

特高压直流输电工程换流站设备监造指南

# 晶闸管换流阀

刘泽洪 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压直流输电工程换流站设备监造指南

---

# 晶闸管换流阀

刘泽洪 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

根据特高压直流输电工程换流站主设备的特点,依据特高压最新的标准和规范,为进一步指导特高压换流站主设备的监造工作,在《特高压直流输电工程换流站主设备监造手册》的基础上重新编写了《特高压直流输电工程换流站设备监造指南》(简称《指南》)。

《指南》涵盖《晶闸管换流阀》《平波电抗器》《换流变压器》三个分册。本书为《晶闸管换流阀》分册,包括设备概况、换流阀关键组部件、阀控设备、监造工作实施、设计审核、制造过程、试验、存栈检查以及典型案例共9章。

本书主要适用于从事特高压直流输电工程换流站主设备监造的技术人员和管理人员,也可供相关专业的技术和管理人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

晶闸管换流阀 / 刘泽洪主编. —北京:中国电力出版社, 2016.11

(特高压直流输电工程换流站设备监造指南)

ISBN 978-7-5123-9555-8

I. ①晶… II. ①刘… III. ①晶闸管-换流站-指南 IV. ①TN34-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 167701 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>)

万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.5 印张 181 千字

印数 0001—1000 册 定价 92.00 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

大力开发西部水电、火电资源，实施西电东送，电力南北互供、全国联网，实现全国范围内的能源优化供给，是21世纪中国能源和电力工业建设的基本战略。直流输电具有远距离、大容量输电和电力系统联网的显著优点，在我国西电东送和全国联网工程发挥了举足轻重的作用。我国从20世纪50年代开始进行高压直流输电的技术研发和工程应用。1977年在上海建成了31kV、150A、4.65MW直流输电实验工程。1989年9月建成了成套引进技术和设备的500kV、1200MW、1.2kA，1045km葛洲坝—南桥直流输电工程，这是我国第一个跨大区、跨系统、超高压、大容量、远距离直流输电工程。2010年6月18日，云南—广州±800kV特高压直流输电工程作为世界首个±800kV、3125A高压直流输电工程实现单极投运。2010年7月8日，向家坝—上海±800kV特高压输电试验示范工程建成，这是世界上首条±800kV、6400MW、4000A的特高压直流示范工程，工程线路长达1907km，这标志着我国电力技术、装备制造达到国际先进水平。截至2015年底，国家电网公司已有向家坝—上海、锦屏—苏南、哈密—郑州、溪洛渡—浙江金华四条±800kV特高压直流输电工程投入运行，灵州—绍兴、酒泉—南湖、晋北—南京、锡盟—泰州、上海庙—山东、扎鲁特—青州±800kV特高压直流输电工程和准东—华东±1100kV特高压直流输电工程都正在建设之中。我国的高压直流输电技术蓬勃发展，已经成为直流大国、强国，引领直流技术的发展，处于世界领先水平。

特高压直流输电工程是一项庞大的系统工程，工程所涉及的设备品种繁多、数量巨大，其中换流阀、换流变压器和平波电抗器是构成直流输电回路的最关键、最核心、最重要的一次主设备。由于其交直流整流及逆变换流的功能要求和耐受直流电压等特点，所以其技术要求与交流输电工程的主设备

相比差异很大，甚至完全不同。因此研发、设计、制造出优良品质的换流阀、换流变压器和平波电抗器设备是发展特高压直流技术的重中之重。

我国换流阀制造技术由20世纪80年代开始的“技贸结合、技术引进、联合设计、合作制造”技术路线，发展到现在的自行设计制造、具有自主知识产权的制造技术。电压等级从 $\pm 125\text{kV}$ 提升至 $\pm 1100\text{kV}$ ，从完全引进国外技术逐步发展到完全自主知识产权。在换流阀设备逐步国产化的进程中，换流阀监造行业逐步健全发展，从与国外电力行业咨询公司合作监造起步，不断地积累经验，不断地摸索，逐步发展到独立地开展换流阀设备从设计审查、制造过程、试验以及存栈全过程监造。

