

## 第 2 篇 高压直流输电

高压直流输电工程自 1954 年在瑞典 Gotland 投入工业化运行以来，至今经历了汞弧阀换流和晶闸管换流时期，目前世界上已有 60 多项直流输电工程投入运行，在远距离大容量输电、海底电缆和地下电缆输电以及电力系统联网工程中得到了较大的发展。特别是在 20 世纪 80 年代以后，大功率电力电子技术及微机控制技术等高科技的发展，进一步促进了直流输电技术的应用与发展。比较明显的是，背靠背非同步联网和多端直流输电工程以及采用新型半导体器件的轻型直流输电工程，近年来发展很快。到 20 世纪末已有 26 项背靠背和 2 项多端直流输电工程投入运行，另外还有 2 项直流工程具有多端直流输电的运行性能。到 2000 年已有 5 项轻型直流输电工程投入运行。

高压直流输电在远距离大容量输电和电力系统联网方面具有明显的优点，它将在我国西电东送和全国联网工程中起到重要的作用。到 2005 年我国已有 8 项高压直流输电工程相继投入运行。

本篇主要从直流输电换流技术、控制系统和保护装置、换流站主接线及主要设备、直流输电接地极、过电压及绝缘配合等方面，总结归纳了国内外高压直流输电工程的建设和运行经验。

## 第 6 章 直流输电概论

### 6.1 直流输电的发展

#### 6.1.1 国外直流输电的发展

电力技术的发展是从直流电开始的，早期的直流输电是直接从直流电源送往直流负荷，不需要经过换流，如 1882 年在德国建成的 2kV、1.5kW、57km 向慕尼黑国际展览会的送电工程；1889 年在法国用直流发电机串联而得到高电压，从毛梯埃斯(Mouties)到里昂(Lyon)的 125kV、20MW、230km 的直流输电工程等。随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的迅速发展，发电和用电领域很快被交流电所取代。由于变压器可方便地改变交流电压，从而使交流输电和交流电网得到迅速的发展，并很快占据了统治地位。但是直流还有交流所不能取代之处，如远距离电缆送电、不同频率电网之间的联网等。

采用直流输电，必须要解决换流问题。因此，直流输电的发展与换流技术的发展有密切的关系。直流输电的发展可分为以下几个时期。

#### 一、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。

## 二、晶闸管换流时期

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，这些进步有效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简单而方便。晶闸管换流阀比汞弧阀有明显的优势，以后建的直流工程均采用晶闸管换流阀。同时，晶闸管逐步替代原来采用汞弧阀的直流工程。

## 三、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。1997 年 3 月，世界上第一个采用 IGBT 组成电压源换流器的直流输电工业性试验工程在瑞典中部投入运行。2000 年时，已有 5 个轻型直流输电工程在世界投入运行。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。近期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。因此，这些新型的半导体换流器件将会取代普通晶闸管。

### 6.1.2 国内直流输电的发展

为了长江三峡水利资源的开发以及三峡电站的电力外送，我国在 1958 年提出直流输电。1963 年在中国电力科学研究院建成 1000V、5A 的直流输电物理模拟装置。20 世纪 70 年代以后，用晶闸管替换了原来的闸流管并采用了数字式的控制保护系统，并先后在西安和上海建立了相应的试验装置和试验工程。到了 80 年代，由于葛一南大型直流输电工程的需要，从瑞士 BBC 公司引进了一套先进的大型直流输电模拟装置。90 年代，在该套装置上又增加了全数字化的直流输电仿真系统（RTDS），并与暂态网络分析装置（TNA）相连，从而具备了进行更大规模试验研究工作的能力。中国直流输电的发展起步较晚，它跨越了汞弧阀换流时期。

## 6.2 直流输电工程的特点

### 6.2.1 直流输电的优点

与高压交流输电相比较，直流输电具有下列优点：

#### 一、输送相同功率时，线路造价低

对于架空线路，交流输电通常采用 3 根导线，而直流只需 1 根(单极)或 2 根(双极)导线。输送相同功率时，直流输电所用线材仅为交流输电的  $2/3 \sim 1/2$ 。另外，直流输电在线路走廊、铁塔高度、占地面积等方面，比交流输电优越。

对于电缆线路，直流电缆与交流电缆相比，其投资费和运行费都更为经济，这就是越来越多的大城市供电采用地下直流电缆的原因。

#### 二、线路损耗小

由于直流架空线路仅用 1 根或 2 根导线，所以导线上的有功损耗较小。同时，由于直流线路没有感抗和容抗，在线路上也就没有无功损耗。另外，由于直流架空线路具有“空间电荷”效应，其电晕损耗和无线电干扰均比交流架空线路要小，直流输电没有集肤效应，导线的截面利用充分。这样，直流架空线路在年运行费用也比交流架空线路经济。

#### 三、适宜于海下输电

海下输电必须采用电缆。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。且电缆的绝缘在直流电压和交流电压作用下的电位分布、电场强度和击穿强度都不相同。

#### 四、没有系统稳定问题

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。系统稳定是指在系统受到扰动后所有互联的同步发电机具有保持同步运行的能力。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。

如果采用直流线路连接两个交流系统，由于直流线路没有电抗，所以不存在上述的同步运行稳定问题，即直流输电不受输电距离的限制。另外，由于直流输电与系统频率、系统相位差无关，所以直流线路可以连接两个频率不相同的交流系统。

#### 五、能限制系统的短路电流

用交流输电线路连接两个交流系统时，系统容量增加，将使短路电流增大，有可能超过原有断路器的通断容量，这就要求更换大量设备，增加大量的投资。而用直流输电线路连接两个交流系统时，直流系统的“定电流控制”将快速把短路电流限制在额定功率附近，短路容量不因互联而增大，有利于实现交流系统的互联。

#### 六、调节速度快、运行可靠

直流输电通过晶闸管换流器能够方便、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。

采用双极线路时，假如一极出现故障，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。

#### 七、实现交流系统的异步连接

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。

#### 八、直流输电可方便地进行分期建设和增容扩建，有利于发挥投资效益

双极直流输电工程可按极来分期建设，先建一个极单极运行，然后再建另一个极。也可以每极选择两组基本换流单元（串联接线或并联接线），第一期先建一组（为输送容量的 1/4）单极运行；第二期再建一组（为输送容量的 1/2）双极运行；第三期再增加一组，可双极不对称运行（为输送容量的 3/4），当两组换流单元为串联接线时，两极的电压不对称，为并联接线时候，则两极的电流不对称；第四期则整个双极工程完全建成。

### 6.2.2 直流输电的缺点

直流输电与交流输电相比，有如下缺点：

一、换流站的设备较昂贵。

二、换流装置要消耗大量的无功功率。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。

三、产生谐波影响。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。

四、换流装置几乎没有过载能力，所以对直流系统的运行不利。

五、缺乏高压直流开关。由于直流输电不存在零点，以致灭弧较困难，目前尚无适用的高压直流开关。现在是把换流器控制脉冲信号闭锁，起到部分开关的作用。但在多端供电式，就不能单独切断事故线路，而要切断整个线路。近年来，采用新型可关断半导体器件进行换流时，直流断路器的功能将由换流器来承担。

六、直流输电利用大地（或海水）为回路而带来的一些技术问题。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；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。

七、直流输电线路难于引出分支线路，绝大部分只用于端对端送电。

根据以上优缺点，直流输电适用于以下场合：

- (一) 远距离大功率输电。
- (二) 海底电缆送电。
- (三) 不同频率或同频率非周期运行的交流系统之间的联络。
- (四) 用地下电缆向大城市供电。
- (五) 交流系统互联或配电网扩容时，作为限制短路电流的措施之一。
- (六) 配合新能源的输电。

### 6.3 直流输电工程系统构成

直流输电系统可分为两大类：两端直流输电系统和多端直流输电系统。两端直流输电系统只有一个整流站和一个逆变站，它与交流系统只有连接端口，是结构最简单的直流输电系统。多端直流输电系统具有三个或三个以上的换流站，它与交流系统有三个或三个以上的连接端口。目前世界上运行的直流输电工程只有少数工程为多端系统，大多为两端直流系统。

#### 6.3.1 两端直流输电系统

两端直流输电系统通常由整流站、逆变站和直流输电线路三部分组成，其原理接线如图 6-1 所示。具有功率反送功能的两端直流系统的换流站，既可作为整流站运行，又可作为逆变站运行；当功率反送时整流站作为逆变站运行，而逆变站则作为整流站运行。换流站的主要设备有：换流变压器、换流器、平波电抗器、交流滤波器和无功补偿设备、直流滤波器、保护装置、远动通信系统、接地极线路、接地极等。

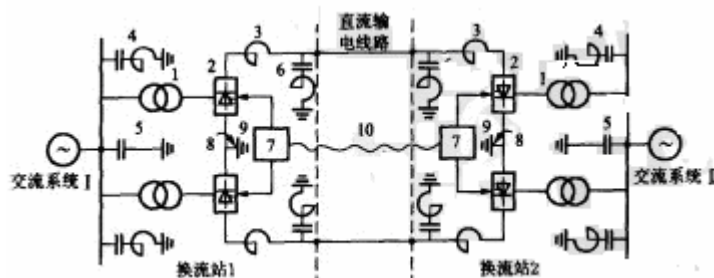


图 6-1 两端直流输电系统构成原理图

1—换流变压器；2—换流器；3—平波电抗器；4—交流滤波器；5—静电电容器；

6—直流滤波器；7—控制保护系统；8—接地极线路；9—接地极；10—远动通信系统

直流输电所用的换流器通常采用由 12 个（或 6 个）换流阀组成的 12 脉动换流器（或 6

脉动换流器)。早期的直流输电工程曾采用汞弧阀换流, 20 世纪 70 年代以后均采用晶闸管换流阀。目前, 已经能制造最大容量为 250kV、4000A 的换流阀, 以满足特高压直流输电的需要。

换流变压器可实现交、直流侧的电压匹配和电隔离, 还可以限制短路电流。换流变压器阀侧绕组所承受的电压为直流电压叠加交流电压, 并且两侧绕组中均有一系列的谐波电流。因此, 换流变压器的设计、制造和运行均和普通电力变压器有所不同。

平波电抗器与直流滤波器共同承担直流侧滤波的任务, 同时它还具有防止线路上的陡波进入换流站, 防止直流电流断续, 降低逆变器换相失败率等功能。

运行时换流器的交流侧和直流侧都会产生谐波, 所以在两侧需要装设交流滤波器和直流滤波器。由晶闸管换流阀所组成的电网换相换流器, 运行中还吸收大量的无功功率。因此, 在换流站要利用交流滤波器提供的无功, 有时还需要另外装设无功补偿装置。

保护装置是实现直流输电正常起停、正常运行、自动调节、故障处理与保护等功能的设备, 它保证直流输电运行的可靠性。20 世纪 80 年代以后, 保护装置均采用高性能的微机处理系统, 大大改善了直流输电工程的运行性能。

为了利用大地(或海水)为回路, 以提高直流输电运行的可靠性和灵活性, 两端换流站还需要有接地极和接地极线路。换流站的接地极大多是考虑长期通过运行的直流电流来设计的, 它不同于通常的安全接地, 需要考虑地电流对接地极附近地下金属管道的电腐蚀, 以及中性点接地变压器直流偏磁的增加引起的变压器饱和等问题。

两端的交流系统给换流器提供换相电压和电流, 同时它也是直流输电的电源和负荷。交流系统的强弱、系统结构和运行性能对直流输电系统的设计和运行均有较大影响。另一方面, 直流系统运行性能的好坏, 也直接影响两端的交流系统的运行性能。

两端直流输电系统可分为单极系统、双极系统和背靠背直流系统三种类型。

### 一、单极系统

单极直流输电系统可以采用正极性或负极性。换流站出线端对地电位为正的称为正极, 为负的称为负极。与正极或负极相连的输电导线称为正极导线或负极导线; 也可以称为正极线路或负极线路。因为正极导线的电晕电磁干扰和可听噪声均比负极导线的大, 单极直流架空线路通常采用负极性, 此时正极接地。同时由于雷电大多为负极性, 使得正极导线雷电闪络的概率也比负极导线的高。单极系统运行的可靠性和灵活性均不如双极系统的好, 实际工程中大多采用双极系统。双极系统由两个可独立运行的单极系统组成, 便于工程进行分期建设, 同时在运行中当一极故障停运时, 可自动转为单极系统运行。因此, 虽然所设计的单极直流输电工程不多, 但在实际运行中单极系统的运行方式还是常见的。

单极系统的接线方式有单极大地(或海水)回线方式和单极金属回线方式两种。另外当双极直流输电工程在单极运行时, 还可以接成双导线并联大地回线方式运行。图 6-2 中的 (a)、(b)、(c) 分别给出这三种方式的示意图。

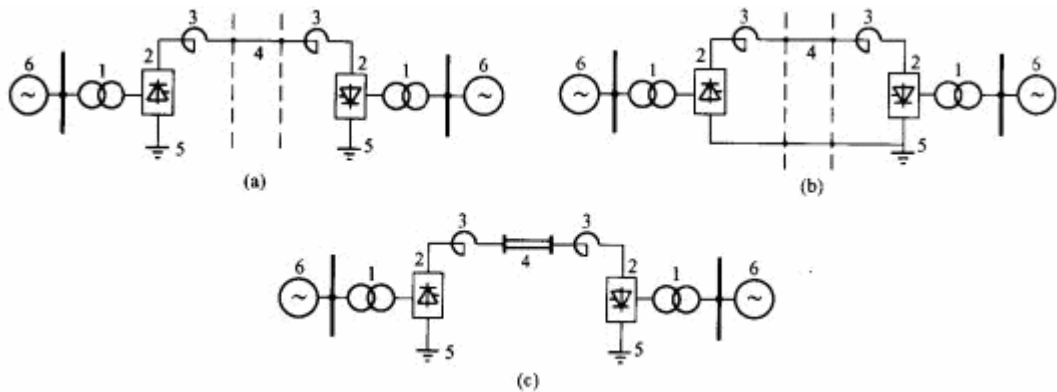


图 6-2 单极图直流输电系统接线示意图

(a) 单极大地回线方式； (b) 单极金属回线方式； (c) 单极双导线并联大地回线方式

1—换流变压器； 2—换流器； 3—平波电抗器； 4—直流输电线路； 5—接地极系统； 6—两端交流系统

### (一) 单极大地回线方式

单极大地回线方式是利用一根导线和大地（或海水）构成直流侧的单极回路，两端换流站均需接地，见图 6-2 (a)。这种方式的大地（或海水）相当于直流输电线路的一根导线，流经它的电流为直流输电工程的运行电流。由于地下（或海水中）长期有大的直流电流流过，这将引起接地极附近地下金属构件的电化学腐蚀以及中性点接地变压器直流偏磁的增加而造成的变压器磁饱和等问题，这些问题有时需要采取一定的技术措施。对于单极大地回线方式的直流输电工程，其接地极设计所取的连续运行电流即为工程连续运行的直流电流。

单极大地回线方式的线路结构简单，可利用大地可以省去一根导线，但其可靠性和灵活性较差；并且对接地极的要求较高，投资增加。这种方式的应用场合主要是高压海底电缆直流工程。

### (二) 单极金属回线方式

单极金属回线方式是利用两根导线构成直流侧的单极回路，见图 6-2 (b)。在运行中，地中无电流流过，可避免由此产生的电化学腐蚀和变压器磁饱和等问题。为了固定直流侧的对地电压和提高运行的安全性，金属返回线的一端需要接地，其不接地端的最高运行电压为最大直流电流时在金属返回线上的压降。这种方式的线路投资和运行费用均较单极大地回线方式的要高。

## 二、双极系统

直流输电工程通常采用双极系统接线方式，可分为三种类型：双极两端中性点接地方式、双极一端中性点接地方式和双极金属中线方式。图 6-3 所示为双极直流输电系统接线示意图。

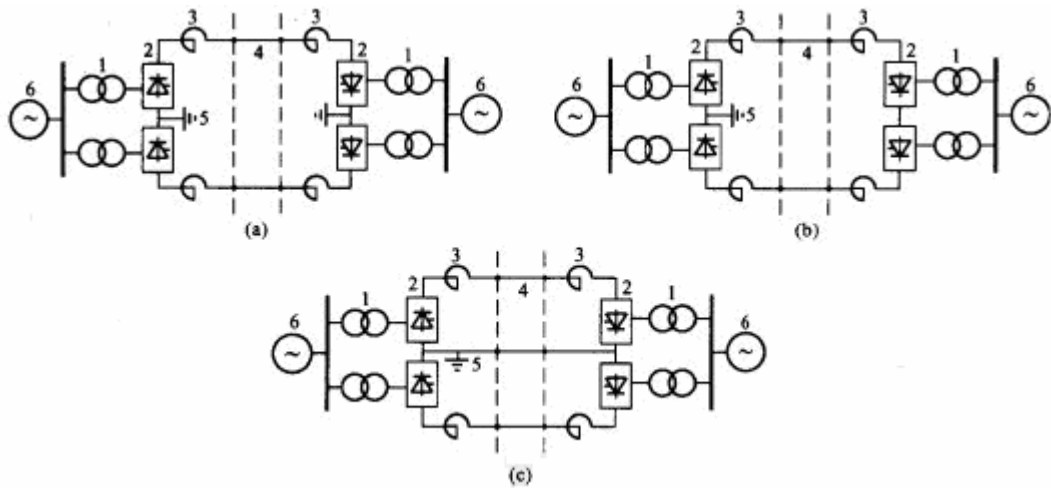


图 6-3 双极直流输电系统接线示意图

(a) 双极两端中性点接地方式； (b) 双极一端中性点接地方式； (c) 双极金属中线方式

1—换流变压器； 2—换流器； 3—平波电抗器； 4—直流输电线路； 5—接地极线路； 6—两端交流系统

### (一) 双极两端中性点接地方式（简称双极方式）

双极两端中性点接地方式在大多数直流输电工程中应用，为正负两极对地，两端换流站的中性点均接地的系统构成方式，见图 6-3(a)，将正负两极导线和两端换流站的正负两极相连，构成直流侧的闭环回路。两端接地极所形成的地回路，可作为输电系统的备用导线。正常运行时，直流电流的路径为正负两根极线。正负两极在地回路中的电流方向相反，地中电流为两极电流之差。双极的任一极均能构成一个独立运行的单极输电系统，双极的电压和

电流可以不相等。双极的电压和电流均相等时称为双极对称运行方式，不相等时称为电压或电流的不对称运行方式。当双极电流相等时，地中无电流流过，实际上仅为两极的不平衡电流，通常小于额定电流的1%。因此，在双极对称方式运行时，可基本上消除由地中电流引起的电腐蚀等问题。当双极电流不对称运行时，两极中的电流不相等，地中电流为两极电流之差。

双极方式的直流输电工程，当输电线路或换流站的一个极发生故障需退出工作时，可根据具体情况转为三种单极方式运行，即：①单极大地回线方式；②单极金属回线方式；③单极双导线并联大地回线方式。

## (二) 双极一端中性点接地方式

双极一端中性点接地方式只有一端换流站的中性点接地，见图 6-3 (b)，其直流侧回路由正负两极导线组成，不能利用大地（或海水）作为备用导线。当一极线路发生故障需要退出工作时，必须停运整个双极系统，而没有单极运行的可能性。当一极换流站发生故障时，也不能自动转为单极大地回线方式运行，而只能在双极停运以后，才有可能重新构成单极金属回线的运行方式。因此，这种接线方式的运行可靠性和灵活性均较差。其主要优点是可以保证在运行中地中无电流流过，从而可以避免腐蚀地中金属等问题。

## (三) 双极金属中线方式

双极金属中线方式是利用三根导线构成直流侧回路，其中一根为低绝缘的中性线，另外两根为正负两极的极线，见图 6-3 (c)。这种系统构成相当于两个可独立运行的单极金属回线系统，共用一条低绝缘的金属返回线。为了固定直流侧各种设备的对地电位，通常中性线的一端接地，另一端的最高运行电压为流经金属中线最大电流时的电压降。这种方式在运行时地中无电流流过。当一极线路发生故障时，则可自动转为单极金属回线方式运行；当换流站的一个极发生故障需要退出工作时，可首先自动转为单极金属回线方式，然后还可转为单极双导线并联金属回线方式运行。其运行的可靠性和灵活性与双极两端中性点接地方式相类似。由于采用三根导线组成输电系统，其线路结构较复杂，线路造价较高。通常是当不允许地中流过直流电流或接地极极址很难选择时才采用。

## 三、背靠背直流系统

背靠背直流系统是无直流输电线路的两端直流输电系统，它主要用于两个非同步运行（不同频率或频率相同但非同步）的交流电力系统之间的联网或送电，也称为非同步联络站。如果两个被联电网的额定频率不相同（如 50Hz 和 60Hz），也可称为变频站。背靠背直流系统的整流站和逆变站的设备通常均装设在一个站内，也称背靠背换流站。在背靠背换流站内，整流器和逆变器的直流侧通过平波电抗器相连，构成直流侧的闭环回路；而其交流侧则分别与各自的被联电网相连，从而形成两个电网的非同步联网。为降低换流站产生的谐波，通常选择 12 脉动换流器作为基本换流单元。图 6-4 所示为背靠背换流站的原理接线。换流站内的接线方式有换流器组的并联方式和串联方式两种。背靠背直流输电系统的主要特点是直流侧可选择低电压大电流（因无直流输电线路，直流侧损耗小），可充分利用大截面晶闸管的通流能力，同时直流侧设备（如换流变压器、换流阀、平波电抗器等）也因直流电压低而使其造价也相应降低。由于整流器和逆变器均装设在一个阀厅内，直流侧谐波不会造成对通信线路的干扰，因此省去直流滤波器，减小平波电抗器的电感值。背靠背换流站的造价比常规换流站的造价降低约 15%~20%，采用背靠背系统进行非同步联网在电力系统运行上具有较多的优点。

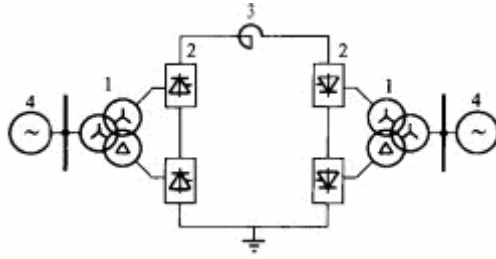


图 6-4 背靠背换流站原理接线图

1—换流变压器；2—换流器；3—平波电抗器；4—两端交流系统

### 6.3.2 多端直流输电系统

多端直流输电系统由三个或三个以上换流站以及连接换流站之间的高压输电线路组成，它与交流系统有三个或三个以上连接端口。多端直流输电系统可以解决多电源供电或多落点受电的输电问题，它还可以联系多个交流系统或者将交流系统分成多个孤立运行的电网。多端直流输电系统中的换流站，可以作为整流站运行，也可作为逆变站运行。多端直流输电系统换流站之间的连接方式可以采用并联方式或串联方式，连接换流站之间的输电线路可以是分支形或闭环形等。

(1) 串联方式的特点是各换流站均在同一个直流电流下运行。通常可用调节换流器的触发角  $\alpha$  或换流变压器的分接开关来改变直流电压。分接开关的调节范围有限(一般为 20%~30%)， $\alpha$  角也受到最大  $\alpha_{\max}$  角(一般为  $50^\circ \sim 60^\circ$ )的限制，从而使换流站的最小功率受到限制。同时在大  $\alpha$  角下运行时，换流站消耗的无功功率也增加很多。如果换流站需要改变潮流方向，串联方式只需改变换流器的触发角，使原来的整流站（或逆变站）作为逆变站（或整流站）运行，而不改变换流器直流侧的接线，潮流反转操作快速方便。当某一换流站发生故障时，可投入其旁通开关，使其退出工作，其余的换流站经自动调整后，仍能继续运行，不需要用直流断路器来断开故障。当某一段直流线路发生瞬时故障时，可调节换流器的触发角，使整个直流系统的直流电压降到零，待故障消除后，直流系统可自动再启动。当一段直流线路发生永久性故障时，则整个多端系统需要停运。为避免这种情况发生，必要时可采用双回线的串联系统，此时线路投资将明显增加。

(2) 并联方式的特点是各换流站在同一个直流电压下运行（忽略直流线路压降），换流站之间的有功调节和分配主要是靠改变换流站的直流电流来实现。可调节控制器的触发角  $\alpha$  以及换流变压器的分接开关来改变直流电流。由于并联方式在运行中保持直流电压不变，负荷的减小是通过降低直流电流来实现，因此其系统损耗小，运行经济性也好。基于上述优点，目前已运行的多端直流系统均采用并联方式。并联方式的主要缺点是当换流站需要改变潮流方向时，除了改变换流器的触发角，使原来的整流站（或逆变站）作为逆变站（或整流站）以外，还必须将换流器直流侧两个端子的接线倒换过来接入直流网络才能实现。因此，并联方式对潮流变化频繁的换流站很不方便。另外，在并联方式中当某一换流站发生故障并需退出工作时，需要用直流断路器来断开故障的换流站。

多端直流输电系统比采用多个两端直流输电系统更经济，但其控制保护系统以及运行操作较复杂。今后随着具有关断能力的换流阀（如 IGBT、IGCT 等）的应用以及在实际工程中对控制保护系统的改进和完善，多端直流输电在工程中将会得到更多的应用。



## 6.4 直流输电的换流技术

要实现直流输电必须将送端的交流电变换为直流电，称为整流，而到受端又必须将直流电变换为交流电，称为逆变，它们统称为换流。这种电力变换的技术就是我们所说的直流输电换流技术。由于直流输电的传输容量大、电压高，要实现这种电力变换，需要有高电压、大容量的换流设备，通常这种设备称为换流阀。

直流输电的发展与换流技术的发展密切相关，其中大功率换流器件起着关键的作用。直流输电换流技术包括实现换流的高压大功率换流阀和保护装置以及进行换流的理论和方法，而前者往往起决定性作用。

### 6.4.1 换流站的基本换流单元

直流输电换流站由基本换流单元组成，基本换流单元主要包括换流变压器、换流器、相应的交流滤波器和直流滤波器以及保护装置等。目前工程中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。它们的主要区别在于所采用的换流器不同，前者采用 6 脉动换流器，后者则采用 12 脉动换流器。在汞弧阀换流时期，为了减少换流站设备的数量，降低造价，通常采用最高电压的汞弧阀所组成的 6 脉动换流单元为基本换流单元。在换流站内允许一组 6 脉动换流单元独立运行，在运行中可以切除或投入一组 6 脉动换流单元。在这种情况下，交流滤波器和直流滤波器必须按 6 脉动换流器的要求来配备。当采用晶闸管换流阀以后，换流阀由多个晶闸管串联组成，可以方便地利用不同的晶闸管串联数而得到不同的换流阀电压，从而可得到不同电压的 12 脉动换流器。因此，绝大多数直流输电工程均采用 12 脉动换流器作为基本换流单元，此时交流滤波器和直流滤波器只需按 12 脉动换流器的要求来配备，这样可大大地简化滤波器装置，减小换流站占地面积，降低换流站造价。

#### 一、6 脉动换流单元

6 脉动换流单元由换流变压器、6 脉动换流器以及相应的交流滤波器、直流滤波器和保护装置所组成，其原理接线见图 6-5。

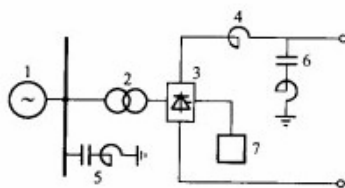


图 6-5 6 脉动换流单元原理接线图

1—交流系统；2—换流变压器；3—6 脉动换流器；4—平波电抗器；5—交流滤波器；

6—直流滤波器；7—保护装置

6 脉动换流单元的换流变压器可以采用三相结构也可以采用单相结构，其阀侧绕组的接线方式可以是星形接线也可以三角形接线。6 脉动换流器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  $6K \pm 1$  的交流滤波器，而在直流侧除平波电抗器以外，对于架空线路来说通常还需要配备  $6K$  次的直流滤波器。

#### 二、12 脉动换流单元

12 脉动换流单元可以采用双绕组换流变压器或三绕组换流变压器，见图 6-6。为了使换流变压器阀侧绕组的电压相位相差  $30^\circ$ ，其阀侧绕组的接线方式，必须一个为星形接线，另一个为三角形接线。换流变压器可以选择三相结构或单相结构。因此，对于一组 12 脉动换流单元的换流变压器，可以有四种选择方案：①1 台三相三绕组变压器；②2 台三相双绕

组变压器；③3台单相三绕组变压器；④6台单相双绕组变压器。

12脉动换流器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须分别配备 $12K\pm 1$ 次和 $12K$ 次的滤波器。从而可简化滤波器装置，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。对于12脉动换流单元除图上标出的主要设备外，还有相应的交直流避雷器和交直流开关以及测量设备等。

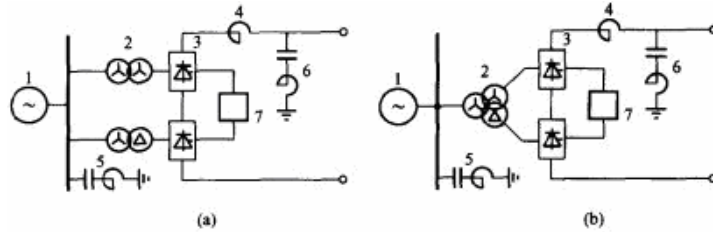


图 6-6 12 脉动换流单元原理接线图

(a) 双绕组换流变压器；(b) 三绕组换流变压器

1—交流系统；2—换流变压器；3—12 脉动换流器；4—平波电抗器；5—交流滤波器；

6—直流滤波器；7—保护装置

大部分直流输电工程均采用每极一组基本换流单元的接线方式，因为这种接线方式换流站的设备数量最少，投资最省，可靠性也最高。但以下情况有时需要考虑采用每极两组基本换流单元接线方式：①当直流输送容量大，而交流系统相对较小时；②当换流站的设备，对于每极一组基本换流单元来说，在制造上或运输上有困难时，需要采用每极两组基本换流单元的方案；③根据工程分期建设的要求，每极分成两期建设在经济上有利时，则可在一极中先建一个基本换流单元，然后再建另一个。

每极两组基本换流单元的接线方式，有串联方式和并联方式两种（见图 6-7），串联方式每组基本换流单元的直流电压为直流极电压的 $1/2$ ，其直流电流为直流极电流；并联方式的直流电流为直流电极电流的 $1/2$ ，其直流电压为直流极电压。

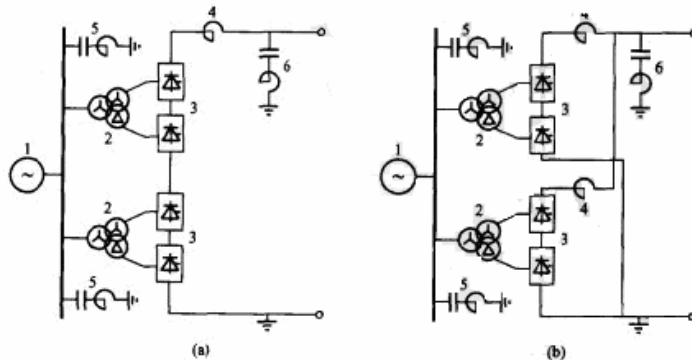


图 6-7 每极两组 12 脉动换流单元原理接线图

(a) 串联方式；(b) 并联方式

1—交流系统；2—换流变压器；3—12 脉动换流器；4—平波电抗器；

5—交流滤波器；6—直流滤波器

## 6.4.2 直流输电换流技术的新发展

### 一、传统直流输电的缺陷

直流输电系统主要由整流器、逆变器(换流器)、直流线路等部分组成。其中关键技术是换流技术。传统的直流输电采用电网换相的换流技术，即由交流电网提供换相时的短路电流，

也称换相电流。因此，传统的直流输电系统存在以下缺陷：

(一) 为保证换相的可靠，受端交流必须有足够的容量，即必须有足够的短路比，当受端电网比较弱时，容易发生换相失败。

(二) 存在延迟触发角  $\alpha$  (一般为  $10^\circ \sim 15^\circ$ ) 和关断角  $r$  (一般为  $15^\circ$  或更大一些)，以及波形的非正弦，因此，传统的直流输电要吸收大量的无功功率，其值约为输送直流功率的 40%-60%，需要大量的无功补偿及滤波设备，且在甩负荷时会出现无功功率过剩，导致过电压。

(三) 传统的直流输电需要交流电网提供换相电流，这就要求受端系统是有源网络。因此，传统的直流输电不能向无源网络(如孤立负荷)输电。

## 二、传统直流输电的新发展

为了克服上述第二个缺点，可以采用人工换相，使换流器工作在  $\alpha, r \leq 0$  的情况下，从而出现了串联电容器换相器技术(CCC)和可控串联电容器的换相器技术(CSCC)。

CCC/CSCC 的基本思想是用串联电容器来补偿换流的无功功率消耗。其中 CCC 概念是将电容器放在换流变压器的二次侧，并且采用固定电容器。适当选择串联电容器的大小，就可实现  $\alpha \leq 0^\circ$  或  $\alpha \geq 180^\circ$ ，从而使换流器不吸收甚至发出基波无功功率。

CSCC 概念是把电容器放在换流变压器的一次侧，并且采用可控串联电容器。它成功运用晶闸管控制电容器(TCSC)技术和传统的电网换相换流器相结合，通过对串联电容器的动态调整，可以克服可能发生的铁磁谐振。

与传统直流输电相比，CCC/CSCC 具有如下技术特点：

1、提高换流器的功率因数。在传统直流输电中，为保证换相的可靠完成，并有一定调节余地，要求足够大的延迟触发角  $\alpha$  (对整流侧)和触发超前角  $\beta$  (对逆变侧)，但另一方面，为了提高换流器的功率因数，又要求  $\alpha$  和  $\beta$  尽可能小，两者要综合考虑。而 CCC/CSCC 换流器的功率因数主要取决于电容器交流侧的视在延迟触发角  $\alpha_{app}$  (对整流侧)和视在触发超前角  $\beta_{app}$  (对逆变侧)，调节电容器值，可使  $\alpha_{app}$ 、 $\beta_{app}$  小于 0，另一方面，CCC/CSCC 换相能否可靠完成，则取决于电容器的换流器侧的实际延迟触发角  $\alpha_{rel}$  (对整流侧)和实际触发超前角  $\beta_{rel}$  (对逆变侧)，而实际的  $\alpha_{rel}$ 、 $\beta_{rel}$  大于延迟触发角的下限。因此，CCC/CSCC 换流器具有很高的功率因数，又具有很高的换相可靠性。

2、降低甩负荷时的过电压。CCC/CSCC 所需的无功功率主要由串联电容来补偿，而串联电容所产生的无功功率随着负荷增减而增减，才能有效地降低甩负荷时的过电压。

3、无需大容量补偿装置，但需采用高性能的滤波器。CCC/CSCC 具有较高的功率因数，只需要小容量滤波装置，但要求滤波器具有良好的跟随特性，必须采用连续可调的交流滤波器或有源交流滤波器。

### 6.4.3 基于电压源换流器的新型高压直流输电系统

传统直流输电以半控功率器件为基础，电流不能自关断，CCC/CSCC 在传统直流输电基础上进行了改进，增加了附加接线，实现了强迫关断，但是仍然采用触发相位控制，只能工作在有源逆变方式。采用 IGBT 的电压源换流器，具有关断电流的能力，可以应用脉宽调制 (SPWM) 技术进行无源逆变，解决了用直流输电向无交流电源的负荷点送电的问题。它与电网换相换流器有着本质区别。基于电压源换流器的新型高压直流输电又称为轻型高压直流输电(Light HVDC)。

#### 一、基于电压源换流器的新型直流输电的实现

采用电压源换流器的新型直流输电是通过 VSC(电压源变换器)来实现，通常采用两电平 6 脉动型，每个桥臂都由多个绝缘栅双极晶体管(IGBT)或门极关断晶闸管(GTO)串联而成。

直流侧并的电容器为逆变器提供电压支撑、缓冲桥臂关断时的冲击电流、减小直流侧谐波；交流侧的换流电抗器 VSC 与交流侧能量交换的纽带，同也起到滤波的作用；交流滤波器作用是滤去交流侧谐波。

## 二、新型直流输电的控制方法

在新型直流输电中，VSC 通常采用正弦脉宽调制(SPWM)技术，其原理是：把给定的正弦波(期望的输出电压波形)与三角载波相比较，从而决定每个桥臂的开通、关断时刻。当直流侧电压恒定时，SPWM 的调制度(正弦给定信号与三角载波幅值之比)决定 VSC 输出电压的幅值，正弦给定信号的频率与相位决定 VSC 输出电压的频率与相位。

VSC 吸收的有功功率和无功功率分别取决于 VSC 输出电压的相位和幅值，所以通过控制 SPWM 给定的正弦信号的相位，就可以控制有功功率的大小及输送方向，通过控制 SPWM 的调制度就可以控制无功功率的大小及性质，从而实现有功功率和无功功率同时且相互独立调节。

## 三、新型直流输电的技术特点

(一) VSC 电流能够自关断，可以工作在无源逆变方式，无需外加的换相电压。这就克服了传统 HVDC 受端必须是有源网络的根本缺陷，使 HVDC 为远距离的孤立负荷送电成为可能。

(二) VSC 可以同时且相互独立控制有功功率、无功功率，控制更加灵活方便。而传统的 HVDC 中只控制触发角，不可能单独控制无功功率或有功功率。

(三) VSC 不需要交流侧提供无功功率，而且起到静止补偿器的作用，动态补偿交流母线的无功功率，稳定交流母线电压。

(四) 潮流反转时，直流方向反转，而直流电压极性不变，这一点与传统的 HVDC 相反。这个特点有利于构成既能方便地控制潮流又有较高可靠性的并联多端直流系统。克服了传统 HVDC 多端系统并联时潮流控制不便，串联时又影响可靠性的缺点。

(五) 由于 VSC 交流侧电流可以控制，所以不会增加系统的短路功率。这意味着增加新的新型直流输电线路后，交流系统的保护整定基本不需改变。

(六) VSC 通常采用 SPWM 技术，开关频率较高，经过低通滤波后就得到所需的交流电压，可以不用变压器。

(七) VSC-HVDC 的一个固有特征是能够提高系统阻尼，故不会引起发电机的次同步振荡。

# 6.5 直流输电的应用和工程类型

## 6.5.1 直流输电的应用简介

### 一、舟山直流输电工程

舟山直流输电工程是 1980 年国家确定全部依靠自己的力量建设的中国第一项直流输电工程，它既解决了浙江大陆向舟山本岛的输电问题，又具有向建设大型直流输电工程过渡的工业性试验性质。该工程的第一期为单极金属回线方式（—100kV，500A，50MW）。第一期工程于 1984 年开始施工，1987 年进行调试并投入试运行，1989 年正式投入商业运行。工程的最终规模为双极 ±100kV，500A，100MW。整流站在浙江省宁波附近的大碇镇，逆变站在舟山本岛的鳌头浦，线路全长 54km。1997 年舟山地区新装一台 125MW 发电机，使系统装机容量增加到 186MW，在低谷负荷时有多余的电力可向浙江大陆输送，从而对工程提出了功率反送的要求；另一方面控制保护设备也极需更新。舟山直流输电工程原理接线见图 6-8。

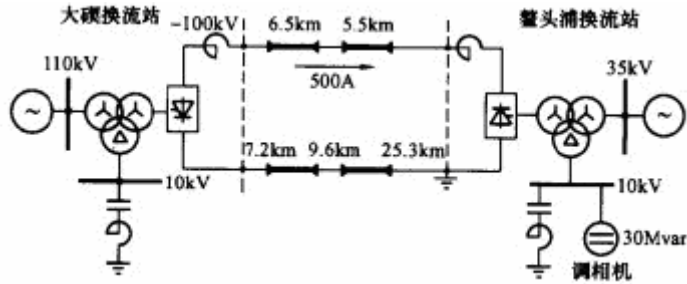


图 6-8 舟山直流输电工程原理接线图

——架空线路；——海底电缆

## 二、葛洲坝—南桥直流输电工程（简称葛—南直流工程）

1982 年开始对葛洲坝水电站向华东送电进行可行性研究，由于直流输电和联网方面的优点，最终选择了直流输电方案。该工程既解决了葛洲坝电站远距离向华东上海地区的送电问题，又实现了华中与华东两大电网的非同期联网。葛—南直流工程为双极±500kV、1200A、1200MW，输送距离约 1045km。整流站在葛洲坝水电站附近的葛洲坝换流站，逆变站在上海的南桥换流站。工程设计和设备制造全部由国外承包商承担，因为这种大型直流输电工程的换流设备，我国尚不能制造，同时又缺乏工程设计经验。1984 年国家批准了工程项目，同年 12 月与原瑞士 BBC 公司和德国西门子公司签订了供货合同。由 BBC 公司总承包，西门子公司提供南桥换流站的全部一次设备。1985 年 10 月开工，1989 年 9 月单极投入运行，1990 年 8 月全部工程建成，并投入商业运行。图 6-9 为葛—南直流输电工程原理接线。

