


德阳换流站

——换流站运维管理

DEYANG HUANYI ZHAN YUNWEI GUANLI

国网四川检修公司特高压交直流运检中心 / 编

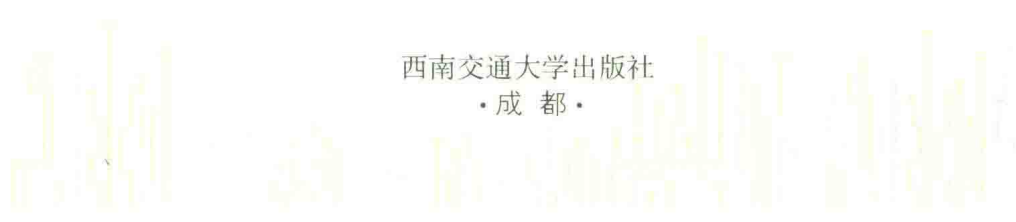


德阳换流站

—— 换流站运维管理

国网四川检修公司特高压交直流运检中心 编

西南交通大学出版社
· 成 都 ·



图书在版编目 (C I P) 数据

德阳换流站: 换流站运维管理 / 国网四川检修公司
特高压交直流运检中心编. — 成都: 西南交通大学出版
社, 2016.11

ISBN 978-7-5643-5137-3

I . ①德… II . ①国… III . ①换流站 - 管理 IV .
① TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 276379 号

德阳换流站

——换流站运维管理

国网四川检修公司特高压交直流运检中心 编

责任编辑	李芳芳
助理编辑	张文越
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川玖艺呈现印刷有限公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	12.75
字 数	258 千
版 次	2016 年 11 月第 1 版
印 次	2016 年 11 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5137-3
定 价	69.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

直流输电承担着大型能源基地电力外送和跨大区联网的重任，是实现资源优化配置的重要手段，同时关系着大电网能否安全稳定运行。直流输电对确保电网长期安全可靠运行意义重大。

为了满足高压直流输电对人才的需求，提高培训工作的系统性和针对性，加快人才培养速度，国家电网四川检修公司组织特高压交直流运检中心运行维护人员编写了《德阳换流站》一书，本书参考了设备厂家说明书、现场运行规程，并总结了实际运维经验，内容涵盖了直流输电的基本原理、换流站主设备及接线方式、控制保护、换流阀及水冷系统，特别是对换流站现场运维技能及典型故障进行了详细描述，编写力求准确、清晰，面向生产一线，突出现场实用性。

本书由丁志林担任主编，李贤庆、彭东担任副主编。

其中第一章，第二章的第一、二、三节，第七章的第三、四和五节由邱大强编写；第三章，第七章的第一、二节由郑希云编写；第四章由涂志波编写；第二章的第四节，第八章的第一、二节由刘俊丽编写；第五章、第六章、第八章的第三节由段涛编写。孙永亮、吴喜红、沙胜、李文泉、柳松延等参与了本书的文字校对工作。

本书在编写过程中得到公司各部门的大力支持，同时也得到德阳换流站其他同事的鼎力相助，特在此表示感谢。由于编者水平和经验有限，书中难免有疏漏之处，望广大读者批评指正。

编者

2016年8月

CONTENTS | 目 录

01	第 1 章	直流输电系统概况	001
	1.1	国外直流输电系统发展	001
	1.2	国内直流输电系统发展	002
	1.3	直流输电系统结构及其优缺点	003
02	第 2 章	直流输电系统原理及典型运行方式	007
	2.1	换流原理分析	007
	2.2	换流站典型接线	014
	2.3	接地极	018
	2.4	换流站典型运行方式	019
03	第 3 章	德阳换流站一次主设备	023
	3.1	换流变压器	023
	3.2	换流阀	031
	3.3	平波电抗器	031
	3.4	直流滤波器	035
	3.5	断路器	035
	3.6	隔离开关、接地刀闸	041
	3.7	电流互感器	043
	3.8	电压互感器	047
	3.9	交流滤波器	050
	3.10	避雷器	052

