

世界直流输电技术概述

许昌继电器研究所 李西友

前 言

世界直流输电是从1906年开始出现,至今已有七十多年的历史。本文将对高压直流输电技术的发展历史,以及在欧洲、美洲、非洲地区和日本、美国、苏联、英国、法国、德国、瑞典、挪威、丹麦、加拿大、中国等国家的使用情况、技术发展、未来发展趋向进行综合性论述。

此外,文中还列举了将于1985和1986年即将投入运行的撒丁岛——意大利,法国——英国,日本北海道——本洲,加拿大——美国的几条直流输电线路的连接方法、换流站功率取样试验进行介绍。最后对直流输电未来使用的超高压绝缘材料、设想和发展趋向作理论方面的论述。

一、世界直流高压输电发展历史

在本世纪初,人们对交、直流输电的综合使用还是处于初级阶段,尽管1906年勒内·蒂尔研究成功了功率为20MW,线路为300km的直流输电发电机组,但交流电仍然被人们所重视。其主要原因是:

- 交流电发电机组结构简单;
- 通过变压器能方便地改变电压;
- 电网调节从零电位开始,便于电流断开。

此外,交流输电在发电设备和输配电设备运行中故障少,而且在网络运行中可以梯接几个分支,分支可用于直流输电。

早在1942年第二次世界大战期间,在德国组织起了一个工程师攻关组织,研究出了第一条从易北河(欧洲)~柏林(德国)的功率为30MW,线路为150km的双极直流电网,而它的整定方法至今人们还在使用。

第二次世界大战以后,这个研究组织被拆散了,一部分人在瑞典,另一部分人到了苏联。在此期间双方不断通过文献资料进行技术交流,成立了一个《卡斯特——莫斯科技术经验交流协会》。双方的技术审定标准是由瑞典《ASEA》技术组确定。1954~1955年间,双方协作的第一条从瑞典大陆至哥特兰岛之间的直流输电网投入运行。

二、高压直流输电在世界各国的使用情况

从世界上第一条直流输电网投入运行之后,直流输电很快被人们所重视。目前直

流输电在世界上已连网沟通二十多个国家和地区，其中有十几个国家连网总功率达25000MW。

在欧洲、美洲、非洲、日本、美国、德国、法国、意大利、加拿大等地区和国家的使用情况各不相同：

——欧洲：在欧洲五十公里以上的线路基本上是使用海底电缆连接。例如：撒丁岛——意大利；法国——英国；丹麦——瑞典——挪威之间的连接均属这类情况。

直流输电采用电缆连接的好处是经济，输送同样功率的交流电网和直流电网相比价格要比直流输电高得多。

从技术角度讲直流输电的好处是：

- 不受交流电电缆容量的功率限制；
- 不同频率的网络连网，电网之间无干扰影响和频率变化以及电压变化。

——美洲和非洲：美洲和非洲及苏联的使用情况则相反。美洲和非洲主要使用800km以上的长直流输电线路。

——苏联：从苏联的埃塞巴斯图兹——俄国工业中心地区使用线路长为2500km，功率6000MW，电压±750kV的线路相连接，该线路目前在世界上为较高水平。

——日本：日本对直流输电的研究和工程建设是从1960年开始，迄今为止，已有佐久间变频站、新信浓变频站和北海道——本州直流输电线路将陆续建成投入运行。

(1) 佐久间变频站：佐久间变频站位于关东地区的静冈县内，主要为联系日本国内50Hz和60Hz的两大电力系统，采用“背靠背”的交直流换流站去实现频率不同的两大系统间的功率交换，借以提高系统运行的经济性，减少备用容量，并在故障时进行紧急功率交换，以提高系统的运行可靠性和稳定性。佐久间变频站设备容量为30万千瓦，电压为±125千伏。

(2) 新信浓变频站：新信浓变频站建于1977年，位于日本长野县境内，联接东、西地区两大电力系统。该变频站最初容量为30万千瓦，电压±125千伏，现已发展到了60万千瓦。这个变频站是日本第一个采用高压大容量可控硅阀做为换流设备的变频站，而且所使用的油浸风冷式可控硅阀也是世界上最新设备。