随着近年来电压等级输送容量的不断提高，元器件的国产化率不断提高，尤其是核心元器件如大功率晶闸管、晶闸管级、阀控电子控保设备的国产化，在取得成果的同时，换流阀在设计、制造、试验过程中出现了一些新的问题，换流阀监造的范围、深度也不断扩大延伸；同时，监造工作也积累了一些新的经验，取得了一些新的成果。为此，特将经验与成果汇编成册，供换流阀监造人员参考。

《特高压直流输电工程换流站设备监造指南》共分三个分册，分别为《晶闸管换流阀》、《平波电抗器》、《换流变压器》。本书为《晶闸管换流阀》分册，主要内容包括设备概况、换流阀关键组部件、阀控设备、监造工作实施、设计审核、制造过程、试验、存栈检查和典型案例。

由于时间仓促，疏漏和不足之处在所难免，恳请专家和读者批评指正，以便对书中内容不断完善。

编者

2016年2月

## 前言

<b>1 设备概况</b>	<b>1</b>
1.1 换流阀结构	1
1.2 换流阀控制系统	5
1.3 换流原理	7
1.4 主要技术要求	13
<b>2 换流阀关键组部件</b>	<b>19</b>
2.1 晶闸管	19
2.2 阳极饱和电抗器	32
2.3 散热器	34
2.4 阻尼、均压回路元件	36
2.5 避雷器	39
2.6 光纤及附件	40
2.7 机械结构件	43
2.8 阀冷系统设备	45
<b>3 阀控设备</b>	<b>51</b>
3.1 分层控制原理	51
3.2 阀基电子设备	53
3.3 晶闸管级控制板	57

<b>4</b>	<b>监造工作实施</b>	<b>59</b>
4.1	工程及设备信息	59
4.2	监造依据及流程	60
4.3	监造前期工作	64
4.4	生产过程监造	65
4.5	监造信息	66
4.6	监造后期工作	68
<b>5</b>	<b>设计审核</b>	<b>69</b>
5.1	主要参数审核	69
5.2	图纸审查	72
5.3	元器件	72
5.4	设计报告/计算书	73
5.5	触发系统	74
5.6	控制、监视与保护	75
5.7	冷却系统	75
5.8	防火核查	76
5.9	检修要求	78
5.10	试验	78
5.11	设计评价	79
5.12	生产计划审查	79
<b>6</b>	<b>制造过程</b>	<b>80</b>
6.1	作业环境检查	80
6.2	质量控制程序检查	81
6.3	工装设备	82
6.4	原材料、零部件的验收	83
6.5	组装	90

<b>7</b>	<b>试验</b>	<b>94</b>
7.1	例行试验	94
7.2	型式试验	96
7.3	水冷系统整机出厂设备联调试验	112
<b>8</b>	<b>存栈检查</b>	<b>115</b>
8.1	装运前的最终质量文件审查	115
8.2	包装、存栈	115
<b>9</b>	<b>典型案例</b>	<b>117</b>
9.1	产品设计问题	117
9.2	阀组件问题	121
9.3	制造工艺问题	137
9.4	试验问题	139
附录 A	换流阀原材料和组部件监造见证方式	141
附录 B	晶闸管换流阀生产过程监造见证方式	145
附录 C	监造资料及信息报表	151
附录 D	换流阀现场监造记录	162
附录 E	见证情况表格式	165
附录 F	监造组应具备的法规及标准目录	172



# 设备概况

换流阀是高压直流系统的核心设备，其主要功能是把交流转换成直流或实现逆变换。直流输电中使用最广泛的是晶闸管换流阀，晶闸管的触发方式有电触发和光触发两种，多数直流工程采用电触发晶闸管。向上工程、锦苏工程等特高压直流输电工程直流电流提高到 4kA 以上，采用的晶闸管元件均为 6 英寸电触发晶闸管。

## 1.1 换流阀结构

直流输电换流阀采用的基本换流单元有 6 脉动换流单元和 12 脉动换流单元两种，主要区别在于前者采用 6 脉动换流阀（三相桥式换流回路），后者采用 12 脉动换流阀（由两个交流侧电压相差  $30^\circ$  的 6 脉动换流阀所组成）。实际直流输电工程中绝大多数采用 12 脉动换流阀作为基本换流单元。由于晶闸管换流阀可以方便地利用不同的晶闸管串联，而得到不同的换流阀电压，从而可得到不同电压的 12 脉动换流阀。此时换流站交流滤波器和直流滤波器只需按 12 脉动换流阀的要求来配备，这样能大大简化滤波装置，减小换流站占地面积，降低换流站造价。

