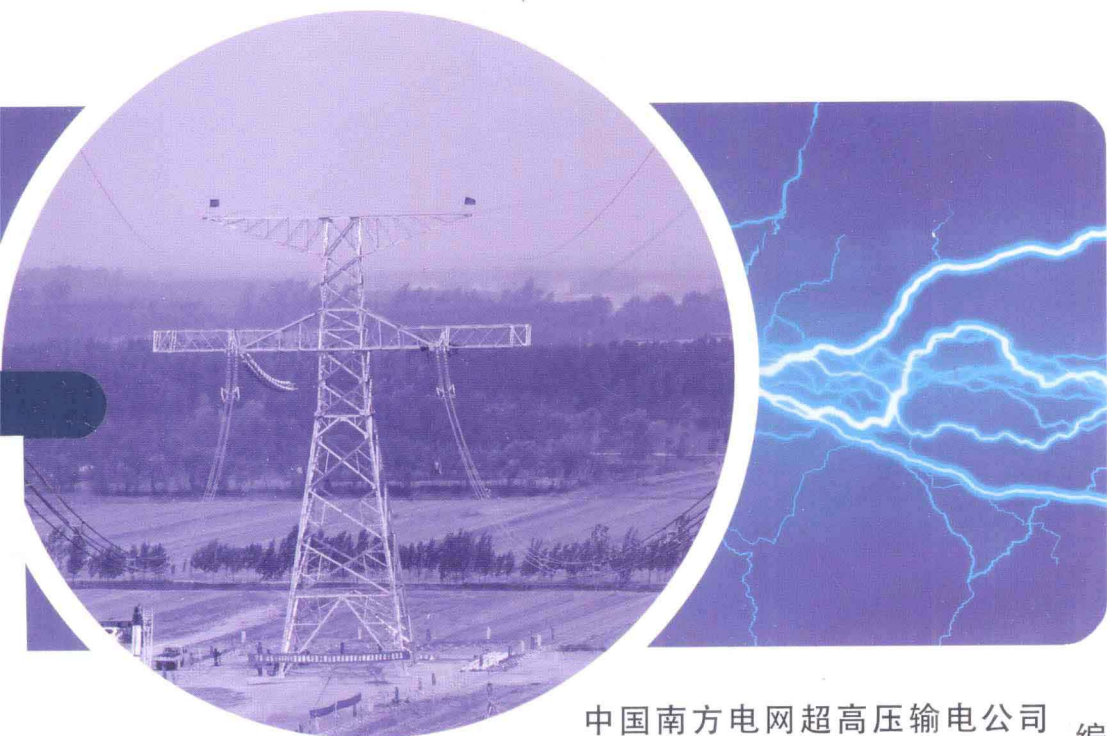


高压直流输电系统 继电保护原理与技术

GAOYA ZHILIU SHUDIAN XITONG
JIDIAN BAOHU YUANLI YU JISHU



中国南方电网超高压输电公司 编
华南理工大学电力学院



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

高压直流输电系统 继电保护原理与技术

GAOYA ZHILIU SHUDIAN XITONG
JIDIAN BAOHU YUANLI YU JISHU

中国南方电网超高压输电公司 编
华南理工大学电力学院



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书由中国南方电网超高压输电公司和华南理工大学电力学院合作编写而成，从直流输电系统的故障过程分析方法、继电保护设计原理、工程实践等方面对直流继电保护开展全方位梳理和研究，将直流输电系统继电保护纳入电力系统继电保护的大框架之中，对推动我国直流输电技术的健康发展具有重要意义。

本书共 8 章，分别为概述，换流器区保护，直流母线区保护，直流输电线路保护，接地极线路区保护，换流变压器保护，交、直流滤波器保护，高速开关保护。

本书可供从事高压直流输电系统设计、运行、维护、科研、培训工作的相关技术人员使用，也可供高校电力相关专业的师生学习、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压直流输电系统继电保护原理与技术/中国南方电网超高压输电公司，华南理工大学电力学院编. —北京：中国电力出版社，2013.9

ISBN 978-7-5123-4614-7

I. ①高… II. ①中…②华… III. ①高压输电线路—直流输电线路—继电保护 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 134913 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.5 印张 219 千字

印数 0001—3000 册 定价 36.00 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 编 贺 智 蔡泽祥

