

袁清云 编

# HVDC 换流阀

## 及其触发与 在线监测系统



中国电力出版社

封面设计：范文东

ISBN 7-80125-861-4



9 787801 258618 >

科技新书目：477-162

ISBN 7-80125-861-4/TM·491

定价：10.00 元

TM  
Y9

199193

TM46

Y908

# HVDC换流阀 及其触发与在线监测系统

---

袁清云 编

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书以葛一上高压直流输电工程设备为基础,详细阐述了换流阀及其触发与在线监测系统的设计思想、工作原理、选用材料和结构参数。

全书共分8章,分别是:绪论;换流阀结构及参数;构成换流阀的基本元件——可控硅;换流器的工作原理;可控硅触发与在线监测系统;可控硅电子设备;阀基电子设备;可控硅在线监测系统。

本书深入剖析了触发与在线监测系统中各种电路板的工作过程,着重介绍了这些设备的试验、运行和维护方法,具有很强的实用性,适用于高压直流输电、变频技术、无功静态补偿及电气拖动等专业的设计、运行人员及相关专业的大专院校师生。

### 图书在版编目(CIP)数据

HVDC换流阀及其触发与在线监测系统/袁清云编. —北京:中国电力出版社,1998.10

ISBN 7-80125-864-4

I.H… III.袁… III.①直流变流器触发电路②直流变流器在线监测系统 IV.TM46.7

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第20352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>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

1999年3月第一版 1999年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 8.375印张 185千字 1插页

印数 0001—3000册 定价 10.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 阀在直流输电中的作用及基本原理 .....	1
第二节 换流阀外围设备及其相互联系 .....	13
第三节 可控硅触发及其在线监测系统概况 .....	18
<b>第二章 换流阀结构及参数</b> .....	32
第一节 换流阀各部分的定义 .....	32
第二节 换流阀的结构 .....	34
第三节 换流器及阀的主要技术数据.....	80
<b>第三章 构成换流阀的基本元件</b> —— <b>可控硅</b> .....	94
第一节 概述 .....	94
第二节 可控硅元件结构和制造工艺.....	96
第三节 可控硅特性 .....	101
第四节 葛—上直流工程可控硅电气 参数及技术规范 .....	106
<b>第四章 换流器的工作原理</b> .....	114
第一节 概述 .....	114
第二节 整流器的工作原理.....	115
第三节 逆变器的工作原理.....	125
第四节 换流器的理论关系式.....	131
<b>第五章 可控硅触发与在线监测系统</b> .....	135
第一节 概述 .....	135

第二节	可控硅触发与在线监测系统的设备配置及运行方式 .....	140
第三节	可控硅触发与在线监测系统的工作内容和输出结果 .....	142
<b>第六章</b>	<b>可控硅电子设备</b> .....	<b>145</b>
第一节	概述 .....	145
第二节	可控硅电子设备的工作原理 .....	148
第三节	可控硅电子设备的逻辑回路 .....	163
第四节	可控硅电子设备技术数据及维护 .....	169
<b>第七章</b>	<b>阀基电子设备</b> .....	<b>175</b>
第一节	VBE 的组成及其与外部的联系 .....	175
第二节	VC 相关电路 .....	178
第三节	TM 相关电路 .....	191
第四节	其他电路 .....	203
<b>第八章</b>	<b>可控硅在线监测系统</b> .....	<b>217</b>
第一节	在线监测系统与外部的信息交换 .....	217
第二节	在线监测系统硬件组成 .....	223
第三节	在线监测系统软件 .....	244
<b>参考文献</b>	.....	<b>263</b>

# 第一章 绪 论

本章简单介绍换流阀在直流输电系统中的作用及其基本原理，阐述了由换流阀构成的换流器的相关定义，叙述了换流阀及其触发与在线监测系统的相互联系。

## 第一节 阀在直流输电中的作用及 基本原理

高压直流输电是本世纪 50 年代发展起来的一种新的输电方式。世界上第一条高压直流输电线路于 1954 年投入运行，该工程是瑞典的果特兰岛—瑞典本土的直流输电工程，其输电线为海底电缆，换流阀为汞弧阀。60 年代，随着可控硅元件的出现、发展和完善，直流输电得到迅速发展。果特兰岛的扩建工程也首次采用了可控硅阀，并在 1970 年投入运行。到目前为止，全世界的直流输电工程已达到 70 多个，各个工程的基本情况如表 1-1 所示。直流输电与交流输电相比，具有运行稳定、造价低、输电损耗小和适合于新型发电方式（磁流体发电和等离子体发电）等优点。