(1) 6 脉动换流单元。6 脉动换流单元由换流变压器、6 脉动换流阀以及相应的交流滤波器、直流滤波器和控制保护装置所组成。

6 脉动换流阀在交流侧和直流侧分别产生  $(6K \pm 1)$  次和  $6K$  次的特征谐波 ( $K$  为正整数)，因此，在交流侧需要配备  $(6K \pm 1)$  次的交流滤波器，而在直流侧除配备平波电抗器以外，对架空线路来说通常还需要配备  $6K$  次的直流滤波器，还有相应的交、直流避雷器和交、直流开关设备以及测量设备等。

(2) 12 脉动换流单元。12 脉动换流单元是由两个交流侧电压相位差  $30^\circ$  的 6 脉动换流单元在直流侧串联在交流侧并联所组成。

12 脉动换流阀在交流侧和直流侧分别产生  $(12K \pm 1)$  次和  $12K$  次的特征谐波。因此，在交流侧和直流侧只需分别配备  $(12K \pm 1)$  次和  $12K$  的滤波器，从而可简化滤波装置，缩小占地面积，降低换流站造价。这是选择 12 脉动换流单元作为基本换流单元的主要原因。12 脉动换流单元除上述的主要设备外，还有相应的交、直流避雷器和交、直流开关以及测量设备等。

(3) 换流阀（阀塔）的总体结构。

1) 对于常规直流输电工程，每个换流站中每极由 1 个 12 脉动换流器构成。对于特高压直流输电工程，我国目前采用每极由 2 个 12 脉动换流器串联构成。每个 6 脉动换流器由 6 个换流阀组成，换流阀的结构包括晶闸管级、阀组件阀模块及相关的均压阻尼和冷却部件。工程中或由一个 6 脉动换流器的 2 个同相阀组成两重阀结构（见图 1-1），或由一个 12 脉动换流器的 4 个同相阀组成四重阀结构。

换流阀单阀一般由两个换流阀组件（阀层）组成，每个组件由两个或四个阀段组成。换流阀组件主要包括框架、晶闸管阀段、电容单元、电阻单元、晶闸管控制单元、电抗器、导线连接、水管连接等。阀模块基本结构如图 1-2 所示。

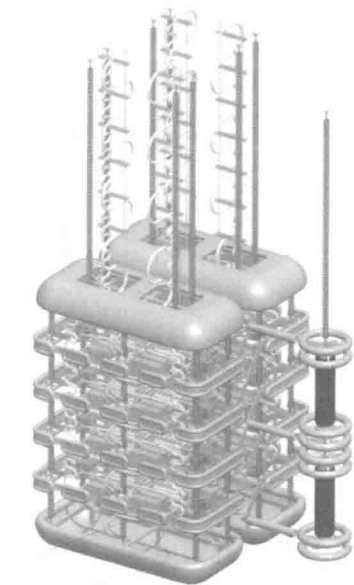


图 1-1 换流阀塔结构示意图

结构如图 1-2 所示。

晶闸管阀段是由 7~8 个晶闸管元件及其散热器通过专用的安装工具压装在一起的，并通过 EPGC 环氧板固定。压紧力应足够大，以保证良好的电气性能和导热性能。散热器与晶闸管的接触面使用高导热性材料，能保证良好的散热接触。紧固拉带应有足够的绝缘强度来承受阀关断期间的电压应力。这种压装结构使得在不需断开电气连接及冷却水管路连接的情况下就可以更换晶闸管。通过专用工具可以很轻松地更换损坏的晶闸管元件，迅速完成直流换流阀

