



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA



高压直流输电 岗位培训教材

换流器及直流控制保护设备

国网运行有限公司 组编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

策划编辑：李建强 赖广秀

联系电话：010-63416251 63416255

高压直流输电岗位培训教材

开关设备

通信设备

线路设备

辅助设备

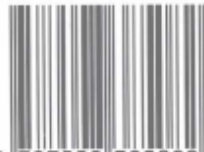
变压器设备

交流保护设备

换流器及直流控制保护设备

互感器、滤波器及避雷器设备

ISBN 978-7-5083-8508-2



9 787508 385082 >

定价：38.00 元

上架建议：电力工程 / 输配电



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

高压直流输电 岗位培训教材

换流器及直流控制保护设备

国网运行有限公司 组编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《高压直流输电岗位培训教材》丛书之一,介绍了换流器和直流控制保护的相关知识。主要包括:换流器的结构、阀控系统,换流器的试验与检修,直流控制保护基本原理,HVDC 控制保护功能要求,南瑞、许继控制保护系统,以及控制保护自动化系统。

本书可供高压直流输电岗位运行、检修技术人员及管理人员参考,也可作为相关专业院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

换流器及直流控制保护设备/国网运行有限公司组编. —北京:中国电力出版社,2009

高压直流输电岗位培训教材

ISBN 978-7-5083-8508-2

I. 换… II. 国… III. ①变流器-技术培训-教材②高压-直流-电流保护装置-技术培训-教材 IV. TM46 TM774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 023736 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

2009 年 4 月第一版 2009 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 341 千字

印数 0001—3500 册 定价 38.00 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

《高压直流输电岗位培训教材》

编 审 委 员 会

主 编 崔吉峰

副主编 李 东 王守东 陈秋安 王晓希

娄殿强 罗德彬

编 委 余克武 余振球 刘 涛 唐开平 殷俊新

李继辉 仝培理 习超群 王聿升 王世民

胡开军 刘国云 丁子健 李安伟

各分册编写人员

变压器设备

饶洪林	周 广	吴 聪	谭 静	陈 飞	靳海路	王 枫	陈大军
余珊珊	赵福莉	郑 华	黄瑶玲	张 勇	戚 菲	李 浩	张 念
张 益	张海燕	李 君					

换流器及直流控制保护设备

吴 鹏	汪 涛	陈 凯	王丽娜	摆 亲	陈 晓	吴 宁	王紫鑫
许立新	吕拦坡	赵 杰	李 彪	付纪华	姚 孟	俞晓冬	孙 瑾
姚其新	韩情涛	贺霖华	李 君	刘蓓蓓	刘 浔	李凤祁	

开关设备

戴晨蓉 廖文锋

线路设备

曹 亮 李浙涛 刘庭波 吴秀海 胡 风

通信设备

马树明 欧阳兰 吴 军 朱煜冰 李 晶

互感器、滤波器及避雷器设备

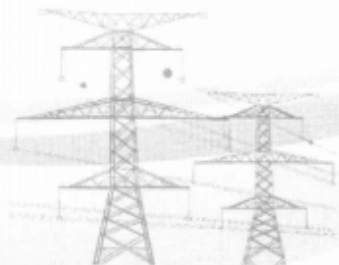
王 鹏	黄 晨	钱 龙	胡锦根	康 文	石伟峰	李华兵	毛志平
黄岳奎	吴 鹏	汪 涛	陈 凯	王丽娜	摆 亲	陈 晓	陈炳华
顾舒扬							

辅助设备

周建国	张 昕	饶 磊	魏华兵	李龙蛟	廖卉莲	康 文	石伟峰
黄 晨	邹根海	苏 飞	陈 凯	汪 涛	吴 鹏	王丽娜	摆 亲
陈 晓	王紫鑫	汤晓峰					

交流保护设备

沈志刚	单 哲	郝跃东	汪道勇	李锋锋	徐 兵	商少波	郑 华
黄瑶玲	赵福莉	周建国	张 昕	黄正发	姚青强	吕拦坡	姚 兵



序

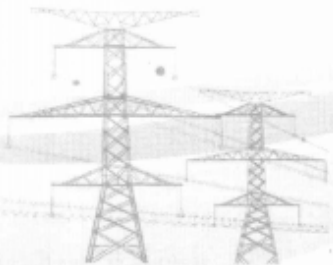
1989年,中国第一条超高压直流输电工程葛洲坝—南桥直流输电工程建成投产,直流输电技术在中国稳步发展。进入21世纪后,随着三峡电力送出和跨区电网大规模发展,中国直流输电工程也得到较快发展。目前,中国直流输电无论容量还是技术水平均已走在世界前列,今后还将有一大批直流输电工程投运,直流输电在电网中的作用越来越重要。