04	第 4 章 德阳换流站二次设备	054
	4.1 交流继电保护系统	054
	4.2 直流控制系统	063
	4.3 直流保护系统	072
	4.4 直流控制和保护系统工程实现	073
05	第 5 章 换流阀及阀控系统	103
	5.1 晶闸管换流阀性能概述	104
	5.2 换流阀阀塔结构	108
	5.3 换流阀阀控系统	116
06	第 6 章 阀水冷系统	127
	6.1 阀内水冷系统	127
	6.2 阀外水冷系统	138
07	第 7 章 德阳换流站辅助系统	147
	7.1 站用电系统	147
	7.2 站用电直流系统	150
	7.3 工业水系统	151
	7.4 空调系统	151
	7.5 消防系统	152
08	第 8 章 德阳换流站运维检修管理	155
	8.1 调度管理	155
	8.2 运维管理	160
	8.3 检修管理	165
	8.4 德阳换流站故障处理	173
	参考文献	198

第1章 直流输电系统概况

直流输电工程是以直流电的方式实现电能输送的工程。在进行远距离、大容量输电时，它能够实现不同额定频率交流系统的互联，提高交流系统互为备用和紧急情况下系统相互支援的能力。我国幅员广大，土地辽阔、沿海岛屿星罗棋布，我国水力资源主要分布在西南地区，煤炭资源70%集中在山西和内蒙古，而工业负荷却集中在沿海地区，因此直流输电有着广阔的发展前景。

1.1 国外直流输电系统发展

电力传输首先是从直流电开始，最早的直流输电是用直流发电机直接向负荷供电。1882年法国物理学家德普勒用装设在米斯巴赫煤矿中的直流发电机，以1.5~2.0 kV电压，沿着57 km的电报线路，把电力输送到在慕尼黑举办的国际展览会上，完成了人类有史以来的第一次直流输电试验。

由于科学技术和工业生产发展的需要，使得社会对电力的需求也急剧增大。由于用户的电压不能太高，因此要提高输送的功率就要加大电流。电流越大，输电线路发热就越厉害，损失的功率就越多；而且电流大，损失在输电导线上的电压也大，用户得到的电压就会降低，离发电站越远的用户得到的电压也就越低。直流输电的弊端限制了电力的应用，这促使人们探讨用交流输电的问题。1889年在法国通过用直流发电机串联得到高电压，如从毛梯埃斯(Mouties)到里昂(Lyon)的125 kV, 20 MW, 230 km的直流输电工程等。由于不能直接给直流电升压，进一步提高大功率发电机的额定电压又存在着绝缘等一系列技术难题，使得输电距离受到极大的限制，不能满足输送容量增长和输电距离增加的要求。高电压大容量直流电机的换向有困难，运行方式复杂，可靠性差，所以直流输电没有得到进一步的发展。与此同时，交流发电机、变压器和感应电动机的快速发展使得交流电的发电、变电、输送、分配和使用都很方便、经济、安全和可靠，因此交流

电几乎完全代替直流电并发展成为今天的规模巨大的电力系统。

20 世纪 50 年代，电力需求增长很快，随着电力系统的大规模发展，输电功率和输电距离进一步增加，交流输电也遇到了一系列不可克服的技术难题，其局限性在生产实践中表现得特别明显。此时，大功率电力电子技术的研究成功为高压直流输电突破了早期直流技术的壁垒，于是直流输电技术又重新为人们所重视。从 1954 年世界上第一项直流输电工程在瑞典投入商业运行以来，高压直流输电技术已经在远距离大容量输电、海底电缆送电、电力系统非同步互联等领域得到了广泛的应用。

换流器作为直流输电系统最核心的设备，其技术发展直接决定了直流输电的发展进程，根据换流器的发展进程可以将直流输电系统的发展分为以下几个时期：

(1) 汞弧阀换流时期：1901 年发明的汞弧整流管只能用于整流，不能逆变。1928 年研制成功了具有栅极控制能力的汞弧阀，它不但可用于整流，而且还可以进行逆变。大功率汞弧阀的问世使直流输电成为现实。但是，汞弧阀制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率高、可靠性较低、运行维护不便等因素，使直流输电的发展受到限制。

(2) 晶闸管阀换流时期：20 世纪 70 年代以后，电力电子技术和微电子技术的迅速发展，高压大功率晶闸管的问世，晶闸管换流阀和微机控制技术在直流输电工程中的应用，这些进步有力地促进了直流输电技术的发展。晶闸管换流阀不存在逆弧问题，而且制造、试验、运行维护和检修都比汞弧阀更加简单和方便。晶闸管换流阀比汞弧阀更有明显的优势，之后修建的直流工程均采用晶闸管换流阀。