维护期间的维修任务。晶闸管阀段示意图如图 1-3 所示。

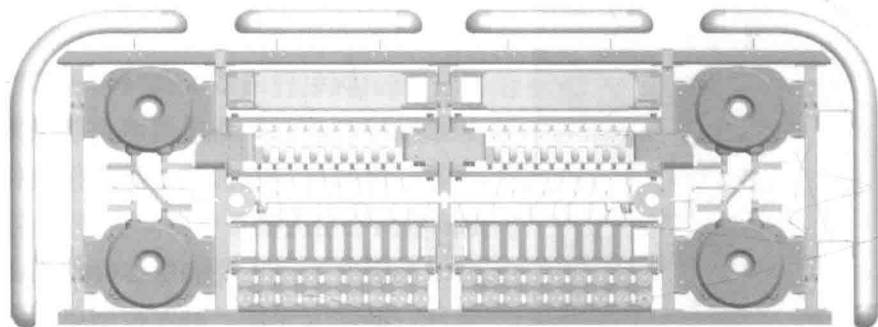


图 1-2 阀模块基本结构

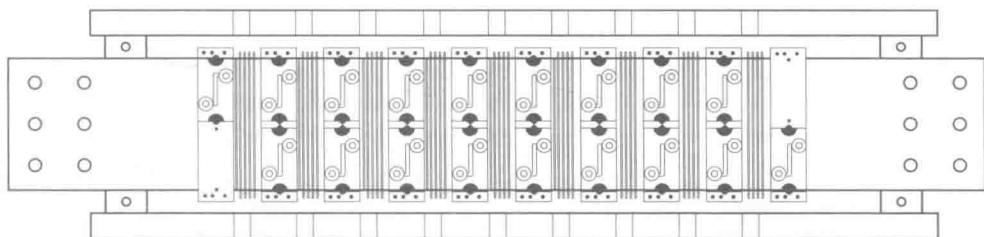


图 1-3 晶闸管阀段示意图

2) 换流阀采用空气绝缘、水冷却、悬吊式结构。阀塔的悬吊部分采用标准的绝缘子和调节螺杆将阀塔和避雷器悬挂于阀厅顶部的钢梁上，为便于安装，阀体的悬吊高低位置可以通过调节螺杆来调整。悬吊设计考虑到地震的特殊要求，对所有动态和静态条件都有良好的承受能力。

3) 换流阀设计充分考虑了阀体的防火性能，换流阀组件装备有阻燃隔板，结构全部选用低可燃性和自熄灭特性的材料。

(4) 特高压换流阀结构。典型的 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流工程换流阀采用空气绝缘、水冷却、悬吊式结构，单极每端包括两个串联的 12 脉动桥。每个 12 脉动桥额定电压是  $400\text{kV}$ ，由两个串联的 6 脉动桥组成。每个 6 脉动桥换流阀为双重阀结构，双重阀悬吊于阀厅顶部。每个特高压换流站共需要 24 个双重阀，



图 1-4 ±800kV、4000A 双重阀阀塔

其中, 12 个布置在高压阀厅内, 12 个布置在低压阀厅内。 $\pm 800\text{kV}$ 、4000A 双重阀阀塔如图 1-4 所示。

每个双重阀的阀臂由数个阀组件构成。每个阀组件由多个晶闸管和紧靠他们的触发控制单元、均压回路及阳极饱和电抗器等组装在一起构成, 阀组件结构示意图如图 1-5 所示。

阀组件中最主要的工作元件是晶闸管元件, 晶闸管元件、触发控制单元、阻尼回路一起组成晶闸管级。晶闸管级是换流阀最基本的功能单元, 典型的晶闸管级示意图如图 1-6 所示。