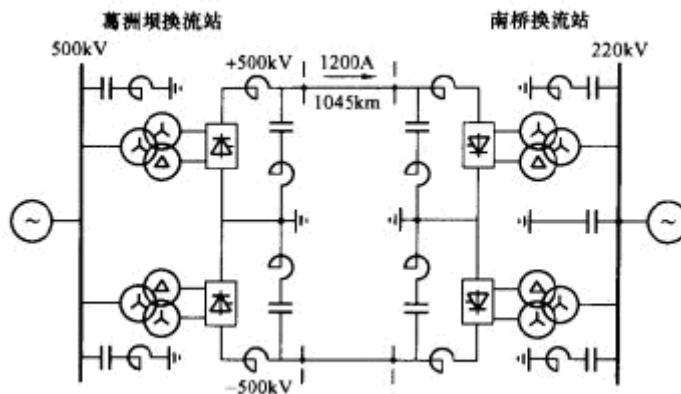


图 6-9 葛—南直流输电工程原理接线图

## 三、天生桥—广州直流输电工程（简称天—广直流工程）

天—广直流工程于 1991 年开始进行可行性研究，1997 年与德国西门子公司签订了供货合同，2000 年 12 月 I 极投入运行，2001 年工程全部建成。该工程和天—广 500kV 交流输电工程形成交直流并联的输电系统，是西电东送工程的一部分。它是双极±500kV、1800A、1800MW，西起天生桥水电站附近的马窝换流站，东至广州的北郊换流站，全长约 960km。天—广直流输电工程原理接线见图 6-10。

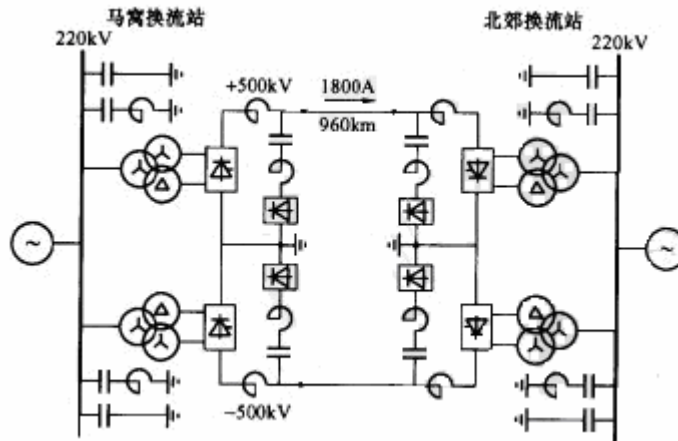


图 6-10 天一广直流输电工程原理接线图

#### 四、嵊泗直流输电工程

嵊泗直流输电工程是中国自行设计和建造的双极海底电缆直流工程，主要解决从上海向嵊泗岛及宝钢马迹山码头的送电问题。工程的主要特点是受端为弱交流系统，并含有大量的宝钢马迹山码头的动态冲击负荷，使工程的控制保护系统及受端的无功补偿方式在技术上均需特殊的考虑。工程为双极±50kV，600A，60MW，可双向送电。直流输电线路从上海的芦潮港换流站到嵊泗换流站，共 66.2km，其中 59.7km 为海底电缆，6.5km（分两段）为架空线路。1996 年完成各种研究工作，1997 年进行设备订货，2002 年工程全部建成。嵊泗直流输电工程原理接线见图 6-11。

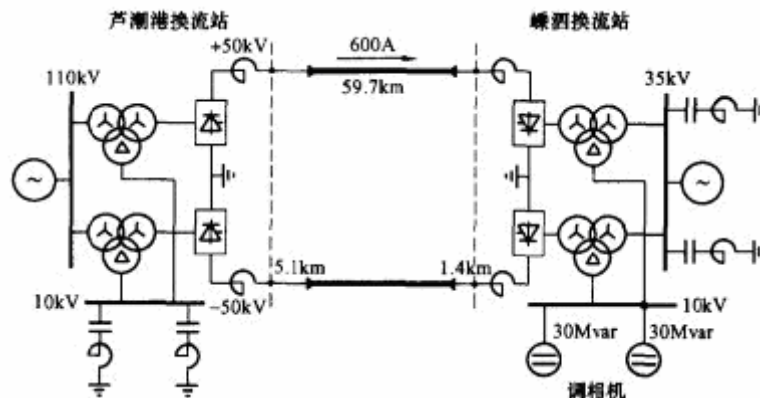


图 6-11 嵊泗直流输电工程原理接线

——架空线路；——海底电缆

#### 五、三峡—常州直流输电工程（简称三—常直流工程）

三—常直流工程主要解决三峡水电站向华东电网的送电问题，加强华中与华东两大电网的非同期联网。该工程为双极±500kV，3000A，3000MW。直流架空线路从三峡电站附近的龙泉换流站到江苏常州的政平换流站，全长共 860km。换流设备由 BBC 公司承包，政平换流站的换流变压器和平波电抗器由西门子公司提供。在引进设备的同时，也进行了技术引进和技术转让，其中部分主要设备（如换流阀、换流变压器、平波电抗器、晶闸管元件等）在国内制造厂进行试制。工程于 2002 年 12 月单极投入运行，2003 年 5 月全部建成。三—常直流输电工程原理接线图见图 6-12。

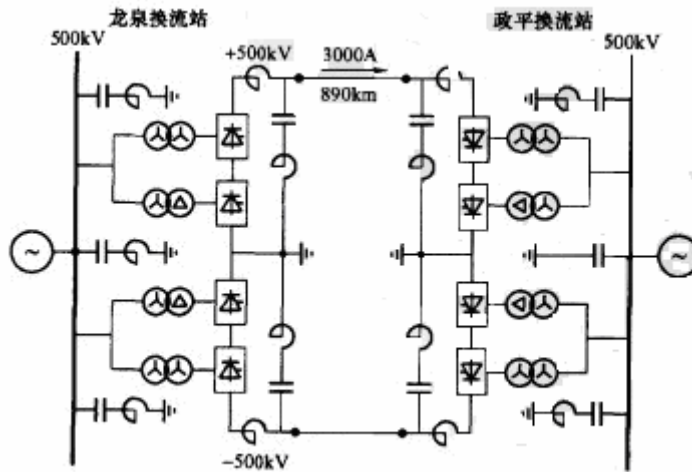


图 6-12 三—常直流输电工程原理接线图

## 6.5.2 直流输电的工程类型

### 一、远距离大容量直流架空线路工程

在远距离大容量输电方面，直流输电比交流输电优越。例如，巴西的伊泰普直流工程为两回 $\pm 600$  kV，约800km长，输送总容量为6300MW；加拿大的纳尔逊河直流工程为两回 $\pm 500$  kV，约940km长，输送总容量为4000MW；中国三峡向华东送电采用三回 $\pm 500$  kV，约900~1100km，输送总容量为7200 MW；三峡向广东送电为一回 $\pm 500$  kV，约960km，输送容量为3000MW等。有时，这种远距离输电还具有非同步联网的性质，如三峡向华东以及向广东的送电工程，同时也实现了华中与华东以及华中与华南电网的非同步联网。而巴西伊泰普直流工程则是从50Hz的发电站向60Hz的电网送电。此类工程的特点是输送容量大、距离远、电压高。根据国外直流输电换流设备的制造情况及直流输电技术的发展水平，建设 $\pm 800$  kV，输送500~600 MW的直流工程是现实可行的。中国西南水电资源丰富，随着西南大型水电站的建设，解决西南水电向华南、华中及华东的送电问题，将会采用这种类型的输电方式。

### 二、背靠背直联联网工程

电力系统之间的互联可以有三种方式，即：①传统的交流输电同步联网方式。②直流输电非同步联网方式，联网后将形成非同步联合运行的大电网，其中包括不同频率的联网；③交、直流并联输电同步联网方式，联网后将形成可以利用直流输电的快速控制改善电网运行性能的同步运行的大电网。

背靠背直流工程近年来发展较快。例如，北美洲东西部两大电网通过6个背靠背换流站实现了非同步联网；东欧与西欧电网也通过3个背靠背换流站实现了互联；俄罗斯与芬兰电网通过背靠背换流站联网已运行多年；日本则通过4个背靠背换流站和两个直流输电线路实现全国9大电力公司的联合运行，其中包括50Hz和60Hz电网的互联。目前，中国已形成7个大区电网。华中与华东电网已采用直流输电实现了非同步联网，华中与华南电网将通过三峡向广东的直流输电工程实现互联。华中与西北电网将首先建一个背靠背换流站实现互联，然后随着西北水电与火电的开发，将会采用直流输电向华中送电。

### 三、跨海峡直流海底电缆工程

由于电容电流使交流电缆的输电距离受到限制，所以大部分跨海峡的输电工程均采用直流输电，如英法海峡直流工程，采用两回 $\pm 270$  kV，总输送功率为2000MW，海底电缆72km；波罗的海直流工程（瑞典—德国）海底电缆250km，架空线路12km，单极450kV，输送功率

600MW；日本纪伊直流工程，海底电缆551km，架空线路51km，双极±500kV，输送功率2800MW；中国的舟山直流工程和嵊泗直流工程等。此类工程大多为海底电缆和架空线路的混合型。其系统结构包括单极大地回线方式、单极金属回线方式、双极两端中性点接地方式、双极一端中性点接地方式、双极金属中线方式等。

#### 四、向大城市送电的直流地下电缆工程

此类工程通常不是大型直流工程，它类似于220kV或110kV的交流输电工程，但输电距离较长。目前仅有英国伦敦的金斯诺斯直流工程，随着轻型直流输电和新型聚合物直流地下电缆的应用，此类工程将会得到进一步的应用和发展。

#### 五、向孤立负荷点送电或从孤立电站向电网送电的直流工程

向孤立负荷点送电的直流工程大多为中小型直流工程，一般该负荷点远离主干电网，输送容量不大，但输送距离较远，采用直流输电在技术和经济上会有一些的优势。此时，轻型直流输电的应用将会更为有利。

孤立电站向电网送电有两种情况。首先是在边远偏僻地区的大型水电站向远处负荷中心送电。电站附近无地区负荷，或地区负荷很小，全部（或大部）发电容量均需送往远处的负荷中心。此类直流工程整流站的接线方式可以考虑采用发电机—变压器—换流器的单元接线方式。另一种情况是远离负荷区的小型水电站或风力发电站向电网或负荷点送电。此类工程的输送容量不大，宜采用轻型直流输电。

#### 六、与交流输电并联的直流输电工程

这种输电系统也称交、直流并联输电系统。建设此类直流工程大多是为了加强改善交流输电系统的性能，如美国的太平洋联络线直流工程，中国的天生桥—广州直流工程等。其主要特点是利用直流输电的快速控制来阻尼交流系统的低频振荡，从而提高与其并联的交流线路的输送能力。



## 第7章 直流输电的控制系统和保护装置

与交流输电不同，高压直流输电的特点在于快速调节两端换流器，控制直流线路输送功率的大小和方向，以满足整个交直流联合系统的运行要求。换句话说，直流输电系统的有效运行，很大程度上取决于自身的控制系统。高压直流输电系统采用各种分层控制方式，为的是运行的高效稳定、功率控制的灵活以及设备的安全。本章旨在阐述高压直流输电系统的主要控制和调节方式以及控制保护三个方面的内容。

### 7.1 控制系统的配置要求

控制系统功能健全、完善，将直接影响直流输电系统的稳定和运行。所以，针对控制系统，必须提出一些基本要求：

- (1) 限制电流的最大值，以避免电流通过阀和其它载流元件出现危险状况；
- (2) 防止直流电流随交流系统电压变化而出现的大波动；
- (3) 尽可能使送端和受端的功率因数保持在较高水平；
- (4) 防止逆变器换相失败和使用汞——弧阀整流器的逆弧；
- (5) 保持线路送端电压恒定并且等于额定值，使功率损耗最小；
- (6) 有时候控制某一端的频率，为的是控制所输送的功率。

#### 7.1.1 控制系统的多重化

直流输电控制系统全都采用多重化设计，为的是达到直流工程所要求的可用率及可靠性指标。多重化设计往往采用双通道，当一个通道工作时，另一个通道处于热备用状态。一旦工作中的通道发生故障，便切换逻辑将其退出工作，而处于热备用状态的通道则自动切换到工作状态，这种自动切换动作不应对直流输送功率产生明显的扰动。也有个别采用三通道设计，三取二表决输出方案的，如我国葛—南直流工程的直流保护系统、三—广直流工程的直流保护系统、俄罗斯—芬兰背靠背工程的直流保护系统，都是采用三取二设计。

控制设计应允许维修因故障而退出运行的通道以及修复后的性能验证试验，并确保不会干扰正在运行中的通道，使控制系统不停电即可维护。

#### 7.1.2 控制系统分层结构

直流输电控制系统分层结构，是按照一定的等级将直流输电换流站和直流输电线路的全部控制功能分为若干层次而形成的控制系统结构。分层结构有如下几个特点：(1)各层次在结构上分开，层次等级高的控制功能可以作用于其所属的低等级层次，且作用方向是单向的，即低等级层次不能作用于高等级层次；(2)层次等级相同的各控制功能及其相应的硬、软件在结构上尽量分开，以减小相互影响；(3)直接面向被控设备的控制功能设置在最低层次等级，控制系统中有关的执行环节也属于这一层次等级，它们一般就近设置在被控设备旁；(4)系统的主要控制功能尽可能地分散到较低的层次等级，以提高系统可用率；(5)当高层次控制发生故障时，各下层次控制能按照故障前的指令继续工作，并保留尽可能多的控制功能。

直流系统中所有的控制装置，可依据层次结构的概念分为双极功能（最高级）、极功能和阀组功能（最低级）。要想减小故障的影响范围，就必须把各控制功能放在尽可能低的层次上，尤其是与双极功能有关的装置应减至最少。对层次设计来说，应注意使与一极有关的电路故障和测量装置故障，不会通过极间信号交换接口、其他控制层次间的信号交换接口，或通过装置的电源而转移到另一极。即使双极中一极的控制装置因维修而退出运行，也不应导致正在运行的另一极任何控制模式受到限制或特性失效。

直流输电控制系统往往设有六个层次等级，从高到低依次为：系统控制级、双极控制级、极控制级、换流器控制级、单独控制级和换流阀控制级。图 7-1 所示为直流输电控制系统的分层结构框图。当每极仅有一个换流单元时，可以简化结构，将极控制和换流器控制合为一级；当仅有一回双极线路时，往往把系统控制和双极控制合为一级。在直流系统各换流站中，需将其中之一指定为主控制站，其余的均为从控制站。设置了系统控制级和双极控制级的主控制站通过通信系统发出控制指令，协调各换流站的运行。

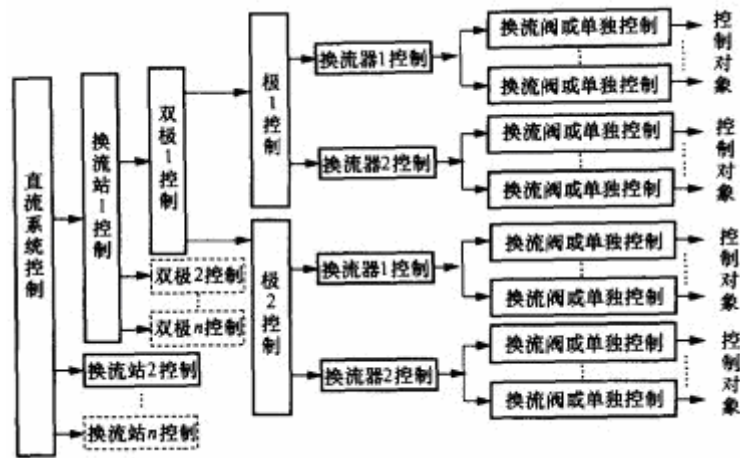


图 7-1 直流输电控制系统分层结构图

### 一、换流阀控制级

换流阀控制级是对各个阀分别设置的等级最低的控制层次，是由高电位控制单元（通常称为 TE）和地电位控制单元（通常称为 VBE）两部分构成，主要功能包括：(1)把处于地电位的换流器控制级送来的阀触发信号进行变换处理，经电光隔离（或磁）耦合或光缆送到高电位单元，再转换为电触发脉冲，经功率放大后分别加到各晶闸管元件的控制级；当采用光直接触发的晶闸管换流阀时，由地电位光缆直接送到高电位后无需再转换为电信号，直接触发晶闸管阀，从而简化了换流阀的触发系统；(2)晶闸管元件和组件的状态监测，包括阀电流过零点、高电位控制单元中直流电源的监视。监测信号经电隔离或光缆传送到地电位控制单元，经处理后进行控制、显示、报警等（这部分设备通常称为 TM）。

### 二、单独控制级

除换流器外，换流站中其他各项设备分别设置了自动控制、操作控制和状态监测设备，与换流阀控制级同属于最低层次的控制级别。单独控制功能包括：换流变压器分接开关切换控制；换流阀冷却及辅助系统的控制和监测；直流和交流开关场合断路器、隔离开关的操作和状态监视；直流滤波器组的投切操作和监测；交流滤波器组和无功补偿设备的投切操作、自动控制和状态监测等。

### 三、换流器控制级

换流器控制级是控制直流输电一个换流单元的控制层次，用来控制换流器的触发相位，主要控制功能包括：换流器触发相位控制；定电流控制；定关断角控制；直流电压控制；触发角、直流电压、直流电流最大值和最小值限制控制以及换流单元闭锁和解锁顺序控制等。

#### 四、极控制级

极控制级是控制直流输电一个极的控制层次。双极直流输电系统要求一极故障时，另一极能够单独运行，并能完成主要的控制任务。主控制站的极控制级还需要协调从控制站同一极的极控制级工作。极控制级的主要功能包括：(1)经计算向换流器控制级提供电流整定值，控制直流输电的电流；主控制站的电流整定值由功率控制单元给定或人工设置，并通过通信设备传送到从控制站；(2)直流输电功率控制，其任务是根据功率整定值和实际直流电压值决定出直流电流整定值；功率整定值由双极控制级给定，也可由人工设置，功率控制单元设置在主控制站内；(3)极起动和停运控制；(4)故障处理控制，包括移相停运和自动再启动控制、低压限流控制等；(5)各换流站同一极之间的运动和通信，包括电流整定值和其他连续控制信息的传输、交直流设备运行状态信息和测量值的传输等。

#### 五、双极控制级

在双极直流输电系统中，同时控制两个极的控制层次称为双极控制级，它用指令形式协调控制双极的运行，其主要功能包括：(1)根据系统控制级给定的功率指令，决定双极的功率定值；(2)功率传输方向的控制；(3)两极电流平衡控制；(4)换流站无功功率和交流母线电压控制等。

#### 六、系统控制级

在直流输电控制系统中，级别最高的控制层次是系统控制级。其主要功能包括：(1)和电力系统调度中心通信联系，接受调度中心的控制指令，向通信中心输送有关的运行信息；(2)依据调度中心的输电功率指令，分配各直流回路的输电功率，当某一直流回路故障时，将少送的输电功率转移到正常的线路，尽可能保持原来的输电功率；(3)紧急功率支援控制；(4)潮流反转控制；(5)各种调制控制，包括电流调制和功率调制控制，用于阻尼交流系统振荡的阻尼控制，交流系统频率或功率/频率控制等。

## 7.2 换流器触发相位控制

在直流输电控制系统中，用来改变换流阀的触发相位，实现直流输电系统及其换流装置运行状态调节的控制环节，称为换流器触发相位控制。包括等触发角控制和等相位间隔控制两种控制方式。

### 7.2.1 等触发角控制

早期的直流输电曾采用等触发角控制（又称按相控制或分相控制），这种控制的特点是：换流器的每一换流阀都有各自分开的触发相位控制电路，直接以加在每个阀上各自的交流电压为参考，即以它的瞬时值变正的过零点为相位基准，来决定该阀触发时刻的相位，保持各阀的触发角相等。

当交流系统三相电压对称时，按相控制的各阀相继触发脉冲间的相位差在稳态运行时是相等的，对于6脉动换流器是60度，对于12脉动换流器是30度。其实，加在换流器上的三相电压难免有一定程度的不对称，此时各阀的触发角彼此相等，而各阀相继触发脉冲间的相位间隔也就彼此不等。触发脉冲相位间隔不相等，将在换流器的交流侧和直流侧产生非特征谐波电流和电压。未被滤除的低次非特征谐波电流流入交流系统，将进一步导致交流电压发生畸变和过零点相位的相对移动，从而造成触发脉冲间隔更加不相等，产生更大的非特征谐波，由此可能形成恶性循环。尤其是当交流系统谐波阻抗较大时，有可能产生增幅的谐波振荡，甚至造成直流输电系统工作的不稳定。另外，触发脉冲间隔不等，还会使换流变压器

产生直流偏磁，导致换流变压器损耗和噪声增大。可能发生谐波不稳定是按相控制方式的主要缺点。目前，这种控制方式在工程中已不采用。

### 7.2.2 等相位间隔控制

等相位间隔控制又称等间隔控制或等距离脉冲控制。与按相控制的不同，它不以保证各阀触发角相等为目标，而是保证相继各触发脉冲间的等相位间隔。每个换流器只能一套相位控制电路，发出等间隔的触发脉冲信号序列，并按一定顺序，依次分送到相应阀的触发脉冲发生器去触发该阀。对于 6 脉动换流器触发脉冲之间的间隔为 60 度，而对于 12 脉动换流器则此间隔为 30 度。当交流系统三相电压对称时，在等相位间隔控制作用下，各阀的触发角也是相等的；当交流系统三相电压不对称时，在等相位间隔控制作用下，虽然各阀的触发角会不相等，但却能有效地抑制非特征谐波可能形成的恶性循环，以防止出现谐波不稳定现象。由于触发脉冲间隔相等，产生的非特征谐波很有限，克服了按相控制的主要缺点，成为当前普遍采用的触发相位控制方式。该控制方式的缺点主要有：当交流系统发生不对称故障时，各阀的触发角相差较大，有时会造成调节器工作困难，但可设法予以克服。

## 7.3 直流输电控制系统功能

### 7.3.1 直流输电起停控制

直流输电起停控制主要包括直流输电系统从停运状态转变到运行状态以及输送功率从零增加到给定值或从运行状态转变到停运状态的控制功能。停运状态有两种：主设备与电源隔离不带电、主设备带电但不送电。带电是指换流变压器网侧绕组交流断路器合闸，接在换流站带电的交流母线上，使换流阀处于带电状态；不送电是指换流阀的触发脉冲未解锁，或已解锁但其触发相位尚未移到适当的位置，使直流回路中没有电流。直流输电系统的起停包括正常起动、正常停运、故障紧急停运和自动再起停等。

#### 一、正常起停

直流输电系统正常工作时的起动和停运，包括换流变压器网侧断路器操作、直流侧开关设备操作、换流器解锁或闭锁、直流功率按给定速度上升到整定值或下降到最小值的全过程。为了降低起停过程中的过电压和过电流，以及减小起停时对两端交流系统的冲击，直流输电的正常起停均严格按一定的步骤顺序进行。

#### (一) 正常起动主要步骤

- (1) 两端换流站换流变压器网侧断路器分别合闸，使换流变压器和换流阀带电；
- (2) 两端换流站分别进行直流侧开关设备的操作，以实现直流回路的连接；
- (3) 两端换流站分别投入适量的交流滤波器支路；
- (4) 在触发角  $\alpha$  等于或大于 90 度的条件下，先解锁逆变器，后解锁整流器；
- (5) 逆变侧的直流电压调节器（或关断角调节器）按起动过程中对直流电压变化规律（一般为直线变化）的要求，逐步升高直流电压直至运行的整定值（或关断角整定值）；
- (6) 与此同时，整流侧的电流调节器按起动过程中对直流电流变化规律（一般为直线变化）的要求，逐渐升高直流电流直至运行的整定值；
- (7) 在直流电压和电流均升到整定值时，起动过程结束，直流输电系统转入正常运行。

#### (二) 正常停运主要步骤

- (1) 按照停运过程中对直流电流变化规律的要求，整流侧的电流调节器逐步将直流电流减小

到允许运行的最小值，在此过程中交流滤波器组随直流功率减小而逐组切除，以满足无功平衡的要求；

(2) 闭锁整流器的触发脉冲，或者将触发脉冲移相到  $\alpha = 120^\circ \sim 150^\circ$ ，使整流器变为逆变器运行，延时 20~40ms 后再闭锁触发脉冲，并切除整流侧余下的交流滤波器组；

(3) 直流电流到零后，闭锁逆变器的触发脉冲，并切除逆变侧余下的交流滤波器组；

(4) 两端换流站分别进行直流侧开关设备的操作，使直流线路与换流站断开；

(5) 两端换流站分别进行交流侧开关设备的操作，跳开换流变压器网侧断路器。

## 二、故障紧急停运

故障紧急停运是指当直流输电系统在运行中发生故障时，保护装置动作后的停运。其操作要实现两个目的：一是迅速消除故障点的直流电弧；二是跳开交流断路器以与交流电源隔离。为实现瞬时性故障消除后迅速恢复供电，直流输电系统也可采取自动再起动作。

故障紧急停运过程也称快速移相，是指迅速将整流器触发角  $\alpha$  移相到  $120^\circ \sim 150^\circ$ 。快速移相后，直流线路两端换流器都处于逆变状态，将直流系统内所储存的能量迅速送回两端交流系统。当直流电流下降到零时，分别闭锁两侧换流器的触发脉冲，继而跳开两侧换流变压器的网侧断路器，达到紧急停运的目的。当多桥换流器中只有一个或部分换流桥发生故障必须退出运行时，为了使其余部分仍可继续运行，可利用旁通阀和旁通开关，将故障部分隔离而退出工作。

另外还可以手动起动紧急停运。通常，在换流站主控制室内设有手动紧急停运按钮，当发生危及人身或设备安全的事件时，可手动按下紧急停运按钮，实现紧急停运。

## 三、自动再起动作

自动再起动作用于在直流输电架空线路瞬时故障后，迅速恢复送电的措施。直流输电的自动再起动作过程为：一旦直流保护系统检测到直流线路接地故障，立即将整流器的触发角快速移相到  $120^\circ \sim 150^\circ$ ，使整流器变为逆变器运行。当两端都在逆变运行时，储存在直流系统中的电磁能量迅速送回到两端交流系统，直流交流在 20~40ms 内降到零。再经过预先整定的 100~500ms 的弧道去游离时间后，按一定速度自动减小整流器的触发角，使其恢复为整流运行，并快速将直流电压和电流升到故障前的运行值(或某预定值)。如果故障点的绝缘未能及时恢复，在直流电压升到故障前的运行值之前可能再次发生故障。这时可进行第二次自动再起动作。为了提高再起动作的成功率，在第二次再起动作时，可适当加长整定的去游离时间，或减慢电压上升速度，或降低要升到的直流电压水平然后再起动作。如果第二次再起动作仍未成功，还可进行第三次、第四次再起动作。如已达到预定的再起动作次数，但都没有成功，则认为故障是持续性的，此时就发出停运信号，使直流系统停运。

因为控制系统的快速作用，通常情况下，直流输电的自动再起动作时间比交流系统的自动重合闸时间要短，所以对两端交流系统的冲击也较小。而对于直流电缆电路，因为其故障多半是持续性的，所以不宜采用自动再起动作。

## 7.3.2 直流输电功率控制

通常情况下，在两个换流站中指定一个为主导站。主导站的直流电流定值是在本站中根据双极功率定值计算出来的。主导站还协调极电流定值限制以及功率调制的要求。任何一个站都有可能被指定为主导站，但同一时刻只有一个控制点能行使主导权。在正常运行情况下，依据需要站间主导权可以转移，该过程不对传输功率造成任何扰动。通常，主导站设在整流站，且无须运行人员干预。主导站不同于主控站，主控站完成直流系统运行的控制。

### 一、定功率模式

直流工程的主要控制方式是定功率控制模式。按照这一控制方式，控制系统应当将指定

功率测控点的直流功率，保持在主控站运行人员整定的功率定值上。通常直流工程的直流功率测控点，设定在整流站直流线路出口。

对直流输电输送功率的控制一般是通过改变直流电流调节器的电流整定值来实现的。对于一个双极直流输电系统，将双极功率定值除以两极直流电压之和，便得到了各极的直流电流调节器的电流定值。这种控制方式可以充分发挥直流电流调节回路的快速响应特性。此外，为了防止在暂态过程中，电流定值因直流电压可能产生的剧烈变化而大幅度波动，需要对直流电压信号进行滤波处理。

直流功率定值及功率从一个定值向另一个定值的变化率由运行人员给定。另外，也可将其他功率调制信号叠加在功率定值上，以实现需要的功率调制功能。通常，功率控制具有如下两种方式。

#### (一) 手动控制

运行人员通过手动输入双极功率定值及功率升降速率来改变直流输送功率，双极输送的直流功率按整定的速率线性变化至预定值。另外，中止双极功率升降功能可以在功率升降过程中中止功率升降，使功率定值停留在执行中止功能的时刻所达到的数值。

#### (二) 自动控制

采用自动控制方式时，双极功率定值应当按预先编排好的直流传输功率日负荷曲线自动变化。在手动控制和自动控制之间切换时，不应引起直流功率的突然变化。

功率控制应当确保当双极对称运行时，流过每一直流极线导体的电流相等，尽量减少接地极电流。只有按单极大地回线方式运行或双极运行时，由于受到设备条件的限制或其他原因不可能使极线电流达到平衡，才容许接地极电流增大。

倘若直流系统某一极的输电能力下降，导致实际的直流传输功率减小，那么双极功率控制应当增大另一极电流，自动而快速地把直流传输功率恢复到尽可能接近功率定值水平，另一极的电流可以增大到该极的固有负荷水平，或短时过负荷水平。当一极闭锁或清除直流线路故障时，双极功率控制应将故障极损失的功率尽可能转移到健全极。如果需要，健全极的功率可以达到它的额定短期过负荷能力。

采用定功率控制方式时，预定的双极功率定值可能因功率调制等其他控制信号而变化，控制系统应当将直流功率调整到最终的功率定值水平上。当控制系统在暂态期间或检测到功率控制器发生故障时，应该能自动地从定功率控制方式切换到定电流控制方式，在切换前后电流值之差小于额定电流的 $\pm 1\%$ ，扰动过后切换回功率控制时，也应当是平稳的，且满足同样的电流变化限制指标。当一极按定电流控制方式运行时，另一极应能照样进行双极功率控制。此时按功率控制方式运行的极所传输的功率，应等于整定的双极功率减去另一极所输送的功率。

### 二、定电流模式

将直流极线电流保持在整定值就是定电流控制模式。通常情况下，由于定电流控制环路的响应比定功率控制环路快，所以直流系统在遭受剧烈扰动时，可以把控制方式从定功率控制切换到定电流控制，以提高系统稳定性。

在定功率控制模式情况下，当两换流站间通信回路发生故障时，控制系统会从定功率控制自动转换到定电流控制，此时逆变站应自动保持电流裕度。这两种控制方式之间的切换应当是平稳的。当两换流站间通信故障时间较长，但站间还可通过电话联系的情况下，控制系统应仍能允许直流系统继续运行，这种控制方式叫做应急电流控制方式。因为站间通信是以极为基础设置的，所以应急电流控制也应各极分别设置。

一些直流工程设计有电流跟踪功能，即当站间通信故障后，逆变站将实际输送的直流电流当作来自整流站的电流定值，所以，在站间通信故障后仍能保持双极功率控制模式。但在这种情况下，必须对功率的变化率予以适当限制。

### 三、降压运行模式

通常，高压直流系统的各极都具有降压运行的功能，以便在直流线路绝缘降低、不能经受全压的情况下，还能降压继续运行。实现一个极的降压运行有如下两种方式。

#### (一) 手动方式

不管该极是否带电，运行人员都应能从控制台发出降压运行指令，从全压至降压运行的转换应当是平稳的，反之亦然。假如该极正处于功率控制方式下运行，那么在转换过程中，应当同时调整直流电压和直流电流（即在降压时直流电流则按降压的比例相应地增加），以保持直流功率不变（如果一次系统设计允许的话），尽可能地减小对直流传输功率的扰动。

#### (二) 自动方式

降压运行还应可能由直流线路保护自动起动。

全压运行和降压运行之间的转换速度及降压幅度都应是可调的，以适应系统变化的需要。一般说来，要求全压到降压的转换快些，以利于运行操作。通常，直流降压运行的电压定值取  $0.7\sim 0.8p.u.$ ，值的具体大小取决于主回路设计。

### 7.3.3 换流站无功功率控制

换流站无功功率控制是直流输电控制系统中对换流站无功功率进行控制的环节，它通过调整换流站装设的无功补偿设备的投入容量或改变换流器吸收的无功功率，将换流站与交流系统交换的无功功率控制在规定的范围内（无功功率控制方式），或将换流站交流母线电压控制在规定的范围内（交流电压控制方式）。前者有利于所连的交流系统无功功率的平衡，后者有利于弱受端交流系统的电压稳定性。除了通过投切交流滤波器实现无功功率控制外，还可通过改变换流器的触发角来改变换流器吸收的无功功率进行无功功率控制。

当直流输电系统运行时，不管是整流器还是逆变器都要消耗一定的无功功率，其数值不仅与输送直流功率的大小有关，还与运行方式、控制方式有关。在额定负荷运行时，换流器消耗的无功功率通常可达额定输送功率的  $40\%\sim 60\%$ ，因此换流站需投入大量的无功补偿容量。但在轻负荷运行时，换流器消耗的无功功率迅速减小，如果补偿的无功功率不变，则换流站过剩的无功功率将会注入所连的交流系统，引起换流站交流母线电压升高。

通常换流站装设交流滤波器、并联电容器、并联电抗器等无功功率补偿设备。与弱交流系统相连的换流站，还可能装设同步调相机或静止无功补偿装置。因为这些补偿设备的特性各不相同，在直流输电工程中设置何种无功补偿设备是由交直流系统无功功率平衡及动态特性研究所决定的。

换流站的无功功率控制应能控制换流站全部发出无功的设备和吸收无功的设备，如控制交流滤波器、并联电容器和并联电抗器的投切以及控制换流器吸收的无功功率等；换流器吸收的无功功率可以通过改变其触发角来平滑地进行控制。这些控制作用必须相互协调，以便保证在任何给定的直流传输功率下，对于各种直流系统运行方式，投入的无功补偿设备的组合都是最优的。为了方便地进行无功功率控制，通常将交流滤波器和并联电容器分成若干分组，根据直流输送功率的大小，适当投切滤波器或电容器分组，实现对换流站无功功率的控制，但滤波器分组不能切除过多，否则投运的滤波器将不能满足滤波需要。

通常，无功功率控制器有两种运行方式：手动和自动。手动运行时，控制器的所有输出都将失去作用，无功补偿设备和交流滤波器的投切将由换流站运行人员手动进行。自动运行时，控制器的所有功能都将起作用，运行人员的作用仅限于调整定值及死区。

要想满足交流滤波器设备的额定值，避免滤波器过负荷而被切除或受到损坏，或要想满足谐波滤波和滤波器特性的需要，无功控制就得按照直流传输功率的大小、换流站整流或逆变运行模式、解锁极数量和直流正常或降压运行等各种因素，确定需要投入滤波器的最小

数量和类型，对应上面两种的要求分别称为绝对最少滤波器组和最少滤波器组要求。如果没有满足绝对最少滤波器的要求，在预定时间后无功功率控制将停运直流。如果所有已投入的滤波器仍不能满足滤波要求，那么无功功率控制将下令投入更多的滤波器，直到满足滤波要求为止。

因为最少滤波器组数的要求，再加上滤波器的单组容量不可能很小，在直流输送功率水平较低时，一般投入的滤波器发出的无功功率会超过换流器消耗的无功功率，从而出现向系统输出较多无功功率的情况，这对于无功吸收能力较弱的系统需要引起注意，可能需要限制直流的运行方式和功率水平。在一些直流输电工程中，由于系统吸收无功能力有限，也考虑采用三调谐滤波器技术，即通过一组滤波器来滤除三种频率的谐波，从而在满足滤波需要的同时下，减少向系统输出的无功功率。

要想尽量减少换流站无功分组投切的操作次数，如果直流输电工程设计允许（至少在轻负荷工况下），那么无功功率控制器应充分利用换流器内在的无功功率调节能力，即通过改变换流器触发角来调整其吸收的无功功率。但这种调节量必须在换流器及相关直流设备所允许的范围内，同时要考虑到对另一端换流站的无功功率平衡和无功控制的影响。

换流站的无功功率由于投切无功设备分组而发生台阶式变化，然而改变换流器触发角来调整其吸收的无功功率则是连续变化的。这两者的配合可以实现换流站无功功率的平滑调节，其代价是在某些工况下，换流器会在较大的触发角下运行，此时直流线路电压降低，导致换流器运行工况恶化，直流系统损耗增大。在长距离输电时运用这种无功功率控制方式要慎重考虑。

对于较弱的受端交流系统，为了减小滤波器或电容器投切对交流电压的影响，避免由于投切引起逆变器换相失败或交流动态电压变化范围超过设计规范，一些直流工程在无功控制中加入 $\gamma$ -kick功能，即 $\gamma$ 角跃变功能，在滤波器或并联电容器投切时，瞬时增加 $\gamma$ 角整定值，以提高换流器无功功率消耗，进而限制交流电压阶跃，该功能只在逆变侧运行时使用。在滤波器投入或切除前， $\gamma$ 整定值以一定斜率升高一个很小的角度，当滤波器投入或切除后，并在很短的时间内， $\gamma$ 整定值又降回投入前的角度。 $\gamma$ 角度的上升时间应与交流系统电压控制的响应时间相配合。

影响无功及电压的因素是复杂的，因此无功功率控制器的所有功能和特性，都应先用数字计算程序进行计算分析，然后在直流模拟装置上予以验证，确保其性能满足要求。

## 7.4 直流输电系统保护装置

随着直流输电技术和电力电子技术的发展，直流输电系统的保护装置而不断更新换代。近十多年来，直流输电技术发展的主要表现是：高速发展的电子信息技术在直流控制保护中的应用，包括实时多处理器技术、光通信技术、网络技术等。

直流系统的控制和保护之间关系密切，且在现代直流输电工程中，其控制和保护系统几乎都采用相同的硬件平台和软件平台，甚至集成在同一机柜之中。

### 7.4.1 保护装置基本组成

通常，直流系统保护装置采用多套冗余配置，每套有自己的计算、测量、电源等。

#### 一、保护装置核心处理器

自从有了晶体管和集成电路，直流输电控制保护的计算机系统使控制保护性能得到了极大改善，从模拟式发展到数字式。尤其在20世纪70年代，以微处理器为基础的电子计算机



的发展,对直流输电控制及保护性能的提高、推动晶闸管阀为标志的直流输电的普及与发展起了推动作用。

近十多年来,直流输电控制保护的基本功能没有发生革命性的变化。但是随着信息技术的高速发展,处理器的计算速度越来越快,存储空间越来越大,并行运行的处理器越来越多。微处理器技术遍布直流系统各个设备的控制和保护,比如:极控、站控(交流场/直流场)、直流系统保护、换流变压器控制保护、交/直流滤波器控制保护、换流器冷却系统控制保护、站用电系统控制保护等。

## 二、测量装置

在直流控制保护系统中,测量装置是为了向控制保护系统提供必要的电气量或其他物理量输入信息,其主要有如下五个方面。

### (一) 直流电压测量

在换流站的直流开关场中,为了测量直流极线电压及中性母线电压,向直流控制及保护系统提供信号,直流极母线和中性母线上都需要装设直流电压测量装置。高压直流工程早期所使用的直流电压测量装置主要有阻容分压器加隔离运算放大器型;如今,随着光纤技术的进步,已能制造出光电型的直流电压测量装置,即将直流分压器的输出信号经光电转换后,用光缆送往主控制室。这种直流电压测量装置具有良好的抗电磁干扰性能。

直流电压检测装置的输出信号,不仅用于控制目的,而且用于保护目的,比如直流线路行波保护、直流欠压保护、直流回路开路保护等。所以,其测量精度取决于控制要求,其测量范围则取决于保护要求。对于控制来说,直流电压测量装置的测量精度应与直流电压的控制精度相匹配,若后者设定为1%,则前者在最大稳态直流电压下应为0.2%或更好。对于保护来说,直流电压测量装置的测量范围应足够大,在1.5倍额定直流电压时的精度应不低于10%。并且,对于正、负两种极性的被测直流电压都应满足以上要求。其暂态响应特性和频率响应特性也应满足控制保护系统的要求,测量系统的截止频率(-3dB)应高于10kHz。

### (二) 直流电流测量

在换流器高压侧及中性线侧出口(通常在穿墙套管中)、直流线路入口及接地极线路入口、直流滤波器高压端和中性端及接地的断路器都应装设直流电流测量装置,向直流控制保护系统输出直流电流信号。

