问世，晶闸管换流阀和微机控制技术开始在直流输电工程中得到应用，有效地改善了直流输电的运行性能以及可靠性，促进了直流输电技术的发展。由于晶闸管换流阀不存在逆弧问题，而且制造、实验、运行维护和检修都比汞弧阀简单而方便。1970 年，瑞典首先在哥特兰岛直流输电工程进行了试验，采用了晶闸管换流阀。由于晶闸管换流阀具有明显的优点，因此以后新建的直流输电工程均采用晶闸管换流阀。与此同时，原来采用汞弧阀的直流工程也逐步被晶闸管所取代。1972 年，世界上第一条采用晶闸管换流阀的直流工程在加拿大（伊尔河背靠背直流工程，投入运行。该工程的成功投入运行，标志着汞弧阀被淘汰，开始进入了晶闸管换流阀时期。在此期间，由于微机控制保护、光电传输技术、水冷技术等新技术在直流工程中也得到了广泛的应用，促进了直流技术的进一步发展。

晶闸管在直流输电工程中的应用，使得直流输电不管在输送容量还是电压等级上都有了很大的提高。最典型的是已运行的向上特高压直流输电工程，其架空线的电压等级为 $\pm 800\text{kV}$ 、最大输送容量为 6400MW 。此时的直流输电无论是在长距离大功率输电，还是在电网互联以及海缆送电等方面都发挥了重大的作用。

（四）新型半导体换流设备的应用

基于绝缘栅双极晶体管（IGBT）（见图 1-1-4）的一种新型直流输电方式——

轻型直流输电 (HVDC light) 的出现, 意味着直流输电进入了一个新的发展时期。但是由于 IGBT 单个元件的功率小、损耗大, 因此不利于大型直流输电工程采用。随着电力电子技术的不断发展, 新的半导体元件将进一步得到发展。近期研制成功的集成门极换相晶闸管 (IGCT) 和大功率碳化硅元件, 具有电压高、通流能力大、损耗低、体积小、可靠性高, 而且还具备自关断能力, 因此将在直流输电工程中有很好的应用前景。可以预计, 随着新技术的不断进步, 这些新型的半导体换流器件将取代普通的晶闸管, 并将有力地推动直流输电技术的发展。

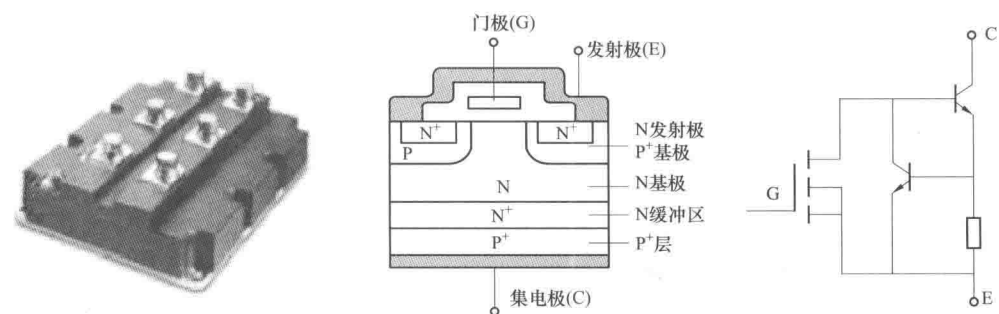


图 1-1-4 IGBT 器件及其电路原理

三、我国直流输电的发展历程

我国直流输电的发展, 与我国经济的高速发展密切相关。经济的发展使得对电力的需求不断上升, 我国有着丰富的水力、煤炭资源, 但分布不均匀。水力资源集中在西南部, 煤炭资源集中在山西、内蒙古、陕西、宁夏等内陆地区。我国沿海地区发展快, 用电增长很快, 而当地煤炭和水力资源比较缺乏, 从外地运煤受交通条件的限制, 且发电成本高, 污染环境, 这就使得经济的发展和能源的分布产生了矛盾。因此, 需要发展电网, 将西部大型水、火电站的电力送到沿海地区和经济特区, 经过技术上的论证以及经济上的比较, 直流输电是一个非常好的选择。

与国外相比, 我国直流输电的发展起步较晚, 它跨越了汞弧阀换流时期, 直接从晶闸管开始。目前我国的直流输电设备市场通过依托现有的工程积累经验和技术转让已逐步实现了各种设备的国产化。未来我国将大力发展特高压直流输电技术, 实现跨区域电力资源的合理调配。