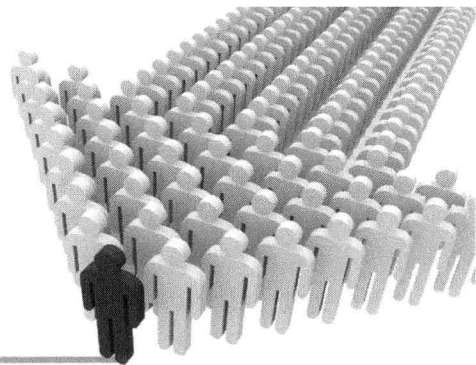
副 主 编 陆 岩 李晓华 高锡明 张勇军

刘相枪

参编人员 徐 敏 禹晋云 韩昆仑 郝志杰

陈明俊 库晓斐 赵 军 杨永东

祝夏军 卢世才



前言

高压直流输电由于其技术和经济上的独特优势,在我国远距离大容量输电和大区联网中得到广泛应用,预计到2020年,我国规划建设的直流工程达50余项,将进入超(特)高压交直流混合大电网运行时代。继电保护系统是高压直流输电系统二次部分的核心技术,长期以来掌握在极少数跨国公司手中,在提供给我国各直流输电工程的技术资料中对用户并不透明,尤其是在继电保护设计原理方面几乎是空白,缺乏系统和完整的技术资料供运行和技术开发人员参考,从而造成我国各直流输电系统在运行、培训、保护整定与事故分析和系统改造与再开发等方面长期处于被动的局面。而对已运行的直流输电系统继电保护的把握上,基本处于“口传心授”的状态。这一局面严重影响了我国直流输电系统的运行与研究水平,给直流输电工程安全运行带来了极大隐患。

1982年起,我国出版和翻译了多部高压直流输电工程技术方面的专著和教材,在直流输电系统继电保护方面多有论述,但普遍存在以下不足:①只论及直流输电系统继电保护的基本配置和一般保护定性原理,缺乏直流输电系统故障分析原理与计算方法的支撑;②缺乏对直流输电系统各保护的影响与制约因素、各保护之间以及保护与直流控制之间的协调配合的分析与论述;③由于资料缺乏或编写的局限性,已有书籍与实际直流输电工程相脱节,关于实际直流工程继电保护系统的论述过于简略,对工程技术人员直接指导作用不大。

本书力图将直流输电系统继电保护纳入电力系统继电保护的大框架中,借鉴我国在交流继电保护的研究与运行方面的体系与经验积累,在充分研究国内外直流输电系统继电保护技术的基础上,从直流输电系统故障过程分析方法、继电保护设计原理、实际工程实践等方面开展全方位梳理和研究,填补我国在这一方面的空白。同时,本书密切结合我国特别是南方电网直流输电系统工程实际,力求对从事直流输电工程运行的一线技术人员和研究开发人员具有参考指导作用,对推动我国直流输电技术的健康发展发挥积极作用。

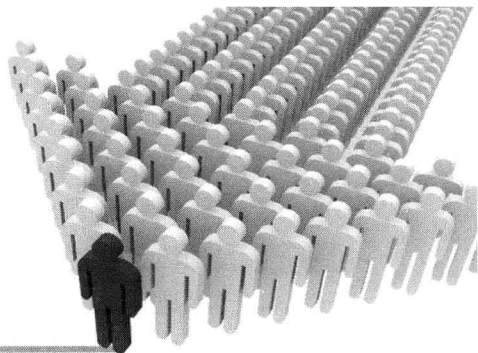
本书是中国南方电网超高压输电公司和华南理工大学电力学院在多年科研

合作基础上，结合所承担的 863 计划课题“含大规模新能源的交直流互联大电网智能运行与柔性控制关键技术”（2012AA050209）的研究成果编写而成。本书在编写出版过程中，得到了许多专家和领导的鼓励和支持，参阅了大量参考文献、技术说明书、运行规程等。在此，谨对所有支持和参与本书编写、出版的专家领导表示衷心的感谢。