(3) 新型半导体换流设备的应用：20 世纪 90 年代以后，新型氧化物半导体器件——绝缘栅双极晶体管（IGBT）得到广泛的应用。由于 IGBT 单个元件的功率小、损耗大，不利于大型直流输电工程采用。随后又成功研制出集成门极换相晶闸管（IGCT）和大功率碳化硅元件，该元件电压高、通流能力大、损耗低、体积小、可靠性高，并具有自关断能力。

1.2 国内直流输电系统发展

我国最早的直流输电工程是葛洲坝至上海 ± 500 kV 的双极直流输电工程。该工程在 1990 年投运，额定容量为 1200 MW，输送直流电流为 1200 A，输电距离为 1045.7 km；其中，葛洲坝为整流站，上海是逆变站。2009 年为 800 kV 特高压直流输电示范工程年，四川向家坝至上海带电调试成功，额定容量为 6400 MW，线路全长 1907 km，该工程标志着我国特高压直流输电技术正式商业使用。目前我国主要的直流输电工程如表 1-1 所示。

表 1-1 我国直流输电工程

序号	工程名称	额定电压 /kV	额定容量 /MW	时间
1	葛南直流输电工程	± 500	1200	1989
2	天广直流输电工程	± 500	1800	2000
3	龙政直流输电工程	± 500	3000	2003
4	江城直流输电工程	± 500	3000	2004
5	三广直流输电工程	± 500	3000	2004
6	贵广 I 直流输电工程	± 500	3000	2004
7	贵广 II 直流输电工程	± 500	3000	2004
8	灵宝背靠背直流工程	± 120	360	2005
9	宜华直流输电工程	± 500	3000	2006
10	高岭背靠背直流工程	± 125	750	2008
11	伊穆直流输电工程	± 500	3000	2010
12	德宝直流输电工程	± 500	3000	2010
13	± 800 kV 复奉直流输电工程	± 800	6400	2010
14	云广直流输电工程	± 800	5000	2010
15	林枫直流输电工程	± 500	3000	2011
16	银东直流输电工程	± 660	4000	2011
17	柴拉直流输电工程	± 400	600	2012
18	± 800 kV 锦苏特高压直流工程	± 800	7200	2012
19	黑河背靠背输电工程	± 125	750	2012
20	± 800 kV 天中直流输电工程直流工程	± 800	8000	2014
21	± 800 kV 宾金特高压直流输电工程	± 800	8000	2014
22	普侨直流输电工程	± 800	5000	2015
23	牛从直流输电工程	± 500	6400 (双回容量)	2015
24	金中直流输电工程	± 500	3200	2016
25	永富直流输电工程	± 500	3000	2016