用于控制目的的直流电流测量装置,如果电流控制精度为1%,那么被测直流电流在短时过负荷电流以下时,其测量精度应不低于额定电流的0.2%,用于保护目的的直流电流测量装置,精度要求可低些,但是也不应低于额定电流的2.0%,当被测电流为额定电流的300%时,其测量误差不应超过额定电流的10%。用于差动保护或双极电流平衡控制的直流电流测量装置,当被测电流在额定电流的1.5p.u.以下时,其配合精度不应低于1%,暂态响应特性和频率响应特性也应满足控制保护系统的要求,测量系统的截止频率(-3dB)应高于10Hz。

直流电流测量装置有磁放大器型和光电型,前者运行经验已很丰富,但测量信号容易受到干扰;后者是20世纪90年代开始应用的新技术,抗干扰能力很强。

### (三) 交流电压测量

对于交流开关场,除按常规装设交流电压互感器外,还在换流变压器进线侧装设一只交流电压互感器,向换流器控制系统提供换相电压过零点信号,作为计算换流器触发角( $\alpha$ 角)的计时参考点,向换流器提供触发同步信号。此同步信号一般取自换流变压器网侧交流电压。控制保护系统对此交流电压互感器的基本要求是要有很好的抗干扰能力。如果采用电容式电压互感器,则应考虑适当的抗干扰措施;如果采用电磁式电压互感器,则应考虑防铁磁谐振措施。

用于测量目的的交流电压互感器，精度应不低于 0.2 级，用于保护目的的交流电压互感器，其精度要求要低一些。

#### (四) 交流电流测量

在交流开关场中及各种滤波器回路中，为了给换流站控制和保护提供信息，需要装设各种不同规格的交流电流互感器。用于控制目的的交流电流互感器，其精度不应低于 0.2 级；用于保护目的的交流电流互感器，其精度要低一些，特别在被测电流远大于额定电流值的情况。

换流阀的导通和关断点的测量通常采用电磁型的微分电流互感器。这种微分电流互感器还可用于直流线路故障定位系统中，以测量进入换流站的陡波前电压。

### 三、数据传送装置

在直流输电系统中，为了保证直流系统的安全稳定运行，分布在换流站的各个控制保护设备之间需要相互传递有关信息。原先的信息传送采用专门的串行通道，在传送速度和冗余上有一定的限制，并且备品、备件易受制造厂的制约。运用通用的局域网技术，换流站分布控制的信息传送从专用电缆变成了局域网。可以采用市场很大的 INTERNET 网络器件，很好地克服了上述缺点。自天——广直流工程以来的直流输电工程，在站内的分布控制系统的信息交换都采用了局域网技术。

### 四、通信装置

在高压直流输电的两个换流站之间、各换流站与各自的调度所之间，都必须配备适当的通信设备，用以传递与直流线路运行相关的控制信息、保护动作信息、设备状态信息、运行参数测量信息、运行操作信息等。

对于高压直流输电系统来说，两换流站之间没有其他通信联络，只要有电话可用，也能够运行，但是运行很不方便，一些自动化功能也难以实现。如果配备有良好的通信系统，直流系统的运行操作就更加容易，系统性能会更加完善。

通信系统以极为基础进行配置，目的是保证双极中各极运行的独立性。两极的通信系统在电气上和物理结构上都应予以分开，以便使各系统能够独立运行。需要传送的双极共用信息应尽可能地少，必须传送的双极信号应通过各极的通道同时传送。对于每一极的通信系统，也应考虑信号通道多重化的要求以确保可靠性。

#### (一) 通信内容

在两个换流站之间，有大量的信息需要传送，这是为了保证直流输电系统的正常运行及事故处理，这些信息主要包括：连续控制用的直流功率定值、直流电流定值、频率控制信号、阻尼控制信号；运行操作命令，如换流器解锁/闭锁、运行控制模式转换、保护连锁、直流电流限制值、直流功率限制值；状态显示信号，如断路器开/合位置、隔离开关开/合位置、变压器抽头位置；测量显示信号，如直流功率、直流电流、换流器触发角和关断角。此外，还有报警信号、语音信号、直流线路故障定位信号等。

在换流站与各级电力调度之间需要的通信内容主要包括遥控信号、状态显示信号、测量显示信号、报警信号及语音信号等。

#### (二) 通信速度要求

在两换流站间交换的信息，对通信速度有两类要求，第一类是要求速度很高的信息，如直流电流指令、紧急停运信号；第二类是速度可以慢些的，如各种状态显示信号、测量显示信号。

要想说明通信速度与控制响应的关系，我们应该考察一下直流电流控制回路的响应特性。按照电流裕度控制原则，在任何运行方式下，都必须保持一定的电流裕度，即整流侧的直流电流定值大于逆变侧的直流电流定值。所以，当要求增大直流电流时，必须先增大整流侧的电流定值，再增大逆变侧的电流定值；而当要求减小直流电流时，则应先减小逆变侧的

电流定值，再减小整流侧的电流定值，以达到两侧直流电流定值的配合，确保电流裕度的存在。

在正常运行方式下，直流电流是由整流侧控制的，以主导站设在整流站为例，当要求增大直流电流时，主控器发出的电流改变指令立即送给整流侧电流调节器，致使直流电流立即开始上升，因此直流系统的电流响应时间仅为直流电流环路的响应时间，与两站间通信时延无关。但是，如果要求减小直流电流，那么为了确保电流裕度，主控器发出的电流改变指令，必须先送往逆变侧，将逆变侧的电流定值减小，同时将逆变侧电流定值已经减小的信号再回送到整流侧。整流侧接收到由逆变侧发送回来的回报信号后，才能向其电流调节器发出减小直流电流的指令信号。此时，实际直流电流才能开始下降。所以，当主导站位于整流侧而要求减小直流电流时，直流电流的响应时间包含两站之间通信通道往返传送信号的时滞。如果主导站设在逆变侧，那么情况与上述又有些不同。在这种情况下，无论是要求增大电流还是减小电流，直流系统的电流响应时间都包含一次通信时滞。综上所述，两站间信号传送速度是影响直流系统控制响应的重要因素。

紧急停运信号也需要在换流站间尽快传送。葛——南直流工程采用单独的 NSD41 通道传送此信号，实测通道时滞为 50~60ms。三——常直流工程在调试时，实测保护动作的传送时间仅为 10ms。

鉴于通信对直流输电控制的重要性，为了保证信号的可靠传输，故要求信号的误码率低于  $10^{-6}$ 。每个信号都应各自满足该可靠性水平，而不是在与冗余信号通道上所传输的信号比较之后才达到这个水平。对于保护动作信号应有专门冗余的传送通道，不受其他信号干扰。

### (三) 电源系统

控制保护系统一般由蓄电池系统直接供电，蓄电池通过站用交流电源浮充电运行。为了保证系统的可靠性，蓄电池及充电系统都应冗余配置。

## 7.4.2 控制保护系统结构配置实例

### 一、葛——南直流工程

每个换流站拥有两家 BBC 公司开发的可编程控制系统，一个是高速可编程控制器 PH-SC 系统，用于阀控；另一个是 P13 系统，用于站控。阀控和站控均采用双通道配置方案，一个处于工作状态，另一个处于热备用状态。当工作通道出现故障时，热备用通道将自动切换成工作通道。

葛——南直流输电工程的保护系统也是采用 PHSC 系统，以三取二冗余方式配置，当一套保护故障时，剩下的两个通道自动变成二取一。葛——南的三套直流保护与选择回路一起安放在同一个设备柜中，由处在保护柜中的一套三取二硬件回路选取，跳闸输出分别启动两条紧急停运总线。交流保护（包括换流变压器、交流滤波器、交流母线及开关）、直流滤波器保护、站用电及辅助装置保护均采用分别各自的装置，它们发出的停运直流系统命令，直接或通过冗余的紧急停运总线传送给直流保护系统执行。

PHSC 系统使用 FUPLA 编程系统进行控制保护功能的软件编程。葛——南直流工程的控制和保护系统总体结构见图 7—2。

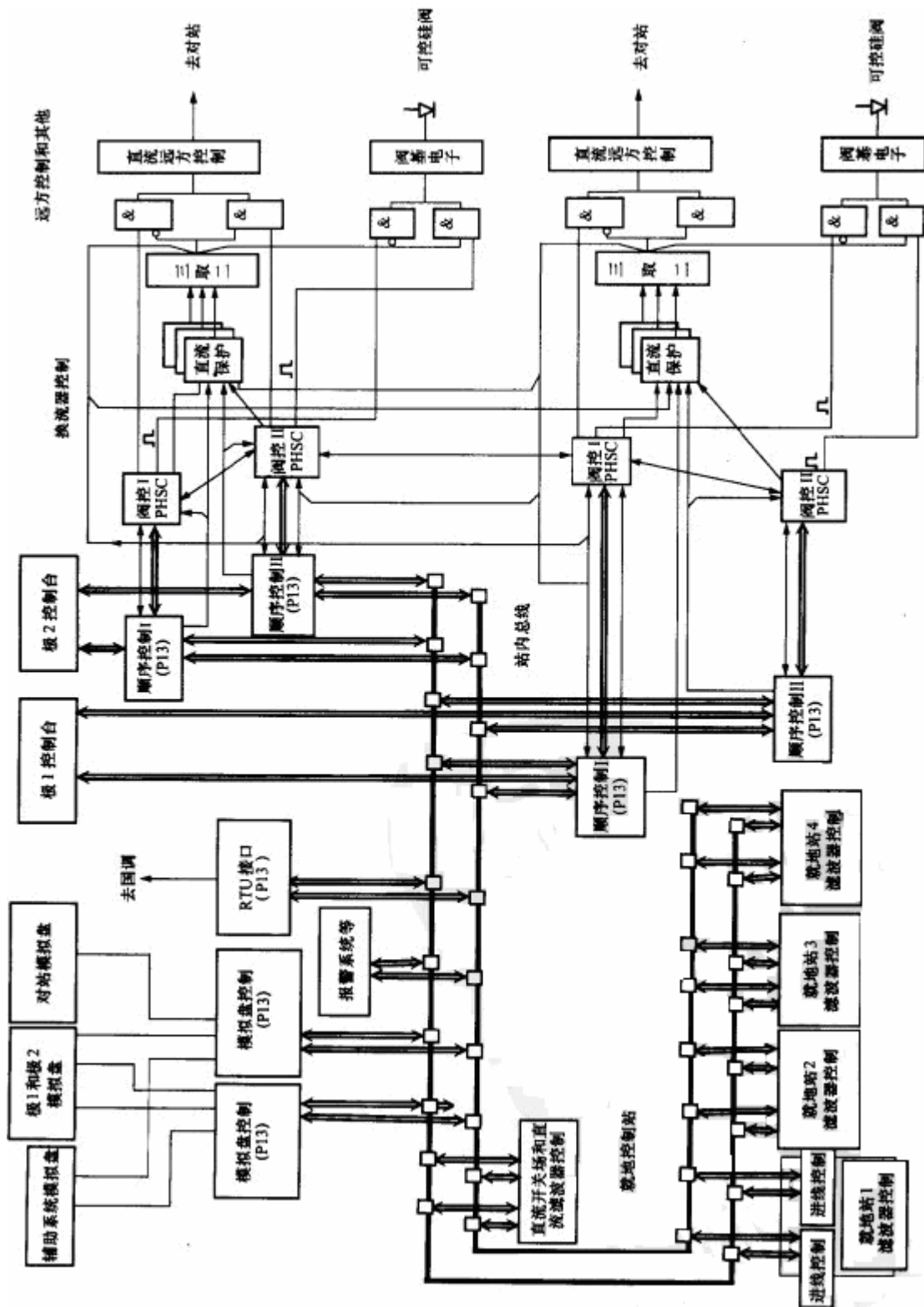


图 7-2 葛——南直流工程控制保护系统总体结构图

## 二、天——广直流工程

天——广直流工程的控制保护系统是用高速数字式可编程控制器 SIMADYND 系统为基础来实现的。直流控制系统分成互为冗余的两套系统，即系统 1 和系统 2 以及系统选择切换控制。两套系统互为备用，在直流系统运行期间，两套系统之间可以进行无扰动的切换。

天——广直流工程的直流保护系统，与葛——南直流保护基本相同，采取的是三取二

配置方案。交流滤波器保护采用大组集中冗余方式，换流变压器保护与交流、直流开关控制结合在一个机柜中。在直流系统保护中，增加了直流滤波器保护。配置完全相同的三套直流保护，分别放在三个独立的机柜中，测量直流运行量通过光纤直接取自一次回路、两套三取二选择硬件电路分别安放在两个保护柜中，保护动作输出信号与其他装置的保护跳闸信号一起分别送给换流器控制的两个通道及变压器保护柜的两套跳闸回路。

SIMADYND 系统使用 SIMATIC 编程系统进行直流控制保护功能的软件编程。天——广直流工程的直流控制保护系统与外围设备连接和通信总览见图 7—3。

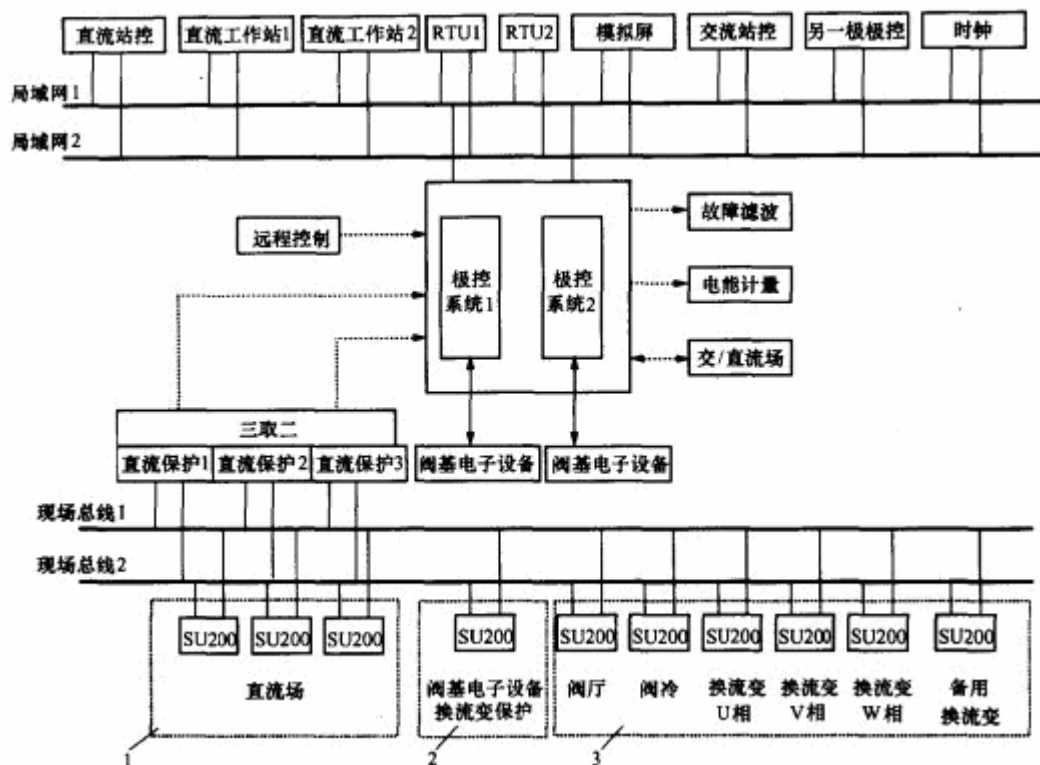


图 7—3 天——广直流工程的控制保护系统与外围设备连接和通信总览

1—直流场继电器室；2—控制屏；3—阀冷却系统控制

### 三、三——常直流工程

三——常直流工程的直流控制保护系统采用了所谓的完全冗余概念。两套主系统的硬件和软件功能及构造完全一样，两套主系统中的任何一套都由两个主机 MC1 和 MC2 构成，其中 MC1 包括直流控制和第一套保护（主保护），MC2 包括直流控制和第二套保护（后备保护）。主计算机 MC 以 BBC 公司生产的工业控制系统 MACH2 为基础，由计算、内存、输入/输出等板卡组成。MACH2 系统使用 HiDraw 编程系统进行直流系统控制保护功能的软件编程。

控制保护系统的分层结构主要包括：(1)站级，包括 SCADA 系统、站控局域网和站内辅助系统报警接口；(2)设备级，包括交流系统控制和保护、交流场接口终端、交流滤波器控制和保护、极控制和保护、双极接口终端、直流场接线终端、阀控、换流变压器控制接口、平波电抗器控制接口、冷却系统的控制和保护以及辅助系统接口等。

三——常直流工程的直流系统保护包括换流器保护、极保护（包括直流开关场保护、极和中性母线保护、直流线路保护和直流滤波器保护）、双极保护（双极中性线及电极线保护）、换流器交流母线和换流变压器保护。直流保护功能基本都包括在一套直流保护装置内，只有交流滤波器和交流开关以及辅助设备的保护不在其中。

三——常直流工程龙泉换流站直流控制保护系统总框图见图 7—4。

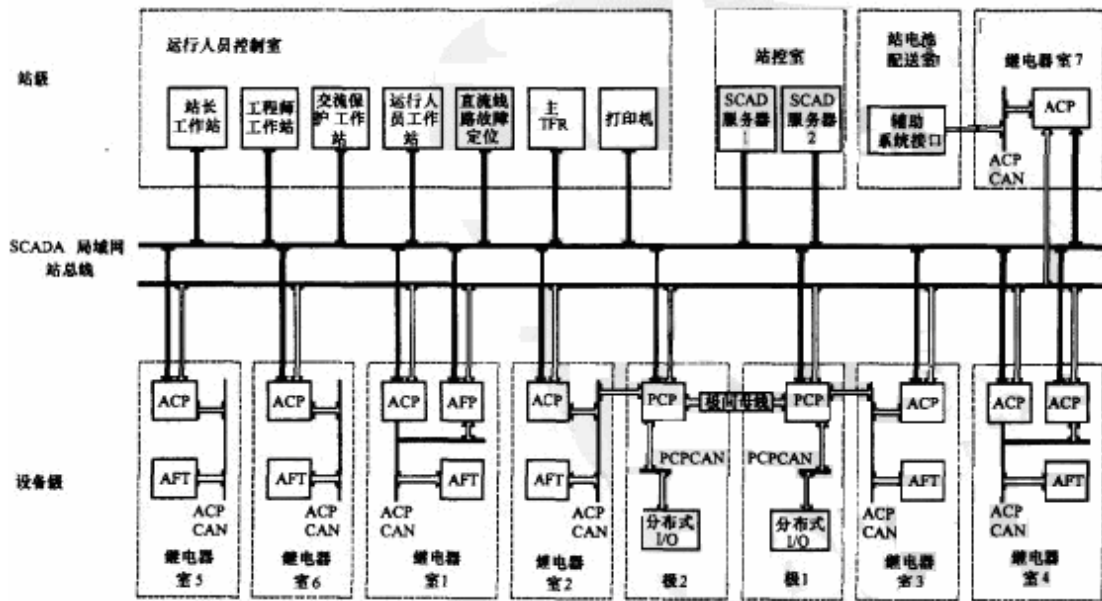


图 7—4 三——常直流工程龙泉换流站直流控制保护系统总框图

PCP—极控保护；AFP—交流滤波器控制和保护；

ACP—交流控制和保护；AFT—交流场接口终端

## 第 8 章 直流输电设备

直流输电与交流输电的形式有所不同。在直流输电系统中，首先将交流电通过整流站变成直流电，然后通过直流输电线路送出，最后在电网的受端再通过逆变站把直流电变成交流电，注入受端交流电网。因此，高压直流输电系统主要包括换流站(包括整流站和逆变站)和线路两大部分。本章旨在介绍换流站的主要电气设备。

### 8.1 换流阀

换流技术的发展对直流输电的发展有着重要的影响，特别是大功率的换流器件。直流输电换流技术包括实现换流的高压大功率换流阀和控制保护装置以及进行换流的理论和方方法，而前者往往起决定性的作用。因此，换流阀是直流输电系统中的关键部件，它除了具有整流和逆变的功能外，同时在整流站中还要具有开关的功能，可利用其快速可控性对直流输电的起动和停运进行快速操作。

要实现直流输电的大容量、高电压，就需要有相对应的高电压、大容量的换流设备，即换流阀。因此，多年来人们对高电压、大容量的换流阀进行了大量的开发研制工作。

20 世纪 50 年代汞弧阀的问世，使直流输电工程成为现实。1970 年，世界上第一项晶闸管换流阀试验工程在瑞典建成，取代了原有的汞弧阀换流器，标志着直流输电有了重大突破性进展。从此以后世界上新建的直流输电工程均采用晶闸管换流阀。90 年代以后，新型大功率半导体器件（如 IGBT、IGCT 和碳化硅元件等）的应用，促进直流输电的进一步发展。

晶闸管换流阀是换流站的核心设备之一，其投资约占全站设备投资的 1/4。晶闸管换流阀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的运行，并满足损耗小、安装及维护方便、投资省的要求。

#### 8.1.1 换流阀的阀特性

晶闸管的电路符号及其伏安特性分别如图 8-1~8-2 所示。主电流从阳极流向阴极，在断开状态，晶闸管能阻断正向电流而不导通，图为伏安特性的断开状态段。

当晶闸管处于正向闭锁状态时，通过向门极施加瞬时的或持续的电流脉冲，能触发晶闸管导通。导通时的正向电压降只有几伏(典型值为 1—3v，取决于晶闸管闭锁电压的额定值)。

一旦晶闸管开始导通，它就被锁住在导通状态，而此时门极电流可以取消。晶闸管不能被门极关断，像一个二极管一样导通。直到电流降至零且有反向偏置电压作用在晶闸管上时，它才会截止。当晶闸管再次进入正向阻断状态后，允许门极在某个可控的时刻将晶闸管再次触发导通。

在反向偏置电压低于反向击穿电压时，流过晶闸管的漏电流很小，几乎可以忽略(图 8-2)。通常，晶闸管的正向和反向阻断额定电压相同。用晶闸管允许通过的最大电流有效值和平均值来规定电流额定值。

在分析换流器时，可以用图 8-3 所示的理想特性来表示晶闸管。

多个晶闸管元件串联连接时，由于各元件的特性不一致，造成晶闸管间电压分布不匀，因此需要加装均压装置来限制其不均匀程度。另外，晶闸管换相时，电压发生突变，由于阀

的杂散电容等和回路电感的存在而产生振荡。为了抑制这个振荡过电压需要设置阻尼装置。这些均压、阻尼装置大都是由统一的 RLC 网络构成。应当指出的是，如果使用统一的 RLC 网络时，则在选择网络参数时，需要同时满足均压参数与振荡阻尼两方面的要求，做到统筹兼顾，合理配置。

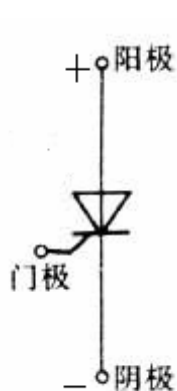


图 8-1 晶闸管

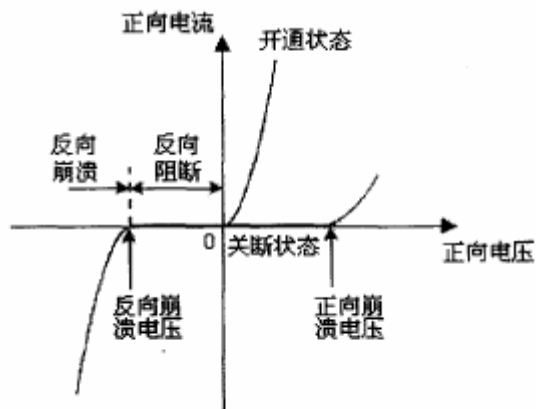


图 8-2 晶闸管伏安特性

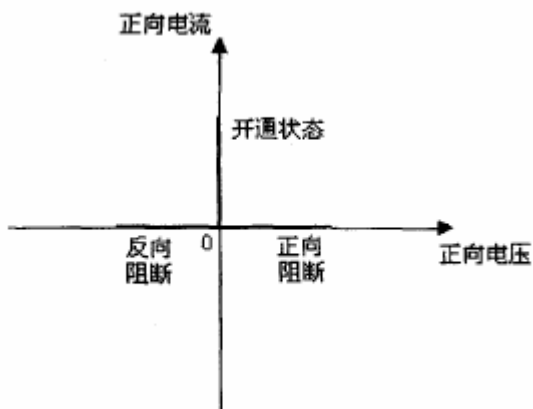


图 8-3 晶闸管理想特性

### 8.1.2 系统对换流阀定值的要求

在选择晶闸管元件时，一般要求各元件具有下列特性：

#### 一、耐压强度高

从晶闸管阳极的伏安特性可知，其反向特性与二极管相似，要求在正向电压时，控制极加触发脉冲就能立即导通；而处于反向电压时，要求不导通。因此，要求晶闸管元件有足够高的绝缘强度承受反向电压。如果反向电压瞬时值超过击穿电压，晶闸管元件将永久损坏。

#### 二、载流能力大

晶闸管元件的额定电流是指通态电流为正弦波时，所允许的通态平均电流，如图 8-4 所示。当通态电流峰值为 314A 时，其额定电流为 100A。通态电流均方根值为 157A。如果通态电



流不是正弦波，则通态平均电流的允许值就不一定等于额定电流。决定其允许值的最根本依据是晶闸管元件结温的最高允许值。改善散热条件可以提高通态电流的允许值。

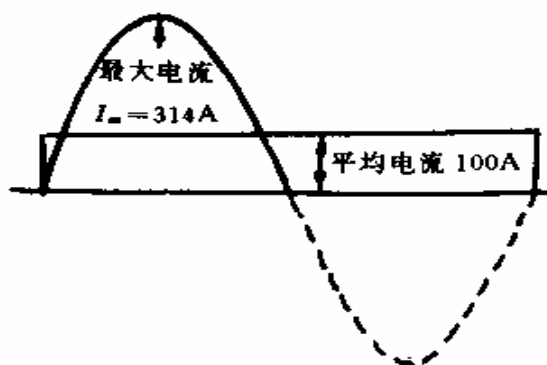


图 8-4 晶闸管元件通态电流平均值

### 三、开通时间和电流上升率( $di / dt$ )的限制

当晶闸管元件阳极加正电压，并在控制极上加足够大的触发电流后，晶闸管元件并不是立即完成开通过程的，它的通态电流上升和通态电压下降都有一个过程。

如图 8-5，从控制极电压上升到终值（触发所需电压）的 10% 时起，到阳极正向电压下降到 90% 时所需的时间，称为延迟时间  $t_d$ ，阳极电压从 90% 继续下降到 10% 时所需的时间称为上升时间  $t_r$ ，其中上升是指阳极电流相应的上升而言。两者之和 ( $t_d + t_r$ ) 则定义为晶闸管元件的控制极控制开通时间（简称开通时间） $t_k$ ，其值一般在  $10 \mu s \sim 20 \mu s$  之间。

晶闸管元件在开通时，先由靠近控制极附近的小区域导通，然后逐渐向外围扩展。如果刚开通时就通以阳极电流，势必对控制极附近的结面造成局部过热而损坏晶闸管。因此开通时的电流上升率  $di / dt$  需要有一个限值，一般约为  $100A / \mu s$ 。

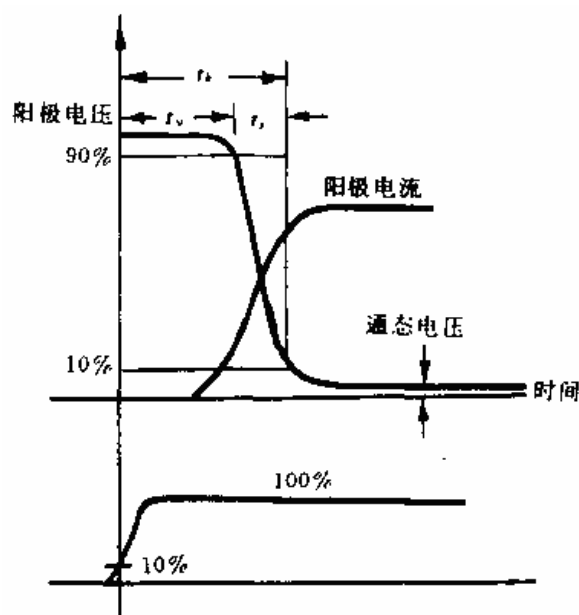


图 8-5 晶闸管元件的触发开通过程

### 8.1.3 晶闸管换流阀的结构

换流电路有多种可选择的结构，但考虑到更充分的利用换流变压器，而且保证阀截止时阀上反向峰值电压较低，高压直流换流阀采用三相全波桥式电路(Graetz 桥)为基本模块，其原理接线图如图 8-6 所示。

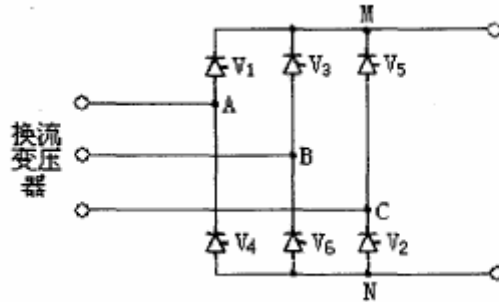


图 8-6 换流器基本原理接线图

为了节省空间和土地资源，在晶闸管阀的结构方面也有了较大发展。从原来一台设备一个阀臂的单阀结构发展为二个阀臂组合成一台设备的双重阀结构，以及一台装有 4 个臂的四重阀结构。四重阀用于 12 脉波运行的组合单元。空气绝缘的桥阀大多采用双重阀结构，在两阀之间有一个控制柜，从地电位接受控制信号，形成控制脉冲，并分别送到上下两阀的元件。

### 8.1.4 换流器在系统中的连接

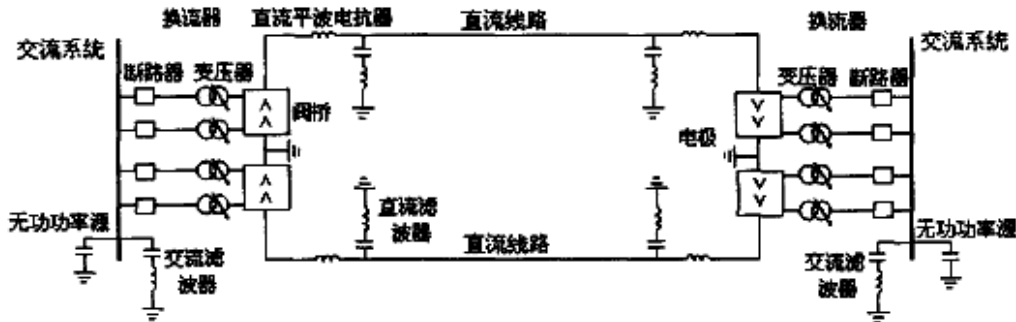


图 8-7 双极直流系统主要元件

换流阀是由阀桥和有抽头切换器的变压器构成。阀桥包含 6 脉波或 12 脉波的高压阀。换流变压器向阀桥提供适当等级的不接地三相电压源。由于变压器阀侧不接地，直流系统能建立自己的对地参考点，通常将阀换流器的正端或负端接地。换流变压器的交流侧配有有载调压分接头。变压器交流侧绕组通常采用星形接地连接，阀侧绕组通常采用三角形或星形连接。

换流阀在交流和直流两侧均产生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，而且可能干扰远动通信系统。因此，在交流侧和直流侧都装有谐波滤波器。

直流换流阀运行时会消耗大量的无功功率。稳态条件下，换流器消耗的无功功率是传输功率的 50%左右，而暂态条件下无功功率的消耗量更大。因此，必须在换流器附近提供

无功电源。对于交流系统，通常用并联电容补偿的形式。

根据直流联络线和交流系统的要求，部分无功电源可采用同步调相机或静止无功补偿器(SVC)。用作交流滤波器的电容也可以提供部分无功功率。

在交流侧装有断路器，作用不是排除直流系统的故障，因为直流系统故障可以通过换流器的控制更快的切除。交流断路器的装设目的是排除变压器故障和使直流输电系统停运。

目前典型的直流电压±500kV, 输送容量 3000MW 的高压直流(HVDC)站换流阀均采用 5 阀片。对于特高压直流输电(UHVDC)工程, 可以考虑采用改进后的 5 阀片, 以加大通流容量。但是,对于有更大容量要求的特高压直流输电(UHVDC)工程, 需要考虑开发更大直径的换流阀片。换流阀组的设计可以考虑采用二重阀或四重阀,一般采用悬吊阀组。

## 8.2 换流变压器

### 8.2.1 换流变压器的功能和特点

换流变压器和换流阀一起共同实现交流与直流之间的互相变换。现代高压直流输电系统一般都采用每极一组 12 脉动换流器的结构, 因此换流变压器还为两个串联的 6 脉动换流器之间提供 30 度的相角差, 从而形成 12 脉动换流器结构。换流变压器的阻抗限制了阀臂短路和直流母线上短路的故障电流, 使换流阀免遭损坏。

换流变压器的运行与换流器的换相所造成的非线性密切相关, 因此换流变压器在漏抗、绝缘、谐波、直流偏磁、有载调压和试验等方面与普通电力变压器有着不同的特点。

#### 一、绝缘

换流变压器在运行过程中既要承受交流的应力作用, 又要承受较大分量的直流应力作用, 因此要求变压器绝缘尤其是阀侧绝缘对运行中的工作场强有足够的耐受裕度, 其绝缘问题非常突出。据统计, 换流变压器的运行故障约有一半是绝缘事故。此外, 直流电压的极性可能迅速反转, 这些问题使得它的内绝缘电位分布与普通电力变压器有很大的差别。在不同绝缘材料电压分配中, 对于交流电压、暂态冲击过电压以及直流电压将做不同的考虑。换流变压器内绝缘大多采用变压器油、纸、压板等纤维素固体材料。它们的介电常数之比不超过 1:3。但材料电阻率的大小受很多外部因素影响, 比如温度、湿度、场强、时间、老化等等, 其电阻率之比可能超过 1:1000。以上因素的影响使得换流变压器在直流电场作用下绝缘中的电位分布与交流有很大差异。换流变压器中最常见的故障多见于线圈绝缘损坏、油纸绝缘强度降低、分接头变换器和套管以及冷却系统(泵)故障。对于特高压变压器而言, 需要关注的是阀绕组与接地—交流绕组之间的直流绝缘结构。

#### 二、短路阻抗

为了防止导通的健全阀通过过大的短路电流而损坏它的元件, 换流变压器应具有足够大的短路阻抗来限制短路电流。这是因为换流器的阀臂发生绝缘破坏事故时, 造成换流变压器的桥侧短路, 而换流器的换相过程实际上就是换流器二相短路过程。但短路阻抗也不能过大, 过大的短路阻抗会使换流器在运行中消耗的无功功率增加, 导致需要加大无功补偿设备的容量, 并且直流电压中换相压降也将过大, 因此换流变压器短路电抗的选择要综合参考这两方面的因素, 通常取值为 15%~20%。

#### 三、有载调压

换流变压器要求有载调压分接开关的调压范围较大, 这是为了补偿换流变压器交流网侧电压的变化以及使触发角运行在适当的范围, 保证运行的安全性和经济性, 尤其在采用直流降压模式时, 对有载调压的要求更高, 一般取值范围为 20%~30%。

#### 四、直流偏磁（直流磁化）

若换流器触发相位的间隔不等，交流相电流的正、负半波波形会有所不同。当其平均值不为零时，相电流中将产生直流分量。该直流分量流过换流阀侧绕组时产生直流偏磁。直流偏磁不仅导致铁心周期性的饱和，并发出低频噪声，噪声的频率只有正常激磁情况下的变压器噪声频率的一半。而且也将使得变压器的损耗和温升大幅增大。

#### 五、噪声

换流变压器的噪声是由于铁心的磁滞伸缩使变压器产生的（不同于前述的低频噪声），一般噪声频率为工频的 2 倍。由于换流变压器铁心中磁通还含有谐波分量，因此它们的噪声中也含有频率较高的分量。这些分量虽然较小，但对人的影响比普通电力变压器要大，所以当换流站建在有人居住地区时更应对噪声问题加以充分地重视。

#### 六、谐波

换流变压器在运行时有特征谐波电流和非特征谐波电流流过。变压器漏磁的谐波分量会使变压器的杂散损耗增大，有时还会使某些金属部件和邮箱产生局部过热现象。对于有较强漏磁通过的部件要用非磁性材料或者采用磁屏蔽措施。数值较大的谐波磁通会引起磁滞伸缩噪音，且处于听觉敏感频段，必须采取有效的隔音手段。

#### 七、试验

特高压换流变压器试验分为常规试验、型式试验和验证性试验。常规性能试验包括：绕组直流电阻测量、极性变压比测量、谐波损耗测量、变压器油试验、长时间空载试验及其空载损耗和电流测量、负载电流测量、一小时励磁试验等。常规绝缘试验用来模拟变压器在稳态和暂态运行过程中对于交流、直流和冲击电压的耐受能力。包括感应电压试验并测量局部放电；交流耐压试验；直流耐压试验并测量局部放电；外施操作冲击电压试验；雷电冲击电压试验；感应操作冲击电压试验等。型式试验包括温升试验；电容量偏差测量；频率响应测量及分析；油流带电测量试验；噪音测量试验；验证性试验或论证包括变压器短路耐受能力验证；抗震能力验证；电磁兼容（EMC）验证等。以上三个试验均要附加局部放电测量，是特高压换流变压器最为关键的绝缘试验。

### 8.2.2 换流变压器绕组的直流偏磁

换流变压器绕组中电流直流分量的存在会影响磁化曲线，并产生偏离零坐标轴的偏磁量。其产生直流偏磁电流的原因有：①触发角不平衡；②换流器交流母线上的正序二次谐波电压；③在稳态运行时由并行的交流酰氯感应到直流线路上的基频电流；④单击大地回线方式运行时由于换流站中性点电位升高所产生的流经变压器中性点的直流电流；⑤由于太阳表面黑子等物质产生的太阳风和射线流袭击地球产生的磁暴。

图 8-8 中给出了变压器的磁化特性： $\varphi = f(i)$  及直流偏磁量与励磁电流的直流分量之间的对应关系。当存在偏磁时，励磁电流的波形发生严重畸变，正半周出现尖峰，且其峰值较无偏磁时大得多。

触发角不平衡产生的直流偏磁是换流变压器直流偏磁的重要原因。导致换流阀触发角不平衡的因素有很多，其中主要原因在于：第一，同相两个阀触发信号光纤长度的差异，会导致触发时间上的轻微差异。第二，交流系统电压的不对称和等距离触发系统及晶闸管触发回路所造成的触发误差。由此引起的触发角不平衡在整流侧及逆变侧产生的直流偏磁电流，整流器和逆变器的触发不平衡都会在换流变压器中产生直流电流，但两者不同步。一个 12 脉动换流阀内的两个 6 脉动阀桥产生的直流电流也不同步。但是只有当触发角的不平衡程度达到使得换流变压器绕组中电流正负半波的电流平均值不等于零的这种情况时，即正半波电流增大，负半波电流减小，换流变压器绕组中才会出现直流分量的励磁电流。

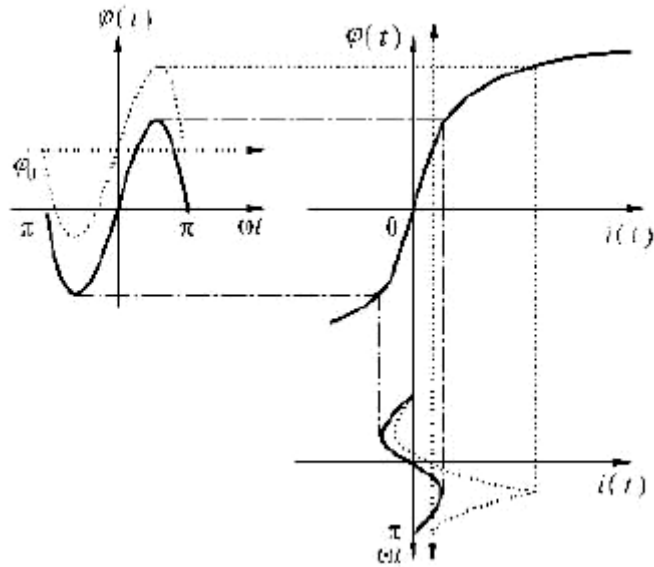


图 8-8 绕组中励磁电流及铁心中磁通的波形变化

根据对换流阀系统包括阀触发电子回路的分析认为,不同阀门之间触发角的不平衡一般不会超过 0.02 度。按比较保守的估算,由此在阀侧绕组所产生的直流不平衡电流可以用下式估算

$$\Delta I_{dc} = \frac{4 \times \Delta \alpha}{360^\circ} \times I_d \quad \text{式(8-1)}$$

当  $\Delta \alpha = 0.02^\circ$  时,  $\Delta I_{dc} = 0.22 \times I_d \times 10^{-3}$ 。

由于换流器交流母线存在正序二次谐波电压,在直流侧会出现 50Hz 的交流电压分量。从而导致换流变压器阀侧电流中出现直流电流分量。根据我国的交流系统运行情况及有关规定,一般假定换流器交流母线存在相当于系统基频电压 1% 的正序二次谐波电压。这种假设是相当保守的,通常只有换流器交流母线上所接的交流滤波器与交流系统发生谐振时才会出现。利用 EMTDC 对包括 12 脉动换流器、交流滤波器、平流电抗器和直流滤波器在内的交直流系统进行模拟可以求出相应的直流电流分量。在模拟计算中,是将交流系统基频电流叠加上 1% 的二次谐波电压,以考虑其对直流电流分量的影响。

