

±800kV YUNGUANG TEGAoya ZHILIU SHUDIAN XITONG
DIANXING GUZHANG FENXI JI XIANCHANG CHULI

±800kV 云广特高压直流输电系统 典型故障分析及现场处理

中国南方电网公司超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

±800kV YUNGUANG TEGAOYA ZHILI

DIANXING GUZHANG FENXI JI XIANCHANG CHULI

±800kV 云广特高压直流输电系统 典型故障分析及现场处理

中国南方电网公司超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以 $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流输电工程为依托,充分吸取和借鉴了工程验收、调试、运行和日常维护工作的宝贵经验,介绍了特高压直流输电换流站主要设备,收集了云广特高压直流输电系统的典型故障,每个实例包括故障经过及处理过程、原因分析、防范措施三个方面,提出了防止类似事故发生的预案。这些经验总结对我国特高压直流输电工程的运行、维护技术的提高具有重要的指导意义。

本书共分五章,分别为云广特高压直流输电系统换流站主要设备、云广特高压直流输电系统主设备故障分析、云广特高压直流输电系统控制保护设备故障分析、云广特高压直流输电系统辅助设备故障分析、云广特高压直流输电系统典型设备处置预案。

本书可供高压直流输电运行、检修、试验、科研人员使用,也可供高校相关专业师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

$\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流输电系统典型故障分析及现场处理 / 中国南方电网公司超高压输电公司组编. —北京:中国电力出版社, 2016.10

ISBN 978-7-5123-8957-1

I. ①8… II. ①中… III. ①特高压输电—直流输电线路—故障诊断②特高压输电—直流输电线路—现场维修 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 035454 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>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月北京第一次印刷

710 毫米 $\times$ 980 毫米 16 开本 13.25 印张 224 千字

定价 56.00 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 尚 涛

副主任 郑望其 刘 森

审核组 陈汝英 汪 洋 江 一 刘明波

杜松轩 戴国安 周海滨

主 编 刘茂涛

副主编 姚自林 熊 杭

编写组 徐攀腾 张志朝 余荣兴 陈灿旭

蒋峰伟 严进军 吕 茵 周登波

何园峰 石 健 熊双成 宋述波

张 文 潘姿君 黄俊波 何润华

王 超 张 锐

前 言

±800kV 云广特高压直流输电系统于 2010 年 6 月 18 日双极四阀组顺利投产,目前已经进入正式运行阶段。云广工程作为世界上第一个特高压直流输电系统,无论在高压一次设备的设计制造,还是在控制保护系统的选择配置方面,都开创了直流输电工程的先河。无运维经验借鉴给全面掌握特高压核心技术、快速处理事故异常带来了极大的挑战。

《±800kV 云广特高压直流输电系统典型故障分析及现场处理》结合云广直流工程验收、调试及运行过程中出现的由于新技术应用而带来的设备异常和故障,分析异常和故障产生的原因,总结了特高压设备典型事故异常的处理方法和运维经验。本书的出版有助于特高压直流运维经验、事故处理思路和改进方法更好地推广,为今后特高压直流输电工程的建设 and 运维提供有益的借鉴,同时,也可供业内工程技术人员学习、参考。

本书共分为五章,第一章分别从一次设备、控制和保护设备、辅助设备三个类别总体介绍了云广特高压直流输电系统换流站主要设备的配置、特性和功能。在第一章的基础上,结合云广直流从建设、调试到投产以来的故障处理经验,第二章至第四章分类介绍了各类设备的典型故障,分析故障原因,提出解决措施。第五章结合设备运行特性和故障处理经验,编写了典型设备处置预案,为事故处理提供参考。