1.3 直流输电系统结构及其优缺点

1.3.1 直流输电系统结构

直流输电系统的结构可以分为双端系统和多端系统两类。目前国内外实际运营的直流输电系统大多为双端系统，其结构如图 1-1 所示。

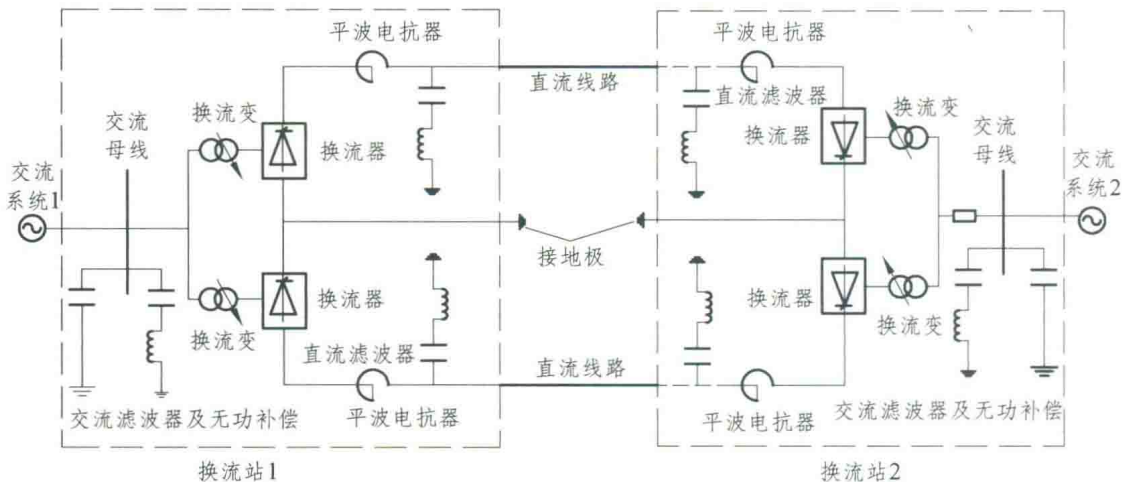


图 1-1 直流输电系统结构

一个完整的直流输电系统主要由三部分组成：换流站 1、直流输电线路和换流站 2。其中，换流站 1 和换流站 2 的直流场设备种类和布局基本一样，交流场则根据交流进线和出线的线路多少略有不同。每个换流站均可以运行在整流和逆变工况下。系统正常运行时，换流 1、2 系统根据潮流传输方向不同而分别运行在不同的整流和逆变方式下。换流站主要由以下设备构成：

(1) 交流场：换流站的交流场与一般 500 kV 变电站布局基本相同，它主要是为换流器输送和接受电能。

(2) 交流滤波器：由于换流器在换流时会产生大量的谐波电压和谐波电流并且吸收大量的无功功率，因此换流站通过交流滤波器滤除换流器产生的谐波并补偿换流器消耗的无功功率。在强交流系统中通常采用并联电容形式的补偿。

(3) 换流变压器：主要为换流器提供合适的交流电压。

(4) 换流器：主要完成“交 - 直”和“直 - 交”的电能转换。

(5) 平波电抗器：它具有高达 1.0H 的电感值，被串联在换流器的直流侧，主要有以下作用：

- ① 降低直流线路中的谐波电压和电流；
- ② 防止换流器换相失败；
- ③ 防止轻负荷时电流不连续；
- ④ 限制直流线路短路期间整流器中的峰值电流。

(6) 直流滤波器：换流器在直流侧产生大量的谐波电压和谐波电流，这些谐波可能导致电容器和附近的电机过热，并且干扰远动通信系统。因此，在直流侧都装有滤波装置。

(7) 接地极：大多数的直流联络线设计采用大地作为中性导线，至少在较短的一段时间内是

这样。与大地相连接的导体需要有较大的表面积，以便使电流密度和表面电压梯度最小，这个导体被称为电极。如前所述，如果必须限制流经大地的电流，可以用金属性回路的导体作为直流线路的一部分。

(8) 直流输电线：它们可以是架空线，也可以是电缆。除了导体数和间距的要求有差异外，直流线路与交流线路十分相似。

为了保证系统功率的平衡，无论是双端系统还是多端系统，其中必须有一个换流站采用定直流电压控制模式，而其他换流站的工作模式可因应用场合的不同而有不同选择。双端的直流输电系统中一旦有一个换流站因故障而退出运行时，整个直流输电系统都将停止运行，严重时将影响电网的正常运行。

1.3.2 直流输电系统的优缺点

目前主要采用高压直流进行长距离、大容量输电线路和大区电网间的互联。在进行输电线路建设时，线路的经济性和对环境的影响是主要考虑的对象，互联线路则需要把整个电网的稳定放在首位。与交流输电相比较，直流输电具有下列优点。

1. 经济性

首先，线路造价低，节省电缆费用。直流输电只需两根导线，若采用大地或海水作回路只用一根导线，能够节省大量线路投资，因此电缆费用省得多。其次，运行电能损耗小，传输节能效果显著。直流输电导线根数少，电阻发热损耗小，没有感抗和容抗的无功损耗，且传输功率的增加使单位损耗降低，大大提高了电力传输中的节能效果。最后，线路走廊窄，节省征地费用。以同级 500 kV 电压为例，直流线路走廊宽仅 40 m，对于数百千米或数千千米的输电线路来说，其节约的土地量是很可观的。

2. 可以实现异步联网

交流输电系统中，所有连接在电力系统中的同步发电机必须保持同步运行。由于交流系统具有电抗，输送的功率有一定的极限，当系统受到某种扰动时，有可能使线路上的输送功率超过它的极限。这时，送端的发电机和受端的发电机可能失去同步而造成系统的解列。当采用直流系统连接两个交流系统时，频率不同或相同的交流系统可以通过直流输电或“交流-直流-交流”的“背靠背”换流站实现异步联网运行，既得到联网运行的经济效益，又避免交流联网在发生事故时的相互影响，不存在同步的问题。

