

特高压直流保护原理 与典型案例解析

国网宁夏电力有限公司检修公司 组编

继电保护

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压直流保护原理 与典型案例解析

国网宁夏电力有限公司检修公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书由国网宁夏电力有限公司检修公司组编，本书以灵绍特高压直流工程控制保护系统设计、制造、调试、运行为基础，详细阐述了特高压直流保护原理，结合实际故障分析介绍了典型直流保护动作案例。

本书共七章，分别为特高压直流保护的概述、换流器区保护、极区保护、双极区保护、换流变压器区保护、交直流滤波器区保护、典型直流保护动作案例分析。

本书可供从事特高压换流站运维检修人员在学习工作中使用，也可为其他相关技术人员提供参考。

图书在版编目（CIP）数据

特高压直流保护原理与典型案例解析 / 国网宁夏电力有限公司检修公司组编. —北京：中国电力出版社，2019.8

ISBN 978-7-5198-3146-2

I. ①特… II. ①国… III. ①特高压电网—直流输电线路—继电保护—案例 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 085290 号

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：苗唯时（010-63412340）

责任校对：黄 蓓 闫秀英

装帧设计：郝晓燕

责任印制：石 雷

印 刷：三河市万龙印装有限公司

版 次：2019 年 8 月第一版

印 次：2019 年 8 月北京第一次印刷

开 本：787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张：18

字 数：421 千字

印 数：0001—2500 册

定 价：135.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

编 委 会

主 任 宋永强
成 员 黎 炜 蔡 乾 王小立

编 写 组

主 编 韦 鹏 史 磊
副 主 编 刘若鹏 高海洋 王豪舟 宋海龙
参编人员 柴 斌 吕 军 卢 峰 张立明
雷战斐 刘 钊 宁复茂 刘书吉
吴 鹏 朱 颖 邓 沛 温 泉
谢伟锋 曹宏斌 高梓栩 耿祥瑞
刘舒杨 李 昊 窦俊廷 王天鹏
徐 辉 王文刚 李君宏

审 核 组

组 长 刘志远
副 组 长 阮思烨 张庆武
成 员 邹洪森 吴建云 唐有证 李 鹏
于晓军 孔祥平 潘亮亮

前 言

特高压直流输电由于其技术和经济上的独特优势，在远距离输电和大区联网中得到广泛应用，随着±800kV 灵绍、酒湖、锡泰、扎青等特高压工程的相继投运，我国已进入特高压交直流混合大电网运行时代。直流保护是高压直流输电系统二次部分的核心技术，其主要任务是快速、可靠地切除高压直流输电系统出现的各种故障，将故障和异常运行方式对电网的影响限制到最小范围。

目前，我国已出版和翻译了一些高压直流输电工程技术方面的专著和教材，但在特高压直流保护方面的论述还存在不足：一是只涉及直流输电继电保护的基本配置，缺乏特高压直流保护的固有特点；二是由于资料缺失或编写的局限性，已有书籍与实际直流工程联系不够紧密，对现场技术人员直接指导作用不够突出。

本书是国网宁夏电力在多年生产运维及科研工作的基础上，以灵绍特高压直流工程控制保护系统设计、制造、调试、运行为基础，结合全过程试验数据，从特高压直流保护配置及设计原理、联调试验故障分析及方法、典型案例等方面开展全方位的梳理和分析。采用其他技术路线的直流工程，部分直流保护原理存在差异，请读者注意分析对比。

本书由国网宁夏电力有限公司刘志远、国家电力调度控制中心阮思焯、南京南瑞继保电气有限公司张庆武牵头审核，他们及审核组专家为提高书稿质量付出了宝贵精力和劳动；本书在编写过程中也得到了国网宁夏检修公司宋永强、西安交通大学郝治国等专家的大力支持和帮助，特在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促，书中疏漏之处恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 特高压直流保护的概述	1
第一节 特高压直流保护的配置原则及特点	1
第二节 特高压直流保护的分区及动作策略	5
第二章 换流器区保护	11
第一节 换流器区保护配置	11
第二节 阀短路保护	15
第三节 换相失败保护	21
第四节 换流器差动保护	27
第五节 阀过电流保护	32
第六节 旁通断路器保护	39
第七节 旁通对过负荷保护	42
第八节 换流变压器中性点偏移保护	45
第九节 电压过应力保护	47
第十节 换流器触发异常保护	49
第三章 极区保护	51
第一节 极区保护配置	51
第二节 极母线差动保护	54
第三节 极中性线差动保护	59
第四节 换流器连接线差动保护	65
第五节 极差动保护	69
第六节 接地极线开路保护	73
第七节 直流谐波保护	77
第八节 中性线断路器保护	80
第九节 直流过电压保护	83
第十节 直流欠压保护	86
第十一节 极开路试验保护	88
第十二节 交直流碰线监视	90
第十三节 换流器不平衡运行保护	92
第十四节 直流线路行波保护	93