限于编者水平,书中难免存在不足、遗漏之处,敬请读者指正。

编 者

2015 年 6 月

目 录

前言

第一章 云广特高压直流输电系统换流站主要设备..... 1

 第一节 特高压换流站一次设备 1

 第二节 特高压换流站控制和保护设备..... 7

 第三节 特高压换流站辅助设备 11

第二章 云广特高压直流输电系统主设备故障分析..... 13

 第一节 换流变压器故障分析 13

 第二节 换流器故障分析 31

 第三节 800kV 直流隔离开关故障分析..... 40

 第四节 直流线路故障分析 42

 第五节 直流滤波器故障分析 61

 第六节 交流滤波器跳闸分析 70

 第七节 平波电抗器异常发热故障分析..... 77

 第八节 500kV 交流场故障分析 82

第三章 云广特高压直流输电系统控制保护设备故障分析..... 100

 第一节 直流站控系统故障分析 100

 第二节 极控系统故障分析 104

 第三节 阀组控制系统换相失败故障分析..... 110

 第四节 阀基电子设备控制系统光发射板异常故障分析 114

 第五节 直流保护系统故障分析 116

 第六节 测量系统故障分析 140

 第七节 间隔控制单元最后开关逻辑不合理故障分析..... 152

第四章 云广特高压直流输电系统辅助设备故障分析..... 157

 第一节 阀冷系统故障分析 157

 第二节 站用电系统故障分析 167

第三节 消防系统故障分析 174

第五章 云广特高压直流输电系统典型设备处置预案 176

 第一节 主设备处置预案 176

 第二节 控制保护设备处置预案 190

 第三节 辅助设备处置预案 197

第一章

云广特高压直流输电系统换流站 主要设备

本章对云广特高压直流输电系统主要设备进行介绍，侧重于特高压直流输电设备的特点，主要分为一次设备、控制和保护设备、辅助设备三大类。一次设备主要介绍换流变压器、换流器、干式平波电抗器；控制和保护设备主要介绍直流站控系统、极控系统、阀组控制系统、直流保护系统；辅助设备主要介绍阀冷却系统。

基于上述设备的基本特性，结合实际运行经验，本章特别总结了设备在运行过程中容易出现的故障，形成设备典型故障概述，为后续故障分析章节建立基础。

第一节 特高压换流站一次设备

本节主要介绍云广特高压直流输电系统特有一次设备的基本结构、特性及其在直流输电系统中的作用，包括特高压换流变压器（高端换流变）、换流器、干式平波电抗器等。交流滤波器、直流滤波器、避雷器、断路器、隔离开关、接地开关、冲击电容、耦合电容等设备在特高压换流站亦有应用，但属常规高压直流输电设备，因此不再赘述。

一、特高压换流变压器

云广特高压直流输电工程采用了每极两个 12 脉动阀组串联的接线方式和 $\pm(400+400)$ kV 的电压组合方案，每极有 12 台换流变压器，即高端星接换流变压器 HY、高端角接换流变压器 HD、低端星接换流变压器 LY、低端角接换流变压器 LD 各 3 台，这种独特的组合方式使得高端星接换流变压器 HY 阀侧对地直流电压可达 800kV，其结构为单相双绕组，组间按星形连接，采用三

柱两旁轭结构；高端角接换流变压器 HD 阀侧对地直流电压可达 600kV，按三角形连接，为两柱两旁轭结构。高端换流变压器冷却方式均为 ODAF（强迫油循环导向风冷），单台容量为 250MVA（整流侧为 250 MVA，逆变侧为 244.1 MVA），作为世界上首次研制并应用于工程实际的高端换流变压器，其设计、制造、运行、维护的每个环节都很关键。

云广特高压 800 kV 换流变压器与常规 500 kV 换流变压器相比，体积庞大、质量大，在绕组设计、外观尺寸、绝缘水平、出线方式等方面均存在着较大的差异。换流变压器阀侧套管均采用 SF₆ 绝缘套管，网侧采用有载真空分接开关进行连续调压。本节将着重对高端换流变压器区别于±500kV 高压直流输电系统换流变压器的结构参数进行介绍。

（一）内部绝缘结构介绍

1. 铁芯结构

云广直流系统的换流变压器分为高端换流变压器和低端换流变压器，其中高端换流变压器为特高压换流变压器，分为 HY 换流变压器和 HD 换流变压器。HY 换流变压器的铁芯被设计为单相五柱式结构，HD 换流变压器的铁芯为单相四柱结构。铁芯磁通流向示意图如图 1-1 所示。通过计算，在铁芯内布置了足够的油道，保证换流变压器铁芯在换流运行状态下产生的发热损耗可以被及时带走，不会发生过热现象。