当直流输电架空线平行并靠近交流线路架设。在稳态运行时,交流线路上流过的交流电流可能在直流线路上感应出基频电压,从而导致直流线路上出现基频电流。即使交流线路三相系统的负荷电流是对称的,但由于各相导线与直流线路距离不等,也会在直流线路上感应产生交流基频电压。降低这种耦合影响的有效措施是交流线路采用相导线的换位措施。

由于在换流过程中换流阀的按序通断,直流线路的 50Hz 电流使换流变压器阀侧绕组出现直流电流分量。在绕组一相中的电流分量可以在零和其最大值之间变化,取决于 50Hz 电流与换相角之间的相角关系。在计算中往往假定最严重的条件以得到一个最大的直流电流分量。

单极大地回线方式运行时接地极电流的影响是在换流变压器中产生直流电流偏磁。单极大地回线方式运行式,巨大的直流电流与大地构成回路,地电流会对附近的交流系统产生影响。同时也会对周围地中的金属管线或地中金属物体产生影响,也可能对地中通信线或信号线产生影响,或加速地中金属物体的腐蚀等。1991 年新西兰 350kV 直流系统 Benmore 换流站在扩建工程投资调试时,换流变压器在空载条件下发现直流偏磁使励磁电流幅值达到

100A 以上，从而引起严重的零序谐波使滤波器过载跳闸。Benmore 换流站至接地极的距离仅 8km，接地极电流为 2kA 时，Benmore 换流站的地电位高达 84V，一般经验为 10V 左右。

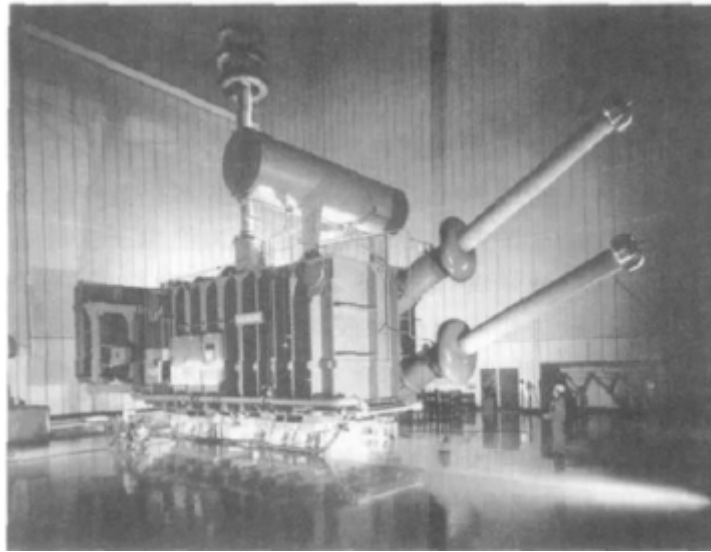


图 8-9 500 kV 直流单相双绕组换流变压器

目前抑制直流偏磁主要采取限流和隔直的方法，即：(1)中性点串联电阻；(2)中性点串联电容；(3)线路串联电容。在直流接地极单极大地回路运行方式下，对系统的影响主要是中性点直接接地变压器的偏磁影响，对变电站其它设备安全不构成威胁。由于直流接地极运行，变电站地网的直流电位已升高或降低。

直流地电位补偿法的原理是：当两变电站地网 A、B 处于接地极恒定电流场时，所处位置不同，使两地网间存在电位差，电流从高电位 A 地网通过变压器中性点经输电线路流向低电位 B 地网，造成中性点变压器的直流偏磁。此时，若向地网注入一定直流电流来降低 A 地网的电位或升高 B 地网的电位将使两地网间的电位差减小，通过地网流过中性点接地变压器的直流电流也相应减小，一定程度上拟制了变压器的直流偏磁。图 8-10 为地网直流电位补偿原理图。补偿部分为一台直流电源向低电位地网注入直流电流  $I$ 。考虑分流影响，流入该地网的电流为  $I'$ ，此时该地网电位值为：

$$U = I'R = KIR \quad \text{式(8-2)}$$

其中， $K$  为分流系数； $R$  为地网接地电阻。可见，如向高电位地网注入负电流时，地网电位相对零电位会降低。由于  $R$  恒定，可通过改变  $I$  来改变地网的电位值。

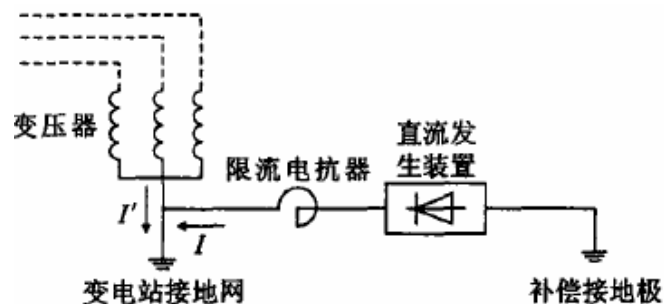


图 8-10 地网直流电位补偿原理图

## 8.3 平波电抗器

在主回路中的平波电抗器(又称直流电抗器)主要有以下几个作用:减少直流侧的交流脉动分量、小电流时保持电流的连续性以及当直流送电回路发生故障时能抑制电流的上升速度。理论上希望它的电感量  $L_d$  越大越好。但是当电感量  $L_d$  越大,电流迅速变化时在直流电抗器上产生的过电压  $L_d \frac{di}{dt}$  就越大。另外平波电抗器作为一个延时环节,  $L_d$  过大时对直流电流的自动调节不利。所以在满足上述前提下,平波电抗器的电感  $L_d$  应尽量小。

### 8.3.1 平波电抗器主要参数选择

由上述分析可知,平波电抗器最主要的参数是电感量,其选择应考虑以下几点。

一、限制故障电流的上升率。其简化计算公式为

$$L_d = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} \Delta t = \frac{\Delta U_d (\beta - 1 - \gamma_{\min})}{\Delta I_d \times 360 f} \quad \text{式(8-3)}$$

式中,  $f$  为交流系统额定频率;  $\gamma_{\min}$  为不发生换相失败的最小关断角;  $\Delta U_d$  为直流电压下增量,在 12 脉动换流器中,一般选取一个 6 脉动桥的额定直流电压;  $\Delta I_d$  为不发生换相失败所容许的直流电流增量;  $\Delta t$  为换相持续时间,  $\Delta t = \frac{\beta - 1 - \gamma_{\min}}{360 f}$ ;  $\beta$  为逆变器的额定超前触发角,  $\beta = \arccos(\cos \gamma_N - I_d / I_{s2})$ ;  $\gamma_N$  为额定关断角;  $I_d$  为额定直流电流;  $I_{s2}$  换

流变压器阀侧两相短路电流的幅值;  $\Delta I_d$  为  $2 I_{s2} [\cos \gamma_{\min} - \cos(\beta - 1)^\circ] - 2 I_d$ 。

由上述计算电感量,并未涉及直流线路电感的限制作用,也不考虑直流控制保护装置的动作,所以在实际工程中采用的电感量可适当降低。

二、减小直流侧的交流脉动分量。换流器对于直流送电线路来说,可看作电压谐波发生器。它将在直流系统中注入  $n$  次谐波频率的谐波环流,其谐波次数

$$n = Kp \quad \text{式(8-4)}$$

$p$ ——脉波数,对三相桥式而言,  $p=6$  (单桥);

$K$ ——正整数,取 1, 2, 3……

$n$  次谐波电压的有效值,当  $\alpha = 0$ ,  $\mu = 0$  时,

$$V_{(n)0} = V_{d0} \frac{\sqrt{2}}{(n^2 - 1)} \quad \text{式(8-5)}$$

对于不同的  $\alpha$  和  $\mu$ ,  $n$  次谐波的有效值  $V_{(n)0}$  将随着这些参数的变化而变化,根据允许的谐

波电流百分含量  $I_d\%$  (通常在 3%左右), 可以利用下式计算出平波电抗器的电感值  $L_d$ 。

$$L_d = \frac{V_{(n)\max}}{n\omega I_n \% I_d} \times 100 \quad \text{式(8-6)}$$

式中  $V_{(n)\max}$  ——  $n$  次谐波的最大值, V

$I_d$  —— 额定直流电流, A

$\omega$  —— 角频率

$n$  —— 谐波次数

三、小电流时保持电流的持续性。在最小直流电流为  $I_{d\min}$  时, 要保持电流连续所需直流电抗器的电感值可用下式计算, 对单桥运行时

$$L_p = \frac{V_{d0}}{\omega I_{d\min}} \times 0.0931 \sin \alpha \quad \text{式(8-7)}$$

双桥运行时

$$L_p = \frac{V_{d0}}{\omega I_{d\min}} \times 0.023 \sin \alpha \quad \text{式(8-8)}$$

式中  $V_{d0}$  ——  $\alpha = 0$  时的空载直流电压;

$\alpha$  —— 延迟角;

$I_{d\min}$  —— 最小直流电流 (一般取  $0.1I_d$ )。

四、平波电抗器是直流滤波回路的组成部分。其电感值应与直流滤波器的参数统筹考虑, 电感值大, 则要求的直流滤波器规模小, 反之亦然。因此平波电抗器电感量的取值应与直流滤波器综合考虑, 并进行费用优化。

五、平波电抗器电感量的取值应避免与直流滤波器、直流线路、中性点电容器、换流变压器等在 50Hz、100Hz 发生低频谐振。

根据以往高压直流输电工程的经验, 确定平波电抗器的电感量没有一个统一的计算公式, 而是一个性能价格逐步优化的过程, 从而确定一个最优值。从远距离高压直流输电工程平波电抗器的参数来看, 大部分平波电抗器的工频电抗标么值通常在 0.20~0.70 范围之内。

### 8.3.2 平波电抗器的优点

平波电抗器有干式和湿式两种类型。这两种平波电抗器在高压直流输电工程中都得到了成功的运行。

一、与油浸式平波电抗器比, 干式平波电抗器有以下优点:

(一) 对地绝缘简单。干式平波电抗器虽然安装在高电位, 但主绝缘只简单地由支柱绝缘子提供, 提高了主绝缘的可靠性。油浸式平波电抗器主绝缘由油纸复合绝缘系统提供, 相对而言较复杂。

(二) 干式平波电抗器中没有油, 因而消除了火灾危险和环境影响。干式平波电抗器无油绝缘系统, 因而没有火灾危险和环境影响, 而且使用干式平波电抗器无需提供油处理系统, 在阀厅和户外平波电抗器之间也无需设置防火墙。



(三) 潮流反转时无临界介质场强。高电压直流输电系统的潮流反转需要改变电压极性，会因为捕获电荷的原因在油纸绝缘系统中产生临界场强；但对于干式平波电抗器，改变电压极性仅在支柱绝缘子上产生应力，没有临界场强的限制，这样干式平波电抗器的支柱绝缘子与其他母线支柱绝缘子的特性相似。

(四) 负荷电流与磁链成线性的关系。由于干式平波电抗器没有铁芯，因此在故障条件下不会出现磁链的饱和现象，在任何电流下都保持同样的电感量。

(五) 暂态过电压较低。由于干式平波电抗器对地电容相对于油浸式平波电抗器要小得多，因此干式平波电抗器要求的冲击绝缘水平相对较低。

(六) 可听噪声低。由于平波电抗器无铁芯的设计，因此相对于油浸式平波电抗器，可听噪声较低。

(七) 运行、维护费用低。干式平波电抗器没有辅助的运行系统，基本上是免维护的，因此运行维护费用较低。

二、油浸式平波电抗器具有与干式平波电抗器几乎相反的特点，其主要优点为：

(一) 油浸式平波电抗器安装在地面，因此重心低，抗震性能好。

(二) 油浸式平波电抗器由于有铁芯，因此要增加单台电感量很容易。

(三) 油浸式平波电抗器的油纸绝缘系统技术成熟，运行稳定性好。

(四) 油浸式平波电抗器采用干式套管穿入阀厅，取代了水平穿墙套管，解决了水平穿墙套管的不均匀污闪问题。油浸式平波电抗器的垂直套管也采用了干式套管，使其发生污闪的概率降低。

随着我国云南—广东、溪落渡—向家坝  $\pm 800\text{kV}$  直流输电工程的规划与项目的启动，开发  $\pm 800\text{kV}$  干式平波电抗器势在必行。

在工程的实际应用中，干式平波电抗器经历多年运行考验，现广泛应用于高压及超高压交、直流输变电系统的无功补偿、负荷潮流控制、换流阀直流侧电压、电流中的谐波滤除等方面，是十分重要的高压、超高压设备。1988年，我国第一条  $\pm 500\text{kV}/2 \times 600\text{MW}$  葛洲坝—南桥直流输电系统的  $500\text{kV}/1200\text{A}$  的平波电抗器由 ABB 公司成套供应的户外干式平波电抗器(用支柱绝缘子支撑)。此外，在葛—南平抗事故整改、现有技术改造及天—广等高压直流输电系统中均采用 Trench 公司的户外干式平波电抗器。

根据向家坝—南汇  $\pm 800\text{kV}$  直流输电工程初步方案，直流输电系统标称电压为  $\pm 800\text{kV}$ ；最高运行电压为  $\pm 816\text{kV}$ ；标称直流电流为  $4000\text{A}$ 。系统计算表明，干式平波电抗器额定电感量取  $300\text{mH}/\text{极}$ 。每极的高、低压端可各配置 1 组干式平波电抗器，每组平波电抗器的电感量约  $150\text{mH}$ 。平波电抗器可采用两台 ( $75\text{mH}/\text{台}$ ) 串接结构形式，整流站和逆变站各需 8 台，1 台备用。

大量实测表明，直流输电工程换流站的污秽比交流站严重，选择干式平波电抗器配套用穿墙套管时应充分考虑其特点。根据现有研究结论，特高压工程中，与干式平波电抗器配套使用的穿墙套管应为硅橡胶合成套管。虽然硅橡胶合成套管比瓷质套管的机械强度要求相对小些，但具有重量轻、表面良好的憎水性、耐污闪等优点，可满足实际需要。

干式平波电抗器可由瓷质或复合支柱绝缘子作为对地绝缘支撑件。复合绝缘子技术在超高压、特高压输电线路大量成功运行经验表明，以硅橡胶材料为伞裙护套的复合绝缘子与瓷质支柱绝缘子相比，有较优异的耐污闪能力，可降低运行维护费用，保障电力系统安全运行。故在  $\pm 800\text{kV}$  直流输电工程中，干式平波电抗器可使用复合支柱绝缘子作对地绝缘支撑件。

干式平波电抗器大多采用多层绕组并联的筒形结构，使用环氧树脂等有机材料做绝缘材料，层间形成通风气道，空气对流散热性好，热点温度低，故可采用多线圈组合的方式满足工程需要，且具有重量轻、体积小、运输方便、安装灵活等特点，户外露天布置使用时可大

大减少基建投资。同时，干式平波电抗器具有机械强度高、电感线性度好和噪声低等优点，通过喷涂防紫外涂料、喷涂防污能力强的 RTV 和佩带防雨帽等多种措施的综合使用，设备可长期用于户外。

但是，户外运行的干式平波电抗器仍存在一些急待解决的问题。如对户外恶劣气象条件(风、雨等)的承受能力有待提高。当雨水进入设备的线圈内部，则在绝缘材料中引起局部放电，形成局部绝缘薄弱，直至其迅速失效，最终造成线圈匝间或层间短路故障。

据目前干式平波电抗器制造工艺水平和 $\pm 800\text{kV}$  直流输电工程对它的要求，初步确定每极高压端平波电抗器的电感量约  $150\text{mH}$ ，需 2 台  $75\text{mH}$  的电抗器串联。



图 8-11 干式平波电抗器线圈的串联实例

干式平波电抗器在户内运行时，完全避免了户外恶劣的气象条件，使其可靠性大大提高。因基本上无紫外线的破坏作用，而表面涂层的老化主要是非常缓慢的热老化过程，故在设备使用期内没有必要重新喷涂。线圈的温升仅由运行电流产生，温升和温度可得到有效的控制，产品的热老化寿命较易预测。同时其线圈的支撑绝缘子不存在污闪和雨闪问题，绝缘子表面可减少伞裙或降低爬距，进而降低设备的安装高度、减少支柱绝缘子的造价、提高绝缘平台的抗震性能。此外平波电抗器在户内运行时所辐射的声波能量即噪音被封闭在有限空间内，对换流站周围环境的污染较小，甚至不形成噪声污染，节省噪音污染的治理费用。但干式平波电抗器户内布置时，需增加大量投资，如：在考虑电气绝缘等因素后搭建设备专用厂房；因设备在运行中产生的热量不易散出，不能实现自冷，需专门增加大功率冷却、通风设备；设备运行时辐射的声波在厂房大厅内壁产生反射，形成的回响放大了电抗器周围的噪声，为避免声波反射，降低大厅内噪声，需在周围墙壁上安装一定厚度的吸声材料，使厂房建设费用增加。

因干式平波电抗器对金属回路及电磁式测量装置（电磁式电压互感器和电流互感器）有一定的距离要求。如将干式平波电抗器布置于户内，需搭建厂房且存在干式电抗器发热和通风及吊装等问题，厂房结构复杂，通风运行费用很高。

表 8-1 中数据仅分析单条 $\pm 800\text{kV}$  极线之上用平波电抗器的情况。其中本体成本（万元）包括线圈、RTV 涂层、防雨帽的造价。安装总高包括线圈高度、减震装置高度、支柱绝缘子高度等。厂房造价包括基建、其它设备(冷却、起重设备)。

表 8-1 干式平波电抗器的技术、经济数据

| 安装类型                          | 户内         | 户外         |
|-------------------------------|------------|------------|
| 线圈电感量/ mH                     | 75 × 2     | 75 × 2     |
| 容量(两线圈串联)/ MVA                | 376.98 × 2 | 376.98 × 2 |
| 产品高度(单线圈)/ mm                 | 3800       | 4000       |
| 产品外径(单线圈)/ mm                 | 4100       | 4300       |
| 总重(两线圈串联)/ t                  | 30 × 2= 60 | 30 × 2= 60 |
| 安装总高/ mm                      | 19000      | 20000      |
| 支柱绝缘子成本/ 万元                   | 360        | 550        |
| 线圈本体成本/ 万元                    | 1450       | 1500       |
| RTV 涂层和防雨帽/ 万元                | —          | 10         |
| 占地面积/ m × m                   | 30 × 50    | 30 × 50    |
| 占用厂房容积/ m <sup>3</sup>        | 58500      | —          |
| 穿墙套管/ 万元                      | 900        | 900 × 2    |
| 增加厂房造价/ 万元                    | 400        | —          |
| 总造价/ 万元                       | 3110       | 3860       |
| 冷却费用/( 万元 · a <sup>-1</sup> ) | 89.352     | —          |

## 8.4 滤波器

### 8.4.1 交流滤波器

滤波器的分类可按其用途分为交流滤波器和直流滤波器；按连接方式可分为串联滤波器和并联滤波器；接阻抗特性分为单调谐滤波器、双调谐滤波器和高通滤波器。

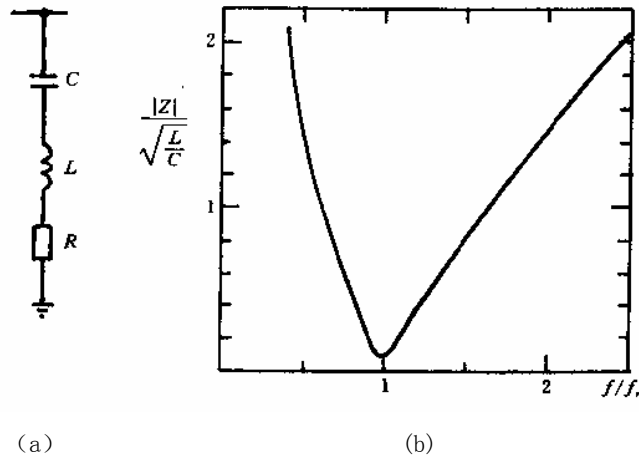
并联滤波器与串联滤波器相比具有如下优点：①滤波效果较好；②串联滤波器必须通过主电路的全部电流，并对地采用全绝缘，而并联滤波器的一端接地，通过的电流只是由它所滤除的谐波电流和一个比主电路中小得多的基波电流，绝缘要求也低；③在交流情况下，并联滤波器除滤波外，其中的电容器还可同时向换流器提供无功功率。因此，高压直流系统中一般都采用并联滤波器。

并联交流滤波器有常规无源交流滤波器、有源交流滤波器和连续可调交流滤波器三种形式。现在已投运的直流输电工程，交流滤波器大部分都采用常规无源交流滤波器。常规无源交流滤波器的设计、制造、调试、安装及运行等技术已非常成熟。葛一南以及天一广高压直流输电工程也都采用常规无源交流滤波器。有源交流滤波器和连续可调交流滤波器仅在个别交流或直流输电工程中应用。

## 一、交流滤波器的阻抗特性

### (一) 单调谐滤波器

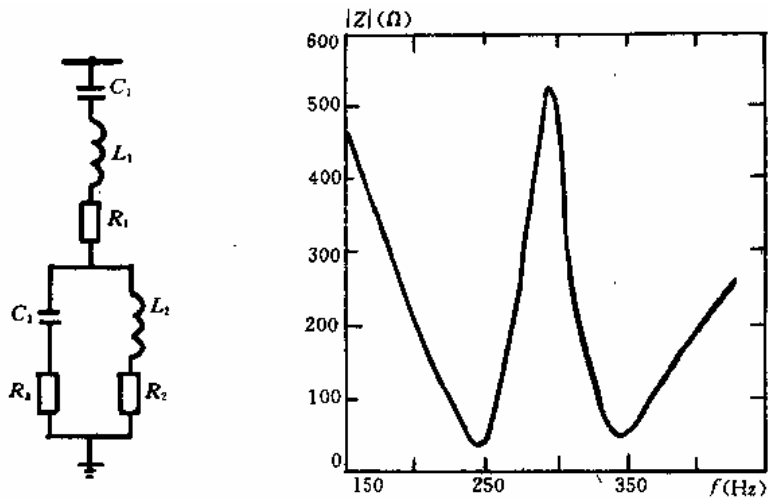
这种滤波器是电阻  $R$ 、电感  $L$  和电容  $C$  等元件串联组成的滤波电路，它在某一低次谐波（或接近低次谐波）频率下的阻抗最小，所以是一种并联滤波器，其接线如图 8-12(a)所示。对每一低次的谐波频率就有一个滤波器支路，其阻抗频率特性如图 8-12(b)所示。



8-12 单调谐滤波支路及阻抗频率特性

### (二) 双调谐滤波器

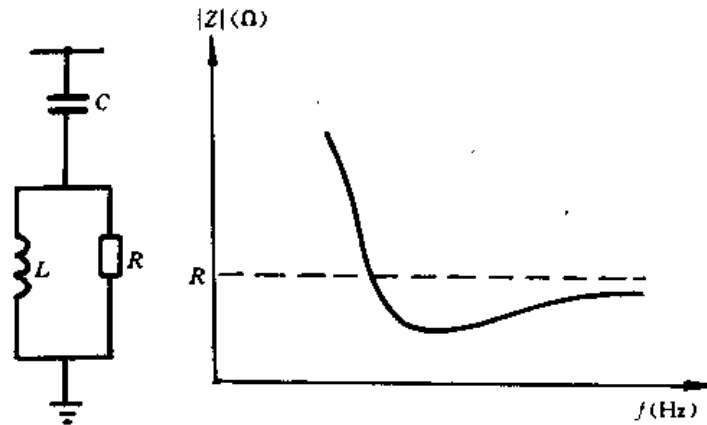
这种滤波器对两种低次谐波同时具有很低的阻抗，即可同时抑制两种特征谐波。它实际上相当于两个单调谐滤波器，且具有两条 RLC 相并联的支路。其滤波支路及阻抗频率特性如图 8-13。



8-13 双调谐滤波支路及阻抗频率特性

### (三) 高通滤波器

这种滤波器是在一个很宽的频带范围内呈一个很低的阻抗。其滤波器支路及阻抗频率特性如图 8-14 所示。



8-14 高通滤波器支路及阻抗频率特性

## 二、交流滤波器的主要电气应力

### (一) 高压电容器的主要应力

对于高压电容器，其主要电气参数如下

(1) 最高持续运行相电压  $U_{cmax}$ 。最高持续运行相电压应包括谐波电压，为给运行留有裕度，取作用在电容器上各电压的算术和

$$U_{cmax} = \sum_{n=1}^{n=50} U_n \quad \text{式(8-9)}$$

式中， $U_n$  为  $U_{cmax}$  所包含的  $n$  次谐波电压。

(2) 电容器热稳定电流  $I_{th}$

$$I_{th} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_n^2} \quad \text{式(8-10)}$$

式中， $I_n$  为通过电容器的  $n$  次谐波电流。

(3) 决定爬电距离的最高电压  $U_{creep}$

$$U_{creep} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} U_n^2} \quad \text{式(8-11)}$$

式中， $U_n$  为  $U_{creep}$  所包含的  $n$  次谐波电压。

### (二) 电抗器的主要应力

对于滤波电抗器，其主要的电气参数如下

(1) 最高持续运行相电压  $U_{Lmax}$

$$U_{Lmax} = \sum_{n=1}^{n=50} U_n \quad \text{式(8-12)}$$

式中， $U_n$  为  $U_{Lmax}$  所包含的  $n$  次谐波电压。

(2) 电抗器热稳定电流  $I_{th}$

$$I_{th} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_n^2} \quad \text{式(8-13)}$$

式中， $I_n$  为通过电抗器的  $n$  次谐波电流。

(3) 决定爬电距离的最高电压  $U_{creep}$

$$U_{creep} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} U_n^2} \quad \text{式(8-14)}$$

式中,  $U_n$  为  $U_{creep}$  所包含的  $n$  次谐波电压。

(三) 电阻器的主要应力

对于电阻器, 其主要参数是热稳定电流和决定爬电距离的最高电压。

(1) 电阻器热稳定电流  $I_{th}$

$$I_{th} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_n^2} \quad \text{式(8-15)}$$

式中,  $I_n$  为通过电阻器的  $n$  次谐波电流。

(2) 决定爬电距离的最高电压  $U_{creep}$

$$U_{creep} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} U_n^2} \quad \text{式(8-16)}$$

式中,  $U_n$  为  $U_{creep}$  所包含的  $n$  次谐波电压。

(四) 交流滤波器设计

(1) 设计准则滤波器设计的目的是要消除由于波形畸变而引起的所有不利影响, 特别是电话干扰。可以采用下列性能指标之一进行衡量。

① 谐波畸变系数。谐波畸变系数可用如下两种方式来定义:

$$D = \frac{\sum_{n=2}^m I_n Z_n}{E_1} \times 100\% \quad \text{式(8-17)}$$

其中,  $I_n$ ,  $Z_n$  和  $E_1$  分别为注入谐波电流、系统谐波阻抗和相电压基频分量;  $m$  为考虑的最高谐波次数(49 或 50)。

第二个定义为

$$D_{Rss} = \frac{[\sum_{n=2}^m I_n Z_n]^{\frac{1}{2}}}{E_1} \quad \text{式(8-18)}$$

在某些情况下, 可以单独地对某次谐波进行定义

$$D_n = (I_n Z_n / E_1) \times 100\% \quad \text{式(8-19)}$$

② 电话干扰系数。这是衡量可能产生电话干扰的指标, 其定义为

$$TIF = \frac{[\sum_{n=2}^m (I_n Z_n F_n)^2]^{\frac{1}{2}}}{E_1} \quad \text{式(8-20)}$$

其中,  $F_n = 5nf_1 P_n$ ,  $P_n = C$ , 是美国贝尔电话系统 (BTS) 和爱迪生电气研究院 (EEI)

采用的权重系数。该系数反映了人耳对频率的敏感程度。 $F_n = 1000$  Hz 时, 其最大值为 1。

③电话谐波形式系数 (THFF), 这个系数的定义类似于 TIF, 只是  $F_n$  的取值为

$$F_n = (nf_1 / 800)W_n \quad \text{式(8-21)}$$

其中,  $W_n$  是电话和电报指导委员会 (CCITT) 所定义的  $n$  次谐波噪声系数。在欧洲普遍采用 THFF, 而在美国采用 TIF。

④IT 积。在 BTS—EEI 系统中, 还采用 IT 积作为指标, 其定义为

$$IT = \left[ \sum_{n=2}^m (I_n F_n)^2 \right]^{1/2} \quad \text{式(8-22)}$$

而 KIT 积的定义为

$$KIT = IT / 1000 \quad \text{式(8-23)}$$

表 8-2 性能指标

| 指标        | 范围     | 建议值 |
|-----------|--------|-----|
| TIF       | 25~50  | 35  |
| KIT       | 25~100 | —   |
| $D_{Rss}$ | 2~5    | 2   |
| $D_n$     | —      | 1   |

(2) 设计系数 滤波器设计的两个基本概念是滤波器的容量和品质。滤波器的容量定义为在基频时滤波器所供给的无功功率, 它实际上等于电容器所供给的基频无功功率。滤波器所有支路的总容量是由换流器的无功需要以及由交流发电机、大型并联电容器、同步调相机或者静止补偿无功系统 (SVS) 各供给多少以满足需求, 且通过比较经济性来确定。

滤波器的品质 (Q) 表示调谐的锐度, 因此与调谐高通滤波器有不同的定义。一个调谐滤波器支路的调谐锐度随谐振电感或电容与它的电阻的比值而增加, 反之, 在高通滤波器的情况下, 锐度与这个比值成反比。

调谐滤波器是针对一个或两个诸如 5 次和 7 次较低的谐波频率进行调谐的, 其 Q 值较高。阻尼滤波器则在较宽的频带上呈现低阻抗, 其 Q 值较低, 因此常常用来消除诸如 17 次以上的高次谐波, 通常称为高通滤波器。

(3) 网络阻抗 通常, 在滤波点的交流网络的谐波阻抗呈现下列特性:

- ①随频率的增加, 谐振 (低电阻) 和反谐振 (高电阻) 是交替变化的;
- ②重负荷时最大阻抗比轻负荷时的要小;
- ③由于线路停运引起网络阻抗的变化较大 s;
- ④交流网络的谐振具有普遍规律性, 极少有例外;
- ⑤谐波阻抗与基频短路水平无关;
- ⑥负荷具有某些阻尼作用;
- ⑦这种阻尼作用随频率的增大而增加;
- ⑧在电缆系统中, 高次谐波 (15 次到 25 次谐波) 的阻抗比架空线系统的要小。

对阻抗轨迹的研究表明, 即使在对称的条件下, 估算谐波阻抗也是困难的。何况某些谐波的影响还取决于瞬时三相谐波的含量, 例如, 交流系统谐波所产生的电话干扰常常是由谐波电流的零序分量所引起的。如果换流器所产生的谐波是干扰源, 那么, 零序电流的产生完全是由于交流系统不对称的缘故 (即换流器不产生零序电流)。

高压输电线路常常不进行换位, 从而引起每相电气参数的不同。在这些情况下, 序网是互耦的。也就是说, 一个序电流会在另外一序中感生电压和电流。

(4) 交流滤波器设备安装方式

交流滤波器设备主要是高压电容器, 它有支撑式和悬挂式两种安装方式。这两种安装方

式在一些工程中均采用过，例如巴西伊泰普直流输电工程和印度强德拉普尔直流输电工程，采用的是悬挂式；我国的天一广和葛一南直流输电工程则采用了支撑式。

电容器单元在支架上有卧式和立式两种安装方式。卧式安装可以采用较短的层间支柱绝缘子，单元间连接导体也较短，故障单元更换也比较方便，并且可以减小电容器组底部主支柱绝缘子的机械应力，但电容器单元浸渍液泄漏的可能性比立式的大。立式的特点和卧式的正好相反。除非有特殊要求，一般应采用卧式安装。支撑式电容器安装时，高电位在上部，和母线连接的导体从顶部引接。滤波器设备的其他元件电位较低，尺寸和质量较小，均采用支撑式安装。

## 8.4.2 直流滤波器

目前世界上已运行的高压直流输电工程中所采用的并联直流滤波器有无源直流滤波器和有源（混合）直流滤波器两种型式。无源直流滤波器已有多年的运行经验，在大多数工程中采用。有源直流滤波器首次于 1991 年在康梯一斯堪 I 直流工程中投入试运行，后来又在斯卡捷拉克 III 和波罗的海电缆直流工程中被采用，我国的天一广直流输电工程则是采用有源直流滤波器的远距离架空线直流输电工程。

在高压直流换流器的直流侧，谐波电压产生谐波电流，其幅值取决于延迟角和熄弧角、重叠角、直流电路的阻抗（即平波电抗器、阻尼回路、冲击电容器以及线路本身）等已知量。

在架空线路输电的情况下，通信干扰是很重要的问题。所以，在规划阶段必须进行综合研究，以便决定是采用滤波器，还是将部分输电线路改造绕过通信线路。

### 一、直流滤波器配置

直流滤波器配置，应充分考虑各次谐波的幅值及其在等值干扰电流中所占的比重，即在计算等值干扰电流时各次谐波电流的耦合系数及加权系数。在理论上，12 脉动换流器仅在直流侧产生  $12n$  次（ $n=1, 2, 3, \dots$ ）谐波电压。但是，实际上由于存在着各种不对称因素，包括换流变压器对地杂散电容等，将导致换流器在直流侧产生非特征谐波。其中，由换流变压器杂散电容而产生的次数较低的一些非特征谐波幅值较大，要滤除它们需要较大的滤波器容量。这部分谐波的主要路径是通过换流变压器→换流阀→大地，而进入直流线路的分量较小。另外一方面是通信线路受到侵入波干扰的频域主要在 1000Hz 左右，对 50Hz 的交流系统来讲，20 次左右的谐波分量危害最严重，要重点消除这部分谐波。由于同一换流站两极具有对称性，因此两极应配置相同的直流滤波器。

目前世界上的直流输电工程，通常采用以下直流滤波器配置方案。

1. 十二脉动换流器低压端的中性母线和地址之间连接一台中性点冲击电容器，以滤除流经该处的各低次非特征谐波，一般不装设低次谐波滤波器以避免增加投资。

2. 在换流站每极直流母线和中性母线之间并联两组双调谐或三调谐无源直流滤波器。中心调谐频率应针对谐波幅值较高的特征谐波并兼顾对等位干扰电流影响较大的高次谐波，这样可以达到比较好的滤波效果。

直流滤波电路通常作为并联滤波器接在直流极母线与换流站中性线（或地）之间。直流滤波器的电路结构与交流滤波器类似，也有多种电路结构型式，常用的有：具有或不具有高通特性的单调谐、双调谐和三调谐三种滤波器，其电路结构可参见交流滤波器的有关内容。尽管直流滤波器与交流滤波器有许多类似之处，但也存在着一些差别：

1. 交流滤波器要向换流站提供工频无功功率，因此通常将其无功容量设计成大于滤波特性所要求的无功设置容量，而直流滤波器则无需这方面的要求。

2. 对于交流滤波器，作用在高压电容器上的电压可以认为是均匀分布在多个串联连接的电容器上；对于直流滤波器，高压电容器起隔离直流电压并承受直流高电压的作用。由于



直流泄漏电阻的存在，若不采取措施，直流电压将沿泄漏电阻不均匀地分布。因此，必须在电容器单元内部装设并联均压电阻。

3. 与交流滤波器并联连接的交流系统在某一频率时的阻抗范围比较大。在特定的电网状态下，如交流线路的投切、电网的局部故障等会引发交流滤波电容与交流系统电感之间的谐振。因此，即使是在准确调谐（带通调谐）的交流滤波器电路中也需要采用阻尼措施。但是换流站直流侧的阻抗一般来说是恒定不变的，因此允许使用准确调谐（带通调谐）的直流滤波器。直流滤波器电路结构的确定应以直流线路所产生的等效干扰电流为基础，由于特征谐波电流的幅值最大，所以直流滤波器的电路结构应与这些谐波（即谐波次数 12、24、36……的谐波）相匹配。

直流滤波器中价格最高的元件为高压电容器，这是由于必须将它设计成耐受直流高压的电容器。降低成本的主要手段之一是将滤波器设计成具有公共高压电容器的双调谐或多调谐谐波电路。通常在换流站的中性点与大地之间装设起滤波作用的电容器，装设该电容器的作用是给直流侧以 3 的倍次谐波为主要成分的电流提供低阻抗通道。由于换流变压器绕组存在对地杂散电容，为直流谐波特别是较低次的直流谐波电流提供了通道，因此应针对这种谐波来确定中性点电容器的参数。一般来说，该电容器电容值的选择范围应为十几微法至数毫法，同时还应避免与接地极线路的电感在临界频率上产生并联谐振。

直流滤波器的电路结构，通常多采用带通型双调谐滤波电路。对于 12 脉动换流器，当采用双调谐滤波器时，通常采用 12/24 及 12/36 的谐波次数组合。图 8-15 给出 12 脉动换流器一个极的直流滤波器示意图。

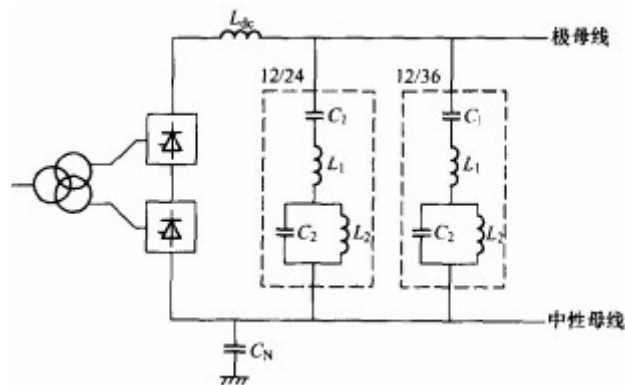


图 8-15 12 脉动换流器一个极的直流滤波器示意图

## 二、直流滤波器的设计

设计直流滤波器的步骤和交流滤波器基本相同，但直流侧不需要考虑无功功率补偿问题，因此，直流滤波器电容器的额定参数不是根据总的无功功率来确定，而是根据线路电压、滤波要求和经济性来决定的。目前常用以下几种不同的准则来规定对直流输电系统中的直流滤波器性能的要求。

1. 在直流高压母线上的最大电压电话干扰系数（TIF）。
2. 在接近高压直流线路的电话线路的最大允许对地噪声。
3. 离高压直流线路 1km 处平行试验线路的最大感应噪声强度。

直流滤波器元件的额定值与交流滤波器很不同，这是因为直流电抗器电抗值较大，能将直流谐波减小到一个较小值。因此，电容器的费用几乎完全取决于它的电容量和直流电压值。

在电话干扰极其严重的情况下，可以增加直流电抗器的电感值，或者以串联形式接入两个电抗器。此时，滤波器支路应当连接在两个电抗器之间的结点上。

在计算换流站直流滤波器设备所承受的主要电气应力时，应考虑各运行方式，包括潮流方向、直流全压和直流降压等。另外，在进行直流滤波器各部件设备的应力计算时，还应假

定每极所连接的任一组直流滤波器支路都可能退出运行的情况。

### 1. 电压应力

高压直流滤波电容器两端的电压由下式确定

$$U_{dfe} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{n=50} U_n + kU_{DC} \quad \text{式(8-24)}$$

式中， $U_{DC}$  为最高持续直流电压； $U_n$  为  $n$  次谐波电压的有效值； $n$  为谐波次数， $n=1\sim 50$ ， $k$  为主要考虑由直流污秽所引起的直流电压分布不均匀系数，取  $k=1.3$ 。将式中直流电压值取零，就可求出直流滤波器低压端电容器、电抗器和避雷器两端的峰值电压。

### 2. 决定爬电距离的电压

主要决定电容器和电抗器两端、高压和低压接线端对地爬电距离的电压，称为决定爬电距离的电压。

#### (1) 高压电容器两端

$$U_{cr,DC} = \sqrt{U_{DC\max}^2 + \sum_{n=1}^{n=50} U_n^2} \quad \text{式(8-25)}$$

#### (2) 其他所有设备两端

$$U_{cr,rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} U_n^2} \quad \text{式(8-26)}$$

#### (3) 其他所有设备接线端对地

$$U_{crDC} = \sqrt{U_{DCNM}^2 + \sum_{n=1}^{n=50} U_n^2} \quad \text{式(8-27)}$$

式中， $U_{crDC}$  为中性点直流电压最大值。

#### (4) 电流应力

通过电容器的额定电流为

$$I_{th} = \sum_{n=1}^{n=50} I_n \quad \text{式(8-28)}$$

通过电抗器的额定电流为

$$I_{th} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_n^2} \quad \text{式(8-29)}$$

式中， $I_n$  为  $n$  次谐波电流的有效值。

#### (5) 可听噪声计算所用的电流

用于计算电容器和电抗器产生的可听噪声电流为

$$I_{audible} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_n^2} \quad \text{式(8-30)}$$