第十五节	直流线路电压突变量保护	100
第十六节	直流线路低电压保护	103
第十七节	直流线路纵差保护	105
第四章	双极区保护	111
第一节	双极区保护配置	111
第二节	双极中性线差动保护	112
第三节	站接地过电流保护	115
第四节	后备站接地过电流保护	118
第五节	站接地开关保护	121
第六节	大地回线转换开关保护	123
第七节	金属回线转换开关保护	125
第八节	金属回线接地保护	128
第九节	金属回线横差保护	133
第十节	金属回线纵差保护	138
第十一节	接地极引线过电流保护	143
第十二节	接地极线不平衡保护	146
第五章	换流变压器区保护	151
第一节	换流变压器区保护配置	151
第二节	换流变压器差动保护	154
第三节	换流变压器过电流保护	169
第四节	换流变压器引线过电压保护	170
第五节	换流变压器过负荷保护	172
第六节	换流变压器零序电流保护	174
第七节	换流变压器过励磁保护	175
第八节	换流变压器饱和保护	178
第六章	交直流滤波器区保护	180
第一节	交直流滤波器保护区配置	180
第二节	交流滤波器母线差动保护	184
第三节	小组交流滤波器差动保护	186
第四节	交流滤波器过电流保护	191
第五节	交流滤波器零序过电流保护	193
第六节	交流滤波器不平衡保护	195
第七节	交流滤波器失谐保护	197
第八节	交流滤波器电抗器与电阻器热过负荷保护	199
第九节	直流滤波器差动保护	201
第十节	直流滤波器不平衡保护	204
第十一节	直流滤波器高压电容器接地保护	206
第十二节	直流滤波器电抗热过负荷保护	211

第十三节	直流滤波器电阻热过负荷保护	213
第十四节	直流滤波器失谐监视	215
第七章	典型直流保护动作案例分析	217
案例一	XX站线路电压突变量保护动作导致闭锁	217
案例二	XX站直流线路欠压保护动作导致闭锁	221
案例三	XX站金属回线 EM 避雷器故障导致闭锁	224
案例四	XX站极 II 线路低电压保护动作导致闭锁	229
案例五	YY站极 I 直流分压器闪络导致闭锁	232
案例六	XX站极 II 高端 800kV 穿墙套管故障导致闭锁	236
案例七	XX站极 I 高端换流变压器饱和保护动作导致闭锁	240
案例八	XX站双极中性母线差动保护动作导致闭锁	244
案例九	XX站换相失败、过电流保护动作导致闭锁	247
案例十	XX站交流滤波器保护动作导致功率回降	251
案例十一	XX站极 I 高端 800kV 穿墙套管故障导致极 I 高端换流器闭锁	261
附录 A	保护系统测点释义	265
附录 B	主接线测点示意图	275
参考文献		276



第一章 特高压直流保护的概述

在直流输电技术中，直流控制保护系统是直流输电系统的中枢，是实现直流输电系统正常起动与停运、正常运行、运行参数改变与自动调节、故障处理与保护等功能所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。直流系统及其主辅设备的所有功能和性能均需通过直流控制保护系统得以实现。

±800kV 特高压直流输电工程主回路采用双 12 脉动换流器串联的接线方案，如图 1-1 所示，主回路存在多种运行方式可供选择，从而提高了直流系统运行的灵活性和可用率。与此同时，特高压直流工程对直流保护系统可靠性的要求也更高。