换流站能够方便、快速地调节有功功率和实现潮流翻转，不仅在正常运行时保证稳定地输出

功率，而且在事故情况下，可通过正常的交流系统一侧由直流线路对另一侧事故系统进行支援，从而提高系统运行的可靠性。当直流输电系统的一极出现故障，另一极仍能以大地或水为回路，继续输送一半的功率，提高了运行的可靠性。

在进行海底输电时，由于海底输电必须采用电缆。电缆线路的电容比架空线路大得多，较长的海底电缆交流输电很难实现，而采用直流电缆线路就比较容易。

直流输电与交流输电相比，有如下缺点：

(1) 与直流输电线路经济优越性相对的是，换流站内的换流装置昂贵，抵消了一部分在架空线路上所节约的成本。同时，换流装置要消耗大量的无功功率。

(2) 直流输电换流器需要消耗一定的无功功率，一般情况下约为直流输送功率的50%~60%。因此，换流站的交流侧需要安装一定数量的无功补偿设备，一般由具有电容性的交流滤波器提供无功功率。

(3) 直流输电线路难以引出分支线路，绝大部分只用于端对端送电，而交流输电工程只要存在变电站，就可以在变电站中引出出线供给当地电力供应，相对而言直流工程在灵活性上有所欠缺。

(4) 换流器运行时在交流侧和直流侧都将产生谐波电流和电压，使电容器和发电机过热，换流器控制不稳定，对通信系统产生干扰。一般在交流侧安装滤波器限制谐波影响。直流线路在运行时，导线周围空间产生离子场，线下合成场强对体会产生影响。线路和换流站设备产生的无线电会对无线电通信产生干扰，产生的噪声会使附近的居民以及换流站的工作人员受到伤害。接地极附近地下（或海水中）的直流电流对金属构件、管道、电缆等埋设物有腐蚀作用；地中直流电流通过中性点接地变压器使变压器直流偏磁，产生局部过热、振动、噪声等；以海水作为回路时，会对通信系统和航海磁性罗盘产生干扰。

第2章 直流输电系统原理及典型运行方式

本章将主要分析换流器的工作原理、系统的结构以及系统的数学模型，并通过分析整流后的波形来阐述换流器的开通和关断顺序，进一步帮助大家理解换流器的实际工作情况。同时，文中还介绍了换流站主设备接线和换流站运行方式，通过这些介绍进一步加深读者对换流站的认识。

2.1 换流原理分析

2.1.1 换流阀特性

高压直流系统的换流阀由多个单阀组成，单阀则由多个阀组件组成，每个阀组件又由多个晶闸管（Thyristor）串联组成。晶闸管作为换流阀的最小单元，其结构为PNPN四层半导体结构，它有三个极：阳极、阴极和门极。晶闸管具有硅整流器件的特性，能在高电压、大电流条件下工作，且其工作过程可以控制，故被广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等电子电路中。

晶闸管在工作过程中，它的阳极（正极：A）和阴极（负极：K）与电源和负载连接，组成晶闸管的主电路，晶闸管的门极G和阴极K与控制晶闸管的装置连接，组成晶闸管的控制电路。晶闸管特性曲线如图2-1所示。晶闸管为半控型电力电子器件，它的工作条件如下。