由于直流输电工程技术及设备的特殊性,工程运行维护较交流工程有很大不同,随着后续直流输电工程的快速发展,直流输电运行维护培训需求大大增加。因此,编写有关直流输电工程生产岗位培训教材是当前直流输电工程发展所急需的,对提高在运直流输电工程的运行可靠性也具有重要意义。国网运行有限公司是国内运行维护直流工程最早、数量最多、容量最大的专业电网运行公司。为了全面提高国内直流输电工程运行维护工作水平,公司组织了数十名长期从事直流输电运行、检修的技术人员,在充分总结在运直流工程运行经验的基础上,前后经过长达两年的时间编写完成了理论结合实际设备、全面系统、实用性较强的《高压直流输电岗位培训教材》。

这套教材共分八册,系统地对直流输电相关设备的原理、结构、技术特点进行了详细的描述,并进而对设备的巡视检查、检修试验等运行维护工作要求和特点进行了总结。它的出版发行将为从事直流输电运行维护、设计、安装、调试和直流输电设备制造、直流电网生产管理和调度管理等方面的技术人员和生产管理人员提供很好的技术参考。期望它能够对提高我国常规直流输电工程和特高压直流输电工程生产运行水平起到重要作用,从而为建设坚强国家电网作出贡献。

傅吉峰

2008年12月



前言

高压直流输电技术起步在 20 世纪 50 年代,到 80 年代,全世界共建成了 30 项直流输电工程,直流输电在电网中发挥了重要作用,直流输电控制保护技术得到进一步的发展和完善。迈入 90 年代以后,随着电力电子技术、计算机技术和控制理论的迅速发展,高压直流输电技术日益完善,可靠性得到提高。

我国直流输电技术同样是在 80 年代得到发展的,建成了我国自行研制的舟山直流输电工程(± 100 千伏,100 兆瓦,55 千米)和代表当时世界先进水平的葛洲坝—上海(简称葛上) ± 500 千伏直流输电工程。90 年代,随着三峡工程的建设,三常、三广、三沪直流工程相继投运。2004 年,我国第一个背靠背直流工程,同时又是一个直流设备国产化示范工程——灵宝背靠背直流工程顺利建成,标志着中国已经逐渐成为世界上运行直流工程数量最多、容量最大、线路最长的直流输电大国。

据预测,至 2010 年全国发电装机总容量将达到 8.4 亿千瓦左右,2020 年将突破 12 亿千瓦左右。将新建电源的电安全、稳定、可靠、经济地送出是我国电网建设的基本任务,并应在此基础上逐步改善电网结构、推进全国联网,这使得电网的发展比电源建设更具挑战性。特别是在西电东送工程中,直流输电本身适宜远距离输送、送电容量大、易于控制和调节的特点将发挥极其重要的作用。根据《国家电网公司特高压电网规划》,到“十一五”末,规划投产的直流背靠背工程包括东北华北背靠背、灵宝背靠背(扩建)、中俄背靠背、福建广东背靠背四个项目,以及德阳—宝鸡、呼盟—辽宁、晋东南—江苏、宁东—潍坊、蒙古—天津、俄罗斯—辽宁、西藏—青海、葛沪改造八个项目。到“十一五”末,国网公司系统直流输电工程将达到 17 个、换流站 28 个,输送容量达到 4005 万千瓦。到“十二五”末,国家电网公司将有 8 个直流系统建成投产,包括向家坝—上海、宁东—济南、四川—湖南、锦屏—江苏、蒙古—唐山、溪洛渡—湖南、溪洛渡—浙江、蒙古—山东。直流工程总数将达到 25 个、换流站 44 个,输送容量达到 8085 万千瓦。“十三五”期间,国家电网公司规划建设投产的直流系统还有 14 个,直流输电工程将达到 39 个、换流站 72 个,输送容量达到 18 745 万千瓦。国内南方电网公司在运的天生桥—广州、安顺—肇庆、兴仁—深圳三个直流输电工程,总输送容量 780 万千瓦,此外在“十一五”末还将完成云广特高压直流输电工程,总输送容量达到 1420 万千瓦。