式中， $I_n$  为  $n$  次谐波电流的有效值。

#### (6) 避雷器主要应力

计算保护滤波器设备（主要是电抗器）的避雷器最高持续运行电压  $U_{MCOV}$  时，应考虑施

加于避雷器上的最不利组合时的运行条件。 $U_{MCOV}$ 可利用下式进行初步估算

$$U_{MCOV} = \sum_{n=1}^{n=50} U_n \quad \text{式(8-31)}$$

式中,  $U_n$  为  $n$  次谐波电压。

## 8.5 无功补偿装置

采用普通晶闸管换流阀进行换流的高压直流换流站, 一般均采用电网电源换相控制技术, 其特点是换流器在运行中要从交流系统吸取无功功率。整流侧和逆变侧吸取的无功功率与换流站和交流系统之间交换的有功功率成正比的关系, 在额定工况时一般为所交换的有功功率的 40%~60%。

换流站运行所需的无功功率不能依靠或不能主要依靠其所接入的交流系统来提供, 而且也不允许换流站与交流系统之间有太大的无功功率交换。这主要是因为当换流站从交流系统吸取或输出大量无功功率时, 将会导致无功损耗, 同时换流站的交流电压将会大幅度变化。

换流站装设的无功功率补偿装置一般有下列几种形式:

### 8.5.1 交流滤波器及无功补偿电容器组

当换流站所接的交流系统不是很弱时, 一般均采用这种补偿形式。交流滤波器除满足滤波的要求外, 同时还能提供基波无功。当交流滤波器所提供的基波无功不足以满足换流站的无功要求时, 需另外装设无功补偿用的电容器组。在交流滤波器合理设计的范围外, 加大交流滤波器的容量以满足无功功率的要求是不经济的。单纯的无功补偿用电容器组要比同容量的交流滤波器便宜。

### 8.5.2 交流并联电抗器

为了满足换流站轻负荷运行时的要求, 可能需要装设交流并联电抗器。由于并联电抗器要随无功补偿电容器(包括交流滤波器)的投入情况进行切换, 因此还需要装设开关设备。但是装设并联电抗器及其开关的费用较贵, 因此只有当利用换流站自身的无功特性无法满足运行条件要求时才予以考虑。

### 8.5.3 静止补偿装置

由于用开关投切的无功补偿电容器组、交流滤波器组以及交流并联电抗器等无功补偿装置的主要缺点是不能调节或仅能分级慢速调节, 而且不能频繁操作, 所以除了投切上述设备对主要部分的无功进行补偿之外, 且利用换流站本身的无功特性尚不能满足高压直流系统对无功补偿的要求时, 可采用静止补偿装置以达到对无功功率快速及无级调节的要求。另外, 当受端为弱交流系统时, 若采用这种补偿方式, 还可提高系统电压的动态稳定性。

#### 8.5.4 同步调相机

静态无功补偿装置可以达到良好的电压及无功控制,但不能提高换流站所接交流系统的短路比。通常,当短路比(SCR)等于或小于3时,将会造成高压直流系统运行的困难,主要表现是当交流系统扰动或故障时将导致换相失败,甚至持续的换相失败。当换流站交流母线接入调相机以后,则可以提高系统的短路比,改善换流器的换相条件,提高系统的稳定性。例如,我国舟山直流输电工程和嵊泗直流输电工程的受端换流站均装设了调相机,但调相机投资贵、运行维护复杂,应尽量避免采用。

### 8.6 换流站的开关设备

开关设备是按照运行要求将换流站的设备及直流线路接通和切断的装置。换流站开关设备分为交流和直流开关设备两大类。换流站内的交流开关设备与交流变电所中的开关设备基本一样。

#### 8.6.1 直流开关设备的特点

直流开关设备包括:直流断路器、直流隔离开关和直流感地开关等,它与交流开关设备相比,主要区别在于:①直流断路器灭弧能力强,能够切断或转移直流电流;②开关触头材料能耐受直流电化学腐蚀;③绝缘结构的外绝缘爬距较大,并且采取措施防止瓷件由于结合金属件或钢脚露出粘合剂的一圈受直流电腐蚀形成的锈层增厚而胀裂。

对于两端直流输电系统,整流站的换流阀本身就起到直流断路器的作用,它可以断开正常运行电流和故障电流。因此也可不需要另外装设直流断路器。但为了在运行中改变直流回路的接线方式和切断部分故障电流,一般在换流站内装设三种直流断路器:①金属回路转换断路器(MRIB),用于从大地回流方式向金属回流方式的转换;②金属回路转换开关(MRTS),用于从金属回流方式向大地回流方式的转换;③低压直流高速开关(LVHS),用于切断换流站内部直流侧低压部分发生接地故障时的接地电流。对于多端直流输电系统,有时则需要装设直流断路器来切断故障电流,而且将故障部分加以隔离使其退出工作;④双极运行中性线临时接地开关(NBGS),NBGS装设于中性线与换流站接地网之间。当接地极线路断开时,不平衡电流将使中性母线电压升高,为了防止双极闭锁,提高高压直流输电系统的稳定性,利用NBGS的合闸来建立中性母线与大地的连接,以保持双极继续运行。

#### 8.6.2 直流断路器的基本构成

在高压直流输电系统中,某些运行方式的转换或故障的切除要采用直流断路器,如上述所说的金属回线转换断路器MRTB、大地回线转换开关GRTS等。直流电流的开断不像交流电流那样可以利用交流电流的过零点,因此开断直流电流必须强迫过零。但是,当直流电流强迫过零时,由于直流系统储存着巨大的能量要释放出来,而释放出的能量又会在回路上产生过电压,引起断路器断口间的电弧重燃,以致造成开断失败。所以吸收这些能量就成为断路器开断的关键因素。我国已建的高压直流换流站中采用的直流断路器型式有无源型叠加振荡电流方式和有源型叠加振荡电流两种方式,其原理图见图8-16,但其构成不外乎由三部分组成:①由交流断路器改造而成的转换开关;②以形成电流过零点为目的的振荡回路;

③ 以吸收直流回路中储存的能量为目的的耗能元件。转换开关可以采用少油断路器、六氟化硫断路器等交流断路器。振荡回路通常采用 LC 振荡回路。耗能元件一般采用金属氧化物避雷器。

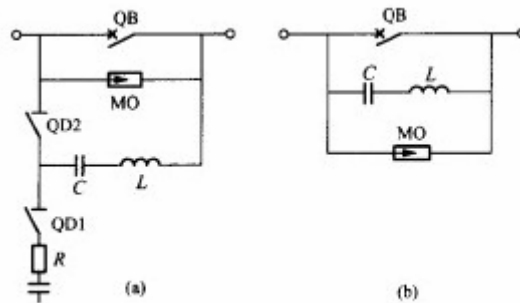


图 8-16 叠加振荡电流方式直流断路器原理

有源型叠加振荡方式是由外部电源先向振荡回路的电容 C 充电，然后电容 C 通过电感 L 向断路器 QB 的电弧间隙放电，产生振荡电流叠加在原电弧电流之上，并强迫电流过零。无源叠加振荡方式是利用电弧电压随电流增大而下降的非线性负电阻在并联的 LC 回路中产生自激振荡，使电弧电流叠加上振荡电流，在与电弧流过零时实现遮断。

由上述可以看出，直流断路器的开断可以分为三个阶段：① 强迫电流过零阶段。换流回路至少应产生一个电流过零点。② 介质恢复阶段。要求断路器有较快的灭弧介质恢复速度，并且要高于灭弧触头间恢复电压的上升速度。即触头间的耐压要快于恢复电压，达到金属氧化物避雷器 MO 的持续最大运行电压。而当恢复电压达到 MO 的持续最大运行电压时，MO 导通。③ 能量吸收阶段。要求耗能装置 MO 的放电负荷能力应大于直流系统中残存的能量，并且要考虑至少有二次灭弧耗能的要求。

### 8.6.3 换流站交流断路器特点

换流站中使用的某些交流断路器，由于存在着换流站自身的特点，促使其操作负担比一般的断路器可能要重些，需要特别注意的是交流滤波回路断路器和换流变压回路断路。

在换流站设计中，通常可能将交流滤波器及无功补偿电容器分成若干大组，每一大组包括若干个交流滤波器及无功补偿电容器。设置大组断路器及分组断路器是用于正常投切及故障的保护切除，而分组断路器是用于在换流站无功功率控制系统的控制下进行分组的正常投切，以满足换流站运行中无功功率的需求。因此，这些断路器正常情况主要是作为回路投切开关用，而且操作较频繁。当换流站发生单极或双极闭锁时，由于交流滤波器组及无功补偿电容器组仍接在交流母线上，因此可能会出现过电压。此时，必须通过分组断路器来切除一个或几个上述无功分组，而且这些断路器两端的恢复电压也可能很高，甚至会导致断路器电弧的重燃。

当研究这些断路器在上述情况的操作过电压时，应考虑以下可能出现的最严重电网背景条件：① 换流站接入电网的短路容量最小；② 直流输电系统处在最大的过负荷定值下，相应投运的无功补偿设备的容量也是最大的；③ 直流输电系统可能处在功率倒送的情况。

由于每个交流滤波器分组的类型可能不完全相同，其中有特征谐波滤波器或低次谐波滤波器，因此对于无功大组断路器的分闸应考虑所有分组都投入和每类分组中有一个退出运行的情况。若设置低次谐波滤波器（如 3 次或 5 次），则必须研究单相故障时应考虑其中的一组 3 次谐波滤波器退出运行的情况。因为单相故障含有较大的 3 次谐波分量，将导致一定程度的谐振电压，从而加重了大组断路器的分闸负担。

## 第 9 章 直流输电接地

### 9.1 接地极的要求及设计

#### 9.1.1 接地极的作用及要求

##### 一、接地极作用

世界上已投入运行的 HVDC 系统,基本都是两端直流输电系统:一端为整流站,另一端为逆变站。按照工程的需要,其主要接线方式包括:①单极大地回线方式;②单极金属回线方式;③双极两端不接地方式;④双极两端接地方式;⑤双极一端接地方式。对于接线方式②、③、⑤,因为只是单点接地或不接地,所以地中没有电流,接地极只起钳制中性点电位的作用。接线方式①、④中的接地极,不仅钳制中性点电位,而且还为直流电流提供通路。因此,接线方式①、④对接地极设计有着特殊要求,下面对这两种接线进行叙述。

##### (1) 单极大地回线方式

单极大地回线方式一般用于直流海底电缆输电系统,它用一个直流高压极线与大地构成回路,只能以大地返回方式运行。在这种方式中,流过接地极的电流等于线路上的系统运行电流。

##### (2) 双极两端接地方式

双极两端接地方式可选择的运行方式较多,如单极大地回线运行方式、双极对称与不对称运行方式、同极并联大地回线运行方式等。对接地极设计有特殊要求的有如下几种运行方式。

(1) 单极大地回线运行方式。通常在 HVDC 系统建设初期,往往要将先建起来的一极投入运行,为的是尽快发挥经济效益。直流输电线路投入双极运行后,当一极故障退出运行时,为了稳定系统,提高系统供电可靠性和可用率,健全极将继续运行。这时,直流系统可处于单极大地回线方式运行,流过接地极的电流等于线路上的运行电流。

(2) 双极对称运行方式。在双极两端中性点接地方式中,当双极对称运行时,理想情况下,正负两极的电流相等,地中无电流。然而在实际运行中,由于换流变压器阻抗和触发角等偏差,两极的电流不是绝对相等的,有不平衡电流流过接地极。这种不平衡电流通常可由控制系统来自动调节两极的触发角,并使其小于额定直流电流的 1%。当任意一极输电线路或换流阀发生故障时,大地回路中的故障电流与故障极上的电流相同。

(3) 双极不对称运行方式。在双极电流不对称运行方式中,正负两极电流不相等,流经接地极的电流为两极电流之差值,并且当两极中的电流大小关系发生变化时,接地极中电流的方向则随之而变。在双极电压不对称方式中,如果保持两极电流相等(此时两极输送功率不等),则仍可保持接地极中的电流小于直流额定电流的 1%。在任意一极输电线路或换流阀发生故障时,大地回路中的故障电流与故障极上的电流相同。

(4) 同极并联大地回线运行方式。同极并联运行的优点是节省电能,减少线路损耗。它是将两个或更多的同极性电极并联,以大地为回线运行方式。该系统流过接地极的电流等于流过线路上电流的总和。

##### 二、接地极运行特性

虽然直流输电大地回线方式的优点很明显,但它可能会带来一些负面效应,这应引起各

方的足够注意。强大的直流电流持续地、长时间地流过接地极所表现出的效应可分为三类：电磁效应、热力效应和电化效应。

#### (一) 电磁效应

在强大的直流电流经接地极注入大地时，极址土壤中会形成一个恒定的直流电流场，并伴随着出现大地电位升高、地面跨步电压和接触电势等。所以，这种电磁效应可能会带来一些影响：

(1) 直流电流场会改变接地极附近大地磁场，可能使得依靠大地磁场工作的设施(如指南针)在极址附近受到影响。

(2) 大地电位升高，可能会对极址附近地下金属管道、铠装电缆、具有接地系统的电气设施(尤其是电力系统)等产生负面影响。因为这些设施往往能给接地极入地电流提供比土壤更好的泄流通道。

(3) 极址附近地面出现跨步电压和接触电势，可能会影响到人畜安全。所以，必须将其控制在安全范围之内。

(4) 接地极引线(架空线或电缆)是接地极的一部分，它与换流站相连。当选择极址时，应统筹考虑接地极引线的路径。直流输电工程通常都是采用 12 脉动换流器，该换流器除了产生持续的直流电流外，还将产生 12、24、36…等 12 倍数的谐波电流。对于单极大地回线方式运行，换流器产生的谐波电流将全部或部分地(当换流站中性点加装电容器或滤波器时)流过接地极引线。这种谐波电流产生的交变磁场，有可能干扰通信信号系统。为减少接地极架空线路上的谐波电流对通信系统的电磁干扰，一个最有效的方法是使架空线路远离通信线路。

#### (二) 热力效应

由于不同土壤电阻率的接地极呈现不同的电阻率值，在直流电流的作用下，电极温度将升高。当温度升高到一定程度时，土壤中的水分将可能被蒸发掉，土壤的导电性能将会变慢，电极将出现热不稳定状态，严重时将使土壤烧结成几乎不导电的玻璃状体，电极将丧失运行功能。影响电极温升的主要土壤参数有土壤电阻率、热导率、热容率和湿度等。所以，对于陆地(含海岸)电极，希望极址土壤有良好的导电、导热性能，有较大的热容系数和足够的湿度，这样才能保证接地极在运行中有良好的热稳定性能。

#### (三) 电化效应

当直流电流通过电解液时，在电极上会发生氧化还原反应；电解液中的正离子移向阴极，在阴极和电子结合而发生还原反应；负离子移向阳极，在阳极给出电子而发生氧化反应。大地中的水和盐类物质相当于电解液，当直流电流通过大地返回时，在阳极上发生氧化反应，使电极发生电腐蚀。电腐蚀不仅发生在电极上，也发生在埋于极址附近的地下金属设施的一端和电力系统接地网上。

另外，在电场的作用下，靠近电极附近土壤中的盐类物质可能被电解，形成自由离子。例如在沿海地区，土壤中含有丰富的钠盐(NaCl)，可电解成钠离子和氯离子。这些自由离子在一定程度上将影响到电极的运行性能。

### 三、对极址的要求

依据接地极运行时所表现的待性，并考虑到接地极运行特性和地中电流分布情况，极址一般应具备以下条件：

(一) 和换流站要有一定距离，通常在 10-50km 之间，不要太远。如果距离太近，则换流站接地网易拾起较多的地电流，影响电网设备的安全运行和腐蚀接地网；如果距离太远，则会增大线路投资和造成换流站中性点电位过高。另外，极址对重要的交流变电所也要有足够的距离，一般应大于 10km。

(二) 有宽阔并且导电性能良好(土壤电阻率低)的大地散流区，尤其是在极址附近范围内，土壤电阻率应在  $100\ \Omega\text{m}$  以下。这对于降低接地极造价，减少地面跨步电压和保证接地极安

全稳定运行起着十分重要的作用。

(三) 土壤应有足够的水分,即使在大电流长时间运行的情况下,土壤也应保持潮湿。表层(靠近电极)的土壤应有较好的热特性(热导率和热容率高)。接地极尺寸大小往往受到发热控制,所以土壤具有好的热特性,对于减少接地电极的尺寸是很有意义的。

(四) 附近无复杂和重要的地下金属设施,无或尽可能少的具有接地电气(如电力、通信)设备系统,以免造成地下金属设施被腐蚀或增加防腐蚀措施的困难,避免或减小对接地电气设备系统带来的不良影响和投资。

(五) 接地极埋设处的地面应该平坦,这不但能给施工和运行带来方便,而且对接地极运行性能也带来好处。

(六) 接地极引线走线方便,造价低廉。

### 9.1.2 接地极的材料

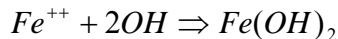
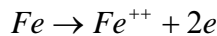
接地极材料是指接地极散流(馈电)材料和活性填充材料,接地极散流(馈电)材料的作用就是将电流导入大地;活性填充材料的主要作用是保护馈电材料,提高接地极使用寿命,改善接地极发热特性,一般只用于陆地接地极和海岸接地极。

#### 一、馈电材料

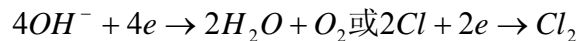
##### (一) 对馈电材料的一般要求

直流输电系统利用大地作为回路运行,电流在土壤或海水中的传导主要是靠土壤或海水中电解质来完成的,由于这一工况有如正负极置于电解槽中,所以对接地极材料的耐电腐蚀性能有特殊要求。当金属处于电解质中,它们的界面上会产生以下反应。

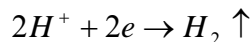
在阳极金属材料失去电子,被电解成离子状态从阳极进入介质,在阴极发生还原反应。例如,在以铁作为接地极材料的介质面上,将产生以下反应:



另外,还存在析氧(若介质中有Cl,会产生氯气)反应



在阴极介质面上一般为析氢反应



可见,在阳极,Fe被电解成离子状态并与介质中的OH<sup>-</sup>离子生成氢氧化亚铁,再进一步变成氢氧化铁(一种红褐色的稀松组织),使阳极金属逐渐消耗;在阴极,一般析氢反应只是使电极表面包上一层氢气,不会有什么腐蚀作用。

电极在阳极状态下失去物质的量服从法拉第定律。该定律指出:在电极上析出或溶解的物质质量M与通过的电流、时间乘积成正比。就是说,通过金属进入介质的电荷越多,其腐蚀量就越大,数学表达式为

$$M = CIt \quad \text{式(9-1)}$$

式中,C是与物质性质有关的常数,通常习惯称为损耗率,kg/(A·年),表示每安培电流通过金属导体进入电解质运行一年所溶解的金属量,也叫腐蚀率;I是流出电流,A;t是时间,s。

直流接地极在外加直流电压和上千安培的直流电流长时间地通过电极的情况下,金属材料会逐渐溶解损失,而且数量往往很惊人。所以,为了提高接地极运行的可靠性和接地极使



使用寿命,希望接地极材料具有很强的耐电腐蚀性能。另外,由于接地极又是一个庞大的导电装置,所以还希望接地极材料导电性能好,加工(焊接)方便,来源广泛,综合经济性能好,运行时无毒、污染小。

## (二) 常用馈电材料的腐蚀特性

时至今日,成功地用于直流输电接地极中的馈电材料有铁(钢)、石墨、高硅铸铁、高硅铬铁、铁氧体和铜等。

### (1) 铁(钢)

碳钢分为三种:低碳钢(含碳量 $<0.25\%$ )、中碳钢(含碳量为 $0.25\% \sim 0.6\%$ )和高碳钢(含碳量 $>0.6\%$ )。碳钢直接放在土壤中的平均电腐蚀率约 $9\text{kg}/(\text{A}\cdot\text{年})$ ;碳钢碳含量低,抗电解腐蚀性能较强,但差别并不十分明显。

试验表明:放在焦炭中碳钢电腐蚀明显地低于 $9\text{kg}/(\text{A}\cdot\text{年})$ ,但含水量增加腐蚀率也增加,尤其是当地下水中含有丰富导电物质如 $\text{NaCl}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等时,则钢棒附设焦炭床结构的钢棒电解速率大大增加。另外,随着含盐量的增加,碳钢的电解速率也明显增大。碳钢在土壤或海水中,其化学腐蚀有以下典型的趋势:氧气是加速腐蚀的主要原因,土壤(或海水)中含氧量越高,化学腐蚀越快。因为碳钢表面的局部腐蚀取决于阴极反应,阴极反应的去极化随着到达阳极的氧含量的增加而加快。碳钢在含氧丰富的海水中电化学腐蚀特别快。

直流接地极阳极附近发生析氧反应,附近的土壤存在着大量氧气,已不断有补充和增加,直至到含氧量饱和析出。所以,直流接地极阳极除电解腐蚀外,还有严重的电化学腐蚀。

### (2) 石墨

石墨是由焦炭在 $2000 \sim 2400^\circ\text{C}$ 烧结而成的惰性材料。它的结构呈晶体结构,其晶体结构中不显示阳离子品格和流动电子,其共价键非常稳定,在常温电解液中不会发生离子化。其导电、导热性能更接近金属,电解速率很小,适合作直流阳极。在早期直流输电工程的海岸和海水接地极中应用广泛。但是由于石墨具有非常松散的层状结构,有明显的多孔性,气体容易渗入石墨的层状结构内,破坏层间较弱的结合使石墨变成疏松的粉状物质而溶解。其溶解速度与析出 $\text{O}_2$ 量有关,即与散出电流有关。石墨电极往往用合成树脂浸渍,使合成树脂在石墨的微孔中固化,阻止 $\text{O}_2$ 的侵入。由于阳极析出 $\text{Cl}_2$ 对合成树脂有浸渍破坏作用,破坏其固化,使石墨点蚀而溶解。因此在海岸和海水环境中,石墨电极的寿命取决于浸渍剂保护作用时间的长短,因而限制了这种材料的使用。新西兰岸边接地极在运行9年后,用高硅铸铁更换了已损坏的石墨电极。高硅铸铁是一种理想阳极材料,且抗腐蚀性优于石墨电极。如今,在阴极保护业中,国内外基本上都用它替代石墨电极。

### (3) 高硅铸铁与高硅铬铁

高硅铸铁是一种含硅量很高的铁硅合金,作为一种抗腐蚀材料在阴极保护业中作辅助阳极材料而加以广泛应用。从1980年开始,在直流接地极工程中,高硅铸铁的应用越来越多。高硅铸铁和高硅铅铁的电极基本成分,见表9-1。

表 9-1 高硅铸铁和高硅铬铁的电极基本成分

| 化学成分   | 高硅铸铁        | 高硅铬铁        | 化学成分   | 高硅铸铁   | 高硅铬铁   |
|--------|-------------|-------------|--------|--------|--------|
| Si (%) | 14.25~15.25 | 14.25~15.25 | S (%)  | $<0.1$ | $<0.1$ |
| Mn (%) | $<0.5$      | $\leq 0.5$  | Cr (%) | 0      | 4~5    |
| C (%)  | $<1.4$      | $<1.4$      | Fe (%) | 余量     | 余量     |
| P (%)  | $<0.25$     | $<0.25$     |        |        |        |

高硅铸铁的抗腐蚀性较强,这是由于铸件表面很容易氧化成一层致密的 $\text{SiO}_2$ 薄膜,产生钝化,从而阻碍了腐蚀的进一步发展。高硅铸铁的抗腐蚀能力,随合成中含硅量的增加而增强,但其脆性也增加。如果含硅量低于 $14.5\%$ ,则耐腐蚀能力急剧下降;如果含硅量高于 $14.5\%$ ,则耐腐蚀能力提高不多;如果含硅量高达 $18\%$ 以上,则合金极脆,而不能使用,

所以往往把高硅铸铁中含硅量控制在 14.5%左右。增加高硅铸铁中的含碳量，可以提高合金的机械和加工性能，在含碳时，合金是很脆的，仅提高含碳性，会出现石墨漂浮现象，形成“石墨巢”，从而使其抗腐蚀性能降低。

在国内的阴极保护业中，高硅铸铁已成功应用了很多年，在没有焦炭回填料的情况下，也成功地被用作阳极材料，在淡水中，电解速率一般在 0.2~1kg / (A·年)左右。

高硅铸铁在有卤铁气体，尤其是在有氯气生成的环境中应用时，由于氯气的腐蚀性很强，会浸入破坏致密的 SiO<sub>2</sub> 晶体，使铸铁表面产生坑坑凹凹的点蚀现象，加速了高硅铸铁电极的腐蚀且不均匀，这就阻碍了它在海水中或其他一些场合的应用。

为了改善高硅铸铁在海水中的抗腐蚀性能，往往在原高硅铸铁成分的基础上，添加了 4.5%左右的铬。铬和硅能形成一个更加钝化、稳定的金属氧化物薄膜，该薄膜不仅能阻止进一步电解腐蚀，也能抵抗氧气的侵蚀。其电解速率在淡水中与高硅铸铁的相似，为 0.25~1kg / (A·年)左右，在海水中高硅铸铁略低。

据美国 HARCO 公司阴极保护产品样本介绍，高硅铸铁阳极的电解速率随电流密度增加而增加，而在海水中还与埋设方式有关，其试验结果见表 9-2。

表 9-2 海水中高硅铬铁电极腐蚀（试验）特性

| 电流密度<br>(A/m <sup>2</sup> ) | 使用时间<br>(年) | 电解速率<br>[kA/(A·年)] | 设置状况   |
|-----------------------------|-------------|--------------------|--------|
| 11                          | 1.95        | 0.308              | 悬挂     |
| 8.5                         | 2.77        | 0.689              | 埋藏在泥浆中 |
| 26                          | 1.95        | 0.467              | 悬挂     |
| 23.6                        | 2.77        | 0.939              | 埋藏     |

最理想的是将阳极悬挂或支撑在海底上，这样阳极产生的氯气可以很快地扩散，从而避免腐蚀的增加。高硅铸铁和高硅铬铁电极在国外直流输电工程中得到了广泛应用，并有相当成熟的应用经验。

#### (4) 铁氧体电极

近几年来，国外研制了新一代电极材料—铁氧体电极，并在阴极保护业中推广应用。铁氧体电极基本属于不溶性材料，在海水中的电解速率小于 1g/(A·年)，美国 BAC 铁氧体电极在海水中的电解速率为 875mg/(A·年)。据 BAC 铁氧体电极级样本介绍，在含 3%NaCl 的土壤中，其电解速率为 10g / (A·年)，基本上不随散流密度变化而变化。铁氧体是一种 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和二价金属离子的氧化物 MO 的化合物，M 可为一种金属，亦可为多种金属，常为 Fe<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 等，铁氧体的晶体结构属尖晶石型，为立方晶系，分子式可用 MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 或 MOFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表示。

铁氧体电极内游离的 Fe<sup>2+</sup> 越多，导电性能越好，体积电阻率越低，但其电解腐蚀速率较高；反之，则耐腐蚀性能好，其体积电阻率高，一般电阻率控制在 10<sup>-1</sup>~10<sup>-3</sup>Ω cm 之间。由于铁氧体电极电解损耗小，所以电极产品尺寸相对较小，其典型产品尺寸为：长 880mm，有效长度 720mm，直径 60mm。但其体积电阻率比高硅铸铁大，因此陆地电极回填料仍按原尺寸，在海水中则不受限制。

与高硅类电极相比，铁氧体电极的腐蚀特性更优，它是新一代抗腐蚀电极材料，并在国外的一些阴极保护工业中得到了应用。国内也有很多研究机构在研制铁氧体电极，并已成功研制出适合作为电极的铁氧体材料，然而由于工艺的限制，至今国内还没有一家研制出成型产品。

#### (5) 铜

铜包括红铜、黄铜和青铜。理论计算铜的电解速率为 10.46kg / (A·年)，比铁的理论值略大。经在同一土壤、同一电流密度下实测铜的电解速率为 7.008kg / (A·年)，比铁电

解速率  $6.789\text{kg} / (\text{A} \cdot \text{年})$  略大，但铜的价格却是铁的几十倍，且铜进入土壤后会污染地下水。因此，铜不宜作接地阳极使用。然而，铜对海水的电化学腐蚀有很好的钝化作用，裸铜作接地阴极效果很好。例如，瑞典果特兰岛的维斯比换流站接地极和丹麦至瑞典的康梯-斯堪工程中瑞典侧海水阴极接地极都采用了裸铜作接地极材料。

在自然腐蚀情况下，铜比钢铁的抗腐蚀特性优越，但在大电流密度作用下，铜的电解腐蚀速度与铁相近，在海水中甚至比铁还高，而价格也比铁贵很多。所以只有在电极用得很少（大部分时间是自然腐蚀）和电流密度很小（限制运行方式）的情况下，才会用铜，尤其是在土壤含盐量高的地方。

在天-广和三-常直流输电工程中，大量试验研究表明，国产材料的腐蚀特性与国外同类材料没有明显差异，试验结果见表 9-3。

表 9-3 不同材料放置在土壤和焦炭中的腐蚀率 [ $\text{kg} / (\text{A} \cdot \text{年})$ ]

| 材料名称 | 置于土壤中 |                 | 放置在不同湿度的焦炭中（实验值） |       |       |       |
|------|-------|-----------------|------------------|-------|-------|-------|
|      | 理论值   | 实验值             | 5%               | 10%   | 20%   | 30%   |
| 铁（钢） | 9.1   | 7~10            | 0.114            | 0.286 | 2.850 | 5.945 |
| 石墨   |       | 0.8~1.2         | 0.011            | 0.028 | 0.031 | 0.048 |
| 高硅铸铁 |       | 0.2~3           | 0.03             | 0.048 | 0.06  | 0.081 |
| 铜    | 10.4  | 8~11            | 0.0095           | 0.03  | 0.049 | 0.234 |
| 高硅铬铁 |       | 0.3~1.0（放置在海水中） |                  |       |       |       |
| 铁氧体  |       | 0.001（放置在海水中）   |                  |       |       |       |

## 二、活性填充材料

地电流从散流金属元件至回填料的外表导电主要是电子导电，因此对材料的电腐蚀作用会大大降低。此外，由于导电回填料提供的附加体积，降低了接地极和土壤交界面处的电流密度，从而起到了限制土壤电渗透和降低发热等作用。因而迄今为止。除了海水电极以外所有陆地和海岸的接地极都使用了导电回填料。

目前，焦炭碎屑是成功地用于接地极的唯一填充材料，焦炭分为煤焦炭和石油焦炭两类，前者是烟煤干馏的产物，后者是在精炼石油的裂化过程中留下来的固体残留物，并须经过燃烧。最近经过对比试验，发现未经过燃烧的焦炭其挥发性达  $15\% \sim 20\%$ ，其电阻率高于煅烧后的焦炭约 4 个数量级，所以用于接地极的石油焦炭必须经过煅烧。

煤焦炭含碳量较低，一般在  $70\% \sim 90\%$ ，含硫量往往  $6\%$  以上。石油焦炭含碳量较高，一般  $95\%$  以上，含硫量仅为  $1\%$  以下。含碳量高意味着导电率高，含硫量低意味着可减少对环境的污染。从技术上讲，石油焦炭更合适，但从经济上讲，石油焦炭较贵。

焦炭通过电流也会有损耗，电流流过焦炭，将使焦炭发热，部分氧化，尤其是焦炭颗粒状接触为点接触，点接触处发热首先被氧化成灰分，灰分为不导电材料。因此，散流金属与焦炭的电子导电特征部分被破坏，以离子导电代替部分电子导电。散流金属的电解腐蚀随之增加，焦炭的损耗速率为  $0.5 \sim 1\text{kg} / (\text{A} \cdot \text{年})$ ，损耗速率取决于焦炭表面的电流密度。

煅烧后的焦炭是成块的，用作接地时必须捣碎，而焦炭碎屑则按定义要通过  $3/4$  英寸的网孔，主要是在  $4 \sim 20$  号筛孔的范围内，并有  $20\%$  的细屑。接地极最常用的产品是燃烧后的石油焦炭碎屑。

用于直流接地极焦炭的典型技术条件如下

(1) 物理特性，有以下几方面：

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 电阻率(在 $1100\text{kg}/\text{m}^3$ 下) | $<0.5 \Omega \text{m}$                 |
| 容重                                  | $1040 \sim 1150 \text{ kg}/\text{m}^3$ |
| 密度                                  | $2\text{g}/\text{cm}^3$                |
| 空隙率                                 | $45\% \sim 55\%$                       |

(2) 颗粒成分, 焦炭应捣碎, 颗粒及其成分(筛号)如下:

|           |         |
|-----------|---------|
| 13×25(cm) | 5%~7%   |
| 25×40(cm) | 15%~20% |
| 40×80(cm) | 30%~35% |
| 80(cm)    | 50%~38% |

(3) 化学成分, 有以下几方面:

|     |        |
|-----|--------|
| 湿度  | ≤0.1%  |
| 挥发性 | ≤0.7%  |
| 灰尘  | ≤2%    |
| 硫   | ≤1%    |
| 铁   | ≤0.04% |
| 硅   | ≤0.06% |
| 炭   | ≥95%   |

在焦炭运输、装卸、存放和现场施工过程中都应小心, 不要将污物或其他外部物质混入焦炭。否则, 会影响焦炭的作用。

### 三、工程应用技术

前面叙述了直流输电中常用接地极材料的腐蚀特性, 为工程选择材料提供了依据。但这些都是特定条件下的试验结果, 在实际工程中, 除接地极材料不同外, 接地极址条件、电极布置形状等也千差万别。所以, 在实际工程中必须根据具体条件予以充分考虑。

#### (一) 端部效应

设计接地极, 特别是确定材料尺寸时, 应以溢流密度(单位长度电极泻入地中的电流, 又称线电流密度)为基础。接地极溢流密度分布遵循恒定电流场基本原理, 其特征与接地极布置形状密切相关, 也与土壤电阻率分布相关。在大地土壤电阻率分布各向均匀时, 除了圆(球)形布置外, 其他布置形式的接地极溢流密度分相一般是均匀的, 外绕端部溢流密度明显高出其他部位。例如, 葛-南直流输电工程南桥侧接地极采用直线形布置, 模拟及其发现, 端部溢流密度是平均值的3倍以上。运行结果表明, 端部腐蚀十分严重, 中部较完好。高硅铸铁类电极也是如此, 如果直线排列(深井串联排列也是直线排列), 端部的电极元件所通过的电流要远大于平均每个元件的电流。虽然这种情况对接地极至远地的电阻并无影响, 但是局部电流密度对地面跨步电压、(阳极)电渗透、土壤热稳定性和材料的损耗是至关重要的。改善措施最好的方法是尽可能使接地极布置成回环, 对于不具备采用因环形电极的极址, 也应尽量避免出现“突出”点。如果是直线或射线形, 则应在其端部增加“屏蔽电极”, 以减小端部元件间的间距, 增加其互电阻, 从而减小通过端部元件的电流。

#### (二) “堆积”效应

因为馈电棒材料存在电阻, 所以接地极上各点的电位是不相同的, 具体地讲, 就算是标准的圆环形电极, 各点的溢流密度也不相同, 尤其是对于入流点位置少或不合适的情况, 电流馈入点溢流密度较大, 其“堆积”程度与土壤电阻率成反比, 与馈电棒材料电阻率成正比。特别是在土壤电阻率低(如海岸电极)和馈电棒材料电阻率高(如高硅铸铁)时, “堆积”效应更为明显。我国葛-南直流输电工程南桥侧接地极采用430mm圆钢, 大地土壤电阻率在20m以下。运行1年后发现, 虽然两个电流馈入点都在中部, 但电流馈入点附近的馈电棒腐蚀严重。在阴极保护业应用中, 高硅铸铁类电极也有类似问题。运行结果表明, 单个元件电流分布存在着严重的堆积效应, 电流引入点的溢流密度大约是平均溢流密度的3倍, 颈部首先变细, 所以在阴极保护技术上称之为“颈缩现象”。解决电流“堆积”效应或腐蚀“颈缩现象”问题的最好方法是选择合适的电流注入位置, 增加入流点数; 建立合理的导流系统; 减少接地极上任意两点间电位差; 降低或消除电流堆积效应。对于高硅铸铁类电极, 电流引入点放

在单个元件的中部,如美国的 DURIRO 公司高硅铬铁电极产品和加拿大的 ANOTEC 公司的高硅铸铁(铬)产品就是这样。现在,国内高硅铸铁和高硅铬铁电极产品,仅端部进线一种。如果采用国产的硅电极,在设计时,不仅要考虑因电极布置溢流密度分布不均匀,还得考虑单个元件的“堆积”或“颈缩”效应。

### (三) 气阻效应

在地表面坚实区域,或地表面接地电阻较大,极址尺寸又相对较小,或其他地下金属构筑物较多的地区,接地极用浅地床埋设是不可能的,而是应该把接地极深埋,采用深埋井式接地极。井式接地极排放因电解而产生的气体要比浅层水平接地极困难得多,尤其是深井接地极。如果接地极排气不畅,气体积聚过多,就会产生气阻效应。该效应会直接增大接地电阻,加重接地极发热,甚至发生热不稳定性现象。气阻已成为深井接地极一大难题,国内阴极保护已有数个 100m 左右的深井阳极因气阻不能正常工作而报废。

所以,当垂直接地极深度超过 10m 时,就要设置专门的排气管,用 3cm 左右直径并钻有较密孔隙的塑料管作排气管。然而在接地极使用期限内,塑料管的孔洞有可能被堵塞。垂直井式接地极有个缺点:因气体堵塞而引起接地极电阻增大。从有关资料来看,国外采用高压空气冲洗排气管堵塞的方法,好像并不成功。国内在阴极保护中采用段制阳极的办法,即将深井阳极分段组合,各有一个封闭的排气室,该组阳极产生的气体,聚在排气室内,只能从公共通道的排气管排出,而不进入其他分段阳极。这就好像现代高层建筑的通风系统,不管楼层多高,因为每个房间都是互相独立封闭的,只与公共通道有关,所以永远保持空气畅通。此法基本解决了气阻问题,在实际应用中效果不错。

### (四) 连接与接续

通常,依据电极材料的不同,接地极馈电方式可分为两种情况:使用配电电缆和不使用配电电缆。因为高硅电极类电极材料焊接十分困难,导电性较差,所以这类电极元件往往需要使用配电电线。高硅电极类电极(商品)元件都有电缆引出,电缆引线的长短可以根据用户的需要确定。该电缆引线除耐受正常工作电流发热外,有可能在土壤中长时期耐受达 90Y 环境温度,另外还要防止阳极析出气体而破坏电气绝缘。所以,对元件引线的要求除正常通流容量要求外,还必须要有较高的耐热等级和防止侵蚀的护套。

导电性能好、机械加工容易等,这些都是铁的优点。所以用铁作为电极可以不设置配电电缆,只需要将人流电线直接焊接在铁棒上,和铁焊接牢靠即可。人流电线与铁棒的连接或单个元件的电缆线与配电电缆的连接,可在地下,也可在地上,接头均应用放热焊,以减少化学电池产生的可能,且接头要用环氧包封,严防水分、气体的渗入。

### (五) 接地极分段

接地极分成若干段,目的是便于维修和更换损坏的电极。运行时通过测量每一独立的电极注入点的电流,并根据电流的平衡或差异,则可判断哪一部分电极是否发生故障。当发现故障,可以切断该部分电流开关,并可在不影响整个接地极工作的情况下检修故障部分。但是接地极分段也会带来一些问题,主要表现在电流分配发生畸变,断开点溢流密度会明显增加,其程度与断开距离密切相关。因此,接地极分段应控制断开距离,一般不要大于 2m。

## 四、结论

(一) 高硅铬铁电极和铁氧体电极抗腐蚀能力强,尤其适合海岸电极、海水电极以及深井布置电极。

(二) 在陆地高硅铸铁抗腐蚀能力强,尤其适合潮湿极址电极和接地极阳极使用,不适用于含 C1 的土壤和海水中的阳极。

(三) 铁具有导电性强、机械加工方便和经济等优点,故铁适用于陆地电极,更适用于阴极。

(四) 铜在强电流通过时较易电解,故不宜做接地极的阳极。如果系统运行方式不长期使用大地作回路,则可考虑使用铜。

(五) 由于焦炭包敷使电极的导电形式发生了变化, 电极的损耗率比无焦炭减小了很多。焦炭湿度对金属材料的损耗率有影响, 湿度越大损耗率就越大。当湿度大于 30% 时。对于钢材而言, 焦炭等于没有保护作用。而对高硅铸铁和石墨而言, 焦炭湿度的影响不是很大。

### 9.1.3 接地极的设计

接地极的设计原则主要有: ①必须满足系统条件; ②符合使用寿命要求, 在规定的运行年限内不应出现故障; ③符合最大允许跨步电压的限制要求; ④符合土壤最大允许温升的限制要求。