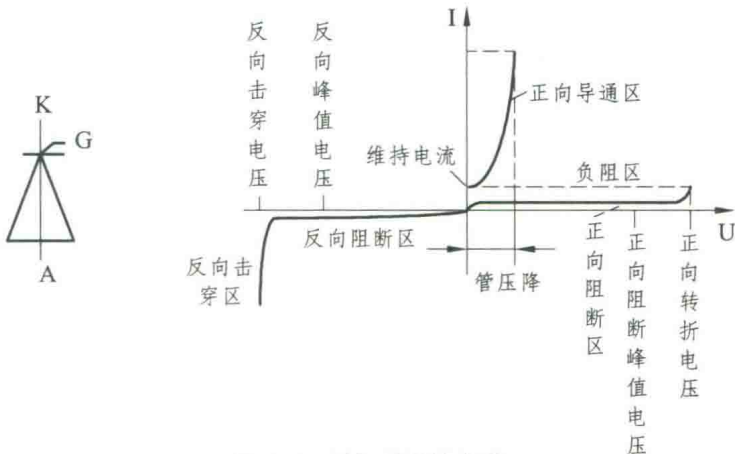


图2-1 晶闸管特性曲线

(1) 晶闸管承受反向电压时, 不管门极承受何种电压, 晶闸管始终都处于断开状态。

(2) 晶闸管承受正向电压且大于导通电压时, 仅在门极承受正向电压(门极收到触发信号)的情况下晶闸管才导通。这时晶闸管处于正向导通状态, 这就是晶闸管的闸流特性, 即可控特性。

(3) 晶闸管在导通情况下, 只要有一定的正向阳极电压, 不论门极电压如何, 晶闸管保持导通, 即晶闸管导通后, 门极失去作用。

(4) 晶闸管在导通情况下, 当主回路电压(或电流)减小到接近于零时, 晶闸管关断。

在高压直流系统中, 由于换流阀是由晶闸管串联组成的, 所以每个换流阀的开断特性与晶闸管的开断特性相似, 也是单向导通。在正方向时, 电流从阳极到阴极, 导通时阀上会有一个小压降; 在反方向时, 即施加在换流阀的电压使阴极相对于阳极为正时, 阀关断。同时, 由于各元件的特性不一致, 可能会造成晶闸管间电压分布不匀, 因此在选用组成换流阀的晶闸管元件时, 一般要求各元件具有下列的性能: 耐压强度高, 过流能力强, 开通、关闭时间短, 并尽量一致, 正向压降小, 剩余载流子电荷差值小, 有承受较大的导通电流变化率(di/dt)和关断电压变化率(dv/dt)的能力等。

2.1.2 换流电路分析

高压直流换流器的基本模块是三相全波桥式电路, 变压器的交流侧绕组通常采用星形接地(Y_0)联结, 阀侧绕组通常采用星形(Y)或三角形(Δ)联结, 其接线示意图如图 2-2 所示。

为方便分析, 一般将其中阴极连接在一起的 3 个晶闸管(V_1 、 V_3 、 V_5)称为共阴极组; 阳极连接在一起的 3 个晶闸管(V_4 、 V_6 、 V_2)称为共阳极组。此外, 习惯上希望晶闸管按从 1 至 6 的顺序导通, 为此将晶闸管编号, 如图 2-2 所示。

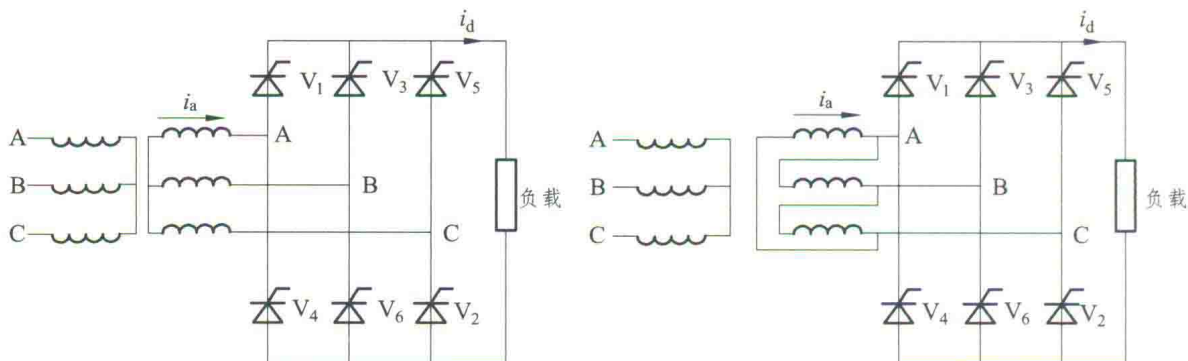


图 2-2 换流阀接线示意图

为便于分析换流器的换流过程，我们先做以下假设。

(1) 含有换流变压器的交流系统可认为是由一个电压和频率恒定的理想电压源与一个无损电感串联；

(2) 直流电流 (i_d) 保持恒定且无纹波，这是因为在直流侧采用了一个较大的平波电抗器 (L_d)；

(3) 换流阀具有理想的开关特性，导通时呈零电阻，截止时呈无穷大电阻。

1. 理想情况下的整流电路

首先分析换流阀触发角 $\alpha = 0$ 时的情况（即换流阀的触发脉冲 p_1 在晶闸管承受正向电压时刻到来），此时可将电路中的换流阀当作二极管对待。对于共阴极组的 3 个换流阀，阳极所接交流电压值最高的一个导通。而对于共阳极组的 3 个换流阀，则是阴极所接交流电压值最低（或者说负得最多）的一个导通。其简化电路如图 2-3 所示。