随着大批直流输电工程投运,直流输电工程的运行维护和生产管理工作显得日益重要,特别是随着近年来直流工程数量和容量的快速发展,直流工程运行维护也不再局限于专业的直流电网运行公司,各网省公司将更多地参与直流输电工程运行维护和生产管理工作。正是为了满足我国直流输电工程生产运行的需要,国网运行有限公司总结了近 20 年来在直流输电工程中运行维护的经验,结合直流输电设备特点,全面系统地编制了我国第一套专门针对直流输电岗位的培训教材。

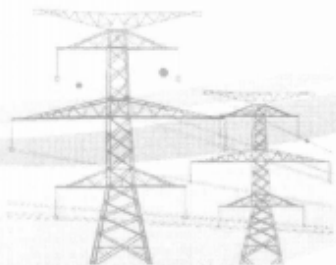
本套教材共分八册，其主要内容有：变压器设备，换流器及直流控制保护设备，开关设备，线路设备，通信设备，互感器、滤波器及避雷器设备，交流保护设备，辅助设备等。系统地对直流输电工程中的上述设备的结构、原理、技术特性、运行维护工作内容和要求等进行了详细说明。本套教材在大量收集、整理、分析国网系统在运直流输电工程运行技术资料的基础上，结合现场运行维护经验，按照设备类别对直流输电工程的运行维护岗位专业技能进行了详细说明，是从事直流输电运行维护和生产管理人员学习直流输电原理、设备特性、控制原理和运行维护内容的岗位技能教材。同时本书也可用于直流输电工程设计、安装、调试、调度管理、设备厂家及相关直流输电工程生产管理人员使用。

为了编制好本套教材，国网运行有限公司充分发挥专业直流输电工程运行维护公司的特点，仔细分析直流输电各岗位的技术技能需求，自2007年10月开始进行编制，经过了多次讨论修改，数易其稿，最后于2008年10月完成了本套教材的编写工作。本书的编写人员均是有着丰富的直流输电工程现场工作经验、熟悉直流输电工程设备技术和生产管理的专业人员。运行公司所属宜昌、上海、惠州、三门峡四个管理处，共9个换流站的近百名专业技术人员参与了教材编写。

本书在编写过程中得到了国家电网公司、设备制造厂家、各技术监督单位的大力支持，特在此表示感谢。限于我们的水平和经验，书中难免存在缺点和不足，望读者批评指正。

编 者

2008年11月



目 录

序
前言

第一部分 换 流 器

第一章 换流器的结构	2
第一节 换流器概述	2
第二节 换流器的设计要求	3
第三节 换流器元件参数	7
第四节 换流器结构	8
第五节 晶闸管级的工作原理	11
第六节 阳极电抗器	16
第七节 冷却器	17
第二章 阀控系统	20
第一节 硬件系统	20
第二节 软件系统	22
第三章 试验与检修	26
第一节 型式试验	26
第二节 常规试验	28
第三节 预防性试验	29
第四节 日常维护	31
第五节 特殊性检修项目	33
附录 运行公司使用换流器清单	42

第二部分 直 流 控 制 保 护

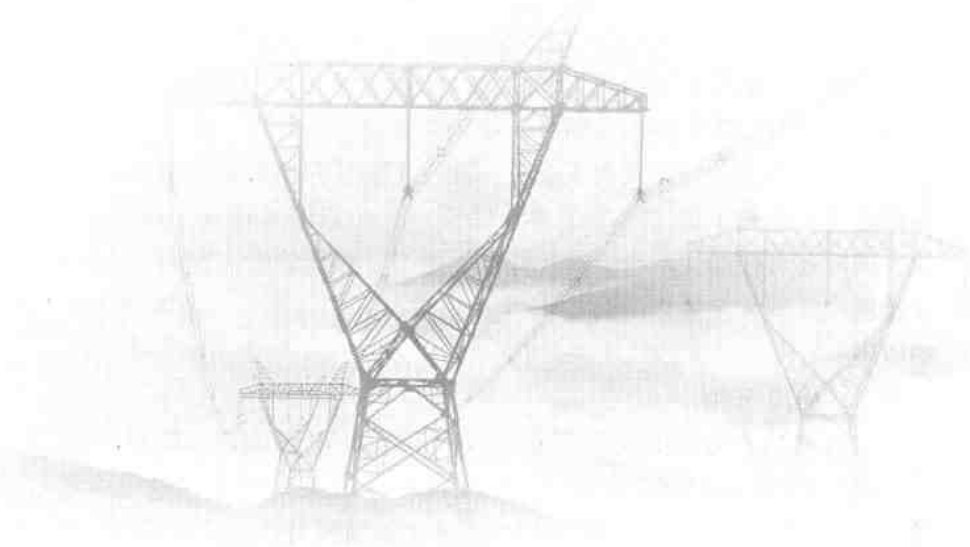
第四章 控制保护基本原理	44
第一节 概述	44
第二节 直流输电的原理及其控制系统	47