#### 一、系统条件

系统条件是设计接地极的依据, 其参数一般由系统规划(设计)部门提供或确定。

#### (一) 直流系统接线方式和运行方式

导致对接地系统设计有特殊要求的接线方式是具有两点接地, 且允许大地回线方式运行的直流系统。

在直流系统大地回线方式运行时, 接地极的极性一般是一极为正(阳)极, 另一极为负(阴)极。对于单极直流输电工程, 这种极性往往是固定不变的。对于双极直流输电工程, 一般由于允许一极先建成投运, 极性也是固定的; 待双极建成投产后, 极性通常不固定, 极性随系统运行需要而变化, 它取决于地中电流方向, 即两极电流之差的方向。对于双极直流输电工程在单极大地回线方式运行时, 其接地极的极性取决于运行极的极性: 在正极运行时, 送端换流站接地极为负(阴)极, 受端换流站接地极为正(阳)极; 在负极运行时情况正好相反。

#### (二) 工作时间

接地极工作时间包括以下四种工况。

(1) 运行寿命。根据条件, 接地极运行寿命分为可更换式和不更换式, 大多数工程按不更换设计安装, 其运行寿命与直流系统相同。

(2) 正常额定电流持续运行时间。对于单极大地回线直流工程, 其时间与直流系统运行时间相同; 对于双极直流工程, 一般系指建设初期单极大地回线运行的时间, 有时还得考虑双极不平衡运行方式的时间。

(3) 最大过负荷电流持续运行时间。一般为几小时。

(4) 最大短时电流持续时间。一般仅为 3~10s。

#### (三) 入地电流

直流系统入地电流一般分为四类: 正常额定电流、最大过负荷电流、最大短时电流和不平衡电流。

(1) 正常额定电流。正常额定电流系指直流系统以大地回线方式运行时, 流过接地极的最大正常工作电流。在对称双极直流系统中, 正常额定电流为

$$I_n = \frac{P_n}{2U_n} \quad \text{式(9-2)}$$

式中,  $I_n$  为正常额定电流(A);  $P_n$  为双极额定输送容量(kw);  $U_n$  为额定直流电压(kv)。

(2) 最大过负荷电流。最大过负荷电流系指直流输电系统在最高环境温度时, 能在一定时间内可输送的最大负荷电流。在葛一南、天一广和三一常直流输电工程中, 最大过负荷电流  $I_m = 1.1I_n$ 。

(3) 最大短时电流。最大短时电流系指当直流系统发生故障时, 流过接地极的暂态过电流。最大短时过电流一般取正常额定电流的 1.5 倍左右, 持续时间为数秒。在设计接地极时, 该电流主要是用于控制计算地面最大跨步电压。

(4)不平衡电流。两极电流之差就是不平衡电流。对于双极对称运行方式，在理想情况下，没有电流流过接地极。但实际上，由于触发角和设备参数的差异，也有不平衡电流流过，其值大小可由控制系统自动控制在额定电流的1%之内。当双极电流不对称运行时，流过接地极的电流为两极运行电流之差。

## 二、使用寿命

馈电材料溶解——电腐蚀是影响接地极使用寿命的主要因素。当直流电流通过电解液时，在电极上将产生氧化还原反应，电解液中的正离子移向阴极，在阴极和电子结合而进行还原反应；负离子移向阳极，在阳极给出电子而进行氧化反应。大地(如土壤、水等)相当于电解液，所以当直流电流通过大地返回时，在阳极产生氧化反应，即产生电腐蚀。按照法拉第(Faraday)电解作用定律，阳极电腐蚀量不但与材料有关，而且与电流和作用时间之乘积成正比。所以，电极设计寿命采用以阳极运行的电流与时间之乘积(安培·小时或安培·年)来表示。以下是计算电极设计寿命时应考虑的因素：

(一) 单极运行。单极运行期间，接地极的极性一般是固定的，一端为阴极，另一端为阳极。对于“双极中性点两端接地”的直流系统，通常是先建成一极，隔一段时间后，再建成另一极。此时，往往是先利用已建成的一极单极运行，这期间阳极的安时数可按式(9—3)计算

$$F_1 = 8760 \times I_n \times T_0 \quad \text{式(9-3)}$$

式中， $F_1$ 为单极投运期间阳极的安时数，Ah； $I_n$ 为正常额定电流，A； $T_0$ 为单极运行时间，年。

(二) 一极强迫停运。在双极投运后，当一极出现故障，另一健全极继续以大地回线方式运行。由于出现故障和接地极出现以阳极运行情况都是随机的，所以两端换流站按接地极出现以阳极运行的安时数可按式(9—4)计算

$$F_{2q} = 8760 \times I_n \times P_{qy} \times P_{qt} \times F \times 2 \quad \text{式(9-4)}$$

式中， $F_{2q}$ 为一极强迫停运时，任意一端接地极出现以阳极运行的安时数(Ah)； $P_{qy}$ 为一极强迫停运时，任意一端接地极出现以阳极运行的概率； $P_{qt}$ 为一极强迫停运时，任意一端接地极出现以阳极运行的年时间比； $F$ 为直流系统设计运行寿命(年)。

(三) 一极计划停运。在双极投运后，当一极停电检修，允许另一极以大地回线方式继续运行。同理，两端换流站接地极出现以阳极运行的安时数可按式(9—5)计算

$$F_{2j} = 8760 \times I_n \times P_{jy} \times F \times 2 \quad \text{式(9-5)}$$

式中， $F_{2j}$ 为一极计划停运时，任意一端接地极出现以阳极运行的安时数，Ah； $P_{jy}$ 为一极计划停运时，任意一端接地极出现以阳极运行的概率； $P_{jt}$ 为一极计划停运时，任意一端接地极出现以阳极运行的年时间比； $F$ 为直流系统设计运行寿命，年。

(四) 不平衡电流。双极投运后，在不平衡电流作用下的两端换流站接地极出现以阳极运行的安时数，可按式(9—6)计算

$$F_2 = 8760 \times I_n \times (F - T_0) \quad \text{式(9-6)}$$

式中， $F_2$ 为双极运行期间，任意一端接地极出现以阳极运行的安时数，Ah。

每个接地极在规定的运行年限里，以阳极运行的总安时数  $F_y$  为

$$F_y = F_1 + F_{2q} + F_{2j} + F_2$$

通过上述方法计算得到的腐蚀寿命  $F_y$  仅用于设计的预期计算值，而在实际运行时，一般并不严格按设计时规定的运行方式运行。所以，在接地极设计时应留有一定的裕度，以确

保接地极在规定的运行年限里正常运行。

### 三、最大允许跨步电压

大地(土壤)并非是良导体,所以在电流自接地极经周围土壤流散时,极址电位会上升,土壤中有压降。人在接地极附近行走或作业时,两脚处于大地表面的不同电位点上,其电位差通称为跨步电压,它表示两只脚接触该地面上水平距离为 1m 的任意两点间的电压。最大跨步电压是指当接地极流过最大电流时,两脚水平距离为 1m 所能接触到的最大电压。显然,当最大跨步电压超过某一安全数值时,可能会对人和动物的安全产生影响,所以必须对接地极最大跨步电压加以限制,或采用相应的安全措施来保证人身和动物的安全。

最大允许跨步电压是设计接地极中重要的控制条件,对造价的影响非常敏感,尤其是对于那些表层土壤电阻率较高的极址,常常起着控制作用。

#### (一) 基本准则

只有综合考虑直流电流特点、极址条件以及作用时间等诸多因素,才能确定出较为合理的最大允许跨步电压。

直流接地极与交流地网不同,其特点有:①因为直流系统工作电流长时间地通过接地极是直流接地极正常运行工况,所以地面电位及电位梯度是持续存在的;②直流电流对人畜的感受影响比交流敏感;③我国人多地少,一般要求设立接地极不应影响农民耕种,即不考虑征地,允许农民继续耕种。所以,在进行直流接地极设计时,最大允许跨步电压的标准,通常不是依据对人畜造成伤亡的地面电位梯度值,而是根据免除对人畜感到难受的电流来确定。由此可见,用于直流接地极设计最大允许跨步电压控制值得大大低于交流控制值。

试验表明,与动物(牛、马、狗、鸡)相比,人更容易拾取感到难受的电流。美国 EPRI 根据人手(指)感到轻微刺痛感觉的直流电流,推荐直流接地极最大允许跨步电压值按式(9-7)计算

$$E_k = 5L + 0.03\rho_s \quad \text{式(9-7)}$$

式中,5L 为地面最大允许跨步电压(v/m); $\rho_s$ 为表层土壤电阻率( $\Omega\text{m}$ )。按式(9-7)确定的直流接地极地面最大允许跨步电压是安全的,一般无需设置接地极围墙。

#### (二) 国内外部分工程接地极最大跨步电压设计实例

表 9—4 列举了世界部分陆地接地极额定电流和最大允许跨步电压的实测值、极址条件、投运时间的情况。可以看出,直流接地极最大允许跨步电压设计控制值比交流低得多,并大部分工程基本符合式(9-7)要求。

我国第一项高压直流输电工程是葛一南直流输电工程,最大短时(10s)入地电流 1650A,1989 年建成投产。该工程送端和受端换流站接地极极址表层土壤电阻率很低,分别只有 25  $\Omega\text{m}$  和 2.5  $\Omega\text{m}$ 。送端接地极投运后,由于电流分布的端部效应,实测局部地面最大跨步电压达 4.96v/m。该工程运行至今未发现由于跨步电压而引起安全问题。

我国继葛一南直流输电工程后的第二个高压直流输电工程是天—广直流输电工程,最大短时(3s)入地电流 2700A。该工程送端和受端换流站接地极极址均为稻田区,表层土壤电阻率分别为 27.5  $\Omega\text{m}$  和 180  $\Omega\text{m}$ 。由于该工程入地电流大,首端极址场地有限和末端表层土壤电阻率高,两端最大跨步电压均难以满足《高压直流输电接地极技术导则》(DL/T437-1991)中 2.5v/m 的要求,因而均按式(9-7)要求进行控制。



表 9-4 世界部分陆地接地极额定电流和最大跨步电压工程实例

| 直流输电工程<br>名称 (国家)    | 额定入<br>地电流<br>(A) | 土壤电阻率<br>( $\Omega$ m) | 跨步电压计算值     |                   | 实测跨步电压<br>(V/m)     | 投运时间    |
|----------------------|-------------------|------------------------|-------------|-------------------|---------------------|---------|
|                      |                   |                        | 计算电流<br>(A) | 跨步电压<br>(V/m)     |                     |         |
| 新西北岛—<br>南岛          | 1200              | 61.5                   | 1200        | 13.0              | 4.9/6.7             | 1965.4  |
| 温哥华岛<br>(加拿大)        | 1700              | 1.5                    | 3400        | 80.0 <sup>①</sup> | 1.0                 | 1968    |
| 太平洋联络线<br>(美国)       | 1800              | 70                     | 1800        | 8.5               |                     | 1970.5  |
| 斯卡格拉克<br>(丹麦—挪<br>威) | 1000              | 10.46                  | 1000        | 10.4              |                     | 1970    |
| 纳尔河逊 I 回<br>(加拿大)    | 2000              | 70/250*                | 1800        | 10/10*            | 8.0 <sup>②</sup>    | 1971.1  |
| 纳尔河逊 II 回<br>(加拿大)   | 2000              | 70/90*                 | 4000        | 10/7.1*           | 10/11* <sup>②</sup> | 1978    |
| 葛洲坝—南桥<br>(中国)       | 1200              | 25/2.5*                | 1650        | 3.6/1.0*          | 4.9/1.5*            | 1989.9  |
| 天生桥—广州<br>(中国)       | 1800              | 28/180*                | 2700        | 4.3/7.1*          | 4.5/8.0*            | 2000.12 |
| 三峡—常州<br>(中国)        | 3000              | 20/                    | 4500        | 2.12/             | 2.13/               | 2002.12 |

\*逆变电站接地极参数;

①采用 IEEE 标准 80 号;

②设计计算值;

③国内工程跨步电压计算方法见本章第七节。

### (三) 最大允许跨步电压取值

(1)与国外比较,我国现行《高压直流接地极技术导则》(DL/T437—1991)中关于最大允许跨步电压 2.5V/m 的限值,不仅数值低,而且系指发生在最大短时工作电流时的状态。显然该标准过高,以至于大部分工程难以甚至无法满足此要求。

(2)大多数国家在直流输电工程陆地接地极设计中,原则上都参照美国 EPRI 研究报告推荐的允许人在带电大地上行走时,不感到难受这一设计准则,即按式(9-7)计算确定最大允许跨步电压。式(9-7)涵盖了人的感受电流和脚与土壤间的接触电阻因素,并且有较好的运行经验,所以按式(9-7)计算并确定的最大允许跨步电压是合适的。

(3)我国人口稠密,接地极址大多为稻田,农民常常赤脚在农田耕种,所以对最大允许跨步电压的控制可适当从严考虑。如以最大短时工作电流控制最大允许跨步电压,甚至不考虑脚与土壤间的接触电阻。基于上述考虑,如按式(9-7)的要求控制,即使极址为水稻田,那么最大允许跨步电压也应大于 5v/m。

### (四) 最大允许温度

当强大的直流电流持续的通过接地极注入大地后,极址土壤的温度将缓慢上升,接地极表面土壤的温度将上升最快最高,根据热力学理论,接地极附近任意点土壤温度可用式(9-8)描述

$$\theta(t) = \theta_{\max} (1 - e^{-k \frac{t}{T}}) + \theta_c \quad \text{式(9-8)}$$

式中， $\theta(t)$ 为任意时间  $t$  的土壤温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\theta_{\max}$ 为接地极土壤稳态最高温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\theta_c$ 为环境( $t=0$ )温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T$ 为接地极热时间常数， $\text{s}$ ； $k$ 为系数 ( $0 < k \leq 1$ ) 与土壤特性及环境条件等相关，一般应通过实验确定。如果土壤温度超过  $100^{\circ}\text{C}$ ，土壤小的水将较快地被蒸发驱散，从而容易导致接地极故障。因此，接地极最高温度必须严格控制在  $100^{\circ}\text{C}$  以下。

由式(9-8)可以看出，对于土壤中某特定点，其温度与环境温度、土壤热特性和电流持续时间有着密切关系。入地电流及其持续时间是由系统确定的，土壤热特性及环境温度是一定的，控制土壤的最高温度实际是控制最大温升。显然，土壤最大允许温升是水的沸点温度( $100^{\circ}\text{C}$ )与最高环境温度之差。为了安全起见，土壤最高允许温度一般取略低于水的沸点温度，即  $90 \sim 95^{\circ}\text{C}$  为宜。

## 9.2 接地极址的选择

### 9.2.1 极址资料收集论证

在设计接地极过程中，接地极极址的选择是最重要的环节，一旦极址被确定，地电流对环境的影响基本确定，与接地极造价及运行性能有着密切关系的土壤物理参数也基本确定。接地极址的选择过程是复杂的，它包括发现极址、极址论证与优化、大地物理参数测定，是一环扣一环的总流程。为了能尽快地选择出接地极址，选址过程一般可遵循图 9-1 所示的选址工序。如图 9-1 所示，按照工作目标划分，整个选址工作可分为三个阶段：极址搜索、极址论证和极址大地物理参数测定。

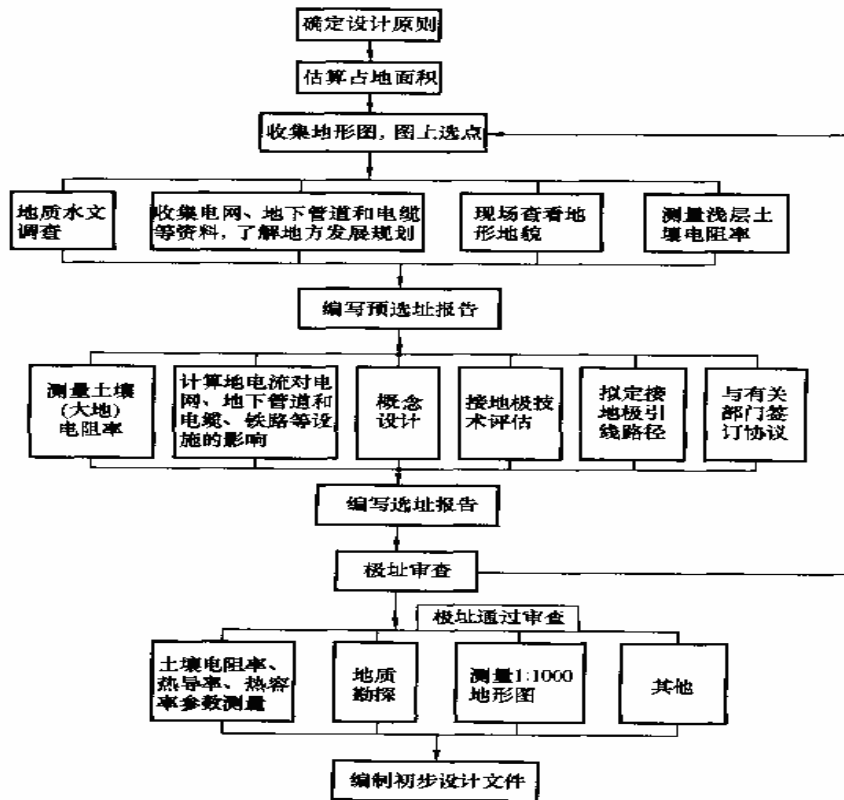


图 9-1 极址选择工序流程图

## 一、极址搜索阶段

设计人员先收集资料并根据收集的资料和设计经验,发现极址是极址搜索阶段的主要工作目标。因此,向有关部门收集的资料应包括以下内容。

(一) 地形图(1: 5000)或航测照片。通过地形图或航测照片可以知道地形和地貌情况,从而可以很快地发现适合于设立接地极的地点。

(二) 地质结构资料。地质结构资料调查是非常重要的,除了可以通过调查的资料(岩石或土壤的性质及其厚度)宏观地估价出可行性和地中电流的分布外,还可以借助资料或经验估计出土壤电阻率、热导率和热容率等参数。

(三) 地面水文和地下水文资料。地面水文资料主要是用来了解有无洪水对极址冲刷构成的威胁;地下水文资料则是用来确定有无足够丰富的地下水来保证电极在大电流长时间运行条件下,极址土壤始终保持潮湿。极址土壤中的含水量直接影响到土壤物理参数,影响到传导电流。土壤中的水实际上是普通盐的水溶液,所以导电呈电解性。电解溶液传导电流的基本方法是离子向电极的移动,即阴离子向阳极迁移,阳离子向阴极迁移。在离子迁移过程中,水扮演着积极的角色。由于水的热导率约等于干土壤平均热导率的5倍,所以土壤中的水不仅对电导有帮助,对热导也有帮助。

(四) 地温。地下(几米)深处的温度即地温,其值决定了电极最大允许温升值。通常在10~50km范围内地温差别不大,但在有些地方(有温泉)则不然,地温差别可达十几乃至几十度。

(五) 通信、电力、地下金属设施。接地极在运行中,对附近的接地电气设备系统和地下金属设施的安全运行会带来影响。收集这方面的资料有两个作用:

- (1) 使极址尽可能远离这些设施;
- (2) 按照这些设施的规模和接地方式等,计算对它们影响的程度。

(六) 其他资料。有些情况下,需要测量特殊参数。例如:在沿海地区,应对土壤或水进行含盐量分析;对于固定的阳极,应对土壤进行电渗透参数的测量;对极址土壤或水进行酸碱度分析,提出PH值等。

依据上述资料进行的可行性研究,并结合经济综合分析,确定出可行的极址若干处,然后对可行的极址进行踏勘,并对一些重要的参数,如土壤电阻率、土质、地下水位等,进行初步测试和勘探,择优决定“初选极址”若干处。

### 9.2.2 极址土壤参数的测量

通常,与接地极设计有关的土壤参数主要有电阻率、热导率、热容率、地温湿度(地下水位)等;对于海岸(边)极址,土壤的含盐(NaCl)量也很重要;此外,还有一些参数,如酸碱度、电渗透、水渗透,对于某些极址或工程可能也是重要的。

#### 一、大地(土壤)电阻率

##### (一) 技术要求

大地(土壤)电阻率定义为两相对面面积为 $1\text{m}^2$ 、距离为 $1\text{m}$ 的立方体电阻。由于土壤的取样将破坏其结构和水分,从而不能得到其真正的电阻率,所以直到现在,几乎所有在现场测试土壤电阻率的方法都是以稳定电流场为基础,假设大地在各个方向上是均匀的。实际上在大多数区域里,土壤在各个方向上是不均匀的,所以实际测得的数据不是真正的电阻率,而是大概的电阻率。

测量大地(土壤)电阻率的主要目的是以测量所得的大地电阻率为依据,确定接地极尺寸、评估地电流对环境设施的影响以及是否采取保护措施等。接地极尺寸及其技术特性与极址附近土壤参数关系十分密切,远离接地极和深层土壤参数对于评估地电流对环境设施的影响不可忽视。所以,对直流接地极极址的大地(土壤)电阻率参数的测试范围远比交流接地网

大。为了得到可信赖的计算结果，人们希望能够了解到离开接地极数十千米范围内的大地电阻串，同时希望得到直至地壳的不同深度的大地电阻率。在如此之大的范围里，为了减少测试工作量，同时也能满足计算精度要求(基于工程观点)，通常对极址附近  $2\text{km}^2$  范围内的土壤电阻率进行详细勘测；对于远离这个范围直至数十千米以外，采取抽样勘测，或者通过收资确定。

土壤电阻率参数分布往往是不均匀的，因此应分块进行测量。先用方形网格或射线网格将极址分成若干小块，然后在每个网格的节点处进行不同深度的测量。对于电极埋设处，应适当 5B 加测点。测点密度视土壤电阻率分布均匀程度和测深来定：土壤电阻率分布不均匀时，测点密度可以大些，反之则小些；测的愈深，测点密度愈小。

为了获得比较准确的测试结果，选择试验电源和电流值也很重要。接地极在直流电流情况下运行，所以，用直流电源测试的土壤电阻率较能代表运行情况的电阻率。此外，对于深层电阻率的测试，由于电压探针极距较大，须考虑地中干扰电流对测试结果的影响。减少这种影响最有效的方法之一是增大试验电流，最小测试电流可用式(9-9)计算：

$$I = \frac{2\pi h U_g}{\rho \varepsilon} \times 100\% \quad \text{式(9-9)}$$

式中， $I$  为最小测试电流，A； $\rho$  为土壤电阻率， $\Omega\text{m}$ ； $h$  为测量深度，m； $U_g$  为干扰(背景)电压，V； $\varepsilon$  为允许误差，%。

## (二) 四极法测量

四极法测量是用一对电流探极向大地引入电流，用另一对探针测量所产生的电位差，然后利用测得的电压和电流关系，计算出所测土壤的电阻率。四极法的电流和电压探极有温纳法(Wenner array)、库勒伯格法(Schlumberger Array)等多种排列方式，其中温纳法是迄今为止用于测量大地电阻率最广泛的方法之一。

温纳法电流和电压探针布置在一条直线上(C1-P1-P2-C2)，探针极距相等。若 C1-C2 通过的电流为  $I$ ，P1-P2 四间测得的电压为  $U$ ，则所测点的视在电阻串为

$$\rho = 2\pi d \frac{U}{I} \quad (\Omega\text{m}) \quad \text{式(9-10)}$$

式中， $d$  为极距，认为是测试深度(m)。

此法操作简单，便于掌握，在土壤分布均匀的情况下，测量结果准确。对于上下层土壤电阻率有变化，则可以通过改变极距  $d$  来获得其曲线的变化，从而可获得大地电阻率分层结构。

温纳法不仅要求探针极距相等，而且要求布置在一条直线上，这对于要求测试范围之广、测量极距之大和测量点数目之多的极址而言，探针的布置容易受到房屋和沟、渠、塘、道路、农作物等条件的限制，难以满足要求。对此，可采用不等距四极法测量，此法用于葛一南、天一广和三一常等直流输电工程换流站接地极大地电阻率的测量，效果很好。

不等距温纳四极法测量如图 9-2 所示，设 C1-P1、C1-P2、C2-P1、C2-P2 间的距离分别为  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  和  $d_4$ ，当电流  $I$  从 C1 流人和 C2 流出时，根据恒定电流方程式，电压表测得的电压值  $U$  为

$$U = \varphi(P_1) - \varphi(P_2) = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_4} \right)$$

$$\text{令 } \frac{1}{d_0} = \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_4}, \text{ 则}$$

$$U = \frac{I\rho}{2\pi} \times \frac{1}{d_0}$$

$$\rho = 2\pi d_0 \frac{U}{I} \quad \text{式(9-11)}$$

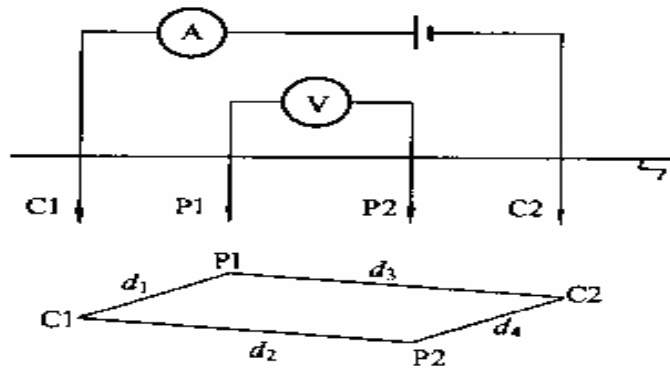


图 9-2 不等距温纳四极法

比较式(9-10)和式(9-11)可以看出，上两式所不同的是“测量深度”有差异：前者极距  $d$  为测深，后者  $d_0$  为测深。若各探极的距离相等，且在一条直线上，即有  $d_1=d_4=d$ ， $d_3=d_2=2d$ 。将其代入式(9—11)即可得到式(9—10)，这表明温纳法是不等距四极法的特例，或者说不等距四极法是温纳法的一般形式。

由于不等距四极法的测量探极间的距离可以是任意的，可以不在一条直线上，所以给测量工作带来极大的方便；可以方便地利用场地的架空配电线路作为测量回路；交替交换电流与电压挤极，获得不同的测试深度；极址布置不受房屋和沟、塘、渠等条件的限制、节省了测量费用。

### (三) 电位拟合法

当给一接地装置注入电流时，其附近地面电位将会升高，显然各点的电位上升，除了与入地电流线性相关外，同时与试验场地土壤电阻率及其分布也密切相关。所以，可以采用电位(反演)拟合法，建立极址电性模型。电位拟合法就是预先给定极址模型，进行地面电位计算，通过合理地、不断地改变极址土壤电阻率值及其分布，使得各点的电位理论计算值与试验值相拟合。电位拟合法工作可分两步进行：

第一步：现场模拟试验。在被试极址合适的位置安装一个小型模拟电极(建议采用圆环形)，在远离模拟电极(宜大于 20km)的地方安装一个辅助电极，租用附近的配电线路，将其中的一相或两相，串入试验电源后连接两个试验电极，另一相留作测量电位用。试验时，给模拟电极注入一定值(宜大于 5A)的电流，同时在模拟电极至两电极中点间测量电位升。电位测点数目应足够多，电位变化大的地方测点应密一些，反之可稀一些。总之应使测得的电位分布曲线有良好的连续性。

第二步：反演拟合。首先应依据试验得到的电位分布曲线及形状，并结合极址地区地质资料，估计出极址土壤电阻率参数分层，即给出初值；然后(采用计算机)计算出与模拟试验相同测点的电位。通过对初值不断地修改，直到理论计算与模拟试验结果相吻合或比较吻合，此时的给定初值即可作为极址大地电阻率参数的设计计算电性模型。由于电位拟合法模拟了接地极运行情况，所以所获得的参数真实可靠，尤其适用于极址大地参数分布复杂(如有山、湖泊、沟渠等)地区，和数百米至数公里深处的大地电阻率测量。在天一广±1500kv 直流输电工程天生桥侧接地极大电阻率参数测量中，国内首次提出并采用该方法，以后其他直流输电工程也多次采用，效果都不错。

#### (四) 电磁探测 (MT) 法

上述四极法具有测量简单、结果准确等优点,但当大范围的测量、山区极址测量或“测量深度”超过 1km 时,由于测量工作量很大,该方法常常不适用。

广泛应用于矿产勘探的大地电磁法(又称 MT 法)为测量接地极深层大地电阻率提供了方便。该方法是建立在大地电磁感应原理基础上的电磁测量方法,场源是天然的正交电磁场。当用 MT 法工作时,在同一点和同一时刻连续记录电场的两个相互垂直的水平分量  $E_x$  和  $E_y$ ,以及磁场三个互相垂直的分量  $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ ,通过计算处理得到该点的波阻抗  $Z$ 。当大地电磁呈各向同性和水平层状分布时,阻抗  $Z=E/H$ 。此方法利用趋肤效应原理,通过改变频率,可获取不同勘探深度及其视在电阻率参数,然后通过计算机(软件)处理,可得到极址电性参数模型。该方法的操作具有专业技术性较强,其详细操作方法请读者阅读其他相关书籍。

大地电磁勘探法由于是利用交变电磁场的感应磁作用,可以穿透直流勘探难以穿透的高阻层,所以只要选择合适的频段,MT 法可以探测地下数百米到数百公里深度范围内的电性变化。MT 法的这些特性使之成为寻找石油等矿产的勘探,尤其是研究大地深部电性分层的一种十分有效的方法。

#### 二、热容率

土壤的热容率定义为单位体积内土壤每升高 1℃ 所需的能量。土壤热容率通常是在实验室用绝热的热量计测量,其方法既可利用持续热源,也可利用间歇热源。目前比较常用的仪器有(美国杜邦公司生产的)910DSC 示差扫描量热计。

间歇热源法是应用一种恒定功率间歇地给封在绝热套里的样品加热,记录温度对时间的变化曲线,获得焓与温度的相互关系,即得样品比热。由于采用间歇加热方式,样品中的焓分布均匀,故这种方法常用于高精度测量。

持续热源法是以恒定功率持续地给封在绝热套里的样品加热,经过一段时间加热后,根据样品的温升与焓即可求得比热,比热乘以比重即是热容率。

送往实验室的样品,应是取自所选极址场地的每种典型土壤抽样或在此地区内的各种土壤。取样土壤最好是取自电极埋深处的土壤,取样数目不宜低于极址土壤分类数。

#### 三、热导率

热导率是指单位长度和面积土壤两端温差为 1℃ 时每秒传递的热量。土壤热导率测试分为两种:实验室测量和现场测试。

实验室测量热导率是将土壤样品放在两块其热导率为已知的圆金属板中,使其一端加热,用一组热电偶测量两端的温度,通过样品的热流量则由一套传感装置进行测量。经过 10min~2h 的热流量测试之后,经由仪器内部进行热流乘以样品厚度除以温差的运算再给出热导率读数。还有一种用美国生产的 JR-Ⅱ 激光扫描仪测量热导率:将土壤制成直径约 8mm、厚度约 1mm 的圆薄片,用激光瞬时照射试件表面加热,并根据试件背面温度升高来求得热扩散系数,然后用热扩散系数乘以比热和密度,即得土壤热导率。实验室测量热导率需要获取和运送样品,由于在这过程中破坏了土壤原有状态,致使影响测量结果,所以有时采用现场测试法。

现场测试法也分为两种:静态法和暂态法,静态法是利用埋设的球体,并对球体加热到使其热流量均匀分布,由于这一过程通常要花好几天,所以不是一种实用的方法;暂态法则是使用一根内装加热器和测温元件的圆柱形测量极,将它插进所需深度的土壤里,加热器突然供热,使热量以恒定速率传入土壤,同时对测量极与土壤接触面的温升加以监控,可以获得土壤温升与热的输出量和时间之间的关系,然后根据热传导理论,求出热导率。此方法通常只需约 1h 即可。

#### 四、土壤温度

土壤温度测量须充分反映出极址土壤的最高和最低温度(在特别寒冷地区),季节性地温

变化情况。每天的大气温度对埋深 1m 以下的土壤温度没有明显的影响，但季节变化可使 10 多米深的土壤温度发生变化。对于 20M 以下的深度认为地温是不变的。极址土壤最高和最低温度资料最常用的方法是通过收资获取。

测量地温最好采用热敏电阻温度计。热敏电阻温度计是一种具有灵敏度高和稳定性好的仪表，并且使用方便，价格也较便宜，特别适合于遥测。但是对于长期埋在土壤中的热敏电阻，为了避免机械振动损坏和受腐蚀，需对热敏电阻加以保护。典型的保护方法是用环氧树脂将其固定在不锈钢壳内。

## 五、地下水位

一般采用钻探或挖井的方法获得地下水位，钻探法比较简单，也比较快，但不易看出地下水的丰富程度，而挖井方法恰恰弥补了钻探法这一缺点。所以，两者可兼顾采用。地下水位也与季节有关，因此对地下水位的勘探，也要象测量地温那样，在 1km<sup>2</sup> 区域里选择若干个有代表件的钻探点，探明最高水位、最低水位以及随季节变化情况。为了获得较难确的数据，建议至少勘探 4 次(春夏秋冬各一次)，每次勘探位置不要变动。

### 9.2.3 极址论证阶段

极址论证阶段的主要工作目标：对初选的若干极址进行技术论证和经济比较，提出推荐极址方案。

一、测量土壤电阻率。土壤电阻率是设计接地极的重要参数，它不仅影响接地极的运行性能和造价，而且还影响地电流对环境影响的计算。为了评估极址，必须测量土壤电阻率参数，但是为了减少工作量，在极址尚未确定时，可以只测量表层(100m 深)土壤电阻率参数。

二、概念设计。按照各极址的地形情况，拟定出电极形状、尺寸和埋深，计算出接地电阻、电流分布、地面最大跨步电压和热时间常数等主要技术参数，并估算出材料用量。

三、评估地电流对环境的影响。计算地电流对环境的影响是极址论证阶段的中心工作，必须根据每个初选的极址环境情况，通过计算并评估出地电流对电力系统、通信系统、地下金属管道或铠装电缆、铁路等设施有无影响。对于有影响的系统，提出缓解(或解决)的措施及可能发生的费用。

四、拟定接地极引线路径。在 1:50000 地形图上拟定出各初选极址全换流站架空线路路径，量出线路长度，并依据其长度、沿途经过的地貌、地质及交通等情况，估算出各初选极址的接地极引线所需要的建设费用。

五、商办协议。针对各初选极址，了解地方规划，与地方政府和有关部门签订协议。征得地方政府的同意，求得地方政府的支持，这也是极址论证中的一个重要工作，这项工作往往要设计人员付出更大的努力。

六、编写选址报告。选址报告是极址选择和极址论证工作结果的具体体现，其内存除了客观地反映上述工作内容外，还应进行技术经济比较，并在此基础上提出推荐极址方案。

## 9.3 接地极电流场的计算

直流输电接地极是一个可长时间持续地工作在有源状态下的接地体，因此正确地分析与计算地中电流场和弄清电流分布，对于确保接地极运行安全并使其造价低廉，避免或减小地电流对环境所产生的影响。

直流接地极通常又是一个巨大的，形状各异的接地装置。它往往要适应于各种地形条件，穿越多种土壤电阻率区域，边界条件复杂，这使得电流场分析与计算变得复杂和困难。为了

求解地电流场，过去常采用“经典公式”法估算，计算结果误差大，工程应用不理想。随着计算机应用技术的不断发展，目前出现了诸如“有限元”法、“边界元”法等数值逼近方法。从理论上讲，上述数值逼近法是可信的，但由于边界条件的复杂性，勘测手段的局限性以及边界界面划分的可塑性，上述数值逼近法也未必能获得满意的计算结果。此外对于一个具有三维敞开边界场的电极而言，上述数值逼近法往往在计算机容量和计算精度要求方面，形成一对难以统一的矛盾。

在工程中，极址大地土壤电阻率参数一般采用电流注入法或电磁法现场测得，所测得的值是视在电阻串。换言之，每一个测量值是众多不同值混合在一起的等效值，不存在可以客观真实地描述不同电阻率土壤的界面。因此，基于工程观点，人们更感兴趣的是不同大地土壤电阻串在电场的作用下对人们所研究问题产生的外部综合效应，本节将重点介绍一种求解接地极地电流场的方法，即所谓的“电阻网络模拟法”（也称网络法）。

网络法就是先按照一定规则将极址划分成若干个单元，然后每个单元根据其电阻率的不同，在 x、y 和 z 三个方向分别用 6 只电阻代替与周边单元的连接。这样将所有的单元连接起来，便形成只有电阻元件连接的网络，地电流场的求解即转化为对网络的求解。该方法特别适用于极址附近有山岗或河流湖泊，水平方向大地土壤电阻率值差别大，计算离开电极稍远(大于 2km)地方的电位升情况。

在直流接地极极址位于山岗、海岸或河流湖泊附近情况下，由于山体岩石或水的电阻率往往与土壤差别甚远，使得场域导电媒质分布不仅纵向不均匀，水平方向也不均匀，采用通常的方法求解地电场比较困难。对于上述情况，由于界面比较清楚，采用网络法就可以较方便地解决问题。

### 9.3.1 单元网络

如图 9-3(a)所示，对于扇径分别为  $r_2$  和  $r_1$ 、扇角为  $\theta$  和扇厚为  $D$  的扇形土壤块电阻率为  $\rho$ ，它与周边土壤的联系可视为图 9-3(b)所示的电阻单元网络，则

$$\left. \begin{aligned} R_r &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho dr}{D(r\theta)} = \frac{\rho}{D\theta} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \\ R_d &= \frac{\rho D}{\int_{r_1}^{r_2} r\theta dr} = \frac{2\rho\theta}{\theta(r_2^2 - r_1^2)} \\ R_\theta &= \frac{1}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{Ddr}{\rho\theta r}} = \frac{\rho\theta}{D \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \end{aligned} \right\} \text{式(9-12)}$$



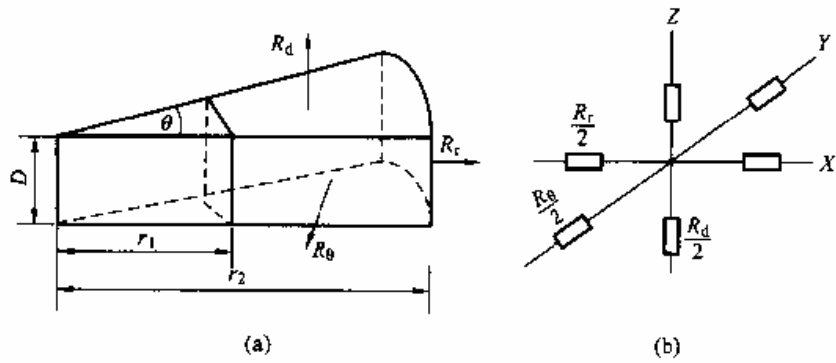


图 9-3 扇形分割单元等制图  
(a) 扇形土壤块 (b) 电阻单元网络

同理，对于长、宽、高分别为  $dx$ 、 $dy$  和  $dz$  的矩形方体，电阻率为  $\rho$  的一块土壤，它与周边土壤的联系也可用单元电阻代替，显然其值为

$$R_x = \frac{\rho dx}{dydz}; R_y = \frac{\rho dy}{dxdz}; R_z = \frac{\rho dz}{dxdy} \quad \text{式(9-13)}$$

### 9.3.2 合成网络

将整个计算场域进行三维空间分割，使之成为有限个互不重叠的单元体，该分割应从电极开始，一直延展到边界条件为已知的界面。分割可以是任意的，但为了提高计算精度，减少计算工作量，分割时应遵循几点原则：①场域里各界面也应是分割面；②靠近电极分割密些，远离电极分割稀些；③计算远离电极(大于 1km)的电位时，应采用扇形分割，分析计算电极附近电场电位时，宜根据电极形状来分割；④若场域具有对称性，分割也应对称，这样可以减少计算工作且；⑤为了提高计算精度，分割时应力求使相邻单元的体积不要悬殊过大，尽量避免出现过宽过扁形体。

通过上述分割，将所研究的战场分割成若干个按照一定规则和排列顺序的单元体。如果对场域进行扇形分割(地平面为圆接坐标  $r$ 、 $\theta$  平面)，并且在  $r$ 、 $\theta$  和  $Z$  方向分别有  $I$ 、 $J$  和  $K$  个面分割，那么可得到  $I \times J \times K$  个单元。如果我们将第  $i$  与  $i+1$ 、第  $j$  与  $j+1$  和第  $k$  与  $k+1$  面围成的单元体记作  $V_0(i, j, k)$ ，节点  $N$  记作  $N_0(i, j, A)$ ，那么根据式(10—33)，与节点  $N_0(i, j, k)$  相连三个方向的电阻分别应是  $R_r(i, j, k)$ 、 $R_\theta(i, j, A)$  和  $R_d(i, j, k)$ 。节点间可用一个电阻代替，如节点  $N_0(i, j, k)$  与节点  $N_1(i+1, j, k)$  和节点  $N_2(i-1, j, k)$  之间，其电阻分别为

$$\left. \begin{aligned} R_{01} &= R_r(i, j, k) + R_r(i+1, j, k) \\ R_{02} &= R_r(i, j, k) + R_r(i-1, j, k) \end{aligned} \right\} \quad \text{式(9-14)}$$