(3) 北海道——本州直流输电站：此直流输电站是用来联系北海道和本州两地区的主要系统，是日本第一条靠国产设备建成的大容量直流联络线路。线路全长约167km，其中跨越津轻海峡的海底电缆线路长约43km。该直流输电工程是分两期建成。第一期工程于1979年12月投入运行，容量为150MW，直流电压125kV，电流1200A；第二期工程于1980年6月1日投入运行，容量为300MW，直流电压250kV，单极，电流1200A。

——美国：根据美国《输电与配电》杂志公布的研究资料，自1980年至1988年架空输电线路建设总长度预计将达65,120英里，地下电缆线路432英里，其中直流输电线路约550英里。根据美国《电力研究》(EPR I)的估计，截至本世纪末建设输电线路将每年投资约16亿美元。还有一些专家们认为：高压直流输电系统很有可能取代现在的交流系统。美国在直流输电方面主张输电电缆使用压缩气体绝缘和超导体材料，以保证电网长期运行安全可靠。

——加拿大：加拿大的电力工业在世界上占有重要的地位。全国各大公司的装机容量和年发电量，目前水平仅次于美国、苏联、日本和联邦德国，居世界第五位。加拿大各代表水平年的最大负荷、装机容量、年需电量及发电量见图表 I。

表 I

代表水平年代	1960	1970	1980	1990	2000
最大负荷(万千瓦)	1700	3500	6400	11300	19500
装机容量(万千瓦)	2303.5	4282.6	8196.6	—	—
年需电量(亿度)	1020	1980	3580.0	6170	10600
年发电量(亿度)	1143.78	2047.23	3673	—	—

加拿大高压直流输电技术在上世界上目前也是最发达的国家之一。自从1969年第一条直流输电工程——温哥华岛工程投入运行以来，相继又有五条线路投入运行。这五个直流输电工程是：温哥华岛一期工程（1969年）、伊尔河工程（1972年）、尼尔逊河一期工程（1977年）、温哥华岛二期工程（1979年）和尼尔逊河二期工程（1983年）。1972年投入运行的伊尔河工程是世界上第一个采用可控硅阀换流器代替汞弧阀换流器的直流输电工程。

加拿大伊尔河直流输电工程的主要设计集中在1969年至1970年进行。它是世界上第一个采用可控硅阀桥式直流输电工程，其设计特点如下：

- a. 8个阀桥共用了近10000只可控硅元件。
- b. 可控硅阀采用光触发方式，并配有电子式保护统系。
- c. 采用了三相四绕组式换流变压器，等值电路如图1所示。