由于涉及内容广泛，编著者水平有限，书中难免存在不妥和错误之处，恳请读者不吝批评指正。

编 者

2013 年 1 月

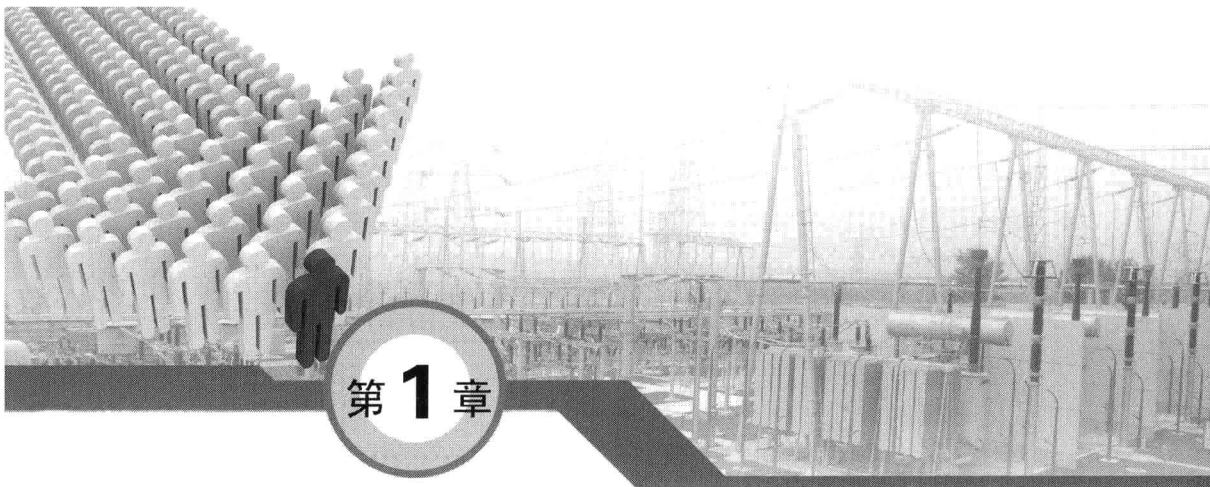


目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 直流输电系统的基本运行方式	1
1.2 直流输电系统继电保护的作用与任务	5
1.3 直流输电系统对继电保护的要求	7
1.4 直流继电保护的种类与区域划分	9
1.5 直流输电系统继电保护的動作策略	10
1.6 直流继电保护的设计、配置与整定原则	13
第 2 章 换流器区保护	14
2.1 换流器区的构成	14
2.2 换流器区的故障分析	16
2.3 换流器区保护的基本原理	54
2.4 实际直流工程中换流器区的保护配置	68
第 3 章 直流母线区保护	75
3.1 直流母线区的构成	75
3.2 直流母线区故障分析	76
3.3 直流母线区保护	80
3.4 实际直流工程中直流母线区的保护配置	82
第 4 章 直流输电线路保护	83
4.1 直流输电线路的构成与故障特点	83
4.2 直流输电线路故障分析	84
4.3 直流输电线路保护的基本原理	95

4.4	实际直流工程中直流输电线路的保护配置	101
第5章	接地极线路区保护	103
5.1	接地极线路区的构成与运行状态	103
5.2	接地极线路区故障分析	105
5.3	接地极线路区保护的基本原理	111
5.4	实际直流工程中接地极线路区保护配置	117
第6章	换流变压器保护	119
6.1	换流变压器的构成与运行状态	119
6.2	换流变压器的故障分析	120
6.3	换流变压器保护的基本原理	130
6.4	实际直流工程中换流变压器保护配置	143
第7章	交、直流滤波器保护	146
7.1	交、直流滤波器的配置与接线方式	146
7.2	交、直流滤波器故障及危害	149
7.3	交流滤波器小组保护	152
7.4	交流滤波器大组保护	168
7.5	直流滤波器保护	172
7.6	实际直流工程中滤波器保护配置	177
第8章	高速开关保护	181
8.1	直流系统的高速开关配置及功能	181
8.2	直流高速开关的基本原理	183
8.3	高速开关失灵和不正常分断	184
8.4	直流高速开关保护	185
8.5	实际直流工程中的高速开关保护配置	188
参考文献		190



概 述

高压直流输电系统从结构上可以分为两端直流输电系统和多端直流输电系统两大类。目前，世界上已经投运的直流输电系统绝大多数采用两端直流输电，多端直流输电主要在意大利—撒丁岛、魁北克—新英格兰及日本的新信浓等直流输电系统中得到了采用。两端直流输电也是我国目前所采用的唯一直流输电形式。在本书中仅讨论双端直流输电系统的继电保护。

两端直流输电系统有单极系统、双极系统和背靠背系统三种类型。一般单极系统仅作为双极系统建设过程中的一种过渡形式，或者双极系统在一极故障停运情况下的特殊运行状态。背靠背系统是输电线路长度为零的特殊单极/双极系统，主要用于实现非同步（不同频率或频率相同但非同步）电网的互联。本书的所有内容均以双极系统为背景，所阐述的保护设计、整定、配置原理与方法对于单极系统和背靠背系统同样适用。