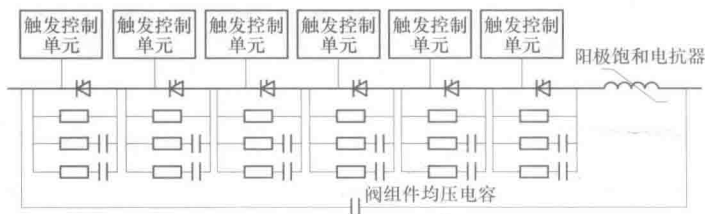


图 1-5 阀组件结构示意图

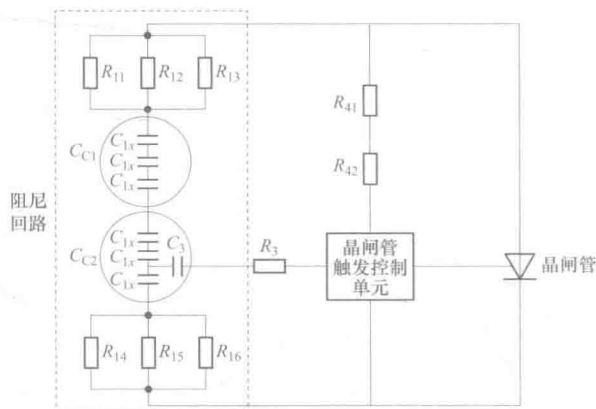


图 1-6 晶闸管级示意图

## 1.2 换流阀控制系统

换流阀控制系统是换流阀的重要组成部分，主要功能是执行直流控制保护系统的触发脉冲指令，同时监控换流阀设备运行工况，保护设备安全运行。

(1) 阀基电子设备。阀基电子设备在高压直流输电工程中连接上层控制保护系统和换流阀的中间设备，可以看作是上层控制保护系统的快速远程 I/O 终端；根据上层控制保护系统的命令触发换流阀，并且根据所监测的换流阀运行状态信息，对换流阀进行相应的保护。阀基电子设备原理图如图 1-7 所示。

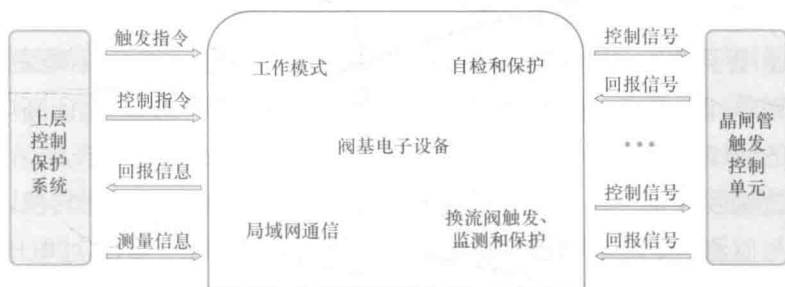


图 1-7 阀基电子设备原理图

在直流输电系统正常投入运行或者系统试验需要时，阀基电子设备根据上层控制保护系统解锁换流阀，接收上层控制保护系统下发的换流阀触发指令，并对该指令进行解码和重新编码后发送至位于换流阀上的晶闸管触发监测单元。直流输电系统正常或者故障停运时，阀基电子设备按照上层控制保护系统进行换流阀闭锁和投旁通对操作，闭锁换流阀后，停止向换流阀发送触发脉冲；投旁通对时向上层控制保护系统选定的单阀发送触发脉冲。

当换流变压器充电，并且换流变压器阀侧电压满足换流阀晶闸管触发监测单元取能要求后，阀基电子设备实时监测换流阀每个晶闸管级的运行状态。当检测到异常状态时，采取相应的保护措施。除了监测晶闸管的运行状态信息，阀基电子设备还可监测阀避雷器动作状态和阀塔漏水状态，但此两项功能作为辅助功能，有时不包括在阀基电子设备的监测范围内。

阀基电子设备为完全独立的双冗余系统，一套处于运行状态，另一套处于热备用状态。阀基电子设备应具有完善的自检和保护功能。阀基电子设备通常

还具备多种工作模式，如上电预循检、单级测试、低压加压和正常工作模式等。

换流阀晶闸管的触发方式有光直接触发式和电触发式，相应的阀基电子设备也因此分为两种。两种阀基电子设备的主要区别是传输的光功率不同。光直接触发式换流阀的阀基电子设备传输光信号功率较大，此光信号经过分光器分光后直接触发晶闸管；电触发式换流阀的阀基电子设备传输光信号功率较小，晶闸管触发监测单元收到此信号后，进行光电转换并放大处理后触发晶闸管。

(2) 晶闸管触发控制单元。晶闸管触发控制单元在高压直流输电工程中位于高电位的换流阀每个晶闸管级，能按照阀基电子设备命令提供足够陡度和幅度的能量触发晶闸管，使晶闸管可靠导通；在晶闸管出现各种异常电压时，能够保护触发晶闸管，以免使晶闸管损坏；并将晶闸管状态及保护触发信号实时传送至阀基电子设备，阀基电子设备根据其回传的信号实现换流阀保护。晶闸管触发控制单元与阀基电子设备之间采用光纤进行信息传输，保证高电位与地电位之间的绝缘强度。换流阀触发控制单元原理图如图 1-8 所示。