### 一、换流阀的作用

换流阀顾名思义就是改变电流的阀。由于无整流子发电机的普遍应用，采用直流输电就必须先将交流电变为直流电再送出去；同样，在用户侧则须把直流电变成交流电后再送给用户。换流阀就是这种能把交流变成直流或将直流变成交

表 1-1 世界各国高压直流输电系统一览表

工程名称	厂家	调试年份	功率 (MW)	电压 (kV)	距离 (km)	地点
马索卡西拉 MOSCOW—KASHIRA	俄国	1951	30	±100	100	俄国
英吉利海峡 ENGLISH CHANNEL	ASEA	1961	160	±100	94	英国、法国
伏尔加—顿巴斯 VOLGOGRAD—DONBASS		1965	720	±400	470	俄国
英特岛 INTER ISLAND	ASEA	1965	600	±250	609	新西兰
萨库马 SAKUMA	ASEA	1965	300	2×125	背靠背	日本
康提斯塔 1 KONTI—SKAN 1	ASEA	1965	250	250	180	丹麦、瑞典
康提斯塔 2 KONTI—SKAN 2	ASEA	1988	300	285	150	丹麦、瑞典
果特兰 1 GOTLAND 1	ASEA	1954	20	±100	96	瑞典
果特兰扩建 GOTLAND EXTENTION	ASEA	1970	30	±150	96	瑞典
果特兰 2 GOTLAND 2	ASEA	1983	130	150	100	瑞典
果特兰 3 GOTLAND 3	ASEA	1981	260	±150	103	瑞典
撒丁岛 SARDINIA	GEC ALSTHOM	1967	200	200	413	意大利
温哥华 1 VANCOUVER 1	ASEA	1968	312	260	69	加拿大
温哥华 2 VANCOUVER 2	GE	1977	370	-280	77	加拿大
太平洋联络线 PACIFIC INTERTIE	GE AND ASEA	1970	1440	±400	1362	美国
太平洋更新 PAC INTERTIE UPGRADE	ASEA	1982	1600			
太平洋扩建 PAC INTERTIE EXPANSION	BBC	1984	2000	±500	1362	美国
		1989	1100	±500	1362	美国



续表

工程名称	厂家	调年份	功率(MW)	电压(kV)	距离(km)	地点
纳尔孙河 1	GEC ALSTHOM	1972	1620	±450	892	加拿大
纳尔孙河 2	直流工作组	1978	900	±250	930	加拿大
金诺斯	GEC ALSTHOM	1985	1800	±500	82	英国
伊尔河	GE	1975	640	±266	背靠背	加拿大
斯卡杰拉 1	ASEA	1972	320	2×80	240	挪威、丹麦
斯卡杰拉 2	ASEA	1976	250	250		
斯卡杰拉 3	ASEA	1977	500	±250	240	
佐久间	东芝	1993	440	350	240	日本
斯奎尔-巴特	GE	1977	300	2×125	背靠背	
大卫·A·哈米	GE	1993	600	3×125		
卡布拉-巴萨	直流工作组	1977	500	±250	749	美国
CU	ASEA	1977	100	50	背靠背	美国
呼卡多	日立	1978	1920	±533	1414	莫赞比克/南非
HOKKAIDO HONSHU		1979	1000	±400	710	美国
		1979	150	125	168	日本
		1980	300	250		
埃凯瑞	西门子	1993	600	±250		
ACARAY		1981	55	25.6	背靠背	巴拉圭