1.1 直流输电系统的基本运行方式

1.1.1 直流输电系统的接线方式

直流输电系统的接线方式，指由直流输电线路、接地极及其引线、站内接地网、金属线路等所构成的直流功率传输回路形式。通过改变直流场设备（断路器、隔离开关、接地开关等）的状态，能够实现直流输电系统接线方式的转变，为直流功率配置合适的传输回路，以适应直流输电系统的不同运行需求。

双极直流系统共有三种接线方式，分别为双极双端中性点接地方式（简称双极方式）、双极一端中性点接地方式和双极金属中线方式。直流系统采用后



两种接线方式的可靠性、经济性、灵活性都比采用双极双端中性点接地方式要差，在实际直流工程中很少采用。我国目前所有直流工程全部采用双极方式，如图 1-1 所示。

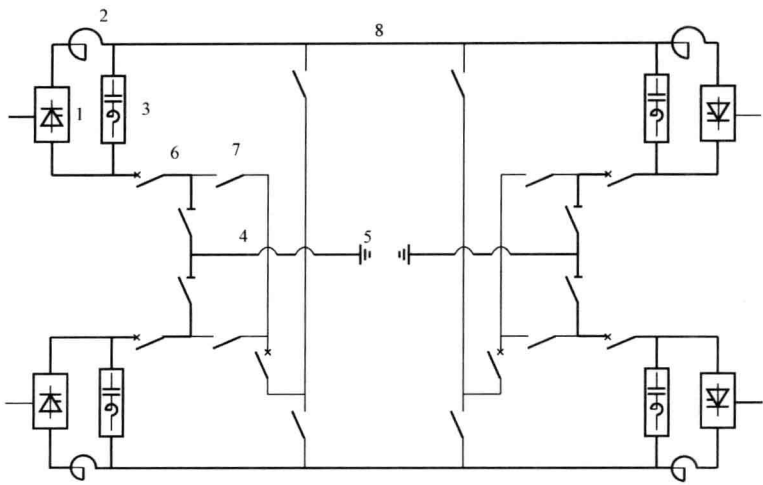


图 1-1 双极直流系统双极运行接线方式

1—换流器；2—平波电抗器；3—直流滤波器；4—接地极引线；5—接地极；
6—直流高速开关；7—隔离开关；8—直流输电线路

双极方式直流系统由两个独立运行的单极大地回路系统组成，正负两极的功率回路均由换流器、直流输电线路、接地极及其引线以及大地构成。两极在大地中的电流方向相反，流过大地电流为两极电流差值。双极对称运行时，两极电流相互抵消，流过大地电流为零。双极不对称运行时，流过大地的电流为双极不平衡电流。

双极方式直流系统一极发生故障退出工作时，剩余健全极相当于单极直流系统。此时根据实际情况，也有三种接线方式可供选择：单极大地回线方式、单极金属回线方式和单极双导线并联大地回线方式，如图 1-2 所示。

单极大地回线方式，利用一根导线和大地（或海水）构成直流侧的功率传输回路。两端换流站均需通过接地极引线及接地极连接到大（或海水），流过大地（或海水）的电流为直流输电系统的运行电流。

单极金属回线，利用 2 根导线构成直流侧的功率传输回路：一根导线为本极输电线路；另一根导线为对极输电线路。两端换流站有且只能有一端接到站内接地网，为直流系统提供参考电位，流过两根导线的电流为直流输电系统运行电流。