本章主要介绍特高压直流保护配置原则、特点和功能分区、保护动作策略等内容，为后续章节分析介绍保护原理打下理论基础。

第一节 特高压直流保护的配置原则及特点

一、特高压直流保护基本配置原则

特高压直流系统区别于常规直流系统最显著的特征是每极由两个换流器串联组成，并存在多种运行方式。特高压直流输电系统的保护配置原则，类似于常规交流系统保护的配置原则。交流输电系统中继电保护的配置一般由主保护系统、后备保护系统组成，主保护和后备保护一般采用不同的保护原理、测量回路和电源，具备多重化冗余配置，每套继电保护装置都具有可靠性、快速性、灵敏性及选择性的特点。目前已经投运的双八百“额定电压±800 千伏、额定输送功率 800 万千瓦”及后续特高压直流工程，其直流保护系统一般遵循以下配置原则：

- (1) 直流保护系统应针对所有直流换流设备、区域或与直流相关设备可能存在的故障，配置完善的保护功能，且各个保护之间配合协调，能正确反应故障区域。
- (2) 在直流系统各种运行方式下，直流保护系统对全部运行设备都能提供完全的保护。
- (3) 直流保护独立于其他的设备，在物理上和电气上独立于控制系统硬件。直流滤波器保护不单独配置，在极保护中实现。交流滤波器保护独立配置保护主机。
- (4) 采用完全冗余设计，各冗余系统同时运行，每一保护区域具备充分冗余度，冗余的直流保护装置的输入回路、测量装置相应分开。
- (5) 不同的保护区域互相重叠，不允许存在保护死区。

(6) 与 12 脉动换流单元有关的保护按换流器独立配置，增加换流器运行的独立性，便于检修和运行维护。

(7) 与双极和极有关的保护独立配置在极保护中。

(8) 不允许与故障极有关的保护在双极运行中误跳另一极。

(9) 单换流器故障时尽量避免停运串联的另一换流器。单 12 脉动桥故障时，保护能与控制相配合退出故障换流器，不影响非故障换流器的继续运行，避免单极停运。

(10) 保护系统中任何单一元件的故障都不能导致直流系统中任一换流器退出运行。

(11) 出现故障或扰动时，任何单一的保护动作不应造成双极停运。

(12) 直流系统保护（包括换流器、极、双极、直流滤波器）、换流变压器保护（包括电量和非电量保护）均按三重化冗余配置，采用“三取二”跳闸逻辑。采用三重化配置的保护装置，当一套保护退出时，出口采用“二取一”模式，当两套保护退出时，出口采用“一取一”模式出口。任一个“三取二”模块故障，不会导致保护拒动和误动。

(13) 作用于跳闸的非电量保护元件都应设置三副独立的跳闸触点，三个开入回路要独立，不允许跳闸触点并联上送，“三取二”出口判断逻辑装置按双重化冗余配置。非电量保护跳闸接点和模拟量采样不经中间元件转接，直接接入控制保护系统。

(14) 交流滤波器保护按大组、双重化冗余配置，采用“启动+动作”的跳闸逻辑。启动和动作的元件及回路完全独立，不会有公共部分互相影响。保护的冗余配置保证在任何运行工况下其所保护的每一设备或区域都能得到正确保护。

(15) 所有跳闸回路上的触点都采用动合触点，报警回路触点一般也采用动合触点。采用不同性质的电流互感器（光和电磁式等）构成的差动保护，保护设计时将具有防止互感器暂态特性不一致引起保护误动的措施。

(16) 保护能区别不同的故障状态，应合理配置告警、设备切除、再启动、停运等不同的保护等级；并能根据故障的不同程度和发展趋势，分段执行动作。所有保护的告警、跳闸等信号分别上送至监控系统以及继电保护故障录波信息管理子站。

(17) 与直流控制系统和交流保护系统均能密切配合。直流保护与直流控制的功能和参数能正确地协调配合，充分利用直流控制系统，以尽可能快的速度停运、隔离故障系统或设备，保证系统和设备的安全；措施包括紧急移相、投旁通对、闭锁触发脉冲、跳交直流侧断路器、顺序控制等；通过控制系统控制故障电压、电流等运行参数的方法，来减轻各种故障对设备的危害程度。直流保护与交流保护能正确地协调配合，使故障的清除及故障清除后的恢复得到最优处理。

(18) 所有保护都配置自检功能。当保护主机及板卡故障时，应自动退出相关保护，防止保护误动作。

(19) 各种直流保护功能的参数应便于修改，保护的配置应考虑装置试验和维护时不会影响到被保护的系统运行。

(20) 保护应既不能拒动，又不能误动。为了保证设备和人身的安全，在不能兼顾防止保护误动和拒动时，保护及跳闸回路的配置宁可误动也不可拒动。

二、特高压直流保护特点

对于双 12 脉动换流器串联的特高压直流系统保护，在保护配置上必须配合一次回路的设计，在故障处理策略上利用一次系统的冗余能力，确保整个系统拥有最高的能量可用率。保护系统的可靠性与安全性不应低于任何其他系统。