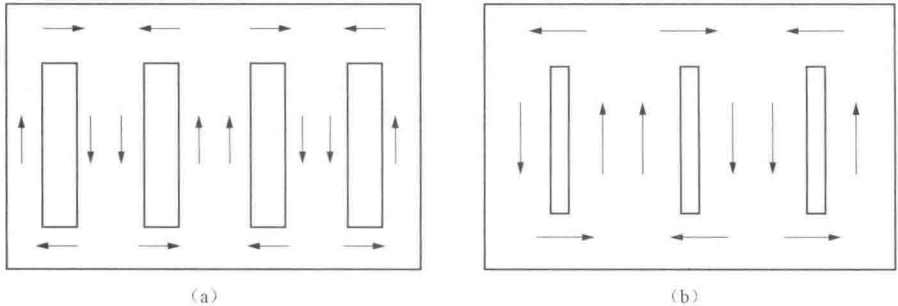


图 1-1 云广特高压换流变压器铁芯磁通流向

(a) HY； (b) HD

2. 主绝缘结构及绝缘水平

特高压换流变压器器身采用整体套装垫块压紧结构，所有绕组分别套在三个（两个）主柱上。根据绝缘水平要求，按电压耐受水平高低由外而内分为“阀

表 1-2

特高压换流变压器与低端换流

变压器外形尺寸比较

(单位: mm)

序号	尺 寸 指 标	HY	HD	LY	LD
1	箱体长度	12630	10850	9514	9514
2	箱体宽度	3460	3460	3384	3384
3	箱体高度	4850	4850	4715	4715
4	储油柜高度	10460	9320	8958	8958
5	箱体加 1.1 套管高度	12492	12567	11990	11990
6	箱体加 1.2 套管高度	6555	6555	6519	6519
7	本体几何中心与 2.1/3.1 套管终点水平长度	16462.5±50	13563±50	10034	10034
8	2.1/3.1 套管终点高度	13949±50	10518±50	6588	6588
9	2.1/3.1 套管水平夹角	41°	35°	28°	28°
10	本体几何中心与 2.2/3.2 套管终点水平长度	18402±50	14576±50	10396	10396
11	2.2/3.2 套管终点高度	7812±50	6403±50	3177	3177
12	2.2/3.2 套管水平夹角	23°	25°	18°	18°

(三) 技术规范比较

作为电压等级最高的换流变压器, 其与低端换流变压器在技术规范方面也有着明显的差异, 主要体现在以下三方面:

(1) 在空载损耗与负载损耗上, 特高压换流变压器与低端换流变压器有着明显区别。HY 换流变压器比低端换流变压器空载损耗高 35%, 这也是由 HY 换流变压器所承受的高电压所决定的。

(2) 在冷却方式上, 特高压换流变压器采用 ODAF (强迫油循环导向风冷), 而低端换流变压器采用 OFAF (强迫油循环风冷), 两种方式的主要区别在于换流变压器器身部分的油路不同。特高压换流变压器采用了导向冷却后, 绕组内油的流动主要依靠潜油泵产生的压力, 与负载无关, 强力促使温度相对均匀化, 提高了换流变压器的冷却效能。

(四) 真空分接开关结构

特高压换流变压器分接开关为真空分接开关, 包含若干熄弧用的主触头真空泡, 在真空中灭弧, 相比依靠油来灭弧的油浸式分接开关, 真空分接开关的维护量更少, 灭弧性能更优, 而且不会引起油的炭化。

真空分接开关结构主要包括电动机构、分接选择器和切换开关三部分。电

动机构主要由传动机构、控制机构和电气控制设备、箱体等组成。分接选择器能承载电流，但不接通和开断电流，它由级进选择器、触头系统和转换选择器组成。切换开关实现挡位的切换。真空分接开关与油浸式分接开关最大的不同就在切换开关的结构上。

(五) 典型故障概述

云广直流工程的换流变压器耐受电压高，结构复杂，附件众多，长期运行后不可避免地会出现问题，主要有：

(1) 分接开关为有载调压方式，作为直流系统电压控制的一部分，在运行过程中会频繁调整，分接开关内的冷却油会受热逐步劣化，长期运行、恶劣工况下运行时可能产生较多分解气体，造成瓦斯保护动作；如果分接开关及其冷却回路结构设计不合理，分接开关调整过程中造成的油流涌动很可能造成瓦斯保护动作，在工程试运行中曾经出现过。

(2) 换流变压器冷却器在高温高负荷工况下长期运行，其油泵、风扇可能出现故障，造成部分冷却器组故障退出。

(3) 高端换流变压器、低端星接换流变压器套管采用 SF₆ 气体绝缘，当套管出现泄漏点时，SF₆ 压力降低，会导致 SF₆ 压力低保护动作。

(4) 换流变压器控制柜因密封不严受潮，导致低压交直流电源回路、控制回路等出现断线、接地、短路等故障时，换流变压器可能出现冷却器退出、分接开关无法调整、误发告警或跳闸信号等故障，严重时甚至造成直流系统停运。