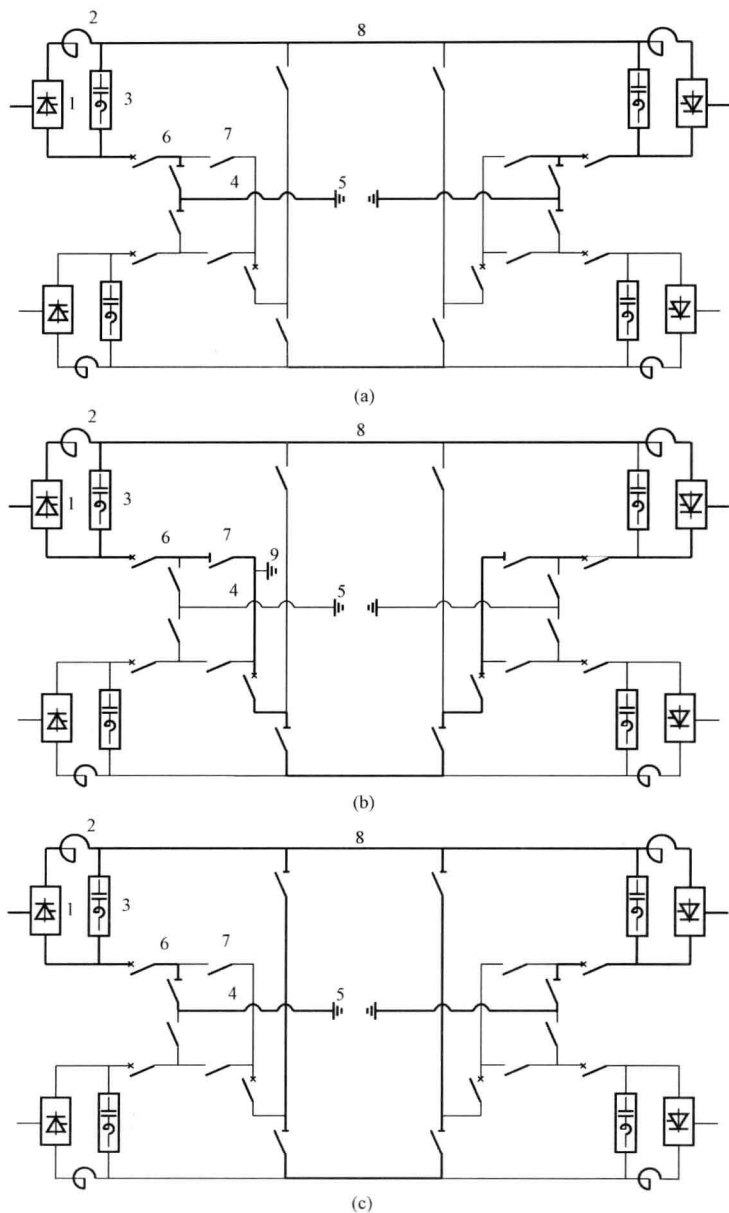


图 1-2 单极系统/双极系统单极运行接线方式

(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—换流器；2—平波电抗器；3—直流滤波器；4—接地极引线；5—接地极；

6—开关；7—隔离开关；8—直流输电线路；9—站内接地网

单极双导线并联大地回线方式，与单极大地回线方式的原理基本相同。只是其将另一极直流输电线路与本极直流输电线路相并联，以降低线路损耗。

1.1.2 直流输电系统的运行状态

直流输电系统的每一极都有接地、停运、备用、闭锁和解锁五种运行状态，以适应直流输电系统复杂的检修、启停、运行需求。五种运行状态的转换关系如图 1-3 所示。

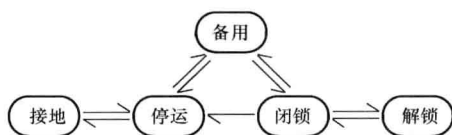


图 1-3 极运行状态间的转换关系

解锁状态是极的最高运行状态，阀控系统释放触发脉冲，各换流阀按照预定顺序轮流触发导通，交流滤波器投入运行，直流系统正常传输功率。解锁状态下，直流系统只能首先

切换到闭锁状态，才能进一步切换到更低级别的运行状态。

闭锁状态是比解锁状态低一级别的运行状态，此时阀控系统闭锁触发脉冲，交流滤波器退出运行，直流系统传输功率为零。闭锁状态下，可供选择的切换状态包括高级别的解锁状态、低级别的备用和停运状态三种。

备用状态下，换流变压器（换流变）交流侧开关断开，换流变进行放电，换流变冷却系统、平波电抗器冷却系统关闭。备用状态下，可供选择的切换状态包括停运和闭锁两种。

停运状态下，换流变交流侧隔离开关分开，阀冷却系统关闭，直流滤波器退出。值得注意的是，直流系统可以由闭锁状态直接切换到停运状态，但是由停运状态不能够直接切换到闭锁状态，必须先切换到备用状态，才能够进一步向更高级别的运行状态转换。

接地状态是极的最低运行状态，可供选择的切换状态只有停运状态。接地状态下接地开关处于合位，只有此时才能打开阀厅大门，进入阀厅对设备进行检修。

正常情况下五种运行状态的转换都是在自动方式下进行的，只要操作人员发出相应状态的指令，系统自动分合断路器、隔离开关、接地开关和投入、退出设备，使直流系统按照预定的状态转换顺序逐渐切换到所要求的运行状态。当自动顺序无法执行时，操作人员也可以手动进行配置。