为达到以上要求和目的，双 12 脉动换流器串联的直流系统保护采用分层结构，有别于常规直流输电，主要体现为：

(1) 在保护装置针对双 12 脉动换流器串联结构分层布置，如图 1-2 所示；每个换流器有独立的保护主机，完成本换流器的所有保护功能，I/O 接口单元按换流器配置。

(2) 针对双 12 脉动换流器串联结构的保护区域划分。

(3) 针对运行方式的适应性要求更高。这就要求满足特高压直流运行方式要求的保护结构具备两个基本特点：一是两个换流器保护具有独立性，退出运行的换流器不对剩余换流器的保护产生影响；二是对退出换流器进行检修维护工作方便、安全。

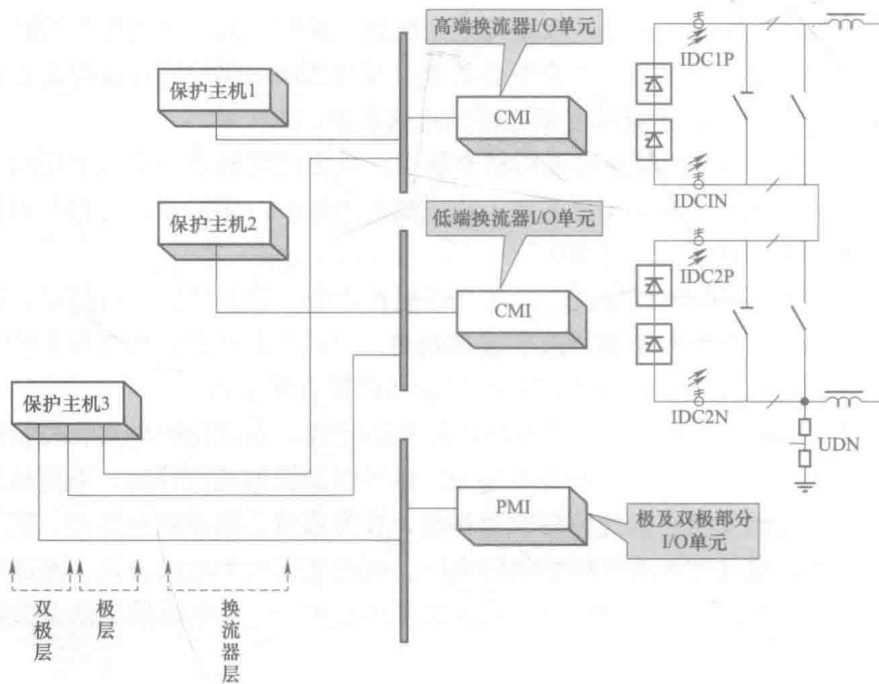


图 1-2 特高压直流保护分层结构图

此外，特高压直流保护因其设计的特殊性，比常规直流保护可靠性更高。例如，换流器差动保护范围内发生设备故障时，如阀厅穿墙套管，可通过优化直流控制保护策略，重启故障设备所在极的健全换流器，实现双极直流系统平衡运行，避免单极停运，提升特高压直流系统运行可靠性。

第二节 特高压直流保护的分区及动作策略

一、特高压直流保护分区

特高压直流保护所覆盖的区域包括换流器、直流场（包括直流极和双极设备、直流滤波器、直流极线、直流中性母线、旁通断路器）、换流变压器、换流母线及与换流变压器相连的交流断路器之间的区域，交流滤波器组及与交流滤波器组相连的交流断路器之间的区域，区内所有设备均应得到保护。相邻保护区域之间相互重叠，不存在保护死区。

特高压直流输电采用两个单极双 12 脉动换流器串联方式，每个 12 脉动换流器（即单换流器）配置有旁路断路器，为减小单极停运的次数，允许该极单换流器退出运行后另一个换流器继续运行；为减小双极停运的次数，双极区域的故障通过优化双极区接线方式或采用全面的保护动作策略来最大可能地减少双极停运。因此，保护分区的原则是：① 影响单换流器运行的故障退出故障换流器；② 影响单极正常运行的故障退出故障极；③ 双极保护区的故障退出双极，但要采取措施尽量避免双极故障退出运行，保证运行的可靠性。