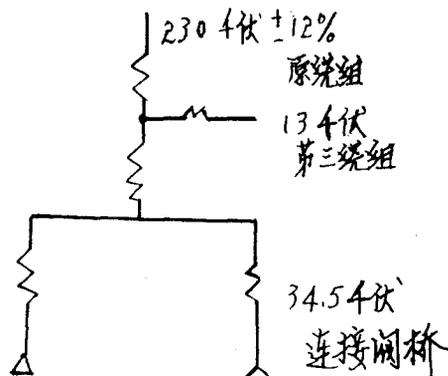


图1 伊尔河直流工程的换流变压器等值电路

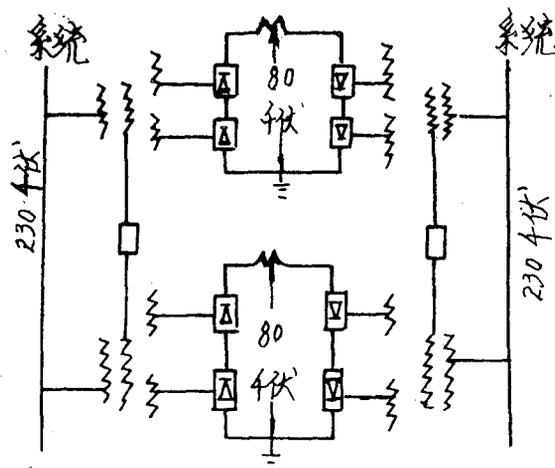


图2 伊尔河直流工程接线图

- d. 在交流滤波器回路中，采用了干式电抗器。
- e. 由于整流站和逆变站在同一地点，因此一次结线紧凑，占地少，成本也较低。

f. 考虑到该地区严寒、降雪量大以及覆冰等气象条件，在设计中也采取了一定的措施。

g. 控制系统采用定功率调节，并利用外部调节系统与交流系统配合调节。结构图如图 2 所示。

加拿大伊尔河直流输电概况如表 I 所示：

表 I

直流输电工程名称	额定电压 (千伏)	额定功率 (兆瓦)	直流输电线路长度 (公里)	结线方式	投入运行年份
加拿大伊尔河	80	320 (2×160)	0	背靠背联接 两组网桥并 联运行	1972

加拿大的直流输电技术与西欧、苏联、日本、美国相比起步较晚，但从 1968~1983 年近十五年间就建成了五条直流输电工程，它的主要技术特点是：

- 直流输电发展速度快；线路形式多样化；设备更新快；可靠性指标高；便于维护与整定。

——法国、英国、意大利：法、英、意三国直流输电联网的新技术和使用方法如下：

考虑到直流输电未来的竞争问题，法国采用的最新方法是：海底电缆在海底互相接通，大功率直流电网进入城市采用地下电缆连接法。这种新方法目前尚未实现，但在法国和英国一些大城市市区还没有完全铺开使用直流输电的问题是为了更进一步弄清楚它的可行性和可靠性，以证实 50km 以上的地下电缆使用的经济性。不过这种情况不会延时很久。

法、英使用海底电缆经验证明：相互连接是直流输电网的一种主要连接方法。对于电网的绝缘水平来讲，相互连接的优点是：技术简单、经济、绝缘程度高等。其实这种方法除了可以起到直流电网电路互相补充外，还有投资少，故障损坏少的好处。除此以外，通过中继变流站连接还可以消除水电站——原子电站发出的电能相位差或用户中的相位差。

直流输电与交流电相比最根本的好处是：电网稳定性好，可消除因电缆造成的功率损失，可取消功率——频率的调整。在出现故障时能减少短路电流值。

目前有以下两项直流输电工程正在试验，并将于 1985 年和 1986 年投入运行。

一条是通过法国科西嘉中继变流站连接撒丁岛——意大利的高压直流输电正在做直流取样试验；另一条是法国——英国的 2000 MW 直流输电网。

A. 在科西嘉中继站进行的撒丁岛——意大利的直流输电取样试验

撒丁岛——意大利的一条功率为 200 MW 的直流输电网是由两条海底电缆连接，电流通过海水返回。它的一端是科西嘉连接撒丁岛，另一端是科西嘉与意大利相连，整个架空线路经过科西嘉中继变流站串联。

1967年法国和意大利两国经过欧洲国际电工委员会与法国协商，法国从科西嘉变流站向意大利提供了一条功率为20 MW的直流输电线路，而十八年后的今天法国就出现了多端“串联”连接和多端“并联”新型连接方法。

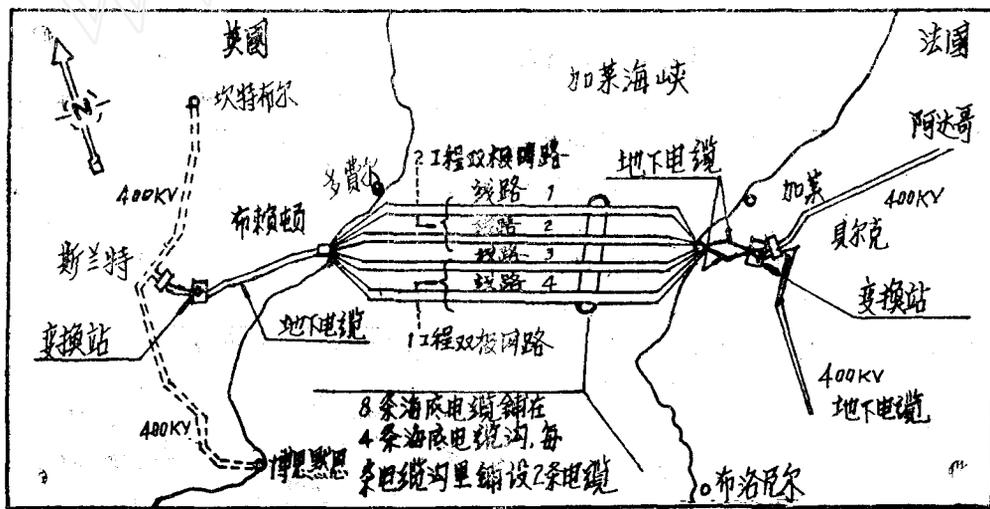
科西嘉变流站采用的取样试验方法是在最大功率为50 MW线路上进行的。尽管欧洲国际电工委员会规定试验功率为20 MW，为了进行过载检查，他们进行了20 MW~50 MW的过载取样试验。