1.1.3 直流输电系统的运行方式

直流输电系统的运行方式，指直流输电系统处于解锁状态下，稳态运行时的电压、电流状态和功率传输方式，与直流接线方式、功率传送方向以及直流电压、电流状态有关。

根据直流接线方式不同，直流输电系统共有六种运行方式，分别为双极双

端中性点接地运行方式、双极一端中性点接地运行方式、双极金属中线运行方式、单极大地回线运行方式、单极金属回线运行方式、单极双导线并联大地回线运行方式。对于双极直流系统，正常情况下均采用双极双端中性点接地运行方式，只有当一极故障退出运行时，才根据实际情况选择合适的单极运行方式。

根据功率传送方向不同，直流输电系统有功率正送和功率反送两种运行方式。在运行过程中通过控制系统作用，可以方便地进行两种运行方式切换，实现潮流翻转，这样既可以在正常运行时按照经济性的原则调节功率传输的大小和方向，而且可以在一端交流系统故障时，从另一端交流系统进行紧急事故支援。

直流输电系统在运行中可以选择额定电压运行方式或降压运行方式。需要降压运行的两种情况是：

(1) 绝缘问题的需要。在恶劣的气候条件或严重污秽的情况下，直流系统运行于额定直流电压会导致一次设备的较高故障率。为了提高直流系统运行的可靠性，此时可采用降压方式运行。

(2) 无功控制的需要。当直流输电系统被用来进行无功功率控制时，需要增大触发角 α 来增加直流系统消耗的无功功率，此时直流电压会相应降低。

双极直流系统根据两极电压、电流是否相等，又可以分为双极对称运行方式和双极不对称运行方式。双极对称运行方式下，两极的电压、电流以及传输功率均相等。双极不对称运行方式有双极电压不对称，双极电流不对称和双极电压、电流均不对称三种类型。在双极对称运行方式下，换流器、接地极等一次设备的运行条件最好，正常情况下均选择这一运行方式。只有当一极设备故障，需要降低直流电压或直流电流时，才会根据实际情况选择合适的不对称运行方式。

1.2 直流输电系统继电保护的作用与任务

1.2.1 直流输电系统故障与不正常运行情况

直流输电系统中的一次设备在运行过程中由于外力作用、绝缘老化、过电压、过电流、误操作、设计制造缺陷等原因会发生短路、断线、器件损坏等故障。短路故障可能发生于一次设备的接线端之间、接线端与大地之间、设备内部，以及设备本体与大地之间，包括换流器主接线回路短路、直流母线短路、直流输电线路短路、接地极引线短路、换流变压器绕组短路、换流变压器与换流器连接线短路、金属回线短路等。断线故障一般发生于直流输电线路、接地

极引线和金属回线上。常见的器件损坏故障包括，换流器阀片损坏、滤波器电容元件损坏、直流断路器无法断弧等。

直流输电系统的不正常运行情况，指非一次设备故障条件下，直流系统和相关一次设备运行条件超出设计范围等，包括系统功率振荡、设备电压过应力、设备电流过应力等。例如，受端交流系统出现较大功率缺额、直流系统进行紧急功率支援时直流线路潮流超出其额定上限（过负荷），控制系统故障引起直流功率振荡等。直流输电系统的控制保护系统故障、辅助系统故障以及交流系统的故障和不正常运行都有可能引起直流系统的不正常运行情况。

直流输电系统故障和不正常运行情况，最直接的影响是造成一次设备损坏，若处理不当，还可能引起直流系统单极甚至双极闭锁事故。作为重要的区域联系纽带和大容量功率传输通道，直流输电系统一旦发生单极或双极闭锁，将给两端交流系统带来巨大冲击，有可能造成事故的进一步扩大，引发大面积停电。

1.2.2 直流输电系统继电保护的作用与任务

在直流输电系统运行中，应积极采取各项措施避免系统的不正常运行，消除或减少故障发生的可能性。而故障和不正常运行情况一旦发生后，必须采取合适的处理策略，保护一次设备安全，将故障和不正常运行情况对电力系统的影响限制到最小范围。

直流输电系统继电保护，是电力系统继电保护的一个子集，包括直流继电保护技术和由各种直流继电保护装置组成的直流继电保护系统，涵盖直流继电保护的设计、配置、整定、调试等技术，以及所有相关的测量、动作、通信等具体设备。直流输电系统继电保护的任务是：

(1) 及时、准确地检测直流输电系统的所有故障类型，自动、快速、有选择性地故障元件从直流输电系统中切除，使故障元件免于继续遭到损坏，保证其他无故障部分迅速恢复正常运行。