基于以上原则，特高压直流输电的保护分区如图 1-3 所示，分别包括换流器保护区、极保护区（包括极母线区、中性母线区、直流滤波器区、直流线路区）、换流器联结母线保护区（包括换流器旁通断路器、换流器联结母线）、双极保护区（包括双极连接区、接地极线区、金属回线区）、换流变压器保护区、交流滤波器保护区。

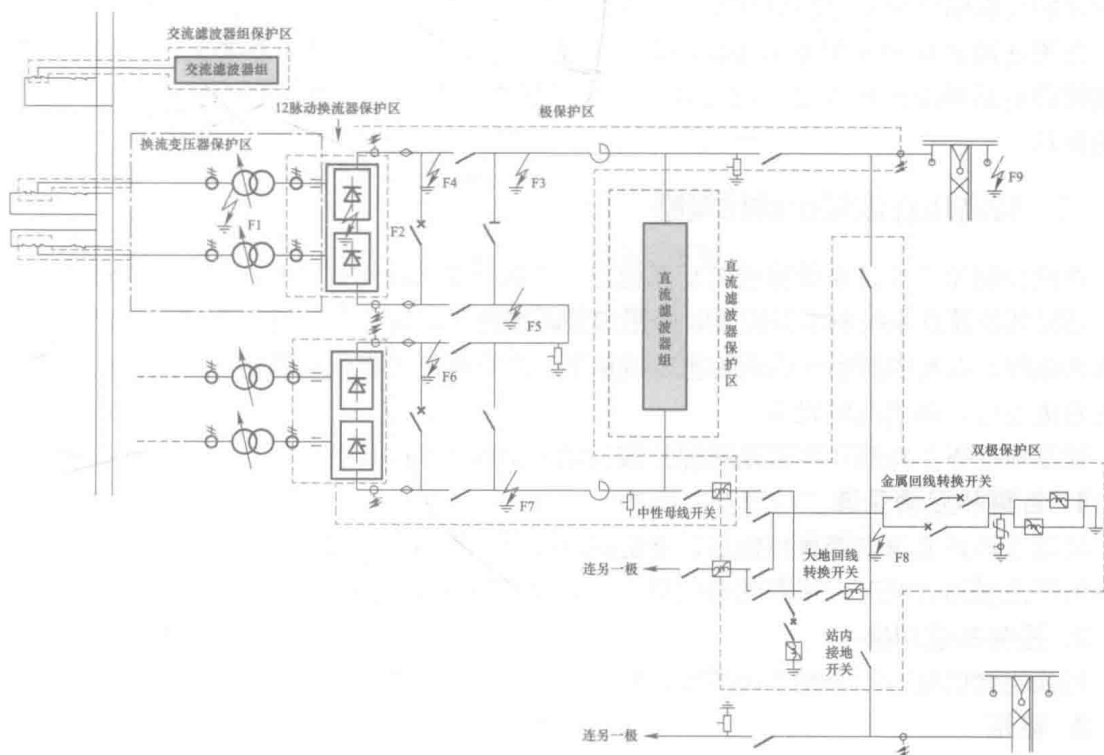


图 1-3 特高压直流保护分区示意图

换流器保护区通常配置阀短路保护、换流器差动保护、换相失败保护等常规直流应配置的保护，对于旁通断路器位于阀厅内或阀厅外时，对应的保护配置及分区也会有所区别。阀短路保护动作后，一种选择是停运极，另一种选择是本极暂时降功率，待故障的换流阀隔离后，另一个健全的换流器再升功率至故障前的值；其余换流器区保护只停运对应的换流器。

极保护区包括极母线、中性母线、直流滤波器、直流线路，该保护区的故障会引起单极的停运。该保护区配置的保护有极母线差动保护、极差动保护、中性母线差动保护、线路保护等，该保护区所配置保护的判据与运行方式有关，对于极母线差动保护，当高端换流器运行时，其判据所取的值为高端换流器出口电流互感器电流与线路出口电流的差，但当高端换流器退出运行时，其判据所取的值就需要发生改变，其值变为低端换流器出口电流互感器电流与线路出口电流的差。