在“并联”连接多端换流站之间采用了远距离遥控信号装置，现已在撒丁岛——意大利之间的直流输电网上使用，用它对电网实行频率调节。因此，在科西嘉换流站做的试验方法在某种程度上讲受到一定的限制，其中包括快速遥控信息通道在内。

科西嘉变流站是世界上第一个使用的多端直流换流站，三个换流站分开连接，这条直流输电线路将于1985年投入运行。

B. 法——英直流输电网最新连接方法具体情况如图3所示。

这是一条总功率为2000 MW电网，两端网络各为1000 MW，每个网络均有四条容量为250 MW的电缆（双极），输送电压±270 kV。中继换流站配备四组可控硅阀，形成500 MW整流桥，每组的1200个可控硅元件。



双极 N ²	线路 N ²	线路长度 (km)			
		英国地下电缆	海底电缆	法国地下电缆	总长度
2	1	18.5	46	6.7	71.2
	2	18.5	45.1	6.7	70.3
1	3	18.5	43.9	6.3	68.1
	4	18.5	43.6	6.3	68.4

图3 法——英直流输电连网

阀的保护与控制将广泛使用光纤电缆连接，相连接点与地之间，阀底部与控制室之间的连线等均采用光纤电缆。

这种独创性设计在中心换流站不存在，而是在海底电缆机械保护中使用。目前海底电缆连接的主要问题是防止电缆层外部损坏，防止捕鱼网拖起和捕鱼船铁锚损伤。

以前使用的连接方法现在已经不再使用了，因为容易使电缆外部损坏，修理费用大，故障多，每年约有六个月发生故障损坏。

可是，机械保护是通过地面传导，比较复杂，费用大。第二个试验是在接近老线路区域，滨海城市布洛涅南部，由于地面土质太硬，试验点又转移到法国北部，目的是为了找到合适的土质。后选定的地方土质为白垩土，抗压强度为100巴。

象法国使用的海底电缆铺设设备进行海底电缆的铺设并非是一件很容易的事。主设备是采用现代化的设备——海底电缆车进行海底电缆铺设。

一只铺设电缆船一次可以同时铺设两条电缆。方法是在约50m远配备一个海底挖掘机挖掘电缆槽，在电缆槽挖掘的同时铺设电缆。这种设备在国外称“海底拖拉机”。（有的国家也称“海龟爬行车”）每一台海底拖拉机配备两名驾驶员，并有一个驳船给它提供能量，用八根缆索拖着前进。拖拉机有规律地向前移动缆索拉紧电缆。1982年法国派出一支船队从事这项工程，于1984年夏季——1985年夏季在这两个电缆槽中铺设四条电缆。

在现场施工遇到了很多困难：不仅要做到电缆槽的挖掘要和铺设同步，而且还牵涉到船驳在海面上的打节定位，气候变化和每天约有近500艘世界商船从这里通过等问题。

第一条1000MW 两极线路将于1985年底投入运行。第二条线路约在1986年底投入运行。电网两端的传输功率一样，接收功率也一样，但是控制检查系统可采用不同的整定调节装置。