同理可得关于  $\theta$  和  $z$  方向的四个电阻应分别为

$$R_{03} = R_{\theta}(i, j, k) + R_{\theta}(i, j+1, k)$$

$$R_{04} = R_{\theta}(i, j, k) + R_{\theta}(i, j-1, k)$$

$$R_{05} = R_z(i, j, k) + R_{\theta}(i, j, k+1)$$

$$R_{06} = R_z(i, j, k) + R_{\theta}(i, j, k-1)$$

将各单元网络都连接起来，就构成了电阻网络。

### 9.3.3 网络求解

如果在上述网络的某些和实际电流场相对应的节点上，按该电流场的边值来给定电位或电流源，就得到代表该电流场等值含源网络模型，这样就把求解电流场的问题转化为求解电路网络。

#### 一、边值问题

求解上述网络，首先要解决边界问题。边值问题可以从两个方面考虑：一是电极本体所在的节点可以看作是恒流源注入点；二是远离电极最外层界面的电位可以直接给出。电极本体所在节点的电流与电极形状，土壤电阻率的分布有关，可以根据各节点注入到网络中的电流之和恒等于接地极入地电流及各个节点电位相等边界条件确定。远离电极外层界面的电位可以根据它离开电极中心的距离给出合适值。当离开距离足够远(如大于 100km)时，合适的电位值可以是零。对于一个敞开边界场，为了提高计算精度，减小计算工作量，往往需要分级计算。分级计算就是逐渐缩小计算场域，先一级计算得到的某界面电位值可作为下一级计算的给定边值。

#### 二、线性方程组

对于一个具有  $I \times J \times K$  个单元的模型，其电路网络即有与单元相同数的节点易见，采用节点电压法求解网络最为方便。

##### (一) 单元分析

根据节点电压法原理，节点  $N_0(i, j, k)$  自电导可以表示为

$$G_{00} = \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} + \frac{1}{R_{03}} + \frac{1}{R_{04}} + \frac{1}{R_{05}} + \frac{1}{R_{06}}$$

式中， $G_{00}$  为节点  $N_0(i, j, k)$  的自导，其余与式(10—30)相同。该节点与周边节点( $N_1, N_2 \dots N_6$ )的互电导则分别为

$$G_{01} = G_{10} = \frac{1}{R_{01}}; \quad G_{02} = G_{20} = \frac{1}{R_{02}}$$

$$G_{03} = G_{30} = \frac{1}{R_{03}}; \quad G_{04} = G_{40} = \frac{1}{R_{04}}$$

$$G_{05} = G_{50} = \frac{1}{R_{05}}; \quad G_{06} = G_{60} = \frac{1}{R_{06}}$$

除电极本体所在的节点外，送入各节点的电流为零，而送入电极所在节点的电流为代表该节点的一段电极泄入地中的电流。于是关于节点  $N_0(j, /, A)$  单元方程可以表达为

$$G_{00}\varphi_0 + G_{01}\varphi_1 + G_{02}\varphi_2 + G_{03}\varphi_3 + G_{04}\varphi_4 + G_{05}\varphi_5 + G_{06}\varphi_6 = I_0$$

式中， $\varphi_0 \sim \varphi_6$  为节点  $N_0$  及局边节点的电位； $I_0$  系进入节点  $N_0$  的电流。

##### (二) 总体合成

为了得到整个场域关于各节点电位函数的离散表达式，有必要对各节点的编码作适当的改写，以便进行总体合成或归并。设将场域被分割成为  $I \times J \times K$  个单元，远离电极最外层的分割面电位为给定值或零，这样待求节点电位函数的离散数有  $(I-1) \cdot J \cdot (K-1)$  个。如果依次将这些节点按自然数顺序编码，则第  $n$  个节点编码可以表示为

$$n=(i-1)J(k-1)+(j-1)(k-1)+k$$

式中， $i=1,2,\dots,I-1$ ； $j=1,2,\dots,J$ ； $k=1,2,\dots,k-1$ ； $n=1,2,\dots,N$ 。

如果将全部节点的电位值和进入各节点的电流值都表示为一个  $N$  阶列阵，分别记作  $\{\varphi\}$  和  $\{I\}$ ；用  $N$  阶方阵  $[G]$  表示电导系数，则可以得到一个关于场域内各节点电位值矩阵表达式为

$$[G] \{\varphi\} = \{I\}$$

$$\begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1n} & \cdots & G_{1N} \\ G_{21} & \cdots & G_{2n} & \cdots & G_{2N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G_{N1} & \cdots & G_{Nn} & \cdots & G_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{Bmatrix} \quad \text{式(9-15)}$$

式(9—36)中  $G_{ij}$  为电导系数。 $i=j$  时为自导，它等于与节点  $i$  相连所有电导之和，取正值； $i \neq j$  时为互导，它等于节点  $i$  与  $j$  之间的电导，取负值。不难看出， $[G]$  是一个对称的方阵，即  $G_{ij}=G_{ji}$ ；矩阵的阶数与待求节点电位数相同，因此有惟一的解。

### (三) 线性代数方程组的求解

这里介绍的网络法求解地电流场最终归结为线性方程组的求解。对于 1000 个节点所对应的线性方程组，它的电导系数矩阵有  $10^6$  个元素，如此庞大系数矩阵的存贮是计算机运算中的一个值得深入分析的问题。由于系数矩阵是对称的，只要存贮系数矩阵三角部分(包括主对角线元素在内)就已足够，从而可压缩近一半的存贮量。此外还可以看到，系数矩阵的每一行最多只有 7 个非零元素，如果能把大量零元素排除在存贮之外，就能进一步压缩内存。对于上述系数是对称的矩阵的代数解法比较成熟，例如可采用超松弛迭代法、消元法、分块消元法等，在此不再逐一阐述。代数解的结果即是待求边值问题的离散解  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ 。

### 三、电场及电流密度

由上述方法计算得到的位函数的数值解，可以继续利用计算机计算地中电场，电流密度及其他参数。依据恒定电流场理论，如果在场域  $D$  内，任意点的位函数为  $\varphi(x,y,z)$ ，则该点的电场及电流密度可以分别表达为：

$$E(x, y, z) = E_x i + E_y j + E_z k$$

$$\delta(x, y, z) = \frac{1}{\rho(x, y, z)} (E_x i + E_y j + E_z k)$$

$$\text{式中, } E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad E_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad E_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

基于电场强度和它对应的位函数之间的关系，可得到关于节点  $N(i, j, k)$  在  $r$  方向对称星形上的电场强度为

$$E_r(i, j, k) = \frac{\varphi(i+1, j, k) - \varphi(i, j, k)}{r_{i+1} - r_i}$$

同理可得  $\theta$  和  $Z$  方向对称星形上的电场强度

$$E_{\theta}(i, j, k) = \frac{\varphi(i, j+1, k) - \varphi(i, j, k)}{(r_i + \frac{r_{i+1} - r_i}{2})(\theta_{i+1} - \theta_i)}$$

$$E_z(i, j, k) \approx \frac{\varphi(i, j, k+1) - \varphi(i, j, k)}{D_{i+1} - D_i}$$

关于节点  $N(i, j, k)$  处的电流密度

$$\delta(i, j, k) = \frac{1}{\rho(i, j, k)}(E_r i + E_{\theta} j + E_z k)$$

上述网络法主要优点是适用大地导电媒质各向分布不均电流场的求解, 尤其适用于给定边值条件电流场的求解。但也存在一些缺点, 要求较大的计算内存, 计算精度不高等。为了提高计算精度, 在计算机存储容量许可的情况下, 尽可能采取较精细的网格, 使离散化的模型能较精确地逼近真实情况。为了能使研究的敞开边界场(零电位点离极遥远)做到这一点, 通常要分级计算, 逐渐缩小计算场域, 使敞开边界变为有限边界, 以提高计算精度。

## 9.4 接地极电流对环境的影响

当强大的直流电流经接地极注入大地时, 在极址土壤中形成一个恒定的直流电流场。此时, 如果极址附近有变压器中性点接地的变电所、地下金属管道或铠装电缆等金属设施, 因为这些设施可能给地电流提供了比大地土壤更为良好的导电通道, 所以一部分电流将沿着并通过这些设施流向远方, 从而可能给这些设施带来不良影响。

### 9.4.1 对电力系统的影响

我国 110kV 及以上电压等级的变压器中性点基本都采用直接接地的。如果变电所位于接地极电流场范围内, 那么在场内变电所间会产生电位差, 直流电流将会通过大地、交流输电线路, 由一个变电所(变压器中性点)流入, 在另一个变电所(变压器中性点)流出。如果流过变压器绕组的直流电流较大, 则可能给电力系统带来以下不良影响。

(1)引起变压器铁芯磁饱和。变压器铁芯磁饱和可导致变压器噪音增加、损耗增大和温升增高。

(2)对电磁感应式电压互感器的影响。这种互感器可能通过直流电流, 从而可能导致与其有关的继电保护装置的误动作, 但在一般情况下, 此问题不突出。

(3)电腐蚀。当直流地电流流过电力系统接地网时, 可能会对接地网材料产生电腐蚀, 但由于窜入接地网的直流电流通常相对较小, 所以直流电流产生的腐蚀也是很小的, 可以忽略。

#### 一、对变压器影响的分析

##### (一) 励磁电流及其波形特点

电力变压器铁芯磁通与励磁电流关系曲线并非是线性的, 对于热轧硅钢片, 当磁通密度在 0.8~1.3T 时, 磁化曲线进入弯曲部分; 而当磁通密度超过 1.3T 时, 磁化曲线进入饱和部分。现代变压器铁芯多采用冷轧硅钢片, 其导磁率较热轧硅钢片高。一般采用热轧硅钢片的

电力变压器，磁通密度选择在 2.25~1.45T，冷轧硅钢片为 1.5~1.7T；现代变压器几乎都采用冷轧硅钢片。

220kv 及以上大容量变压器在额定电压下，如采用热轧硅钢片，励磁电流通常不超过额定电流的 1%，如采用优质冷轧硅钢片，励磁电流仅是额定电流的 0.1%。励磁电流的大小随着外加电压的增大而急剧增加，对于普通热轧矽钢片，当外加电压在额定电压之上增加 10% 时，励磁电流几乎增加 1 倍；对于优质冷轧硅钢片，当外加电压在额定电压之上增加 10% 时，励磁电流增加约 3.5 倍；当电压增加 15% 时，励磁电流则增加约 8 倍。

因为变压器铁芯磁化曲线存在饱和，以及铁芯磁化曲线对称于原点，所以磁通及励磁电流波形也对称于原点，如图 9-4 实线所示。通过分析典型的电力变压器励磁电流波形，可以发现，在无直流量情况下，除基波外，还含奇次谐波，在额定电压下各谐波电流的幅值如下：

|      |     |     |    |    |      |
|------|-----|-----|----|----|------|
| 一次   | 三次  | 五次  | 七次 | 九次 | 十一次  |
| 100% | 50% | 10% | 2% | 1% | 0.5% |

励磁电流中的高次谐波电流对电流有效值影响不大，其标么有效值  $I_e$  仅为

$$I_e = \sqrt{1 + 0.5^2 + 0.1^2 + 0.02^2} = 1.13 \quad \text{式 (9-16)}$$

虽然变压器绕组中励磁电流包含有高次谐波分量，但因为变压器低(中)压绕组一般为  $\Delta$  接线，为三次谐波电流提供了通道，所以使得通过铁芯的磁通仍为正弦波，保证电压波形不变。

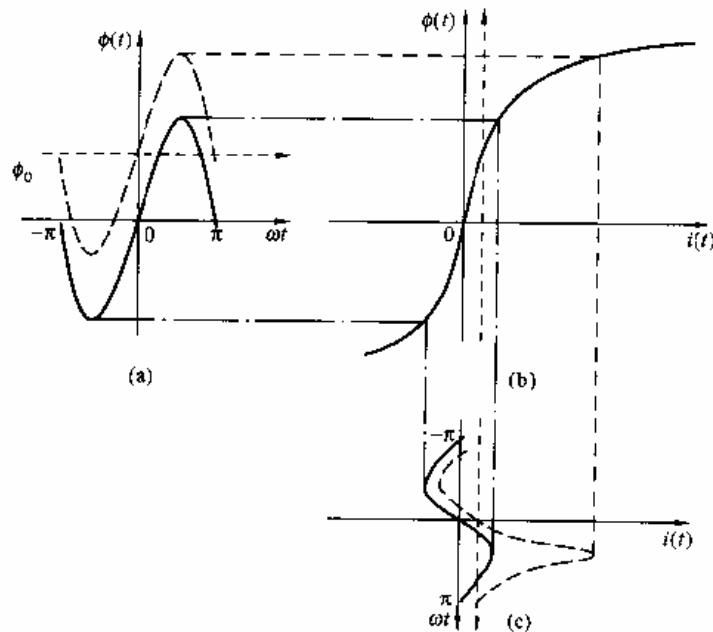


图 9-4 直流电流对变压器励磁电流的影响

## (二) 直流地电流对变压器的影响

图 9-4 叙述了直流接地极电流对变压器磁饱和影响。当变压器绕组无直流量，励磁电流  $i(t)$  工作在铁芯磁化曲线  $\phi(t)$  的直线段，此时若铁芯中磁通为正弦波时，励磁电流  $I_e$  也是正弦波，如图 9-4 实线所示。

当变压器绕组中有直流电流流过时，由于直流电流的偏磁影响，可能使得励磁电流工作在铁芯磁化曲线的饱和区，导致励磁电流的正半波出现尖顶，负半波可能是正弦波，如图 9-4(c) 虚线所示。显然其幅值的大小除了与变压器设计有关外，还与直流电流值密切相关。此时的励磁电流波形既非对称于原点，也非对称于 Y 轴。将其分解为傅里叶级数，除了含有 1、3、5... 奇次倍频谐波外，还包含有 0、2、4—偶次倍频谐波。对各个倍频谐波电流进

一步分析,三的倍频谐波电流属于零序电流,1、4、7、10…为正序电流,2、5、8、11…为负序电流。励磁电流幅值和波形的变化对变压器影响主要有:

(1)噪音增大。当变压器绕组中有直流电流流过时,励磁电流会明显增大。对于单相变压器,当直流电流达到额定励磁电流时,噪音增大10dB,若达到4倍额定励磁电流,噪音增大20dB。此外,变压器中增加了谐波成分,会使变压器噪音频率发生变化,可能会因某一频率与变压器结构部件发生共振使噪音增大:

(2)对电压波形的影响。在我国,110kV及以上变压器一般采用YN,d连接,超高压、大容量变压器,尤其是自耦变压器一般采用YN,d,yn连接。对于YN,d和YN,d,yn连接的三相变压器,虽然当直流接地极电流流过YN绕组时,增加励磁谐波电流,但由于一次和二次绕组都可以为三的倍频谐波电流提供通道,直接为变压器提供所需的三的倍频谐波电流,使得主磁通接近正弦波,从而使电动势波形也接近于正弦波。然而事实上,当铁芯工作在严重饱和区,漏磁通会增加,在一定的程度上使电压波峰变平。

(3)变压器铜耗增加。变压器铜耗有两种:基本铜耗和附加铜耗。在直流电流的作用下,变压器励磁电流可能会大幅度地增加,因此变压器基本铜耗可能会急剧增加。但由于主磁通仍为正弦波,且磁密变化相对不大,所以直流偏磁电流对附加铜耗产生的影响相对较小,铜耗主要是基本铜耗。

(4)变压器铁耗增大。变压器铁耗有两种:基本铁耗(磁滞和涡流损耗)和附加铁耗(漏磁损耗)。基本铁耗与通过铁芯磁密的平方成正比,和频率成正比。对于采用YN,d和YN,d,yn连接的变压器,尽管励磁电流包含着谐波分量,因为主磁通仍然维持着正弦波,所以变压器绕组中的直流电流对基本铁耗(铁芯中的磁滞和涡流损耗)的影响不会太大。但是由于励磁电流进入了磁化曲线的饱和区,使得铁芯和空气的导磁率接近( $\mu/\mu_0 \rightarrow 1$ ),从而使得变压器的漏磁大大地增加。变压器漏磁通会穿过连接片、夹件、油箱等构件,并在其中产生涡流损耗,即附加铁耗。附加铁耗会随着铁芯磁密的增加而显著增加。附加铁耗应引起重视,即使在无直流情况下,大型变压器的附加铁耗与基本铁耗相当,甚至更大,这意味着随着变压器绕组中直流分量的增加,变压器的附加铁耗会增加。

## 二、流过变压器绕组的直流电流计算

假定变电所A和变电所B分别位于接地极地电流场,按照欧姆定律,流过变压器每相绕组的直流电流可表示为

$$I_0 = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{3R_{ga} + 3R_{gb} + R_{ta} + R_{tb} + R_1} \quad \text{式(9-17)}$$

式中, $I_0$ 为流过变压器每相绕组的直流电流(A); $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$ 分别为变电所A和变电所B的电位(V); $R_{ga}$ 、 $R_{gb}$ 分别为两变电所的接地电阻( $\Omega$ ); $R_{ta}$ 、 $R_{tb}$ 分别为两变压器每相线圈直流电阻( $\Omega$ ); $R_1$ 为每相导线的直流电阻( $\Omega$ )。

当变电所A和变电所B位于等电位面上,有 $I_0=0$ 。在实际工程中,计算流过电力系统各变压器绕组的直流电流往往远非如单元支路那样简单。首先,由于大地土壤电阻率分布并非各向均匀,使得计算各变电所电位变得很复杂;其次,电力系统接线是一个网络,不是单一支路,因而计算电流应使用网络概念;再次,需要收集大量的系统资料,如系统接线图、变电所变压器型式及相关参数、接地电阻、线路参数等。

流过各变压器绕组的直流电流大小,不仅与接地极的距离相关,同时与极址土壤导电性能、电力系统网络接线及其参数(如变电所接地电阻、导线型号及长度、变压器容量及台数等)有关。在一个变电所里单台运行的变压器比多台投运的变压器更容易受到影响;靠近接地极变电所和与接地极成径向布置的变电所较其他方向布置的变电所容易流过更多的地电流。

### 三、变压器允许直流电流

在一定程度上，变压器容许多大的直流电流取决于变压器设计，即其值与变压器结构、锈芯材料、磁通密度取值等因素有关。我国国家标准规定，电力变压器在超过 5% 的额定电压下也应能长期安全运行，此时的励磁电流将较额定电压下的励磁电流大 50%。这意味着，只要流过变压器绕组的直流电流所引起的励磁电流增量不大于正常值的 50%，直流电流对变压器的影响是可以接受的。

针对变压器绕组允许通过的直流电流问题，有如下结论：

(一) 与磁密取值有关。对于冷轧硅钢片，当磁密在 1.65~1.7T 之间时允许通过的直流电流为额定电流的 0.45%~0.55%。

(二) 与变压器硅钢片导磁串特性有关。导磁率愈高(优质冷轧硅钢片)，允许通过的直流电流愈小。对于热轧硅钢片(老式变压器)，变压器绕组允许通过的直流电流较大，可达到额定电流的 1%。

(三) 与变压器类型有关。因为单相和三相五柱式变压器具有较低的直流磁阻抗，故允许流过的直流电流较普通三相三柱式变压器稍小。

### 四、缓解措施

要想解决直流接地极地电流对变压器影响，最好的方法是尽可能地使接地极远离变电所或保持合适的位置。但如果受到客观条件的限制，则可以根据情况选择采取以下缓解措施。

(一) 对 110kV 变压器并且不是每个变电所都需要接地的系统，可以调整变电所接地位置(让受影响变电所不接地)。

(二) 对新制造的电力变压器，要求制造厂家满足直流偏磁方面的技术要求。

(三) 对已投运的变压器，当计算得到的流过变压器绕组的直流电流值大于允许值时可以在受影响变压器的中性点加装电阻或电容器隔离装置，减少或隔断直流电流。

(四) 尽可能减少甚至取消单极大地回线运行方式。

## 9.4.2 对地下金属的腐蚀

### 一、电腐蚀特性

接地极地电流可能使埋在极址附近的金属构件产生电腐蚀，这是由于这些金属设施为地电流传导提供了比周围土壤导电能力更强的导电特性，致使在构件的一部分(段)汇集地中电流，又在构件的另一部分(段)将电流释放到土壤中去的结果。

图 9-5(a)描述了接地极以阳极运行时，金属管道上的电流腐蚀情况。在这种情况下，靠近电极的一段管道吸取来自阳极的电流，然后在远离电极的一段管道处将电流释放到土壤中去。这表明，在电极附近的这一段管道相对土壤的电位为负，受到阴极保护；在远离电极的那一段管道相对土壤的电位为正，以致产生腐蚀(阴影部分)。如果接地极是以阴极运行，则管道上的直流电流的流内情况与上述情况正好相反，在离开接地很远处的一段管道汇集来自阳极的电流，再由在靠近电极的一段管道将电流释放给阴极。所以，在远离电极的那一段管道受到了阴极保护，而在电极附近的这一部分管道上产生电腐蚀，如图 9-5(b)所示。

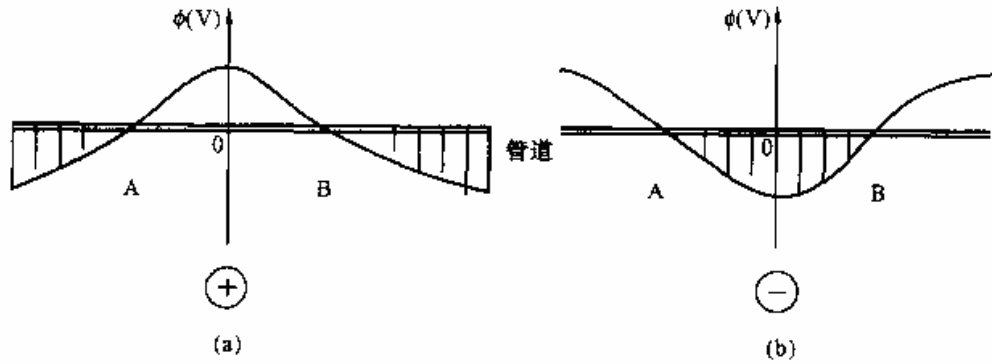


图 9-5 接地极对地下管道的腐蚀范围示意图

(a) 接地极为阳极; (b) 接地极为阴极

通过理论分析,直流地电流对管道的电腐蚀程度除了和接地极与地下金属设施的距离  $J$ 、走向等因素有关外,还与地下金属设施几何长度  $L$  密切相关。在其他条件不变情况下,设施  $L$  愈大,电腐蚀程度愈严重。通常,当  $L/d$  小于 1 时,几乎不受腐蚀影响。因此,接地极地电流主要是对地下金属管道、销装电缆、电力线路杆塔基础等这类大跨度的埋地设施的金属构件产生电腐蚀。

## 二、地下金属构件电腐蚀计算

### (一) 金属管线或电缆铠装电腐蚀

通常情况下,地下金属管线用于输送石油、天然气和自来水。大型管线,如石油和天然气管线,往往用绝缘材料将管道包裹起来,以防止自然腐蚀。小型管线一般没有采取包裹防腐措施,而是直接埋在地下。电缆有通信电缆和电力电缆,前者铠装对地一般是绝缘的,后者铠装对地有绝缘和非绝缘两种。管线和电缆通常采取每 2km 接地一次,以防止雷害。小型管线一般没有采取包裹防前者铠装对地一般是绝缘的,如果管壁或铠装是绝缘的,由此可见,在计算管线或电缆的电腐蚀问题上,数学模型是相同的,其区别在于管壁或铠装是否对地绝缘。当管壁或铠装对地绝缘时,则受腐蚀的是接地装置,否则受腐蚀的是管壁或铠装。

#### (1) 管壁或铠装对地不绝缘。

当一条裸金属管道或外套为铠装的电缆经过接地极附近时在直流电流场的作用下根据分布参数理论,管道或铠装上任意两点间  $dx$  段满足式(9-18)微分方程

$$\frac{d^2 I(x)}{dx} = \Gamma^2 I(x) - GE(x) \quad \text{式(9-18)}$$

式中,  $I(x)$  为流过管线或铠装  $dx$  段的电流(A);  $G$  为  $dx$  段管线或铠装对地泄漏电导(s);  $E(x)$  为沿着管线方向的直流场强(v / m);  $\Gamma$  等于  $\sqrt{RG}$ , 其中  $R$  为  $dx$  段管线或铠装的纵向电阻( $\Omega$ )。

对于管线或铠装上任意从  $a$  到  $b$  两点,式(9-18)微分方程的通解矩阵式可以表达为

$$\begin{bmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh[\Gamma(x-a)] & \frac{1}{\Gamma} \sinh[\Gamma(x-a)] \\ \Gamma \sinh[\Gamma(x-a)] & \cosh[\Gamma(x-a)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1(x) \\ Z_2(x) \end{bmatrix} \quad \text{式(9-19)}$$

式中,  $I_1(x)$  为流过管线或铠装  $dx$  段的电流(A);  $I_2(x)$  为  $dx$  段对地泄漏电流(A);  $A$  和  $B$  为常数,根据边界条件确定;  $z_1(x)$  和  $z_2(x)$  为积分函数,其中



$$\left. \begin{aligned} Z_1(x) &= P(x)e^{-\Gamma x} - Q(x)e^{\Gamma x} \\ Z_2(x) &= -\Gamma \left[ P(x)e^{-\Gamma x} - Q(x)e^{\Gamma x} \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{式(9-20)}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} P(x) &= \frac{G}{2\Gamma} \int_a^x E(x)e^{\Gamma x} dx \\ Q(x) &= \frac{G}{2\Gamma} \int_a^x E(x)e^{-\Gamma x} dx \end{aligned} \right\} \quad \text{式(9-21)}$$

欲得到式(9-19)的特解,需要给定 a 和 b 点边界条件。边界条件一般有以下几种情况,可根据具体情况给定。

- 1) 在离开接地极最近点或有绝缘接头处,  $I_1(x) = 0$ 。
- 2) 在图 10—12 所示的 A 和 B 处, 有  $I_2(x) = 0$ 。
- 3) 在离开接地极足够远(如大于 100km)处,  $I_1(x) = 0$  和  $I_2(x) = 0$ 。
- 4) 对于有阴极保护的, 由于阴极保护电流由一端注入并在大地的遥远处释放电流, 这意味着  $E(x)=0$ 、 $Z_1(x)=0$  和  $Z_2(x)=0$  所以式(9-18)的特解可简化为

$$\left. \begin{aligned} I_1(x) &= Ae^{-\Gamma x} - Be^{\Gamma x} \\ I_2(x) &= -\Gamma(Ae^{-\Gamma x} + Be^{\Gamma x}) \end{aligned} \right\} \quad \text{式(9-22)}$$

此时, 如果阴极保护电流  $I_c$  在 A 端注入, 边界条件有  $I_{1(a)}=I_c$  和  $I_{1(b)}=0$ 。

当 A 到 B 段的场强分布是变化时, 可以将该段分成  $x=x_1 < x_2 < \dots < x_n$  ( $a = x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ ) 若干小段, 如果用  $x_n$  代替“a”, 那么每小段的通解具有与式(9—18)相同的形式。特解结果是:  $x^{n-1}$  段 b 端被消除;  $A=x_1(x_n)$ ,  $B=I_2(x_n)$ 。为了保证在泄漏电导突变地方导体上的电流  $I_1(x)$  和电位  $U(X_n)$  连续, 将式(10—19)改写成式(9—23)关于  $I_1(X_n)$  和  $U(X_n)$  的函数式

$$\begin{bmatrix} \cosh \Gamma(x - x_n) & -\frac{1}{\Gamma G} \sinh \Gamma(x - x_n) & -1 & 0 \\ \sinh \Gamma(x - x_n) & -\frac{1}{G} \cosh \Gamma(x - x_n) & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(x_n) \\ U(x_n) \\ I_1(X) \\ U(X) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_1(x) \\ Z_2(x) \end{bmatrix} \quad \text{式(9-23)}$$

式中,  $U(x_n)$  系  $X_n$  处金属管道或铠装对土壤的电位, v。

由此可以得到, 包含有  $I_1(x_1)$ 、 $I_1(x_2) \dots I_1(x_n)$ ,  $U(x_1)$   $U(x_2) \dots U(x_n)$   $2n$  个未知数的  $2(n-1)$  个独立方程组。根据  $I_1(x_1) = I_1(x_n) = 0$  边界条件, 可以用来用高斯消元法求解得到  $U(x_1)$   $U(x_2) \dots U(x_n)$ , 从而得到  $X_n$  处金属管道或铠装泄漏电流  $I_2(x_n)$ 。

按照法拉第腐蚀定律, 在直流系统整个设计寿命期间, 直流电流对金属管道或铠装壁厚累计的电腐蚀按式(9—24)计算

$$\delta(x_n) = \frac{k v_f I_2(x_n) \bullet F_y}{8.760 \pi D \rho I_d \bullet \Delta x} \quad \text{式(9-24)}$$

式中,  $\delta(x_n)$  为电腐蚀厚度, mm;  $I_2(x_n)$  为  $x_n$  处泄漏到大地上的电流, A;  $v_f$  为材料电腐蚀速率,  $\text{kg} / (\text{A} \cdot \text{年})$ ;  $F_y$  为直流系统以阴极或阳极的累计运行安时数, Ah;  $D$  为管道或铠装的直径, mm;  $I_d$  为接地极入地电流, A;  $\rho$  为材料密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\Delta x$  为每小段( $x_n - x_{n-1}$ )管道或铠装的长度, m;  $k$  为电流不均匀系数,  $k > 1$ 。

理论计算表明, 如果在合适的位置将管道或铠装分段绝缘, 可以大幅度地降低电腐蚀程度。所以, 对于管壁或铠装对地不绝缘情况, 可以采用此方法来减少电腐蚀影响。

(2)管壁或铠装对地绝缘。

如果一条对地绝缘的金属管道或铠装电缆通过接地极附近，由于  $G \rightarrow \infty$ ，管道或铠装泄漏到地中的电流  $\rightarrow 0$ ，所以可以采用集中参数计算流过接地装置的直流电流，其等效电路如图 9-6 所示。

对图 9-6 所示网络，借助于计算机，可以很方便地求得流过每一接地装置的电流。若计算出的电流是由接地装置流入大地，则表明该接地装置可能存在电腐蚀。在直流系统整个设计寿命期间，第  $n$  个接地装置腐蚀重量可以按式(9-25)计算

$$W(x_n) = \frac{v_f I_2(x_n) F_y}{8.760 I_d} \quad \text{式(9-25)}$$

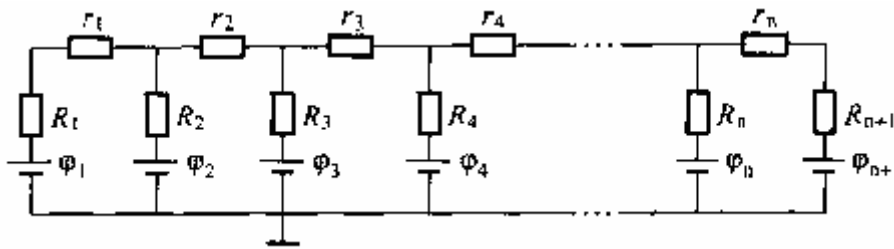


图 9-6 管壁或铠装对地绝缘时的等效电路图

- $\Delta \varphi_n$ -地  $n$  接地装置处的地电位升 (V);
- $R_n$ -第  $n$  豪接地装置处的接地电阻 ( $\Omega$ );
- $r_n$ -第  $n$  至  $n+1$  段管道或铠装的直流电阻 ( $\Omega$ )

式中， $W(x_n)$ 为在直流系统整个设计寿命期间，对接地装置的累计电腐蚀质量(kg); 其他符号含义与式(9-24)相同。

要想解决接地极地电流对接地装置的电腐蚀影响并不难，其一，加大接地装置材料的尺寸；其二，将接地装置材料换成抗电腐蚀能力强的材料，如高硅铸铁或涂层或包裹有机导电材料等。

(二) 输电线路基础腐蚀

通常情况下，高压输电线路的架空地线是对杆塔绝缘的，但也有不绝缘的，其中包括接地极引线。对于地线与杆塔不绝缘的线路，如果它经过接地极附近，在接地极入地电流的作用下，两杆塔间形成电位差，直流电流则经过地线由一个杆塔流入(出)到另一个杆塔流出(入)。所以，在电流流入大地的杆塔基础处会产生电腐蚀。

计算流过各杆塔的直流电流等效电路与图 9-6 相同，其中  $\Delta \varphi_n$  是第  $n$  号杆塔处地电位升(V);  $I_n$  是流过第  $n$  号杆塔的直流电流(A);  $R_n$  是第  $n$  号杆塔接地电阻( $\Omega$ );  $r_n$  是第  $n$  至  $n+1$  号塔间架空地线的直流电阻( $\Omega$ )。

对每一基杆塔基础的腐蚀质量可以按式(9-25)计算。

消除接地极对输电线路铁塔基础腐蚀的方法是：对于计算有影响的(长 10~20km)一段线路，将地线与杆塔绝缘即可；对于紧靠极址的杆塔，由于该处地面场强较大，应用沥青或其他绝缘材料将基础与地绝缘，并用玻璃钢板垫在塔脚处，使塔与基础绝缘；如果使用拉线塔，可在拉线中串入一片绝缘子。

三、评判准则和阴极保护

(一) 评判准则

严格地讲，接地极地电流会影响附近的地下金属管道或电缆铠装，不过大小不同而已。通过管道或铠装的电流多大被认为有影响、国际大电网会议 14.21 工作组的文章认为，泄漏电流密度为  $0.01A/m^2$ ，每年对铁的腐蚀厚度是  $0.174mm$ ，是可以接受的。但是仅仅以电流

密度来评判地电流对金属管道或铠装电缆有无影响是不够的。评判接地极地中电流对管道或铠装电缆有无影响，不仅取决于电流密度，尤其取决于所造成的累计电腐蚀，是否对受影响物在其设计寿命期间的安全运行构成威胁。如果是构成了威胁，就认为有影响。

## (二) 阴极保护

通常情况下，减少接地极地电流对管道或铠装电腐蚀的方法是使接地极与其间保持足够的距离。但在实际工程中，当不满足安全距离要求和不便采用上述措施时，对有影响的管道或电缆，可采取阴极保护措施。

对于钢(铁)结构的管道不产生腐蚀的对周边土壤的电位为 $-0.85\text{V}$ ，即低于 $-0.85\text{V}$ 的金属构件受到阴极保护；如果金属构件对土壤的电位低于 $-1.5\text{V}$ ，将会导致防护层脱落。所以，美国腐蚀工程师全国协会(NACE)推荐 $-0.85\sim-1.5\text{V}$ 对地下金属构件保护的上下限控制标准。

阴极保护和牺牲阳极保护是一种较为广泛用于地下金属构件的防腐措施，前者是在被保护构件施加相对于地为负极性的电压，使其得到电流；后者是采用比被保护构件更活泼的金属(如锌棒)牺牲电极并与被保护构件连接，从而在构件和阴极材料之间形成原电池而保护设备。虽然两者方法不一样，但保护的基本原理是一样的，都是使被保护构件相对于周边土壤为负电位。

一般采用沥青浸渍的玻璃布包裹大型或重要的地下金属管道，如石油和煤气管道等。其作用一方面是为避免自然腐蚀，另一方面当采用了阴极保护时，可减少阴极保护电流。值得指出的是，因为这些防护层不可能是理想的绝缘材料，甚至可能出现孔，如果管道汇集的电流可能集中在管道裸露于土壤处释放电流，则会加速该部位腐蚀。所以，管道即使采用了防护层，仍然有必要对通过计算被认为有影响的管道，采用阴极保护措施。

### 9.4.3 对铁路系统的影响

当接地极离铁路太近时，直流地电流可能对铁路系统的信号和电气化铁路的供电系统有影响。许多旧的铁路信号系统采用低压直流电池和继电器，这种型式的典型信号系统是由一根用绝缘铁轨接头隔离的轨道构成，使其一端的两根铁轨与电池连接，另一端的两根铁轨与继电器连接，如图 9-7 所示。继电器线圈平时是带电的，直到火车开来时，由于电他被短路，使继电器动作，合上闭锁开关，从而使该区段显示出“停止”信号。

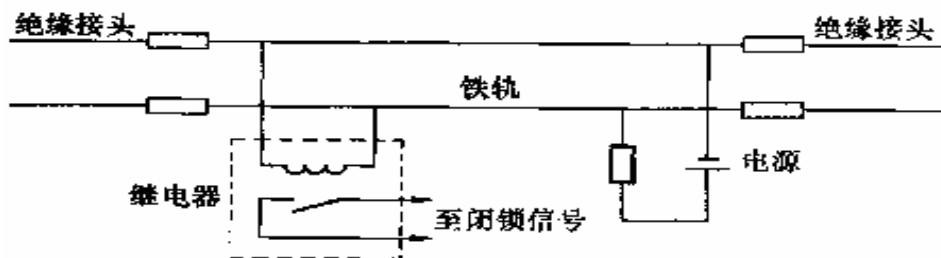


图 9-7 铁路信号系统接线示意图

当铁路穿过接地极地电流场时，信号系统从铁轨上拾取接地极入地电流，有可能抵消继电器在正常情况下的电流(特别是信号系统的电池接近耗尽时)，这样即使在没有火车开来的情况下，该铁路区段仍然有可能显示“停止”的信号。

解决接地极入地电流对铁路信号系统影响的方法不仅多而且简单。其一，在美国等其他国家，用绝缘铁轨接头将两根铁轨都予以隔开，这样不但可使分段的铁轨比连续的铁轨拾取的电流少，而且两根铁轨的电流、电阻和电压降也近似相等，所以通常不会出现错信号；其二，采用较高电压的电池和灵敏度较低的继电器；其三，当问题严重到采用这些办法还不能满足要求时，那就将信号电路改为交流系统或数码电路系统。

# 第 10 章 直流输电的过电压及绝缘配合

## 10.1 直流输电的过电压

直流输电的过电压问题不容忽视。过电压研究总是结合某种或某个避雷器特性来进行，一般不进行预期过电压研究，即不在确定避雷器配置方案之前进行故障模拟。为了说明换流站过电压的主要类型和产生原因，需对换流站各种可能的过电压进行简单介绍，由此说明各种避雷器的必要性。

### 10.1.1 来自换流站交流侧的过电压

#### 一、暂时过电压

暂时过电压是指持续时间为数个周波到数百个周波的过电压。除直接作用在设备，还作为其他故障和存在的起始条件，将引起操作过电压上升。最典型的暂时过电压发生在换流站交流母线，直接影响着交流母线避雷器，并通过换流变压器传至阀侧，影响阀避雷器。在换流站交流母线上产生的暂时过电压主要有以下三种类型。

#### (一) 甩负荷过电压

当换流站的无功负荷发生较大改变时，将产生程度不同的电压变化。特别是当无功负荷突然消失时，电压将突然上升即为甩负荷过电压。如果不考虑电压上升所引起的变压器饱和，则可用工频动态过电压 DOV 来表示。引起甩负荷过电压的一个典型原因是换流器停运。对于交流母线设备绝缘水平和避雷器应力，一般考虑直流双极停运。此时的电压水平最高，而且对设备应力的影响主要体现在过电压的最高幅值。如果发现过电压幅值过高，超过相应电网运行规程规定的母线暂时过电压最高允许值（如中国高压电网的最高暂时过电压，母线侧为最高运行电压的 1.3 倍，线路侧为 1.4 倍），则应该采取相应的措施，如快速切除并联无功补偿设备，加以限制。但需要指出的是，用于这种目的的断路器必须具备在这样高的电压下切除电容器的能力。当考虑暂时过电压对阀避雷器应力的影响时一般不考虑连接在同一交流母线上的所有换流器全部停运，因为换流器停运以后，其避雷器从耐受相间电压变成耐受相对地电压，一般不会再有过应力。在考虑这种工况时，最重要的是甩负荷前后最大的电压变化倍数而不是过电压的绝对值，因为只有这一电压变化量才能通过换流变压器转变为阀避雷器上的过电压绝对值。

#### (二) 变压器投入时引起的饱和过电压

换流站和常规交流变电所不同，一般装设有大量的滤波器和容性无功补偿设备，与系统感性阻抗在低次谐波频率下可能发生谐振，造成较高的综合阻抗，使得变压器投入时饱和引起的励磁涌流在交流母线上产生较高的谐波电压，并叠加到基波电压上，造成长时间的饱和过电压。由于换流站一般有多个换流器，当其他换流器运行时，不可避免地要投入滤波器和容性无功补偿设备，当最后一台换流变压器投入时，必将发生这类情况。为了降低这类过电压的幅值，几乎所有换流变压器的断路器都加装合闸电阻，合闸电阻对降低换流变压器投入时的铁磁谐振过电压十分有效。