换流器联结母线保护区包括换流器旁通断路器、换流器联结母线，该保护区配置的保护有联结母线差动保护、换流器旁通断路器保护等，该区域的设备是特高压直流比常规直流新增加的部分设备。该保护区的故障可能引起单换流器退出运行，也可能引起单极的故障停运。

双极保护区的接线方式与常规直流相比没有多少区别，双极保护区配置的保护有双极中性线差动保护、站内接地开关保护、转换开关保护等。对于特高压直流而言，由于双极保护区故障引起双极停运后对系统的冲击较大，对双极区域设备可靠性的要求更高。

换流变压器保护区配置的保护有变压器差动保护、换流变压器过电流保护等，该保护区的保护只影响单换流器的运行而不会引起单极的停运。

交流滤波器保护区配置的保护与常规直流没有太大区别，其中需要关注的问题是当双极故障停运后的交流滤波器切除方式，以免引起交流系统的过电压和交流滤波器大组断路器的损坏。

二、特高压直流保护动作策略

直流控制始终保持系统输送的功率恒定，当系统发生故障扰动时，控制系统将立即起作用，利用其快速性来抑制事故发展，企图维持系统稳定。只有当系统发生严重故障或设备发生永久故障，以及控制系统达到控制范围极限，直流系统不能恢复稳定时，直流保护才动作停运直流系统，隔离故障设备。

通常情况下，特高压直流系统保护遵循以下动作策略。

1. 告警和启动录波

启动录波，记录告警事件信息，并使用故障色、音响等方式，提醒运行人员，注意相关设备的状态和运行状况，采取相应的措施，识别故障设备和分析故障原因。

2. 控制系统切换

切换当前的运行系统至备用系统，防止由于极控制系统故障造成的继电保护误动作。

3. 移相

即延时发送下一个触发脉冲，从而增大触发角。在整流侧，通过移相使触发角增加到 90° 以上，使其变到逆变状态，以减少故障电流，加快直流系统能量释放，便于换流器闭锁。

在逆变侧，通过增大触发角，使得逆变器运行于最小换相裕度，可以限制流过逆变器晶闸管的故障电流。

4. 投旁通对或禁止投旁通对

投旁通对是指同时触发 6 脉动换流器同相上的两个换流阀，使其同时导通，如图 1-4 所示。投旁通对会形成直流侧短路，使直流电压快速降低到零，可用于防止换流阀导通或关断时电流的断续和过电压；投旁通对可快速隔离交直流回路，便于交流侧断路器快速跳闸。投旁通对还可以用于直流系统的解锁和闭锁，单极两个双 12 脉动换流器串联时，还用于单 12 脉动换流器的退出。