——中国：中国直流输电技术比日、美、苏、法等国起步较晚一些，但是，中国地大物博，海岸线长，电力资源丰富，发展直流输电和海底电缆直流输电具有广阔的前景。

中国是从八十年代才开始对直流输电进行研究。中国第一条直流输电工程是：浙江省舟山直流输电工程，1983年投入运行，装机容量为4650 瓩，输出电压±100kV。

自动控制调节系统在直流输电技术中占有极其重要的地位。采用这种设备通过快速和多种方式调节以改善直流系统的运行特性，提高系统运行的安全性和稳定性。

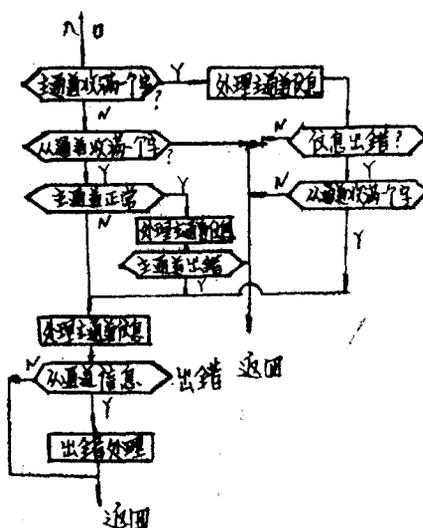


图4 双通道软件切换流程图

为了确保直流微机运动装置的高可靠性运行,浙江舟山直流输电工程采取了以下有效措施:

a) 采用了微机运动装置,配合精制的软件系统以扩大运动功能。这种措施可保证装置可靠性无故障时间在两年以上。

b) 采用双重通道。直流输电载波和特高频两种通道并行运行,以其中一个通道为主,另一个为辅。发送端的信息同时送给两路通道,接收端接收来自于两通道的信息,存放于两个缓冲区内。正常情况下,只使用来自主通道的信息。然而,在两通道不同时发出传输错误的情况下,不但保证了信息的正确接收,而且保证了不失去任何信息。这种情况在传统性运动装置中是很难做到的。在主通道上出现不正常工作情况下,由软件切除主通道,从通道接收信息。双通道软件切换程序流程图如图4所示:

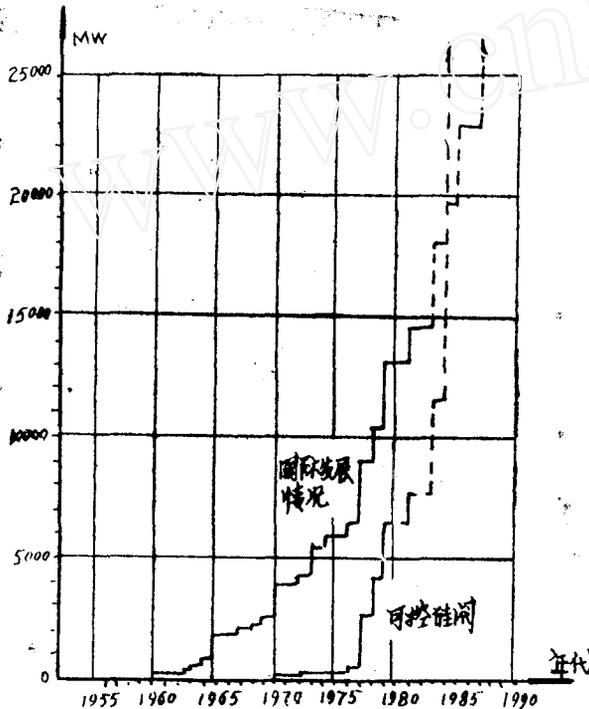


图5 直流输电国际发展情况

现在中国正在建设上海——葛州坝直流输电工程。这项工程装机容量为1200MW,电流为1200A,电压为 $\pm 500\text{kV}$,预计在1986年投入运行。

直流输电连接方法最适合于在不同频率的电网中使用。在日本则有一种特殊的情况,例如:日本把电网按用户的不同情况分开,交流网络一半是50Hz,另一半是60Hz这样就可以按不同用户情况,精确地进行能量转换。为了在两种设备之间使用后备保护,唯一的解决方法是从交流50Hz——直流——交流60Hz使用自动双重转换。

总的来说,直流输电网在世界上发展的速度是很快的,从图5我们可以看出,直流输电1976~1977年的发展是惊人的,在发展中同时还出现了新型可控硅阀,使新的直流输电技术发展的更快。