第五章 HVDC 控制保护功能要求	58
第一节 控制系统分层	58
第二节 基本控制策略	60
第三节 基本保护配置	61
第四节 附加控制功能	65
第五节 控制保护系统冗余	65
第六节 直流工程控制系统配置方案	72
第七节 直流工程直流保护配置方案	76
第六章 南瑞 (ABB) 控制保护系统工程实现	79
第一节 控制保护系统总体结构	79
第二节 控制保护系统冗余实现	82
第三节 控制系统功能实现	88
第四节 保护系统功能实现	114
第五节 控制保护系统自检功能	138
第七章 许继 (SIEMENS) 控制保护系统工程实现	142
第一节 控制保护系统总体结构	142
第二节 控制保护系统冗余实现	147
第三节 控制系统功能实现	150
第四节 保护系统功能实现	175
第八章 自动化系统	184
第一节 系统总体结构	184
第二节 系统冗余实现	185
第三节 系统功能实现	186
第四节 服务器数据库软件	191
第五节 自动化工作子站	220

高压直流输电岗位培训教材

换流器及直流控制保护设备

换 流 器



换流器的结构

第一节 换流器概述

换流器是直流输电系统中的关键设备，它的作用是把交流电变换成直流电（称为整流），或者把直流电变换成交流电（称为逆变）。通常用来换流的有 6 脉动换流器和 12 脉动换流器，12 脉动换流器由两个 6 脉动换流器串联而成。

一、分类

按照触发原理的不同，换流器可分为 LTT（Light Trigger Thyristor）换流器和 ETT（Electric Trigger Thyristor）换流器。

1. LTT 换流器

由光触发晶闸管 LTT 组成的换流单元称为 LTT 换流器。光触发晶闸管的工作原理是在晶闸管门极区周围有一个小光敏区，当一定波长的光被光敏区吸收后，在硅片的耗尽层内吸收光能而产生电子空穴对，形成注入电流使晶闸管元件触发。这种触发方式与电触发方式相比，省去了控制单元的光电转换、放大环节及电源回路，简化了阀的辅助元件，改善了阀的触发特性，提高了阀的可靠性。目前，光触发晶闸管换流器已在我国灵宝背靠背换流站以及贵广直流输电工程中得到应用。

2. ETT 换流器

由电触发晶闸管 ETT 组成的换流单元称为 ETT 换流器。电触发晶闸管工作原理是将阀控系统来的触发信号转化为光信号，由光缆将光信号传送到每个晶闸管级，在门极控制单元把光信号再次转换成电信号，经放大后触发晶闸管元件。这种触发方式利用了光电器件和光纤的优良特性，实现了触发脉冲发生装置和换流阀之间低电位和高电位的隔离，同时也避免了电磁干扰，减小了各元件触发脉冲的传递时差，使均压阻尼回路简化和小型化，同时还可使能耗减小、造价降低，是当今直流输电工程的主流。目前，电触发晶闸管换流器在我国大多数直流输电工程（三常、三广、三沪等直流工程）中得到了非常广泛的应用。

二、组成元件

晶闸管换流阀是由晶闸管元件及其相应的电子电路、阻尼回路以及组装成阀组件（或阀层）所需的阳极电抗器、均压元件等通过某种形式的电气连接组装而成的换流桥臂。6 脉动换流器由 3 相桥式电路中的 6 个换流桥臂组成，每相由两个桥臂组成。12 脉动换流器则由两个 6 脉动换流桥臂串联而成。其中晶闸管阀是直流输电工程的“心脏”，是换流器最基本的组成单元。