工程名称	厂家	调 试 年 份	功 率 (MW)	电 压 (kV)	距 离 (km)	地 点
维布尔 VYBORG	俄国	1981	355	1×170(±85)	背靠背	俄国
		1982	710	2×170		
		1984	1065	3×170		
		将来	1420	4×170		
舟山 ZHOUSHAN	西电公司	1982	50	100	42	中国
布恩罗尔 BUERNROHR	直流工作组	1983	550	145	背靠背	奥地利
爱迪县 EDDY COUNTY	GE	1983	200	82	背靠背	美国
侠托给 CHATEAUGUAY	直流工作组	1984	1000	2×140	背靠背	加拿大
奥克诺尼亚 OKLAUNION	GE	1984	200	82	背靠背	美国
依泰普 1 ITAIPU 1	ASEA	1984	1575	±300	785	巴西
	ASEA	1985	2383			
	ASEA	1986	3150			
	ASEA	1987	3150	±600	805	扎伊尔
依泰普 2 ITAIPU 2	ASEA	1982	560	±500	1700	美国
英加-沙巴 INGA-SHABA	BBC	1985	200	57	背靠背	美国
黑水 BLACK WATER	ASEA	1985	200	±56	背靠背	美国
海给特 HIGHGATE	GE	1985	350	140	背靠背	加拿大
马大瓦斯卡 MADAWASKA	GE	1985	200	±82	背靠背	美国
麦尔斯城 MILES CITY	GE	1985	200			

续表

工程名称	厂家	调年份	功率(MW)	电压(kV)	距离(km)	地点
布卢肯山 BROKEN HILL	ASEA	1986	40	2×17(±8.33)	背靠背	澳大利亚
英特萝滕 INTERMOUNTAIN	ASEA	1986	1920	±500	784	美国
英法海峡 CROSS-CHANNEL	ALSTHOM	1986	2000	2×±270	72	法国、英国
德斯勒通 DES CANTONS—COMERFORD	GE	1986	690	±450	172	加拿大、美国
萨库 SACOI	ALSTHOM	1986	200	200	415	法国科西嘉岛
希的尼 SIDNEY (VIRGINIA SMITH)	西门子	1992	300			
葛上 GESHA	BBC+西门子	1988	200	55.5	背靠背	美国
温亚恰尔 VINDHYACHAL	ASEA	1989	600	500	1045	中国
迈克雷尔 MCNEILL	GEC ALSTHOM	1990	1200	±500		
芬诺—斯堪 FENNO-SKAN	ASEA	1989	500	2×69.7	背靠背	印度
希尔—巴索尔 SILERU-BARSOOR	INDEPENDANT	1989	150	42	背靠背	加拿大
		1989	500	400	200	芬兰、瑞典
		1989	100	±200	196	印度
瑞翰德里 RIHAND-DELHI	ABB	将来	400			
		1991	750	+500	910	印度
		1500	±500			

续表

工程名称	厂家	调试年份	功率(MW)	电压(kV)	距离(km)	地点
魁北克美国 HYDRO QUEBEC-NEW ENG.	ASEA	1990	2000	±450	1500	加拿大、美国
尼库拉特 NICOLET TAP	ASEA	1992	2000			加拿大
芒提塞罗 WELCH-MONTICELLO	西门子	1995	600	160	背靠背	美国
爱岑瑞特 ETZENRICHT	西门子	1993	600	160	背靠背	德国
西南文拉 VIENNA SOUTH-EAST	西门子	1993	600	160	背靠背	奥地利
直流混网 DC HYBRID LINK	ABB	1993	992	+270、-350	617	新西兰
乌拉瓜纳 URUGUAIANA	东芝	1994	50	15	背靠背	巴西、阿根廷
鲍梯克 BALTIC CABLE PROJECT	ABB	1994	600	450	250	瑞典、德国
康特克互联 KONTEK HVDC INTERCON	ABB	1995	600	400	170	丹麦、德国
香爪普拍德 CHANDRAPUR-PADGHE	ABB	1997	1500	±500	900	印度
香爪普拉马 CHANDRAPUR-RAMAGUNDUM	GEC ALSTHOM	1996	1000	2×205	背靠背	印度
维斯卡帕纳 VISAKHAPATNAM	GEC ALSTHOM	1998	500	205	背靠背	印度
来特—卢增 LEYTE-LUZON	ABB	1997	440	350	440	菲律宾
海来—恰九 HAENAM-CHEJU	GEC ALSTHOM	1997	300	±180	100	韩国
维多利亚 VICTORIA-TASMANIA			300	300		澳大利亚