自1977年以来,直流输电又开始向降低成本方面发展。从经济观点看:50km距离

c) 采用双极运行,主机是整个系统的核心部分。在单机情况中,一旦主机出故障,将会导致系统崩溃。为了提高设备运行的可靠性,可采取主机冗余措施。在正常工作情况下,一主机承担所有系统的运行,另一主机处于备用状态,出现故障时,由诊断程序切除故障主机,将备用机投入运行。这样就可保证系统可靠地运行。

直流输电连接方法最适合于在不同频率的电网中使用。在日本则有一种特殊的情况,例如:

日本把电网按用户的不同情况

以上的线路采取电缆线连接；800km以上的采用架空线路比较经济。为了使直流输电技术得到稳步发展，应做以下技术改进：

- 改进保护的快速性、可靠性和稳定性。
- 调整涡轮发电机组速度。

以上谈到的是直流输电在世界各国不同的使用情况，尤其是欧洲、美洲、非洲、苏联和日本的一些特殊使用情况。

三、目前直流输电技术水平

直流输电的连接是由电网两端的两个发电站通过架空线路或电缆连接构成(图6)。当电网使用单极两端连接时，电流是从地面或海面上返回。图6是一种双极连接方法。

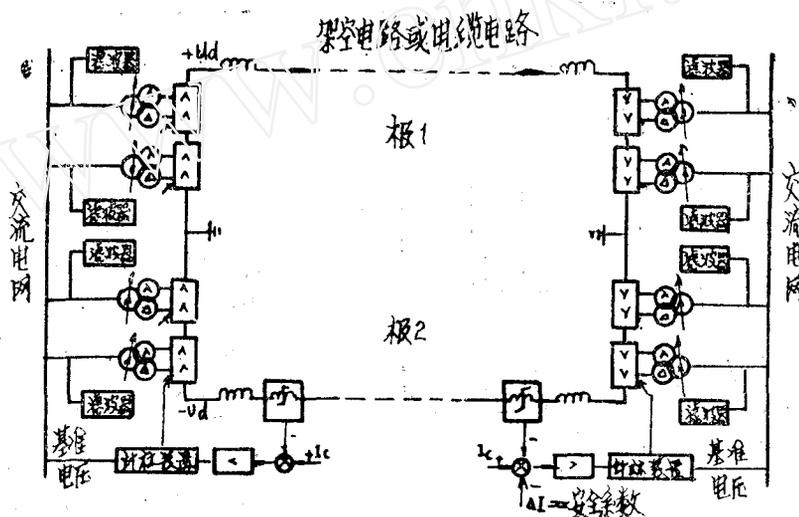


图6 双极直流输电连接图

每一个电站都要根据它所发出的电压大小，功率大小，安装一定数量的控制变压器。变压器是用来保证电网在运行中的电压匹配和稳定。根据换流的变化情况配备一定数量的可控硅阀、电抗器、无功功率补偿谐波滤波器和控制调节器。

这些设备中有两种设备应特别注意：

- 变压器：变压器二次线圈要保证能长期承受直流电压和交直电压。在不同的电压绕组中，对地线相间电压的调节不受容量的限制，但阻抗和电容变化很大，阻抗的变化对变压器油的纯度反应极为敏感。因此，这个问题应在设计时加以改进；

- 可控硅阀：可控硅阀代替水银汞弧阀已有十多年的历史了，可控硅阀是由一百多个可控硅元件组成一个阀组，其特点是：安装灵活，便于互换使用。控制系统的信号传送和与阀组的连接应采用光纤导线。它的构成是由三相四层阀构成一个十二脉冲变流器。可是，这里还存在着一个启动难的问题，要保证在几微秒内获得分压的最佳值，整个可

控硅回路应预防加到它上面的过电压，增加阻尼衰耗器。

在单独阀上装有很多分压电路， di/dt 和 dv/dt 限制线路，遥控振荡阻尼线路等。

在表Ⅲ中，根据主要电子元件的发展情况给出了典型阀的功率。目前的发展水平是：可控硅电流4000A，最大反向电压5000V，十二脉冲换流器一般可达500MW——800MW。