二、换流器

(一) 电气组成

换流器的基本组成单位为晶闸管 (Thyristor) 器件，单个阀片级结构如图 1-2 所示。

单个阀片级主要由以下五部分组成：

- (1) 晶闸管器件；
- (2) 阀电压监测 PCB (TVM) ，
阀控的一部分；
- (3) 主动式散热装置；
- (4) 与晶闸管器件并联的 RC 缓冲（阻尼）回路；
- (5) 与晶闸管器件并联的直流分压电阻（安装在 TVM 板上）。

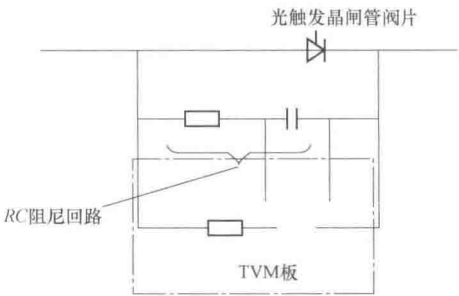


图 1-2 单个阀片级结构

15 个晶闸管器件与 2 台阀电抗器串联后，再与一只均压电容器并联构成一个晶闸管阀段（Valve Section）；2 个晶闸管阀段串联后构成一个换流阀模块（Thyristor Module），两个阀模块串联构成一个换流阀（Thyristor Valve，也称换流臂、桥臂）；2 个换流阀串联构成一个二重阀（Quadruple Valve），即一座阀塔；单个阀组由 6 座阀塔构成，器件数量如表 1-3 所示。

表 1-3 各器件所用晶闸管器件数量

器件名称	所用晶闸管器件数量（块）
1 个晶闸管阀段	15
1 个换流阀模块	30
1 个换流阀（桥臂）	$2 \times 30 = 60$ （其中包含 2 块冗余）
1 个二重阀（阀塔）	$60 \times 2 = 120$
1 个阀组（每个阀厅）	$120 \times 6 = 720$

（二）典型故障概述

由于换流器故障，导致直流闭锁的因素有：

- （1）两路电源均出现故障；
- （2）两套阀控制与监测系统均出现故障；
- （3）单一换流阀内有两个以上晶闸管器件出现无回检信号故障；
- （4）单一换流阀内有四个及以上晶闸管器件保护性开通。

换流器采用光触发，光纤回路故障会导致阀片无回检、保护性触发，甚至阀组闭锁。

三、干式平波电抗器

（一）结构与形式介绍

直流平波电抗器也称平波电抗器，一般串接在每个极换流器的直流输出端与直流线路之间，它与直流滤波器一起构成高压直流换流站直流侧的滤波回路。平波电抗器能防止直流线路或直流开关站所产生的陡波冲击波进入阀厅，从而使换流阀免于遭受过电压应力的破坏；能平滑直流电流中的纹波；能避免在低直流功率传输时电流断续；还可通过限制由快速电压变化所引起的电流变化率来降低换相失败率；当逆变侧发生某些故障时，可避免引起继发的换相失败；可减少因交流电压下降引起逆变侧换相失败概率；当直流线路短路时，在整流侧调节配合下，限制短路电流的峰值。

平波电抗器有干式和油浸式两种形式。云广特高压直流系统平波电抗器属于干式空心平波电抗器，每极所装设平波电抗器的总电感量为 300mH，极母线和中性母线各装设一组 150mH 平波电抗器组，每组分别采用 2 台 75mH 电抗器串联组成。平波电抗器分极母线和中性母线两端配置的模式相比全部平波电抗器安装在极母线侧的模式，可以确保高低端阀组间的母线电压几乎为纯直流电压；可降低高端 12 脉动阀组各点的过电压，有效提高避雷器保护水平、高端 12 脉动阀组各点的绝缘水平。

（二）典型故障概述

平波电抗器由线圈绕制而成，加以树脂材料制成保护外壳，因此，在高温高负荷工况下容易出现局部过热，造成绝缘下降，出现异常放电，甚至起火。

第二节 特高压换流站控制和保护设备

±500kV 天广、高肇、兴安直流输电工程控制保护系统均基于西门子硬件平台 SIMADYN D，与此不同，云广特高压直流输电工程控制保护及测量系统首次采用西门子工业控制平台 SIMATIC TDC。与 SIMADYN D 相比，SIMATIC TDC 集成度更高，数据处理能力更强大，运行速度更快。