续表

工程名称	厂家	调 试 年 份	功 率 (MW)	电 压 (kV)	距 离 (km)	地 点
苏格兰—北爱尔兰 (SCOTLAND-IRELAND)		1998	250	150	60	英国
希腊—意大利 (GREECE-ITALY)		1998	500			意大利
天广 TIAN-GUANG	西门子	1999	1800	500	903	中国
泰—马 THAILAND-MALAYSIA		1998	300	300	110	马来西亚、泰国
芮维尔 RIVERA		1998	70		背靠背	乌拉圭
北部—东南 NORTH-SOUTHEAST		1999	1000			巴西
冰岛—苏格兰 ICELAND-SCOTLAND LINK		2000	550	400	950	
			1100	±400		
来特民大努 LEYTE-MINDANAO		2000	400			菲律宾
罗恩德 NORNE		2001	600	500	600	罗威、荷兰
三峡 THREE GORGES		2003	3000	±500		中国
霸坤 BAKUN		2003	2800	±500	1335	马来西亚
维铿 VIKING CABLE		2003	600	450	600	罗威、德国
尤拉电缆 EUROCABLE		2003	600	500	600	罗威、德国
能源桥 EAST-WEST ENERGY BRIDGE		2005	500	600	1800	德国、波兰、俄国

流的器件。

为了使电流从一个形态转换成另一形态，必须采用非线性元件，其电阻随着电流的方向不同而有很大的变化。对某些种类的换流阀（电子的、离子的），其电流只能通过一个方向，而这个方向就称为正方向，在反方向，电流根本不能通过，其反方向电阻等于无穷大。

对直流输电换流站或大容量换流设备来讲，换流阀必须具有高效率。有两种形式的换流阀能满足这种要求。一种是水银阴极离子换流阀（汞弧阀），一种是半导体可控硅换流阀。汞弧阀已被可控硅阀取代，但它对直流输电的发展具有很重大的意义。第一个商用的高压直流输电系统使用的就是汞弧阀。

汞弧阀是一种具有水银阴极的真空离子器件。它通过汞蒸汽的电离来实现单向通电。由于汞弧阀换流器在运行中会产生逆弧、熄弧故障，同时还有阴极和阳极温度控制复杂，启动时需要预热及电压、电流参数低等缺点，限制了它在直流输电中的发展。

## 二、换流器相关定义

换流阀及其触发与在线监测系统根据其构成隶属关系即构成层次可以由图 1-1 所示的方框图表示。换流器有两种：整流器和逆变器。它们都由换流阀构成。换流阀也有两种：可控硅阀和汞弧阀。汞弧阀已经被淘汰，不在本书中讨论。

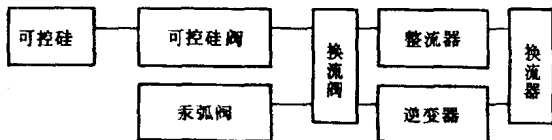


图 1-1 换流阀构成层次

可控硅阀由可控硅元件串、并联组成。本书讨论的重点是可控硅换流阀及为它提供服务的触发与在线监测系统。

整流器是将交流变成直流的电路，是一种把交流变为直流的换流器。

逆变器是将直流变成交流的电路，是一种把直流变为交流的换流器。

实际上整流器与逆变器都是一种特定的换流器。在直流输电中，为了增强系统间的相互支援，往往都设置有潮流反转功能，即功率传输方向可以改变。因此在直流输电中，换流器即可以作整流器运行，也可以作逆变器运行。因此，我们可以这样理解：整流器只能把交流变成直流，逆变器只能把直流变成交流，而换流器则既可把交流变成直流，也可以把直流变为交流。

换流阀在电路中相当于一个电路元件。换流器与换流阀的关系可由图 1-2 理解。图 1-2 中，换流器电路由 6 个换流阀组成。它是一个普通的三相桥式换流电路。每一个换流阀相当于一个桥臂，因而在直流输电中，有时也把换流阀称为桥臂。一个三相 6 脉动换流器（如图 1-2 所示），有 6 个阀即 6 个桥臂。直流输电常用的 12 脉动换流器则有 12 个阀，即 12 个桥臂。换流阀由许多电子元件（如可控硅）串并联