(1) 晶闸管及晶闸管级 (Thyristor Level)。晶闸管是组成晶闸管阀的关键元件, 在高压直流输电中使用晶闸管芯片直径已达到 125mm, 反向非重复阻断电压已高于 8kV。除了光电转换触发晶闸管外, 光直接触发晶闸管也已应用到直流输电工程中 (如贵广、灵宝背靠背工程)。电触发晶闸管级由晶闸管元件及其所需的触发、保护及监视用的电子回路和阻尼回路构成。

(2) 阀组件。串联连接的若干个晶闸管级与阳极电抗器串联后再并联上均压电容元件构成了阀组件。

(3) 单阀。若干个阀组件串联连接组成一个单阀, 它构成了 6 脉动换流器的一个臂, 称阀臂 (单阀)。

第二节 换流器的设计要求

换流器是换流站的核心设备之一, 晶闸管换流器应能在预定的外部环境及系统条件下, 按规定的要求安全可靠地运行, 并满足损耗小、安装及维护方便、投资少的要求。

为了满足阀换流和可靠运行的要求, 阀应具有如下基本性能:

(1) 阀应该只具有单向导通的性能, 在一个周波中阀导通时间为 1/3 周波。

(2) 在阀不导通时, 能够承受正向和反向的阻断电压。

(3) 阀的最大阻断电压一般设计为 3 倍的 6 脉动阀桥额定直流电压, 最大阻断电压应由并联避雷器的电压保护水平决定。

(4) 当阀承受正向电压, 同时有触发电流 (大约 8A) 给门极时, 则阀应导通。只有流过阀的电流降为零时才关断。

(5) 阀具有承受过电流的能力。通过健全阀的最大过电流发生在阀两端间的直接短路, 而过电流的幅值主要由系统短路容量和换流变压器短路阻抗所决定。

除了满足以上的性能要求外, 阀在设计中还应满足如下要求: ① 很高的可靠性; ② 足够的机械强度; ③ 较低的损耗; ④ 最少的安装和维护费用; ⑤ 整体最优的价格; ⑥ 完善的自动监视系统; ⑦ 可靠的防火系统。

一、基本性能

1. 晶闸管元件性能

现代高压直流换流阀主要由晶闸管元件串联组成, 换流器的性能通过晶闸管元件的特性来实现。

晶闸管元件的主要特性如下:

(1) 阳极伏安特性。当加在晶闸管元件上的正向阳极电压增加时, 如果门极电流为零, 正向阳极电流将随阳极电压的增加而从零缓慢加大, 即使正向电压已加到很高, 电流仍只有几毫安, 元件处于正向阻断状态, 此时的阳极电流称为正向漏电流。待电压升到某一数值 U_{DSM} , 电流突然急剧增加, 管压降突然降至 0.5 ~ 1.5V 时, 元件转入导通, U_{DSM} 称为正向断态非重复峰值电压。如果元件上的电压多次超过 U_{DSM} , 且有大电流通过, 则

将使元件特性恶化以致损坏。如果门极电流不为零,则随着门极电流的增加,晶闸管元件由阻断状态变为导通状态所需的正向阳极电压就减小。如果门极电流达到其可触发的电流,则晶闸管元件在很低的正向阳极电压下就能导通。

晶闸管元件的阳极(与阴极之间)加上反向电压时的特性与二极管相似,只有很小的方向漏电流,且随反向电压的加大而增大。如果方向电压达到反向非重复峰值电压时,反向电流急剧增加,元件将被击穿而损坏。

(2) 门极特性。晶闸管元件的门极正向电压和正向电流之间的关系,称为门极特性。在门极与阴极之间施加正向电压,必然显示出二极管的特性,但又有别于普通二极管。其正、反向电阻差别较小,在门极正常触发区,应既能使元件可靠触发开通,又不致使门极击穿或过热。

(3) 断态重复峰值电压。指晶闸管门极断路和正向阻断条件下,可施加的重复率为每秒 50 次且持续时间不大于 10ms 的断态最大冲击电压。

(4) 反向重复峰值电压 U_{RRM} 。指晶闸管在门极断路条件下,可施加的重复率为 50 次/s 且持续时间不大于 10ms 的反向最大脉冲电压。

(5) 额定平均电流。指在规定的环境和散热条件下,允许通过的工频正弦半波电流的平均值,而表征元件发热情况的电流常以有效值表示。

(6) 断态临界电压上升率。在额定结温和门极开断条件下,不导致晶闸管元件从断态转变为通态的最大阳极电压上升率,一般在每微秒几千伏范围内,容许的电压上升率最大值与结温有关,结温越高,容许的电压上升率越低。