晶闸管触发控制单元主要功能包括取能与储能，光电和电光转换，晶闸管正常触发与监测，晶闸管正常触发与监测，电流断续保护触发，反向恢复保护触发，正向过电压和  $dv/dr$  保护等。

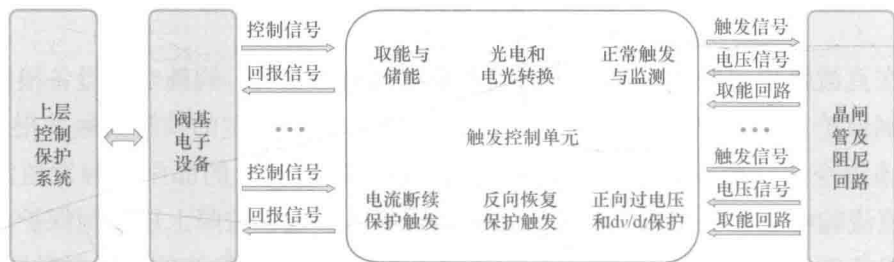


图 1-8 换流阀触发控制单元原理图

随着电子信息科学的快速发展，晶闸管触发控制单元从数字模拟混合电路发展成现在的大规模集成电路，集成度越来越高，可靠性也越来越高。未来正朝着智能化方向发展，智能化晶闸管触发控制单元的优势在于：① 能够预测晶闸管级所有元件故障，使换流阀计划检修时间延长，简化和减少计划检修次数；② 非计划检修可提前；③ 降低综合造价；④ 增强换流阀可靠性。

(3) 阀触发系统。换流阀触发系统包含在上层控制保护系统中，向阀基电子设备发出一定波形和一定相位，并满足其他要求的门极触发脉冲，对换流阀

的触发开通时刻（相位）进行控制，以实现直流输电系统的电流、电压及功率的控制。触发系统包括从控制装置输出到各个晶闸管元件门极为止的全部电路和装置，为了保证安全导通，晶闸管换流阀的触发系统必须满足的要求包括① 控制系统发出的触发指令必须传递到不同高电位下的每个晶闸管级；② 在晶闸管所处的电位下，须有足够的能量来产生触发脉冲；③ 所有晶闸管必须同时接收到触发脉冲。

阀的触发方式主要有光电转换触发和光直接触发两种。光电转换触发是目前使用最普遍的触发方式，光电转换触发是把来自阀控制系统的触发信号转换为光信号，通过光缆传递到每个晶闸管级，在门极控制单元把光信号转换成电信号，经放大后触发晶闸管元件。

光直接触发是换流阀的另一种触发方式，其工作原理是在晶闸管元件门极区周围，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触发。与光电转换触发方式相比，光直接触发省去了控制单元的光电转换、放大环节电路，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。

### 1.3 换流原理

晶闸管换流阀作为换流站进行换流的关键设备，除了具有整流和逆变的功能外，在整流站还具有开关功能，可利用其快速可控性对直流输电的启动和停运进行快速操作。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。

换流阀通常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。阀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。

（1）整流器换流原理。单桥整流器的原理接线如图 1-9 所示，图 1-10 给

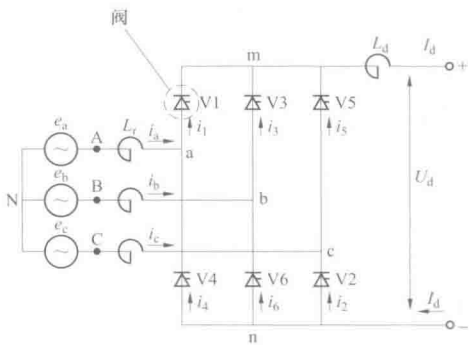


图 1-9 6 脉动整流器原理接线图

出整流器主要各点的电压和电流波形。

6 脉动整流器是通过换流阀三相桥式连接的 6 个桥臂（阀）按 V1~V6 顺序通断，将交流电变为直流电，数字 1~6 为阀的导通序号。通常每个阀由多个晶闸管元件串联构成，具有晶闸管的特点且满足直流电压的设计要求。图 1-9 中  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为等值交流系统工频基波正弦相电动势（通常由换流变压器提供）， $L_r$  为每相等值换相电抗（主要为换流变压器的漏抗）的电感， $L_d$  为平波电抗器的电感。等值交流系统的线电压  $e_{ac}$ 、 $e_{bc}$ 、 $e_{ba}$ 、 $e_{ca}$ 、 $e_{cb}$ 、 $e_{ab}$  为阀的换相电压。规定换相电压由负变正的过零点为阀触发角  $\alpha$  的计时起点。在理想条件下，三相交流系统对称，6 个阀的触发角相等且等距，触发脉冲间距为  $60^\circ$ 。