第二章

直流输电原理

一、直流输电的基本原理

换流站是包含实现大容量交、直流电能相互转换设备的场所。实现交流电转换为直流电的设备称为整流器，而直流电转换为交流电的设备称为逆变器，它们统称为换流器。整流器和逆变器的设备基本相同，只是控制方式不同。当换流器触发角 $\alpha < 90^\circ$ 时，换流器运行于整流工况，为整流器；而 $\alpha > 90^\circ$ 时，换流器运行于逆变工况，为逆变器。

(一) 6 脉动换流器工作原理

1. 晶闸管伏—安特性

电流源换流器均采用晶闸管为基本半控器件，接成 6 脉动换流回路来进行换流。直流输电工程广泛采用的晶闸管换流阀的特性曲线如图 1-2-1 所示，其特点

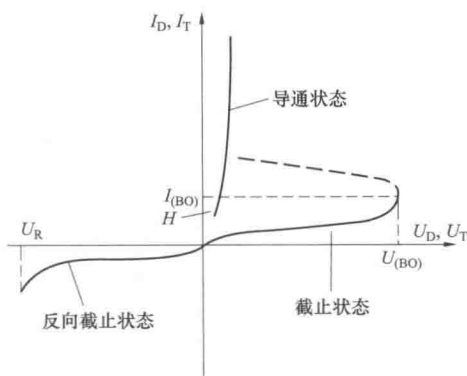


图 1-2-1 换流阀特性曲线

是：① 换流阀的单向导电性。换流阀只能在阳极对阴极为正电压时，才单方向导通，不可能有反向电流，即直流电流不可能有负值。② 换流阀的导通条件是阳极对阴极为正电压和控制极对阴极加能量足够的正向触发脉冲两个条件，必须同时具备，缺一不可。换流阀一旦导通，它只有在具备关断条件时才能关断，否则一直处于导通状态。③ 换流阀的控制极无关断能力，只有当流经换流阀的电流为零时，它才能关断（唯一的关断

条件),是靠外回路的能力来进行关断的。换流阀一旦关断,只有在具备上述两个导通条件时,才能导通,否则一直处于关断状态。

2. 6 脉动换流桥

直流输电的换流器采用一个或多个三相桥式换流电路(也称6脉动换流器)串联构成,因而可用6脉动换流器(也称换流桥)作为原理分析的基础。换流桥由6个换流阀组成,其中阀V1、V3、V5共阴极,称为阴极换相组或阴极半桥;阀V2、V4、V6共阳极,称为阳极换相组或阳极半桥。代表阀符号V后面的编号是按换流阀运行时触发次序编排的,通常是将V1的阳极接到a相。

单桥整流器的原理接线如图1-2-2所示。图1-2-2中 e_a 、 e_b 、 e_c 为等值交流系统的基波正弦相电动势, L_γ 为每相的等值换相电抗。

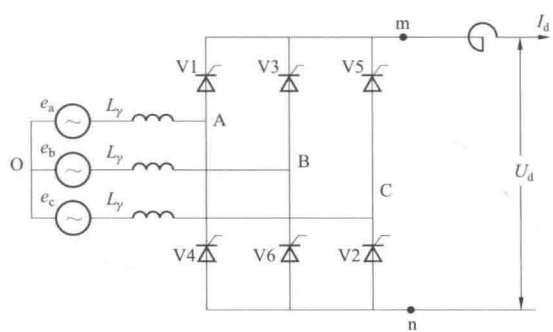


图 1-2-2 单桥整流器原理接线图

6脉动换流阀正常运行时,一般同时导通2个阀,换相时同时导通3个阀,即2—3运行方式。以阀V6和V1导通为例,其等值电路见图1-2-3。

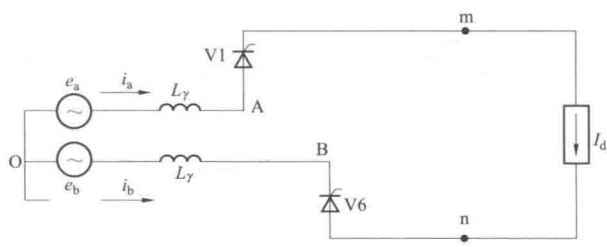


图 1-2-3 正常运行时等值电路图

3. 无相控整流理想空载

如图1-2-4所示。假定换相电抗 $L_\gamma=0$,换流阀均为不可控的整流阀,换流