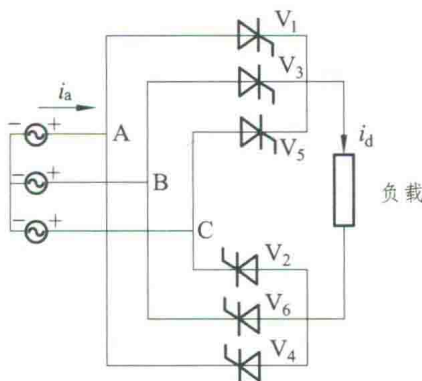


图 2-3 换流器等效示意图

从图 2-3 可以看出，在任意时刻共阳极组和共阴极组中各有 1 个晶闸管处于导通状态，施加于负载上的电压为某一线电压。上面一排阀 1, 3, 5 的阴极连接在一起，下面一排阀 2, 4, 6 的阳极连接在一起。假设换流器的输入电压为公式 (2-1)。

$$\begin{cases} u_a = E_m \sin(\omega t + 30) \\ u_b = E_m \sin(\omega t + 150) \\ u_c = E_m \sin(\omega t + 270) \end{cases} \quad (2-1)$$

电压波形如图 2-4 所示。

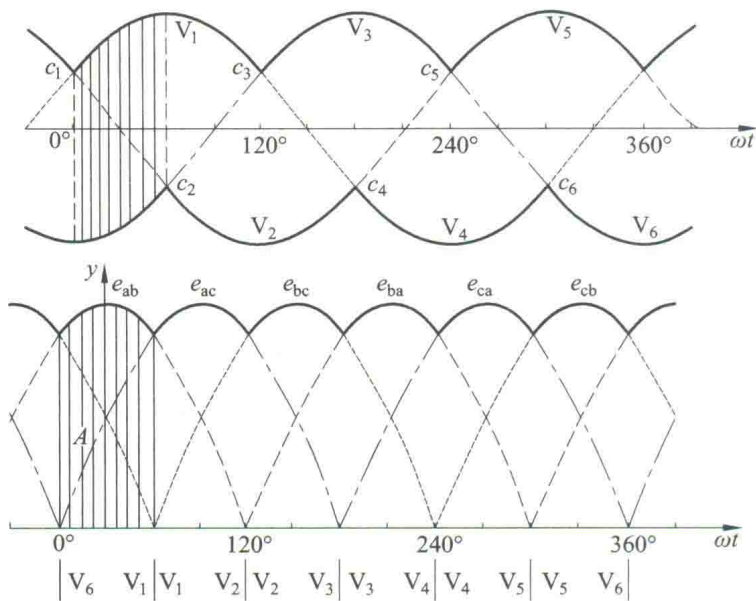


图 2-4 换流阀整流波形图

在 c_1 时刻以后, V_1 和 V_6 处于导通状态, 换流器的直流输出电压为线电压 u_{ab} ; 到 c_2 时刻, 由于 B 相电压高于 C 相电位, V_2 进入导通状态, V_6 在反向电压作用下电流到零而关断, 直流输出电压为 u_{ac} ; 到 c_3 时刻, 由于 B 相电压高于 A 相电位, V_3 进入导通状态, V_1 在反向电压作用下电流到零而关断, 直流输出电压为 u_{bc} 。按照这种方法进行分析, 换流器在任何时刻总有两个换流阀导通, 每个阀在一个工频周期内导通 120° , 阻断 240° 。由于忽略换流变的电感作用, 我们认为换流阀换相过程是瞬时的, 在交流电动势的作用下, 换流阀周而复始的按序开通和关断, 从而在直流负载侧可得到一次为 $1/6$ 周期的线电压相应的 6 个正弦曲线段组成的直流电压波形。根据换流阀的导通和关断情况可以将图 2-3 化简为图 2-5。