一个完整的 SIMATIC TDC 系统在硬件上通常包含机架、处理器单元 CPU551、信号模块 SM500、通信模块 CP50M1/CP51M1、数据采集及预处理模块 IM5 和 LO5、其他模块及附件。机架为所有基于 TDC 的控制保护系统所必备的，机架配备有集成电源、后备电池、冷却风扇及高性能 64 位 VME 总线；CPU551 为 TDC 系统的核心模块，除直流测量系统外，云广直流控制保护系统均包含至少一块 CPU 插件；SM500 信号模板提供了模拟量、数字量 I/O 及增量型和绝对值编码器输入接口，共 60 个 I/O 通道；CP50M1 模块带有 2 个 PROFIBUS DP/MPI 接口，并具有通信缓存功能，CP51M1 模块提供一个工业以太网接口，具有通信缓存功能；IM5 与 LO5 均为直流测量系统专用模块，主要用于全站控制保护系统所需的所有模拟量及二进制量的采集及预处理，并通过总线与控制系统进行数据交换；云广特高压直流系统中所应用的其他 SIMATIC TDC 系统模块包括程序存储卡、接口卡 SM128V、光纤分配模块 ODM、光纤通信子单元 ICH 及多功能接口模块 MFI 等。

本节重点介绍云广特高压直流输电系统控制、保护系统区别于常规高压直流输电系统的功能。

一、控制系统

控制系统实现对直流系统的控制和监测,采用分层分级控制的原则,主要分为工作站(Workstation)、直流站控(DCSC)、极控(PC)、阀组控制(GC)、交流站控(ACSC)、间隔控制单元(Bay Control Unit)、远动控制接口(RCI)等系统。下面主要介绍直流站控、极控、阀组控制三个系统。

(一) 直流站控系统

直流站控系统按站配置,全站配有两套相互冗余的直流站控系统,主要实现双极层的控制功能,具体包含双极控制(如双极功率控制、电流平衡控制)、直流场控制(如直流场接线方式自动顺序控制、高压直流设备操作和监视)、交流滤波器控制、控制级别的协调和转换等。

(二) 极控系统

极控系统按极配置,每极配有两套相互冗余的极控系统,极控系统实现极级控制功能,采用冗余配置并且具有系统自动选择功能,具体包含电压控制、电流限制、极控后备保护功能等。

(三) 阀组控制系统

阀组控制系统采用标准 SIMATIC TDC 装置,采用冗余配置并且具有系统自动选择功能,主要实现阀组启停、换流变压器控制、闭环控制(定电压/定电流/定熄弧角控制)及控制器选择功能,阀组控制属于换流器层控制。

(四) 典型故障概述

在实际运行调试过程中,控制系统出现过由于软件设计缺陷、板卡硬件故障导致交流滤波器异常投退、板卡功能失效等故障。

二、保护系统

云广特高压直流输电系统的保护系统分为直流保护系统、交流保护系统和站用电保护系统。两套主保护一般采用不同的保护原理、独立的测量回路和电源。对不能采用不同原理的保护,保护系统采用完全冗余方案配置,以保证故障设备的安全停运和可靠隔离。本节将对直流保护系统进行介绍。

(一) 云广特高压直流系统直流保护配置

云广特高压直流保护分区配置,主要包括阀组保护(见图 1-3 区域 1)、直流母线保护(见图 1-3 区域 2)、直流滤波器保护(见图 1-3 区域 3)、接地极引线保护(见图 1-3 区域 4)、直流线路保护(见图 1-3 区域 5)。