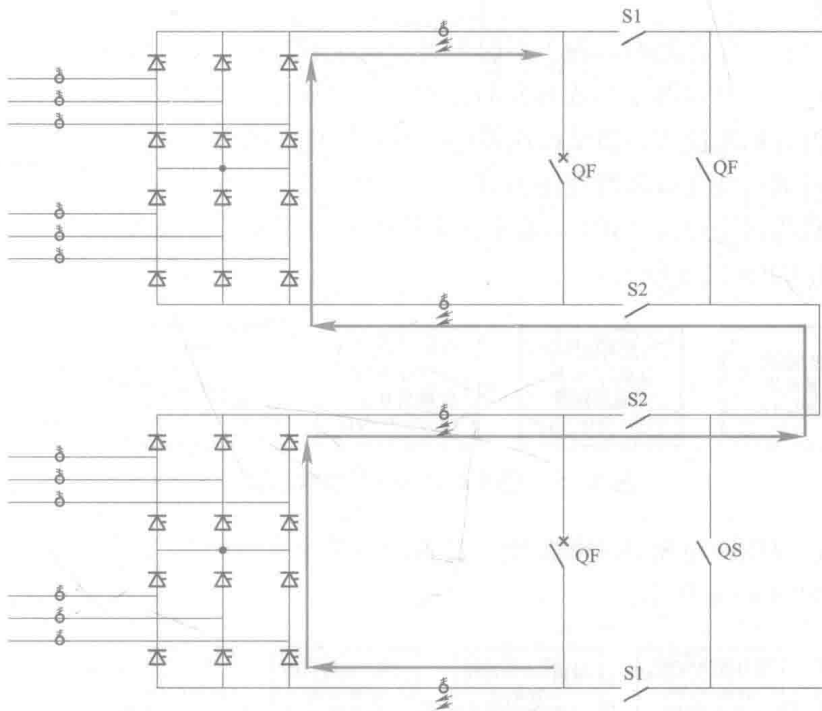


图 1-4 投入旁通对示意图

但在某些特殊故障情况下，投旁通对非但不利于清除故障，甚至可能会造成故障扩大，例如逆变侧直流极母线差动保护。因此，旁通对的投入策略针对不同的故障是有所区别的。

5. 保护性闭锁

特高压直流保护又分为换流器闭锁和极闭锁。换流器闭锁时只闭锁一个单换流器，即停止向晶闸管提供触发脉冲。换流器闭锁总是保证整流器在逆变器之前闭锁，以防止逆变侧先闭锁造成线路末端反射波叠加形成的过电压。极闭锁通常是闭锁单极或是双极，双极闭锁时，防止交流母线过电压，需要同时切除所有交流滤波器。保护闭锁主要分为 X 闭锁、Y 闭锁、Z 闭锁，具体内容如下：

(1) X 闭锁。针对阀故障和不能正确触发旁通对的情况，完整的 X 闭锁逻辑如下：

- 1) 整流侧闭锁换流器，不允许投入旁通对。
- 2) 逆变侧移相，交流开关跳开时投入旁通对，合旁通断路器（BPS），BPS 合位时闭锁换流器。

(2) Y 闭锁。针对不会导致设备过应力的直流故障、交流侧故障和手动闭锁的情况，完整的 Y 闭锁逻辑如下：

1) 整流侧移相，当满足低电流条件时，一段时间后闭锁换流器；当不满足低电流条件时，一段时间后投入旁通对，合 BPS，BPS 合位时闭锁换流器。

2) 逆变侧移相并投入旁通对，合 BPS，BPS 合位时闭锁换流器。

(3) Z 闭锁。针对直流侧故障和系统过电流的情况，完整的 Z 闭锁逻辑如下：

1) 整流侧移相并投入旁通对，合 BPS，BPS 合位时闭锁换流器。

2) 逆变侧投入旁通对，合 BPS，BPS 合位时闭锁换流器。

6. 极隔离

通常在一个极故障停运时，为了不影响另一极正常运行，便于停运极直流设备检修，需要同时断开停运极中性母线上的连接断路器和极线侧连接隔离开关，即进行极隔离。由于极线路隔离开关没有断流能力，如果换流器中还有直流电流流过，极隔离时必须首先断开中性母线断路器，否则需要先拉开线路隔离开关。一般分以下三种情况。

(1) 如果直流线路电流 (IDL) 低于预定值的时间超过 5s，极隔离时先分极 1 线路隔离开关，顺序操作如图 1-5 所示。

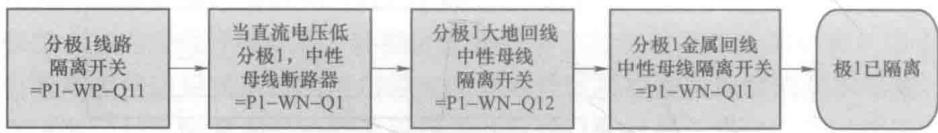


图 1-5 极隔离顺序控制操作示意图 1

(2) 如果直流线路电流高于预定值 (如直流线路出现故障)，极隔离时先分中性母线开关，顺序操作如图 1-6 所示。

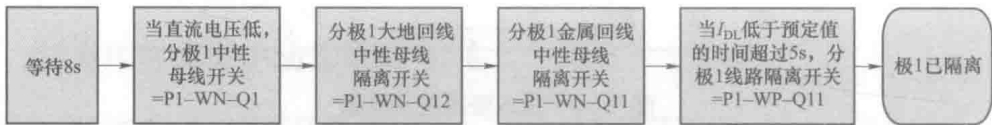


图 1-6 极隔离顺序控制操作示意图 2

(3) 当直流线路电流 (IDL) 已经低于预定值，而极中性母线电流 (IDNE) 很高，则极隔离时的顺序操作如图 1-7 所示。

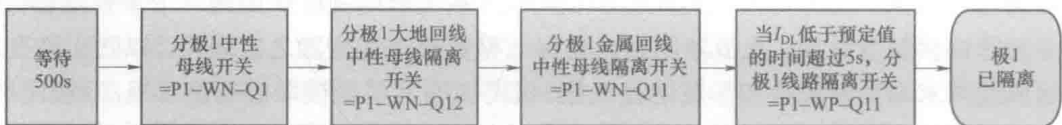


图 1-7 极隔离顺序控制操作示意图 3

7. 换流器单元隔离

特高压直流每极有两个 12 脉动换流器串联接线，当某个换流器发生内部故障时，将该换流器单元闭锁、隔离，使退出的设备与运行系统有明显的断开点，且不影响健全设备的运行。换流器隔离的顺序控制操作如图 1-8 所示。