(2) 反应直流输电系统的所有不正常运行情况。检测到直流输电系统不正常运行后，继电保护一般不要求立即动作，而是根据其危害程度规定一定的延时，以避免短暂干扰造成的保护不必要动作。

广义的直流输电系统继电保护，需要保护从送端交流母线到受端交流母线范围内的所有一次设备，包括交流母线、交流滤波器、换流变压器等交流设备以及换流器、平波电抗器、直流线路、接地极线路、高速开关、直流滤波器等直流设备，并且能够反映相关设备的不正常运行情况，如过电流、过电压、触发角异常等，如图 1-4 所示。

狭义的直流系统继电保护，只包括直流输电系统中两侧换流站之间的直流部分继电保护，不包括换流变压器、交流滤波器、交流母线的保护。

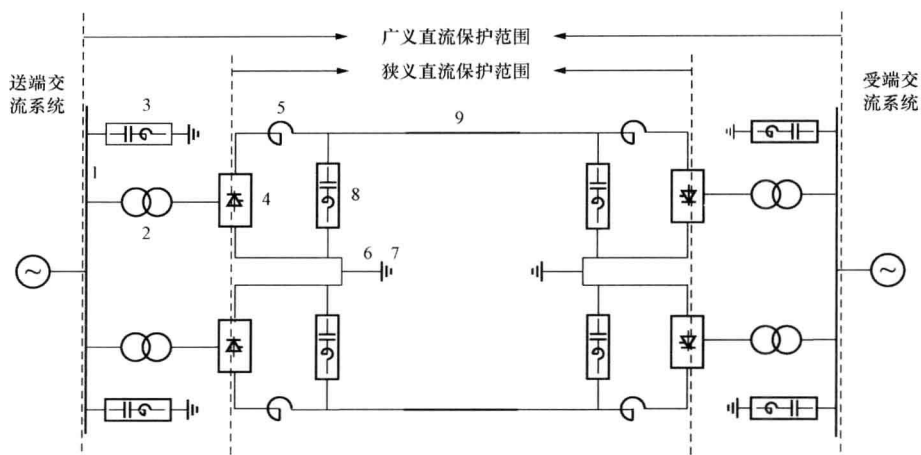


图 1-4 直流输电系统继电保护的范

1—换流站交流母线；2—换流变压器；3—交流滤波器；4—换流器；5—平波电抗器；
6—接地极引线；7—接地极；8—直流滤波器；9—直流输电线路

1.3 直流输电系统对继电保护的要求

与交流继电保护类似，直流继电保护一般也应满足“四性”的基本要求——选择性、可靠性、速动性、灵敏性。

1.3.1 选择性

直流输电系统继电保护的选择性，指直流输电系统中发生故障或不正常运行情况时，应由故障设备本身的保护动作，采取合适的保护动作策略清除或隔离故障，只有当该保护启动或动作失败时，才允许相邻设备保护动作。

在图 1-5 所示的直流输电系统中，极一输电线路 K 点发生对地短路，极二没有发生故障。按照直流继电保护选择性的要求，应由极一的线路保护动作将故障清除，在整个过程中，极一其他保护以及极二所有保护均不应该动作。

1.3.2 可靠性

直流输电系统继电保护的可靠性，包括可依赖性和安全性两个方面。可依赖性，指各直流保护对于应该动作的故障和不正常运行情况，应可靠动作，不能拒动。安全性，指各直流保护对于不应该动作的情况，应可靠不动作，不能误动。

对于所有威胁到一次设备安全和电力系统运行的故障和不正常运行情况，直流继电保护必须保证不拒动，以保护设备安全，并尽量减小对交、直流系统

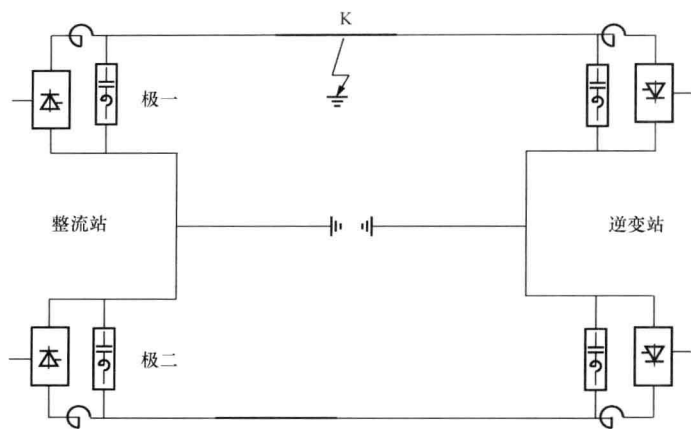


图 1-5 双极直流系统，一极输电线路对地短路

的冲击。直流输电系统作为重要的区域联系纽带和大容量功率传输通道，继电保护一旦发生误动，导致单极或双极闭锁，将给两端交流系统带来巨大冲击，因此必须杜绝直流继电保护的误动作。