(7) 通态临界电流上升率。当用门极触发使元件开通时,晶闸管元件能承受而不发生有害影响的最大通态电流上升率,一般在每微秒数千安范围内。晶闸管允许的电流上升率大小与开通过程有关。当元件开通时,首先在门极附近的结面逐渐形成导通区,然后逐步扩展到整个结面完全导通,整个过程约几微秒到几十微秒。若电流上升率过大,元件 PN 结面还未完全导通,门极附近的结面电流密度过大,则会发生局部过热而导致元件损坏。

(8) 开通时间 T_{ON} 。从门极加上触发脉冲开始到阳极电流上升到稳态值 10% 的这段时间,称延迟时间 T_{d0} ,与此同时阳极与阴极间的压降在减小。阳极电流从稳态值 10% 上升到 90% 所需的时间,称为上升时间 T_{r0} 。开通时间 T_{ON} 的定义为上述两者之和,即 $T_{ON} = T_{d0} + T_{r0}$ 。

(9) 关断时间 T_{OFF} 。这里所说的关断是指元件的阳极、阴极回路在外电路作用之下使晶闸管元件开始关断,不涉及门极可关断的晶闸管元件。关断时间为从额定结温下元件正向电流为零起到元件恢复阻断能力为止的这段时间。关断时间 T_{OFF} 是反向阻断恢复时间 T_{rr} 和正向阻断恢复时间 T_{pr} 之和,即 $T_{OFF} = T_{rr} + T_{pr}$ 。

换流器性能的优劣与晶闸管元件特性直接相关。从换流器的设计基本要求看,阀的优化是综合考虑技术和经济的复杂问题,其中串联晶闸管元件最少和优选晶闸管元件参数是阀设计的一个重要目标。为减少串联元件数,降低相应损耗和成本,应要求元件耐压水平高、电流定值大,即要求提高单个元件的开关功率容量。晶闸管直径 $\phi 125$ 、8kV 左右耐

压水平和 3kA 以上电流定值的晶闸管元件已在工程中采用。除减少元件串联数外, 阀设计还应降低串联回路中电压分布不均匀系数, 并更好地利用晶闸管元件的电流能力, 以及阀内晶闸管元件各种参数的分散性为最小。例如: ① 元件的开通时间应尽可能一致, 尽可能小, 这样可大大减小开通过电压; ② 元件的恢复电荷尽可能小, 尽可能一致, 这样可大大减小关断过电压, 提高关断速度; ③ 元件的通态临界电流上升率能力、承受浪涌电流能力应尽可能高, 有利于降低阀的成本及尺寸; ④ 选择触发功率小的和通态压降低的晶闸管元件, 可减少阀的损耗。目前有不少耐压水平高的元件还不能用在直流换流阀上, 就是因为通态压降太高, 使阀的损耗高到无法接受。若仅为降低阀损耗选用通态压降低的元件, 则其耐压能力又受到很大的限制, 将导致串联元件数增加。

由于晶闸管元件参数之间相互制约, 因此现代高压直流换流器的设计应根据性能要求, 合理地选择主要参数指标。换流阀的设计也是晶闸管元件参数优化的过程。

2. 阀的耐压性能

晶闸管阀应能承受各种不同的过电压, 阀的耐压设计应考虑保护裕度。当考虑到电压的不均匀分布、过电压保护水平的分散性以及其它阀内非线性因素对阀应力的影响时, 保护裕度必须足够大。根据工程经验, 不计阀内冗余元件, 阀和多重阀单元的耐压应有的保护裕度是: 对于操作冲击和雷电冲击应大于避雷器保护水平的 15%, 对于陡波头冲击应大于避雷器保护水平的 20%。

通常, 阀的过电压耐受能力是由每个晶闸管的耐压水平通过多个元件串联叠加来实现的, 故在一定的元件耐压水平参数下, 阀的耐压能力由晶闸管的串联元件数所决定。

阀臂中每数个元件串联后 (称为组件或阀段) 与一个 (或数个) 饱和电抗器串联, 而该电抗器将承受陡波冲击的大部分过电压和雷电冲击的部分过电压, 而且平波电抗器也会限制从线路侵入的雷电波, 因此这两种过电压对于换流器阀臂串联元件不是主要控制因素。操作冲击是决定串联元件数的主要因素, 由于多个元件串联和各元件对端部的杂散电容及元件特性的不均匀性, 尽管有均压回路, 但仍会存在电压分布不均匀。操作冲击波的电压分布不均匀系数, 目前制造水平可达到 1.05 ~ 1.10, 这是决定换流阀阀臂最小串联元件数时应予以考虑的因素。