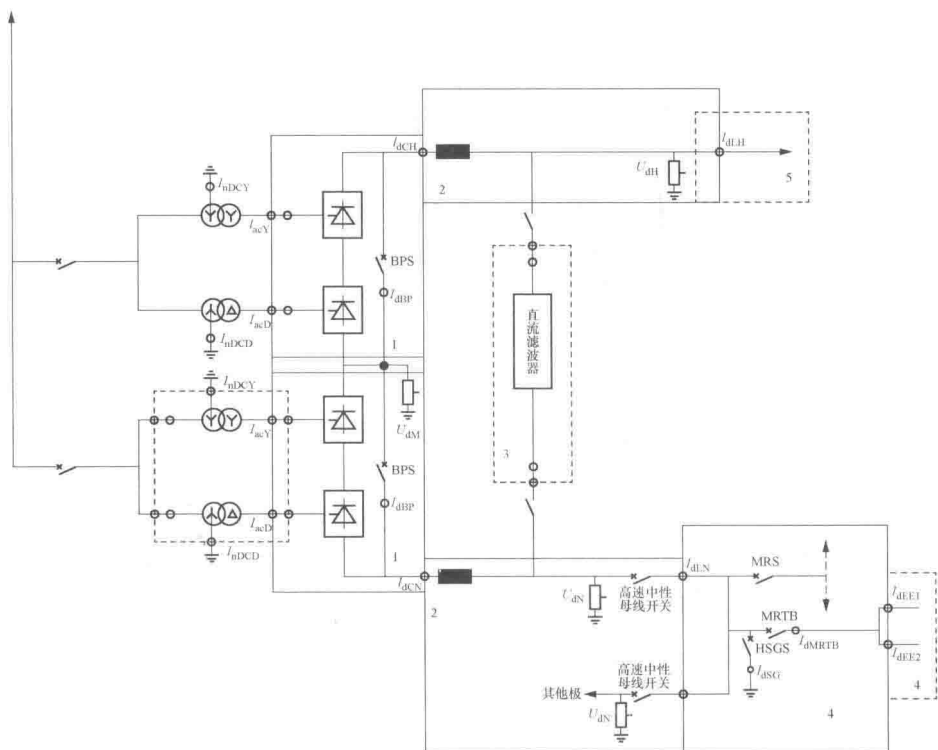


图 1-3 直流保护配置区域图

1—极级换流器保护；2—直流母线保护；3—直流滤波器保护；

4—接地极线路保护；5—直流线路保护

高端（低端）阀组保护包括短路保护、交流过电流保护、桥差保护、阀组差动保护、直流差动保护、阀侧绕组接地故障监视。

极层阀组保护包括双 12 脉动阀组直流差动保护、50 Hz 保护、100 Hz 保护、低电压保护、次同步谐振保护、交直流碰线保护。

直流母线保护包括极连接线差动保护、中性线差动保护、极差动保护。

极线保护包括双极中性线差动保护、接地极差动保护、接地极过电流保护、接地极开路保护、站接地过电流保护、接地系统保护。

直流线路保护包括行波保护、低电压保护、直流线路差动保护、金属回线差动保护。

（二）特高压特有直流保护功能

特高压直流输电系统特有的保护功能包括阀组旁路开关保护、阀组过电压

保护及双 12 脉动阀组直流差动保护等。

1. 阀组旁路开关保护

特高压直流工程采取双 12 脉动阀组串联运行,通过旁路开关与阀组解闭锁的配合,实现了系统运行方式的灵活多变,因此旁路开关的配合控制显得非常重要。为了防止解闭锁过程中出现配合控制不精确,导致旁路开关控制失败而影响同极另一阀组的正常运行,阀组保护设置了旁路开关保护,该保护分为 2 段。

(1) 旁路开关保护 1 段。解锁一极第二个阀组前,该阀组旁路开关在合位,为已解锁阀组提供旁通回路。解锁第二个阀组时,阀组控制系统会根据解锁配合顺序自动断开旁路开关,在该过程中若保护检测到旁路开关已经断开,但是流过旁路开关的电流 I_{dBPS} 仍然大于保护定值,则保护要求重新合上旁路开关,第二个阀组解锁不成功,同时还会导致同极运行中的阀组强制移相。

(2) 旁路开关保护 2 段。一极第一个阀组闭锁或紧急停运时,要求合上旁路开关将该阀组旁路。当控制或保护系统发出合上旁路开关命令后,若保护检测到流过旁路开关的电流 I_{dBPS} 小于保护定值,且换流器高压侧的电流 I_{dCH} 大于保护定值,则保护系统判定该阀组旁路失败,为了确保设备安全从而闭锁整个极。

因此,应加强对阀组旁路开关的日常运行维护,避免出现分、合闸闭锁而影响系统运行或者将事故扩大。

2. 阀组过电压保护

阀组过电压保护检测由直流开路、逆变器闭锁或控制系统故障引起的阀组连接母线直流过电压情况,测量阀组连接母线上的直流电压,如果该电压大于整定值,将延时跳闸,其动作逻辑如图 1-4 所示。

3. 双 12 脉动阀组直流差动保护

双 12 脉动阀组直流差动保护覆盖高端阀组高压侧直流穿墙套管和低端阀组中性线侧穿墙套管之间的区域,检测保护范围内的接地故障和对中性线短接的故障,检测高压 12 脉动阀组高压侧直流电流和低压 12 脉动阀组中性线侧直流电流。正常情况下,这两个电流是平衡的,当两个电流互感器之间的区域发生接地故障或对中性线短接的故障时,短路电流流过故障点,这两个电流存在很大的差值,其动作逻辑如图 1-5 所示。