表Ⅲ 水银汞弧阀和可控硅阀最佳性能的比较

基本性能	水银汞弧阀 1975	可控硅阀	
		1975	1982
工作电压 (kV)	150	150	150
整流电流(1/3周期)A	1800 (6个正极并联)	(180个可控硅组) 2000	(110个可控硅组) 4000
电压降 (V)	60	(2个可控硅并联)	(1个可控硅 水平安装)
di/dt 最大信数 (A/ μ s)	2~3	280	200
恢复时间或去 游离时间(μ s)	100~200	30	50
		100	200

直流电网在运行中保持电压稳定。电站在运行中通过起动脉来调整整流器的电流，以保持逆变器运行电压恒定。有时在短时间内功率方向反向，这种情况应根据交直流逆变器的运行状态来调整整流器。有时也有可能电流增大，在这种情况下，要通过整定频率和交流电网的稳定阻尼来解决。

另一种连接方法是多端直流电网连接方法。图7示出两种连接方法，一种是“串联”连接法，一种是“并联”连接法。

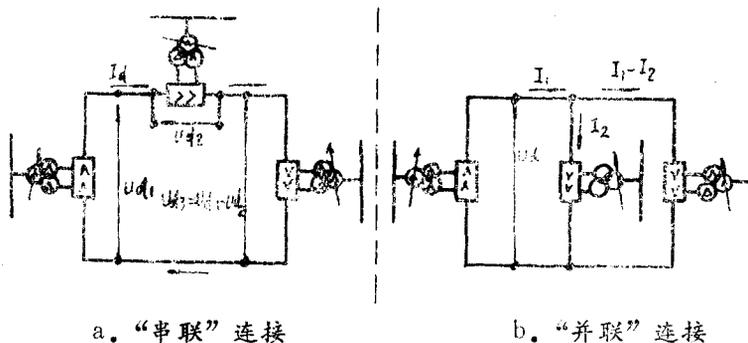


图7 多端直流输电连接方法

这两种连接方法是采用最新调节原理进行整定。例如：在“串联”连接图中，每一个电站中的电流都一样，根据电压的变化获得功率的变化。相反，在“并联”连接图中，电压恒定，从稳定性原理来讲应该是通过变流器调节电源，这样会出现大量的电能消耗。在以上两种连接方法之间进行选择并非一件容易的事，正确的选择取决于直流电压值和中间换流站与终端换流站之间的功率比。以上两种直流输电网络连接方法代表了目前世界直流输电的发展水平。

四、直流输电技术未来发展趋向

对于未来技术发展设想的试验是一种冒险，而在发展中它又被证实是必要的。对每一种研究来说，在它没有做出正确的结论之前对其发展的设想是必要的。

日本为了规划20世纪90年代及21世纪初的电力系统的发展展望，于1980年专门成立了一个特高压输配电研究机构，经过近几年的分析研究，根据日本国内的资源条件，制定出了今后日本电力发展规划。规划确定特高压交流输电的电压为1000千伏；直流输电的电压为 ± 500 千伏，输送容量为1000万千瓦左右，采用双极回路，输送距离约为1000公里左右。

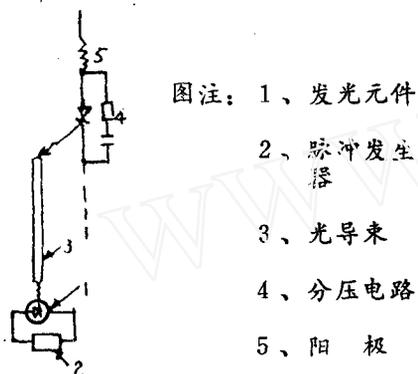


图8 可控硅光直接触发方式

可控硅触发方式采用光直接触发(图8)。

光直接触发的原理是：把对地等电位的发光元件(发光二极管)所发出的光信号，传送到位于高压线路下的光可控硅，直接触发光可控硅元件。

为了提高运行设备的可靠性，日本在直流输电换流站中，将普遍使用SF₆气体绝缘密闭式交直流转换开关阀。在未来的500千伏大容量充气密闭式换流站中使用SF₆气体阀组，采用“背靠背”安装方式，气体绝缘和气体冷却。