从绝缘配合要求看, 阀臂正向非重复阻断电压应高于避雷器保护水平和最小正向紧急触发电压 (BOD), 阀臂的反向非重复阻断电压应高于避雷器保护水平并满足最小绝缘配合裕度要求。此外, 阀应能在晶闸管级保护触发动作时连续运行, 在最大工频过电压, 如交流系统故障后的甩负荷工频过电压下, 阀的保护触发不应因逆变换相暂态过程而动作, 保护触发不应影响此后的直流系统恢复。另外, 在正常控制过程中的触发角快速变化不应引起保护触发动作。

为了换流器的安全可靠运行, 在进行换流阀设计时, 还要考虑元件的故障率和冗余度。根据经验, 每个阀中晶闸管级的冗余数应大于运行周期内晶闸管级损坏数日期期望值的 2.5 倍, 也不应小于阀中晶闸管级总数的 3%。晶闸管级的故障率应包括晶闸管元件故障率及辅助元件 (如阻尼电容器、阻尼电阻器和控制单元) 的故障率。依据工程经验, 晶

闸管换流阀的冗余度不宜小于 1.03，且每阀臂冗余元件不应少于 3 个。

3. 阀的电流性能

晶闸管阀不仅应具有通过负荷额定运行工况、连续过负荷及短时过负荷工况下的直流电流的能力，这是由直流系统正常运行方式所决定的，而且还应具有一定的暂态过电流能力（对晶闸管元件来说，常采用浪涌电流），这是由系统故障条件决定的。

二、其他要求

1. 阀的损耗特性

换流器的损耗是高压直流输电系统性能保证值的重要基础，是评价换流阀性能优劣的重要指标。根据直流输电工程的经验，换流站在额定工况时的损耗约小于传输功率的 1%，而阀的损耗则占全站损耗的 25% 左右。

2. 阀的热性能

换流阀在运行中产生各种损耗，对晶闸管元件的影响就是导致元件结温升高。

晶闸管元件的额定参数主要取决于在元件内产生的热量及元件把内部热量传到外壳的能力，故运行损耗产生的结温升高是晶闸管元件额定参数选择的限制因素，而阀的热力设计就是要将晶闸管的运行结温维持在正常的范围内，需考虑各种稳态和暂态工况、晶闸管结温工作范围、冷却系统设计等多方面因素。

阀的热力强度设计基于阀的额定工作电流、各种过负荷电流及暂态故障电流，前两种电流属于稳态运行工况。在目前制造水平下，晶闸管元件的正常工作结温允许范围是 60 ~ 90℃，因此冷却系统额定容量选择应能满足这一要求。各种暂态故障电流将决定晶闸管元件的最高允许结温。对晶闸管元件来说，换流阀承受故障电流的过程可以假定为一个绝热过程，冷却系统和散热器基本不起作用，此过程表现为晶闸管元件结温的急剧上升。评价阀承受故障电流的能力，主要看故障末期结温以及故障切除后马上承受正向工作电压时的最大结温。要求实际最大结温应小于导致永久损坏晶闸管元件的极限结温，并留有一定裕度。目前国际上的制造水平是：导致永久性损坏的极限结温为 300 ~ 400℃，承受最严重故障电流后的最高结温为 190 ~ 250℃。

一般来说，阀承受故障电流的能力取决于晶闸管元件直径，直径越大，过电流能力越强。例如：三常直流输电工程阀侧最大短路电流约 36kA，要求采用直径 $\phi 125$ 的晶闸管元件，指标高于葛南直流输电工程（14.5kA， $\phi 75$ ）和天广直流输电工程（22.4kA， $\phi 100$ ）。

3. 阀内和元部件的防火特性

换流阀由大量的塑料、合成材料和非导体组成。应当明确，阀内的非金属材料具有很低的可燃性并能自灭，所有的塑料都添加了足够的阻燃剂。在阀内电子电路设备设计时，尽量使用了具有低燃烧特性的元部件。

此外阀厅安装了完善的火灾探测系统和灭火系统，用于早期的火灾报警以及紧急时的灭火。