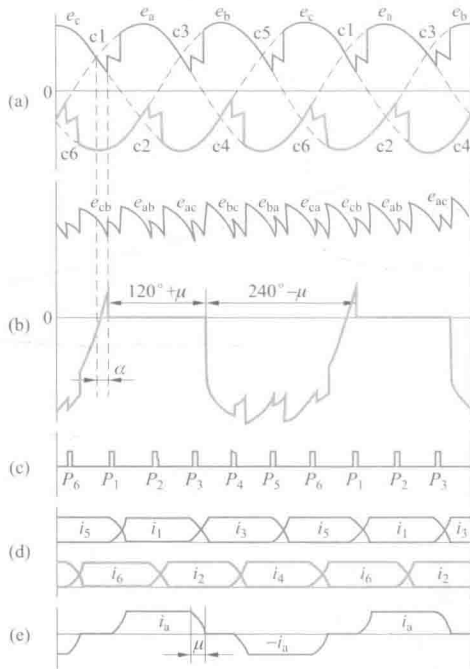


图 1-10 整流器的电压和电流波形

- (a) 交流电动势和直流侧 m 和 n 点对中性点的电压波形；(b) 直流电压和阀 1 上的电压波形；  
(c) 触发脉冲的顺序和相位；(d) 阀电流波形；(e) 交流侧 A 相电流波形



换相电压为正半波(  $\alpha=0^\circ \sim 180^\circ$  )的区间是阀具备正向导通条件的区域, 所加触发脉冲的时刻(  $\alpha$ 角)即为阀的导通时刻。对于整流器而言,  $\alpha=0^\circ \sim 90^\circ$  (不含  $90^\circ$  时), 换流器输出的直流电压为正。在一个工频周期内, 共阳极组( V2、V4、V6)和共阴极组( V1、V3、V5)中各有一个非同相的阀导通, 将流入整流器的交流电流送入直流回路形成直流电流。

以 V1 向 V3 换相为例说明换相的过程: 一旦 V3 导通, 换流变压器的 A 相和 B 相通过 V1 和 V3 形成两相短路, 此时 V3 中的电流为两相短路电流, 从零开始升高; 在 V1 中由于两相短路电流的方向与原 V1 中的电流方向相反, 流经他的电流为两相短路电流与原电流之差值, 当两相短路电流等于原电流时, 流经他的电流为零, 则 V1 关断, 全部直流电流流过 V3, 换相过程结束。由于阀电流的回路中存在电感, 因此导通和关断的两阀电流不能突变, 换相所需的时间用换相角  $\mu$  表示。6 脉动整流器在正常运行时, 其两端的直流电压平均值  $U_{d1}$  可用式 (1-1) 表示

$$\begin{aligned} U_{d1} &= U_{d101} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{r1} I_d = U_{d101} \cos \alpha - d_{r1} I_d \\ U_{d101} &= 1.35 U_1 \\ d_{r1} &= \frac{3}{\pi} X_{r1} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中  $U_{d101}$  ——整流器理想空载直流电压, kV;

$U_1$  ——整流侧换流变压器阀侧线电压有效值, kV;

$\alpha$  ——整流器触发角, ( $^\circ$ );

$I_d$  ——直流电流, kA;

$X_{r1}$  ——整流器等值换相电抗,  $\Omega$ ;

$d_{r1}$  ——比换相压降, 即 1 个单位直流电流在换相过程中引起的直流电压降,  $\Omega$ 。

式 (1-1) 表示整流器的直流电压和直流电流的关系, 也称为整流器的伏安特性。

换相角  $\mu$  是换流器的一个重要参数, 直接影响换流器的无功和谐波性能。整流器的换相角  $\mu_1$  为

$$\mu_1 = \cos^{-1} \left( \cos \alpha - \frac{2 X_{r1} I_d}{\sqrt{2} U_1} \right) - \alpha \quad (1-2)$$