1.3.3 速动性

快速地清除或隔离故障，既有利于保护一次设备的安全，也有利于防止故障发展成为事故，以及在事故发生后抑制事故的进一步扩大。直流输电系统的故障清除或隔离时间，等于直流继电保护出口时间与保护动作执行时间之和。提高直流输电系统继电保护的速动性应从下面三方面入手：①采用快速保护作为主保护；②合理缩小主保护和后备保护的时间差；③选择合适的保护动作策略，缩短保护动作执行时间。

1.3.4 灵敏性

直流继电保护的灵敏性，指保护对故障和不正常运行情况的反应能力，习惯上常称作灵敏度。为准确反映故障和不正常运行情况，保护故障设备和非故障设备的安全，直流继电保护装置都应该有足够高的灵敏性。直流保护装置的灵敏性，一般用灵敏系数来衡量，其与保护装置所采用的原理以及被保护元件的类型、直流系统参数和运行方式等有关。这一问题将在后续章节中针对各个保护分别予以详细讨论。

直流输电系统继电保护的“四性”要求是矛盾统一、相互制约的整体，一般难以同时满足四个要求，某一方面性能的提高经常以牺牲其他性能为代价。在直流继电保护的设计、配置与整定中，应根据故障类型及其可能造成的危害，决定“四性”中的着重点。鉴于直流输电系统的结构和运行特点及其在电

力系统中的特殊地位，“四性”协调应当遵循在保证一次设备安全的基础上，尽量缩小故障范围，减小对交、直流系统冲击的总原则。

1.4 直流继电保护的种类与区域划分

直流输电系统发生故障或不正常运行情况时，将伴随着触发角、电压、电流、阻抗、功率、谐波等电气量的异常。利用其与正常运行时相关电气量的区别，可以构成不同原理的保护，包括过电压保护、过电流保护、低电压保护、大触发角保护、行波保护、谐波保护、差动保护（包括纵差动保护、横差动保护以及其他采用差动原理的保护）等。

将这些保护原理应用到直流输电系统之中，可以实现对所有一次设备以及系统不正常运行情况的保护。按照被保护对象的不同，直流继电保护可以分为反映设备运行状态的交流母线保护、交流滤波器保护、换流变压器保护、换流器保护、高压直流母线保护、中性直流母线保护、平波电抗器保护、直流输电线路保护、直流滤波器保护、接地极母线保护、接地极线路保护、高速开关保护等。

直流继电保护目前主要有三种划分方案，分别如下：

（1）方案一：如图 1-6 所示，视具体直流工程不同，交流部分的分区可能有所差别，直流部分的保护分区是基本一致的。

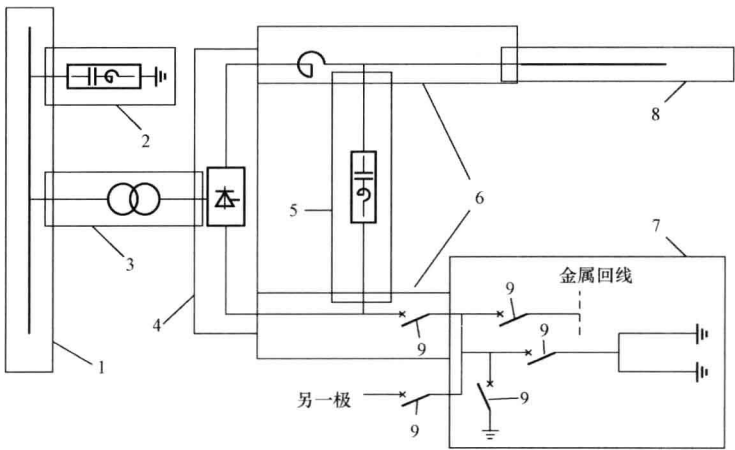


图 1-6 直流输电系统保护分区（方案一）

1—交流母线区；2—交流滤波器区；3—换流变压器区；4—换流器区；5—直流滤波器区；6—直流母线区（包括高压直流母线和中性直流母线）；7—接地极线路区（包括接地极母线和接地极线路）；8—直流线路区；9—高速开关保护