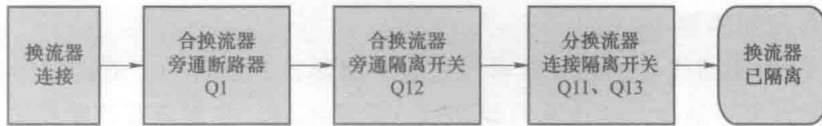


图 1-8 换流器隔离示意图

8. 交流断路器跳闸、锁定及启动失灵

通常，本侧直流保护动作闭锁换流器的同时，均需跳开交流侧断路器，使交直流系统隔离；如果对侧换流站直流保护动作至直流系统停运时，则本侧换流站可视情况不自动执行交流断路器跳闸，以便故障清除后较快速地恢复。交流断路器跳开后，锁定该断路器，防止断路器重新合闸于故障，造成设备损坏，只有当故障清除后才允许合断路器，以提高安全性。如果交流断路器未正确跳开，则启动跳相邻或上一级断路器，最终将故障隔离。

9. 再启动

通常在直流输电线路发生瞬时性故障时，直流线路保护动作，启动直流系统再启动程序，将整流器触发角迅速增大到 $120^\circ \sim 150^\circ$ ，变为逆变运行，使直流系统储存的能量很快向交流系统释放，直流电流迅速下降到零。待短路点去游离后，再减小整流器触发角，使直流系统恢复正常运行。再启动次数是根据系统研究预先设定的，目前特高压直流再启动典型逻辑主要有两次原压重启和两次原压、一次降压模式，如图 1-9 所示。

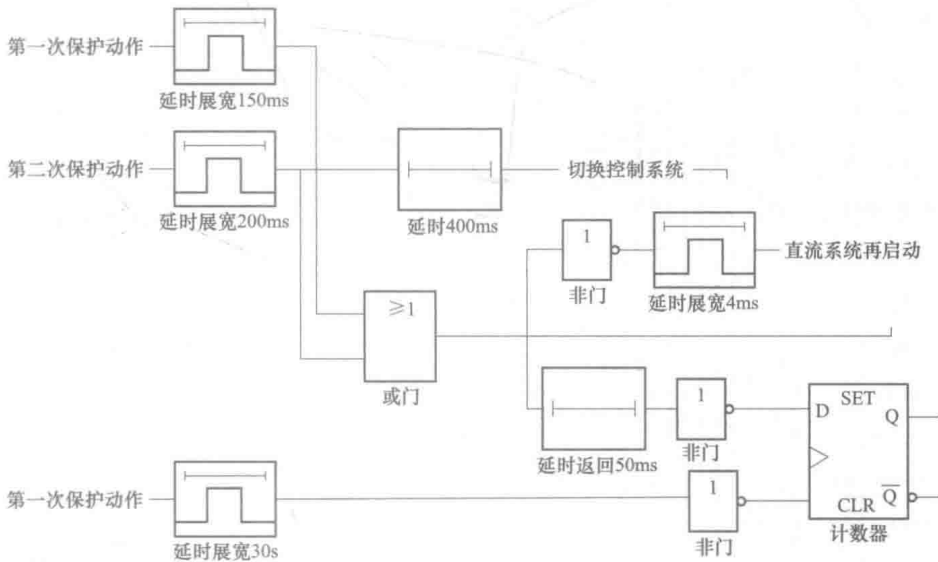


图 1-9 直流线路再启动逻辑示意图

10. 降功率

按直流保护的需要，通过控制系统使本极功率或电流降到预设值，达到减小设备所承受的过应力、消除瞬时性故障的目的。

11. 极平衡

当发生故障或不正常运行情况时，双极不平衡度较大，可能导致流过接地极或站内接地网的电流过大，威胁设备和人员安全。此时，相关保护动作，通过控制系统出口执行极平衡命令，以消除减小不平衡电流。