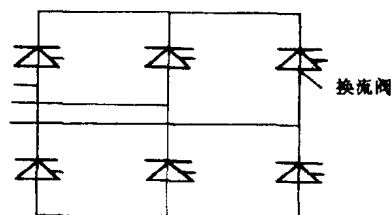


图 1-2 换流器电路

组成。串联可以提高换流阀的电压，并联则可提高换流阀的电流。换流阀的原理电路如图 1-3 所示。这是一个由 120 只可控硅串联，2 只可控硅并联组成的可控硅换流阀。

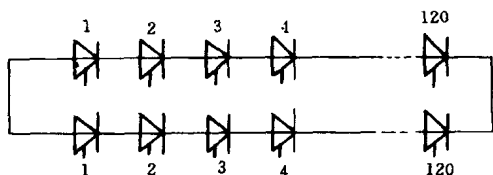


图 1-3 换流阀原理电路

阀的特性与可控硅相同，导通条件也一样。众所周知，可控硅在控制极不加触发脉冲时，具有正、反向阻断能力，控制极加触发脉冲后可正向导通，一旦导通后，无论控制极的脉冲是否存在，只要可控硅两端电压为正向，它就保持导通，直到可控硅两端电压反向时才关断。由于一个阀中有许多可控硅元件，因此，一个阀导通意味着一个阀中所有的元件都要导通。图 1-3 中 240 只可控硅元件串并联对触发系统要求更为严格，因为它要求这 240 只可控硅同时被触发。如果有一个阀中的可控硅不同时触发，则串联连接支路中未触发的可控硅将会承受过压而损坏；同样，有并联支路的可控硅除有过压危险外，如果并联支路中有可控硅未导通，则已导通支路还会产生过流，使元件发热以致损坏。由此看来，阀运行除可控硅元件运行所需的要求外，由于有可控硅串并联，还需要有均压、均流措施以及一套完全同步的触发装置。该触发装置同时向阀中所有（葛—上工程<sup>①</sup>为 120 个）可控硅元件发出触发脉冲使阀同时导通。因此，一个实际的

<sup>①</sup> 葛—上工程是葛洲坝至上海直流输电工程的简称。



换流阀并不象图 1-3 所示的那样只有可控硅元件。图 1-4 示出了葛—上直流工程换流阀的实际电路图。电路中除可控硅外，还有对应于每只可控硅的触发电路板 (TE)、RC 阻尼回路 (在图中为  $R_1$ 、 $C_1$ ) 和跨在 15 只可控硅上的均压电容器  $C$ 。阀的关断靠外部电路的交流电压反向实现。

除触发装置外，由于换流阀造价很高 (约占换流站投资的 40%)，故需要及时了解它的工作状况，即对可控硅元件进行在线监测。我们把这种能对可控硅元件进行在线监测的装置称作可控硅在线监测装置。

触发及在线监测是为可控硅服务的。触发系统系指控制系统发出指令至可控硅控制极接受指令之间的一切环节，如图 1-5 所示。阀控是直流输电系统的中心控制部分，它根据系统的要求，控制可控硅的触发角，从而达到控制功率大小和方向的目的。由于控制、监测的对象都是可控硅，所以我们常把换流阀的触发与在线监测系统称为可控硅触发与在线

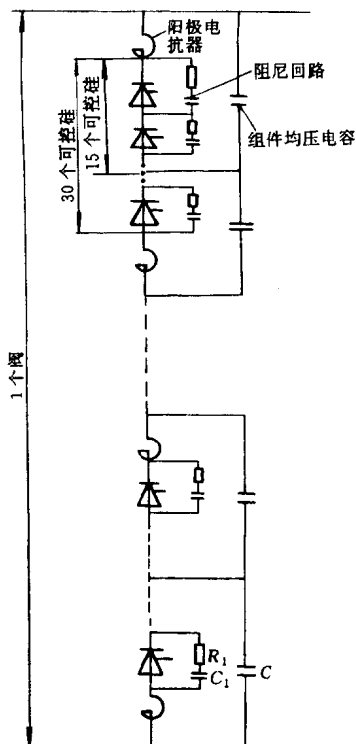


图 1-4 葛—上直流工程阀实际电路图