美国：美国直流输电的发展趋向是使用微型可控硅阀，采用冷却剂，SF₆气体绝缘阀。从目前的技术发展水平看，他们是过低地估计了实行的困难。

苏联、欧美、意大利、加拿大等国未来的发展趋向是：系统采用自动化数字控制；设备采用体积小、功率大、便于维修自控设备；采用光直接触发；冷却剂或空气冷却方式；电缆采用架空和海底及地下电缆相结合；电网运行采用交直流相结合的方式。

当然，直流输电未来的发展是无限的，但从基本原理上讲，将来最有竞争力的是在系统中使用微处理机自动信息处理设备。

近几年来，人们对超导体材料在直流输电中使用很感兴趣，目前法国正在研究它在信息系统中的特殊使用，这种超导体材料将延期使用到2000年。

五、结 论

综上所述，近八十年来直流输电在发展过程中取得了丰富的实践经验，这些经验证明：直流输电为发展工业和造福人类起到了极大的作用。随着世界电力工业的不断发展，直流输电技术必将得到进一步的发展。目前，在西欧一些国家中，电力用户之间的线路距离长为100km，我们认为这个距离还可以扩大，连接方法应采用地下电缆或海底电缆，网络采用多端串联或并联。经济效益应从降低成本着想，使用设备和元件逐步实现小型化和微型化，这些就是直流输电未来的发展趋向。

(下转85页)

配方二:

基料: E44(6101)*环氧树脂100份;增韧剂:邻苯二甲酸二丁脂15~20份;

填料:钛白粉2份;固化剂:乙二胺6~8份

具体操作程序如下:

(1)将邻苯二甲酸二丁脂与钛白粉(如果需要时也可增添其他填料,但都需干燥处理)按比例混合后加温90—100°C充分搅拌放置待用。

(2)将按比例混合好的邻苯二甲酸二丁脂,钛白粉等其他填料制得混合液再与环氧树脂混合。

(3)加温80—100°C充分搅拌均匀。

(4)如果用E44树脂待冷却到室温后,加6~8份乙二胺搅匀,停放10~15分钟自行消除气泡,即可以尽快的速度浇铸。

(5)对E51树脂要求30~35°C后,按比例加入改性苯二甲胺搅匀,放入真空箱内抽气后,方可以尽快速度浇铸。

(6)固化:对于E44树脂浇铸后在室温下12~18小时就可开模取件;对于E51树脂浇铸完后,要放入70~80°C烘箱内,恒温4小时即可开模取件。

(2)浇铸零件的稳定处理:固化后的零件放入烘箱内升温到80°C恒温4小时,随炉冷却出炉。

已得到的零件(或毛坯)可以直接使用,或再进行必要的机械补充加工,达到零件使用要求。

3、减少制件收缩率的措施

使用室温硫化硅橡胶模浇铸的环氧树脂制件,根据我们实际工作所得,其成型收缩率大约为1.5%左右,这样对一些精密零件就会使尺寸超差。我们采取的补救措施是:

(1)在浇制硅橡胶模混料时,添加5~10份石英粉。

(2)严格控制交链剂,触发剂的比例不准超过。

(3)环氧树脂浇铸热固化和零件处理温度都要控制在100°C以下。

(4)环氧树脂混料时,在流动性允许的情况下,适当添加些可用填料。

这样可以把收缩率减小,一般在0.5%左右。

几年来,我们利用此项工艺,为新产品研制服务,先后制造了继电器底座,支承架,旋钮,小型壳体,微型接插件等等近百种,加快了科研速度,由于材料性能、工艺关系,所制造的零件尚存在耐磨性稍低,收缩率不易掌握等问题,有待进一步探索。

(上接74页)

参 考 文 献

- 1、Alain LACOSTE, Le transport en courant continu haute tension 《RGE》 No 9 1982
- 2、尹克宁,日本直流输电的现状、技术水平和发 展趋向《电力系统自动化》 No 5 1984
- 3、伍世民、张游益,美国输电与配电《广西电力技术》No 6 1984
- 4、任 震 王官洁,加拿大的高压直流输电技术
《电力系统自动化》No 6 1984
- 5、李西友,译直流高压输电系统故障分析与研究新方法《继电器丛书》No 1 1982