#### (三) 清除故障引起的饱和过电压

在换流站交流母线附近发生单相或三相短路时，交流母线电压会降到零。故障时，换流变压器磁通将保持在故障前水平不变。当故障清除时，交流母线电压恢复，电压相位与剩磁通的相位不匹配，将使得该相变压器发生偏磁性饱和。这种饱和过电压不能通过加装合闸电

阻来解决，因而成为确定换流站交流母线避雷器能量要求的基本工况之一的办法。

## 二、操作过电压

交流母线操作过电压是由于交流侧操作和故障引起的，有较大幅值的操作过电压一般只维持半个周波。除影响交流母线设备绝缘水平和交流侧避雷器能量外，还可以通过换流变压器传导至换流阀侧，而成为阀内故障的初始条件。引起操作过电压的操作和故障有以下几类：

### (一) 线路合闸和重合闸

当两端开路的线路在一侧投入到交流系统时，通常在线路末端产生较高的操作过电压，而线路首端的过电压水平相对较低。当换流站交流开关场投运时，总是让第一回投入的线路首先带电，当达到稳定状态后，再接到换流站交流母线上，这样可以避免在交流开关场设备上造成大的操作过电压。另外，线路合闸过电压可通过加装合闸电阻得到改善。

### (二) 投入和重新投入交流滤波器或并联电容器

在投入滤波器时，因滤波电容器电压与交流母线电压相位不一致，会产生操作过电压。最严重的情况是滤波器刚刚退出，还未彻底放电，而因为某种原因需再次投入，此时如果电容器残压与交流母线电压刚好反相，造成严重的操作过电压。在现代的换流站控制保护系统中，都配备了最短投入时间保护，并要求电容器装设放电电阻。

### (三) 对地故障

当交流系统中发生单相短路时，由于零序阻抗的影响，会在健全相上感应出操作过电压。对于直流换流站常用的中性点固定接地系统，这种操作过电压一般不太严重。

### (四) 清除故障

清除故障也会引起操作过电压，但过电压倍数一般不太高。

## 三、雷击过电压

换流站交流母线产生雷电过电压的原因有交流线路侵入波和换流站直击雷两类。由于换流站一般进线较多，又有较多的交流滤波器等阻尼雷电波的设备，加之都装设交流母线避雷器，因此雷电过电压的情况一般没有常规变电所严重。另外，由于换流变压器的屏蔽作用，雷电波不能侵入换流阀侧，故通常情况下雷电过电压不作为换流站交流过电压研究和绝缘配合的重点。

## 10.1.2 来自换流站直流侧的过电压

### 一、暂时过电压

在换流站直流侧产生暂时过电压的原因主要有以下两类：

#### (一) 交流侧暂时过电压

当换流器运行时，因各种原因在换流站交流母线上产生的暂时过电压能够传导至直流侧，将主要引起阀避雷器通过较大的能量。

#### (二) 换流器故障

换流器部分丢失脉冲、换相失败、完全丢失脉冲等故障，均能够引起交流基波电压侵入直流侧。如果直流侧主参数配置不当，存在工频附近的谐振频率，则由于谐振的放大作用，将在直流侧引起较长期的过电压。

### 二、操作过电压

在换流器内部产生操作过电压的原因主要有以下两类：

#### (一) 交流侧操作过电压

交流侧操作过电压可以通过换流变压器传导到换流器。由于交流母线避雷器的保护作用，传导到直流侧的过电压通常不对直流设备产生过大的应力。但一般在考虑换流器内部短路时，都假设交流母线电压为避雷器保护水平，保证设备安全。

## (二) 短路故障

换流器内部发生短路故障时，由于直流滤波电容器的放电和交流电流的涌入，通常会在换流器本身和直流中性点等设备上产生操作过电压。

## 三、雷电过电压

由于换流变压器及平波电抗器的屏蔽作用，因此在一般设计中可不考虑雷击引起的过电压。但当换流器内部发生短路故障时，充电的极电容和直流滤波器电容通过平波电抗器向未短接的部分放电，如果回路自然频率为雷电波频率，则会在这些设备上产生雷电过电压。

## 四、陡波过电压

以下两种原因会在换流器中产生陡波过电压：

### (一) 对地短路

当处于高电位的换流变压器阀侧出口到换流阀之间对地短路时，换流器杂散电容上的极电压将直接作用在闭锁的一个网上，对阀产生陡波过电压；而直流滤波器和极电容上的电压将通过平波电抗器加到未导通的阀上，造成雷电波或操作波过电压。

### (二) 部分换流器中换流阀全部导通或误投旁通

当两个或多个换流器串联时，如果某一换流器全部阀都导通或误投旁通对导通的换流器将耐受全部极电压，造成陡波过电压。

## 10.2 换流站的过电压保护

像其他所有电气系统一样，高压直流输电系统由于遭受雷击、操作、故障或其他原因而产生各种波形的过电压，因而需装设过电压保护装置，限制过电压，保护设备，从而提高系统可靠性，降低设备成本。

### 10.2.1 换流站过电压保护变迁

换流站过电压保护装置经历了保护间隙、碳化硅有间隙避雷器和金属氧化物无间隙避雷器三个发展阶段。早期的直流输电工程大多采用保护间隙作为主要的过电压保护装置，它的结构简单，价格便宜，坚固耐用，通流能力大，但缺点是放电电压不稳定，没有自灭弧能力。因为直流输电系统中有完善的控制调节系统，在保护间隙动作之后，能自动降低直流电流到零，帮助间隙灭弧，然后有可能自动再起动，恢复直流送电能力。

直流避雷器的运行条件和工作原理与交流避雷器有以下差别：

- (1) 交流避雷器可利用电流自然过零的时机来切断续流，而直流避雷器没有电流过零点可资利用，灭弧较为困难；
- (2) 直流输电系统中电容元件（如长缆段、滤波电容器、冲击波电容器等）远比交流的多，而且在正常运行时均处于全充电状态，一旦有某一只避雷器动作，它们将通过这一只避雷器进行放电，所以换流站避雷器的通流容量要比常规交流避雷器大得多；
- (3) 正常运行时直流避雷器的发热较严重；
- (4) 某些直流避雷器的两端均不接地；
- (5) 直流避雷器外绝缘要求高。

因此，直流避雷器的运行条件要比交流避雷器的严酷得多，对直流避雷器提出更高的技术要求，直到 20 世纪 60 年代才研制出合格的碳化硅直流避雷器。

碳化硅避雷器虽比火花间隙的保护特性有较大的提高，但仍不能有效降低残压。为了降

低设备绝缘水平，必须降低避雷器额定值。

对直流避雷器所提出的技术要求是：非线性好，灭弧能力强，通流量大，结构简单，体积小，耐污性能好。这些要求正好是 20 世纪 70 年代以后发展起来的金属氧化物避雷器的突出优点。因此，一经推出便迅速地淘汰了传统的碳化硅有间隙避雷器而成为现代直流输电系统中过电压保护装置的首选。由于金属氧化物避雷器的伏安特性比碳化硅避雷器优越得多（见图 10-1），从而不再需要有串联间隙，故有时也称为无间隙避雷器。目前在常规直流输电系统中，已无例外的均采用氧化锌无间隙避雷器作为过电压保护装置，本章只介绍这种保护设备。

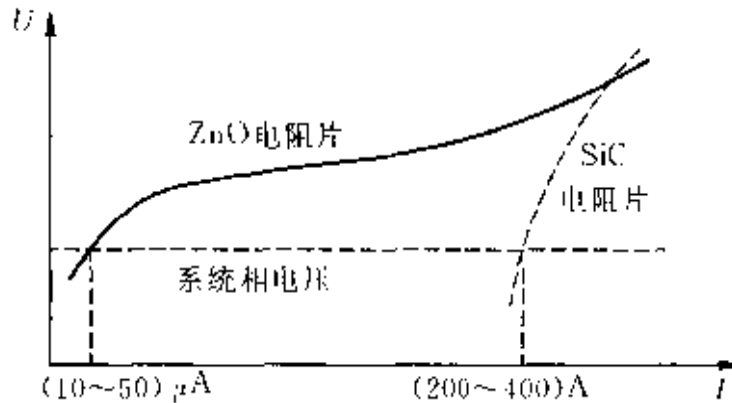


图 10-1 两种电阻片伏安特性的比较

自从 20 世纪 60 年代末，70 年代初，日本首先研制成功氧化锌非线性电阻片和电力用氧化锌避雷器以后，十多年来经过世界各国的共同努力，氧化锌电阻片的发展已经达到了成熟的阶段。由于氧化锌电阻片具有非常优异的非线性伏安特性，可以取消串联火花间隙，实现避雷器无间隙无续流，而且造价低廉，因此氧化锌避雷器已在越来越广的领域内取代了碳化硅避雷器。

目前世界各国主要研制高性能的无间隙避雷器。由于氧化锌电阻片有极其优异的非线性特性，它在过电压下电阻很小，残压很低；而在正常工作电压下电阻很高，实际上相当于一绝缘体，因此可以不用串联火花间隙来隔离工作电压，而将氧化锌电阻片直接接到电网上运行也不至于烧坏。

以下介绍氧化锌避雷器的一些优点：

- (1) 保护性能优越。它不需间隙动作，电压稍微升高，即可迅速吸收过电压能量，抑制过电压的发展。
- (2) 无续流，动作负载轻，耐重复动作能力强。
- (3) 通流量大。氧化锌避雷器的容许能量吸收，没有串联间隙烧伤的制约，仅与氧化锌电阻片本身的强度有关。
- (4) 性能稳定，抗老化能力强。
- (5) 在大电流冲击后，氧化锌电阻片的残压特性变化很小；可靠性高，预期运行寿命长。
- (6) 适应多种特殊需要。
- (7) 氧化锌避雷器耐污性能好，不存在出于污秽或带电清洗时改变瓷套表面电位分布而影响避雷器性能问题。
- (8) 适于大批量生产、造价低廉。

氧化锌避雷器由绝缘套管和串联的避雷器芯片组成，其中芯片是一种陶瓷材料，由氧化锌和其它添加材料，如氧化铋、氧化钴、氧化铬、氧化锰和氧化锑等混合，并磨制成极小的

颗粒后压制烧结而成。烧制后的芯片材料主要由低阻性的氧化锌颗粒构成，颗粒直径约为 10 $\mu$ m，在其周围由厚度约为 0.1 $\mu$ m 的高阻性氧化物薄膜紧密包裹，随着电场强度的变化，薄膜的电阻率可在 10<sup>10</sup>~1<sup>10</sup>  $\Omega \cdot \text{cm}$  之间变化，相对介电常数约为 500~1200，极端情况可达 1600。

芯片的导通机理可分为三个阶段，第一阶段为低电场下的绝缘特性。此时，高阻薄膜可视为能量屏障，阻止电子在氧化锌颗粒之间移动；电场降低了屏障能量值，从而允许部分电子以热扩散的方式穿过，其电流密度可表示为：

$$J_0 = J_0 \exp[-(\Phi_B - Ee^3 / 4\pi\epsilon) / kT] \quad \text{式(10-1)}$$

式中， $J_0$  为常数； $\phi_B$  是屏障值； $e$  为电子电量； $\epsilon$  是介电常数； $E$  为电场强度； $k$  是 Boltzmann 常数； $T$  为绝对温度。

第二阶段为中等电场强度下避雷器的限压特性。当薄膜内的电场强度达到约为 106V/cm 时，电子以隧道效应通过薄膜的能量屏蔽，其电流密度可表示为：

$$J_s = J_1 \exp[-(A\phi_B^{1/2} / E)] \quad \text{式(10-2)}$$

式中， $J_1$  和  $A$  是常数。

第三阶段为高电场强度下的导通特性。此时由穿过薄膜的隧道效应所产生的电压降很小，且大多集中在氧化锌颗粒上，电流密度随电场强度的增大趋于下式的规律：

$$J_s = E / \rho \quad \text{式(10-3)}$$

避雷器的伏安特性对过电压幅值和绝缘配合有重要的影响。从材料开发的角度出发，采用以 V/mm 表示的电场强度对以 A/mm<sup>2</sup> 表示的电流密度的变化曲线是最理想的，但工程中最广泛的是单块芯片的伏安特性或以标么值电压表示的伏安特性。图 10-2 是直径为 80mm、厚度为 20mm 的一块氧化锌避雷器芯片的典型伏安特性。

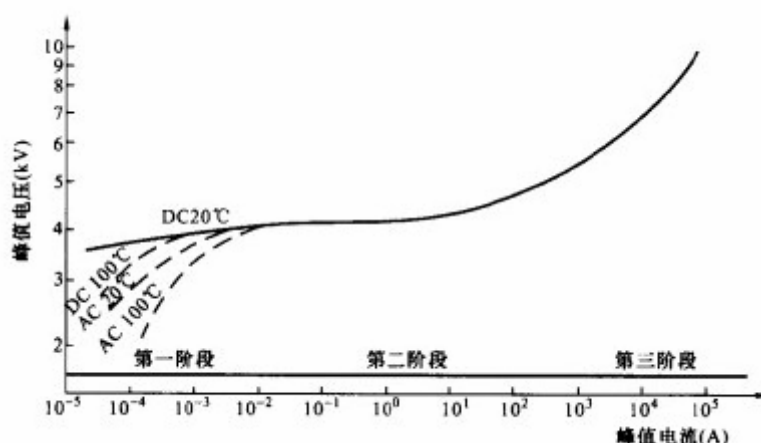


图 10-2 氧化锌避雷器芯片典型伏安特性

在电流低于 10<sup>-2</sup>A 区域时，避雷器特性随温度变化很大，对应于电子热扩散的导电模式。当电流在 10<sup>-2</sup>A 区域时，对应于上述隧道效应的导电模式，避雷器的电压变化很小，其伏安特性可用式 (10-4) 表示，在对数坐标上可表示为一条直线



$$I = CU^\alpha \quad \text{式(10-4)}$$

式中，C 为与避雷器芯片几何尺寸相关的常数； $\alpha$  为与材料特性相关的非线性系数，一般为 10~50，从降低设备绝缘水平的角度出发，应选用  $\alpha$  较大的材料，在工程估算时可采用 30 的典型值。

当电流继续增大时，避雷器电压线性上升，主要为氧化锌颗粒上的电阻性压降。为了便于叙述，将体现氧化锌避雷器性能的基本参数定义如下。

(1) 避雷器参考电压  $U_{ref}$ 。是衡量一支避雷器材料特性、几何尺寸和串联片数的主要参数，是在厂家规定的一个电流水平下避雷器两端电压峰值。这个电流一般为数毫安，处于避雷器伏安特性第一区域和第二区域之间的过渡部位。

(2) 避雷器参考电流  $I_{ref}$ 。是避雷器加上参考电压时的阻性电流峰值。

(3) 避雷器额定放电电流。用于衡量避雷器放电能力的放电电流峰值，电流波形为 8/20us。

(4) 避雷器保护残压  $U_{res}$ 。当通过规定波形和幅值的放电电流时避雷器两端间的电压峰值。

(5) 避雷器保护特性。是用陡波、雷电波、操作播散各规定的波形、规定的配合电流幅值以及在通过这些电流是避雷器保护残压来表示。

(6) 避雷器连续运行电压。它直接关系到对避雷器本身的要求以及被保护设备的决议水平。连续运行电压是换流站某处对地，或两点之间可能出现的持续时间为数分钟以上的运行电压，在这样的电压下避雷器不失去热稳定性，也不显著老化。连续运行电压是以 50Hz/60Hz 下交流电压有效值表示。在换流站中，很多避雷器在连续运行时的电压是其他不规则的电压波形，而不是理想的正弦波电压。在选择避雷器参数时要用到以下三个术语和概念。

1) 顶值连续运行电压 PCOV。对于连续运行电压中存在换相过冲时，顶值连续运行电压是指考虑换相过冲的最高电压。

2) 峰值连续运行电压 CCOV。指连续运行电压中不计换相过冲的最高峰值电压。

3) 等效连续运行电压 ECOV。指一个等效的工频正弦波电压，避雷器在这一电压下连续运行消耗的功率与实际运行电压下相同。

(7) 避雷器连续运行电流。当避雷器上施加连续运行电压时的阻性电流。

(8) 配合电流。是避雷器在过电压下流过电流的最高估计值，主要考虑以下四种电流波形。

- a) 陡波冲击电流，其波前为 1 (0.9~1.1) us，波尾不长于 20us。
- b) 雷电冲击电流，其波前为 8 (7~9) us，波尾 20 (18~22) us。
- c) 操作冲击电流，其波前为 30~100us，波尾为 60~200us。
- d) 长操作冲击电流，其波前达 1000us，波尾达 2000us。

(9) 能量特性。单次冲击或连续冲击下能够吸收的以 MJ 表示的能量。

(10) 额定电压。针对交流应用的避雷器铭牌参数，近似参考电压。在一般交流母线上应用时约为最高连续运行电压的 1.3~1.4 倍。因此，在最高连续运行下运行的避雷器连续运行电流比参考电流还要下降 2~3 个数量级。

(11) 避雷器耐受暂时过电压幅值随时间的关系。在常规交流应用中，用于线路末端的避雷器比用于母线的避雷器额定电压要高 5%~6%就是这个道理。用于衡量避雷器耐受暂时

过电压能力的一个指标是耐受时间随暂时过电压幅值变化的曲线，如图 10-3 所示。

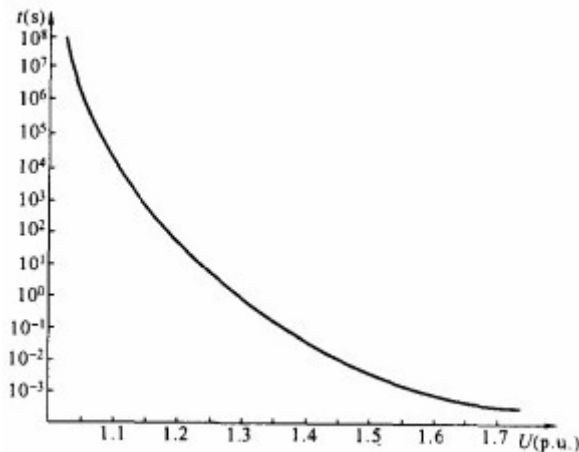


图 10-3 避雷器耐受时间随暂时过电压幅值变化的曲线图

## 10.2.2 换流站过压保护与绝缘配合

直流输电换流站过电压保护与绝缘配合的目的就是寻求一种避雷器配置和参数选择方案，保证换流站所有设备(包括避雷器本身)在正常运行、故障期间及故障后的安全，并使得全系统的费用最省。

从避雷器安全的角度出发，需要考虑两个主要方面，其一是长期连续运行的安全，防止加速老化。其二是过电压下通过避雷器的能量不能超过其允许值。一般说来，避雷器额定电压越高，单位电压的能量要求越低。较高的避雷器额定电压可以降低单位电压避雷器的能量要求，因而可以降低避雷器制造难度和费用。

对于被保护设备，避雷器额定电压越高，保护水平就越高，设备的绝缘水平也必定相应提高，因而制造难度和费用增加。为了解决避雷器安全和设备造价之间的矛盾，需要进行精心的优化配置工作，在这方面已经进行了不少的研究工作，最后制定成国际和国内的标准和导则。

在工程中，换流站的过电压保护要严格按照标准和导则进行规范，还需要借鉴工程经验。换流站过电压保护和绝缘配合的一般过程是：第一步，确定避雷器的配置方案；第二步，确定各避雷器的额定电压和保护特性；第三步，初步确定配合电流、保护残压和设备绝缘水平；第四步，进行过电压研究，确定避雷器能量要求，校核实际流过避雷器的电流幅值是否超过配合电流；第五，如果必要，则进行调整，即一般情况下调整避雷器并联柱数，必要时调整额定电压甚至配置方案，最终确定保护方案和绝缘水平。

## 10.3 换流站的绝缘配合

绝缘配合是指根据设备的使用及其周围的环境来选择设备的电气绝缘特性。设备内所有的绝缘，无论是固体绝缘，还是符合一定要求的电气间隙和爬电距离，都必须能够承受设备在正常条件和在单一故障条件下自己内部产生的相应部分的电压。此外，还必须能承受电网电源传输进来的或者从通信网络传入的瞬态冲击电压而不击穿、不飞弧。

绝缘配合原则是综合考虑电气设备在电网中可能承受的各种作用电压、保护装置的特性

和设备绝缘对各种作用电压的耐受特性，合理确定设备必要的绝缘水平，以使设备造价、维护费用和设备绝缘故障引起的事故损失在经济和安全运行上总体效益最高。

绝缘配合的设计需考虑环境条件的影响，根据设备所承受的电压来选定电气间隙、爬电距离和固体绝缘等的尺寸结构。设计应符合 GB/T 16935.1-1997《低压系统内设备的绝缘配合 第一部分：原理、要求和试验》的要求。设备的绝缘系统在结构上应满足：

- (1) 有足够的电气间隙，以防止沿着两电极间最短的空气间隙发生放电；
- (2) 有足够的爬电距离，以防止在相应污染等级的环境条件下沿着绝缘材料表面发生爬电；
- (3) 有足够的绝缘穿透距离，以防止透过绝缘材料内部击穿。

### 10.3.1 换流站避雷器的选择

#### 一、避雷器配置

针对换流站避雷器配置，可以将换流站分成图 10-4 所示的三个区域：A 区域为交流区域，避雷器的配置与常规交流变电所没有本质的区别；B 区域为换流器区域，该区域的避雷器主要用于保护晶闸管换流阀和换流变压器；C 区域为直流场区域，该区域的避雷器主要用于保护直流场设备。上述三个区域避雷器配置的总原则是：交流侧产生的过电压应由交流侧避雷器限制；直流侧产生的过电压应由直流侧避雷器限制；重要设备应由与之直接并联的避雷器保护。

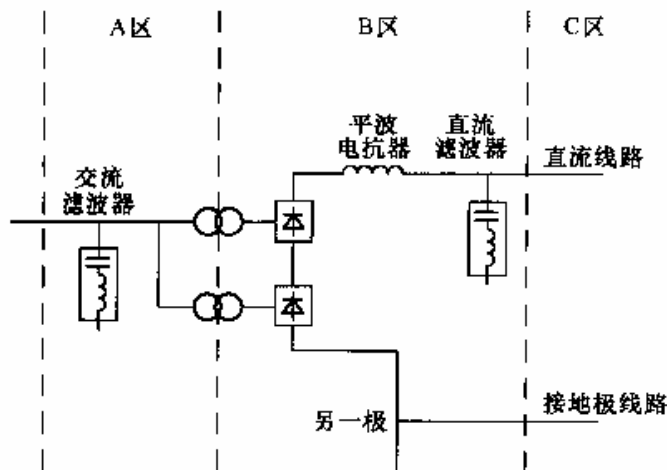


图 10-4 换流站避雷器配置分区图

根据上述原则，图 10-5 所示为目前最常用的每极一组 12 脉动换流器的避雷器典型配置方案。

实际工程的避雷器配置方案可能与图 10-5 的方案略有区别。对于空气绝缘的平波电抗器，为降低纵向绝缘水平，经技术经济比较后可以采用与电抗器直接并联的避雷器；对于油浸式平波电抗器，则不采用并联避雷器而依靠两侧对地的避雷器保护。由于阀避雷器串联可以代替 6 脉动桥避雷器的作用，目前一般不再配置 6 脉动桥避雷器。有时为了降低 Y, y 变压器阀侧绕组的绝缘水平，可以采用 6 脉动桥母线避雷器。

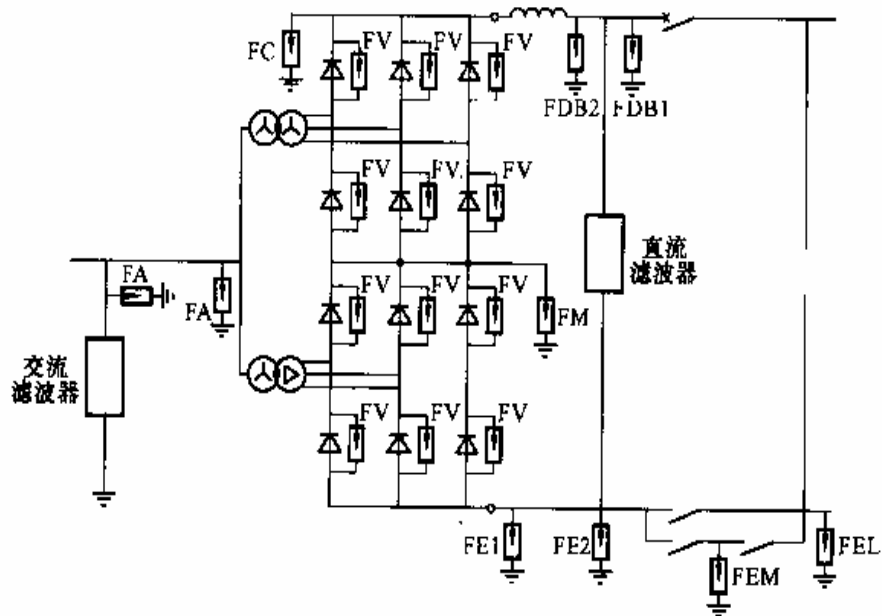


图 10-5 每极一组 12 脉动换流器的避雷器典型配置方案

FV—换流阀避雷器；FDB1、FDB2—直流极避雷器；FE1、FE2—中性母线低容量避雷器；FEL、FEM—中性母线大容量避雷器；FA—交流母线避雷器；FM—六脉冲阀桥避雷器；FC—换流器避雷器

## 二、避雷器参数初选

在避雷器生产技术一定的情况下，所谓确定避雷器参数就是确定避雷器额定电压（或与之相当的参数，如参考电压）和避雷器通流能量，前者决定避雷器耐受正常工作电压和暂时过电压的能力，同时也基本上决定了保护点的保护水平和设备绝缘水平；后者决定避雷器在过电压下能否安全地消耗掉因保护动作而产生的能量。

初选避雷器参数要考虑商务和技术两个方面。对于总体承包的工程，承包商主要是根据直流系统主回路参数以及工程经验，选择合适的避雷器参数，并在规程规定的较高配合电流下确定保护水平和设备绝缘水平。在签订合同后，承包商将按合同要求进行详细的过电压研究，在这一过程中一般要求已承诺的避雷器额定电压不能升高，避雷器能量水平不能降低，避雷器保护水平不能升高，设备绝缘水平不能降低。一般能得到偏于保守的绝缘配合方案。

主要避雷器的额定电压必须根据最大连续运行电压选取，并适当考虑暂时过电压水平。如果暂时过电压水平不超过避雷器耐受暂时过电压随时间曲线规定的水平，则一般只需考虑最大连续运行电压，并约取该电压 1.3~1.4 倍，因此在其后的所有研究中一般不再考虑变动避雷器额定电压。所有的研究都是按一支避雷器特性考虑，并在配合电流下的保护残压进行绝缘配合。

下面介绍换流站主要避雷器参数选择中的关键因素。

### (1) 交流母线避雷器 FA

直流输电系统运行时都必须在交流母线上投入交流滤波器，限制交流母线谐波电压，在选择交流母线避雷器时，一般不考虑较小的谐波，而直接考虑母线最高连续运行电压，如 500kV 母线最高连续运行电压常取 550kV，单相对地电压为 318kV，因此一般避雷器额定电压取 420kV。

### (2) 阀避雷器 FV

换流器运行在蒸馏状态和逆变状态的阀上电压波形分别见图 9-6 和图 9-7。在不考虑换

相过冲时，阀上所承受的电压最大值为  $U_{vp} = \sqrt{3}\pi U_{di0}$ ，其中  $U_{di0}$  为换流器理想空载直流

电压，与换流变压器阀侧空载电势的关系为  $U_{di0} = 3\sqrt{2}E/\pi$ 。因此，阀上所承受的最大电压实际上是换流变压器阀侧绕组线电压峰值。在直流系统主回路参数设计中，可求得  $U_{di0}$  的额定值  $U_{di0N}$  以及稳态运行中允许出现的最大值  $U_{di0max}$ ，而大多数直流工程中  $U_{di0max} = U_{di0N}$ 。但是，考虑测量系统的误差和换流变压器抽头的调节死区等因素，计算实际运行中可能达到的绝对最大值为  $U_{di0abs}$ ，一般要比  $U_{di0max}$  大 2%~3%，并留有一定的设计裕度 0.5%~1%，从而得到用于阀避雷器设计的  $U_{di0Vmax}$ 。避雷器等效连续运行电压的有效值为  $U_{EOC} = \pi U_{di0Vmax} / 3\sqrt{2}$ 。

上述讨论没有考虑换相过冲的影响。在现代换流阀中，由于冷却技术的进步，阻尼回路的效果更好，换相过冲一般不大，可将最大连续运行电压适当提高，来等效考虑换相过冲的影响。

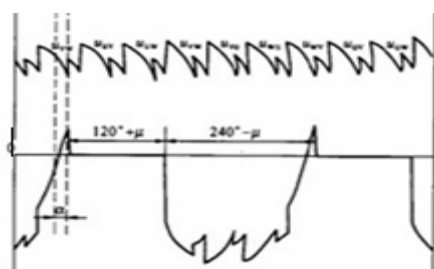


图 10-6 换流器运行在蒸馏状态的阀上电压波形

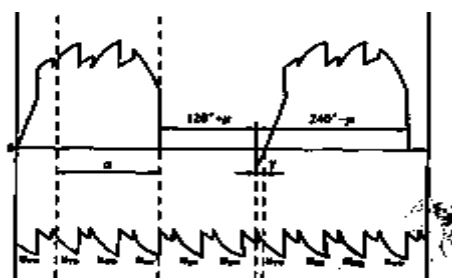


图 10-7 换流器运行在逆变状态的阀上电压波形

### (3) 换流器避雷器 FC

换流器直流侧电压波形图 10-6 和图 10-7，其峰值电压受换流器  $U_{di0}$  和运行角度的影响。对于工程中常用的 12 脉动换流器的最高连续运行电压，常出现在直流电压较高的运行工况。其计算工况为：换流器具有绝对最大理想空载电压，对应较大的触发角或关断角，同时还使得直流电压运行在可能的最大值，考虑所有这些因素，可取最大连续运行电压为最大直流电压的约 1.1 倍。

### (4) 直流线路避雷器 FDB1

直流线路避雷器的运行电压几乎为纯直流，其中的小幅值纹波对于避雷器的连续运行应力影响甚微，可忽略不计。现代直流输电工程的控制保护系统的完善，线路避雷器可以不考虑耐受大的暂时过电压和严重的操作过电压。

(5) 直流母线避雷器 FDB2

直流母线避雷器与直流线路避雷器耐受的运行电压相同。在正常运行时，这两台避雷器几乎并联运行，只是在雷击冲击下，由于直流母线避雷器对平波电抗器绕组等设备提供了更直接的保护。

(6) 直流中性点避雷器 FE

图 10-8 给出计算中性点运行电压的示意图。图 10-8 (a) 所示为双极运行，中性点电压  $U_1$  和  $U_2$  为接地极中不平衡电流所产生的直流压降。图 10-8 (b) 中所示为单极金属回线运行方式，对于中性点接地一侧，中性点电压为零，对于不接地一侧，中性点电压  $U$  为极电流在金属回线上产生的直流压降。通常  $U_1$  和  $U_2$  均小于 5kV， $U$  小于 40kV。图 8-5 所示的  $U_1$ 、 $U_2$  和  $U$  可用下式计算

$$U_1 = (R_{L1} + R_{G1})I_{ab} \quad \text{式(10-5)}$$

$$U_2 = (R_{L2} + R_{G2})I_{ab} \quad \text{式(10-6)}$$

$$U = R_L I_d \quad \text{式(10-7)}$$

式中， $R_{L1}$ 、 $R_{L2}$  和  $R_{G1}$ 、 $R_{G2}$  分别为两端接地极引线和接地极电阻； $R_L$  为金属回线电阻； $I_{ab}$  为接地极中的不平衡电流； $I_d$  为直流运行电流。

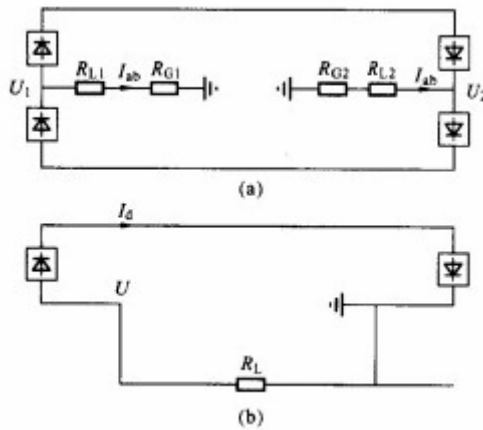


图 10-8 计算换流站直流中性点正常运行电压示意图

(a) 双极运行；(b) 单极金属回线方式运行

在直流极对地短路、换流变压器阀侧套管出口对地短路、交流侧不对称故障等情况下，中性点将出现操作过电压，此时在中性点避雷器上将产生较大的应力。图 8-6 所示为对于一个具有确定主回路参数的直流工程，中性点母线避雷器的最大能量要求与避雷器额定电压的关系图。

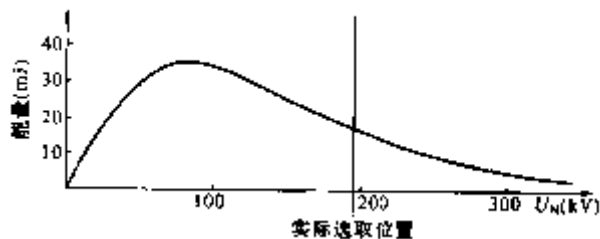


图 10-9 中性点母线避雷器的最大能量  
要求与避雷器额定电压的关系图

从图 10-9 可看出，中性点避雷器的额定值要选择在超过能量峰值的较高电压区域，才能同时满足稳态运行电压应力和较小的能量要求。另外，在双极直流系统中，一般要再不接地侧装设金属回路转换短路其 MRTB 和大地回路转换开关 GRTS，它们是由一个常规断路器，加上 LC 振荡回路，并联很大的一个金属氧化物吸能装置而构成，这个吸能装置通常为几十支并联的氧化锌避雷器。为了获得一定的效能能力，这些氧化锌避雷器必须具备一定的额定电压。当这些开关操作时，避雷器动作，在中性点产生一定的残压，为了保证这些开关的正确动作并避免中性点对地避雷器过应力，应将这些避雷器的额定电压选择得明显高于开关消能避雷器的额定电压。

直流中性点开关场是直流输电系统接线变换的主要场所。在双极、单极大地回路、单极金属回路这三种基本运行方式下，由于接入系统的部分是不同的，因此中性点避雷器配置应考虑这一因素。中性点避雷器典型配置如图 10-10 所示：

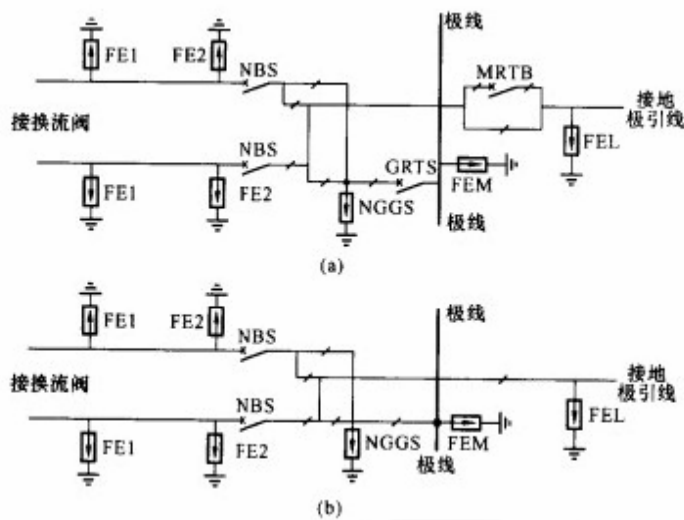


图 10-10 直流中性点避雷器典型配置  
(a) 不接地侧；(b) 接地侧

### 10.3.2 主要设备绝缘水平确定

#### 一、绝缘配合设计原则和绝缘裕度

##### (一) 绝缘配合设计原则

- (1) 高压直流换流站的绝缘配合设计原则仍适用特高压直流换流站的绝缘设计。
- (2) 交流侧过电压应由交流侧避雷器保护，直流侧过电压应由换流变直流侧避雷器组合来限制。

- (3)换流设备关键部件应由与其紧密相连的避雷器直接保护。
- (4)交流和直流滤波器中电感元件快速暂态时过电压很高，用并联避雷器保护。
- (5)母线或设备可直接由连接于被保护设备两端点间或设备对地间的避雷器保护，也可由两支或多支避雷器串联实现，如阀侧套管和阀对地的绝缘由相同的多支避雷器串联保护。
- (6)设备的绝缘水平要保持适当的绝缘裕度。⑦特高压直流换流站直流侧油浸式设备不再采用 SIWL/LIWL 的比例系数(0.83)和靠至高一级的标准绝缘水平等级。

## (二) 绝缘裕度的确定

影响绝缘裕度的主要因素有：设备实际耐受水平运行几年后会发生变化，特别是有机材料(如纤维素和油)的设备，故考虑裕度是必要的；环境条件(如雾、雨等)可能改变设备的绝缘强度；避雷器特性运行几年后会发生变化；过电压模拟计算中存在不确定因素，主要为杂散电容，母线长度等；绝缘闪络的随机性。因此，需由绝缘裕度来保证故障或闪络的概率在预期值内。

晶闸管阀因下列原因，建议无间隙金属氧化物避雷器保护阀的绝缘裕度由 15%降低到 10%：①设备运行几年后实际耐受水平变化不大。高压直流晶闸管阀既不是纤维素材料也不是油绝缘，承受应力的元件是晶闸管阀、阳极电抗和均压电容。如果任一元件故障，则仅此处晶闸管元件失效。失效部分元件将在下一维修周期中更换，则阀可恢复，包括其冗余。此过程在阀寿命期内必要时多次重复，而变压器除非绕组出现重大故障，否则不会更换变压器油。②环境条件对设备耐受水平变化影响不大。晶闸管阀安装在阀厅内，故环境(温度、湿度、清洁度等)能得到很好的控制。③运行几年后避雷器的特性仍在保证值内。带间隙避雷器(碳化硅或氧化锌)的保护水平当间隙磨损时会发生变化。但目前保护阀的金属氧化锌避雷器不使用间隙。此外，给定的最大最小电压特性在其使用期内有效。④应力计算中不确定因素，主要来自杂散电容和母线长度。⑤绝缘闪络的随机性。综上所述，需要绝缘裕度来保证故障或闪络的概率在预期值内。

鉴于目前高压直流系统的运行经验及良好的避雷器特性和不断改进的模拟分析手段，推荐采用表 10—1 的绝缘裕度。

表 10—1 特高压换流站设备宜采用的绝缘裕度

| 过电压 | 线侧油 | 阀侧油 | 空气绝缘 | 单个阀 |
|-----|-----|-----|------|-----|
| 雷击  | 25  | 20  | 20   | 10  |
| 操作  | 20  | 15  | 15   | 10  |
| 陡波  | 25  | 25  | 25   | 15  |

## (三) 换流站内绝缘与套管绝缘间的裕度

以往统计表明，故障多因变压器套管引起。套管选取更高绝缘水平，才能改善变压器整体可靠性。因此规定套管的直流耐压和极性反转试验的电压水平比绕组的试验电压提高 15%，而其它试验提高 10%。但近年的统计表明，套管故障不一定因过电压引起，变压器故障也不一定是因为套管故障。因此，套管尺寸过大、变压器与套管间绝缘有差异的问题就凸现出来，800kV 直流特高压就更突出，套管额外的绝缘使其尺寸增大，而引发其它问题，同时这样的尺寸可能使改善可靠性失去意义。

因此，建议直流 800kV 换流站套管的直流耐受试验和极性翻转试验(都带局部放电测量)的试验水平，仍取绕组相应耐受电压水平的 1.15 倍。而雷电和操作冲击试验电压水平，由比绕组绝缘水平提高 10%降低到提高 5%执行。

## 二、过电压的研究

避雷器参数一经确定，其保护水平和设备绝缘水平都可凭经验确定。但是，在实际工程设计中，仍要进行大量的过电压研究。主要是验证在各种冲击情况下，流过避雷器的电流是否超过配合电流，以及验证避雷器所需吸收的能量是否超过其能力。



直流输电技术发展初期,过电压研究多利用 TNA 和直流输电模拟装置等物理模拟设备。由于这些设备的阻尼比实际系统大,避雷器特性难以准确模拟。另外,随着基于梯形隐式积分数字模型的成熟以及计算机技术的发展,目前直流换流站过电压研究几乎都用数字方法。

换流站中存在暂时、操作、雷击和陡波过电压。这些过电压的主频率不同,故采用的电路模型也不一样。对于暂时过电压和操作过电压,由于冲击波的频率较低,杂散参数的影响甚微,因而电路模型可采用工频稳态电路模型。对于雷击过电压,由于主频率很高,杂散参数的影响已上升为主导作用。对于陡波过电压,杂散参数是唯一主导作用的参数。因此,用于研究雷击过电压和陡波过电压的电路模型与稳态电路模型完全不同,如电容器对陡波的阻抗可忽略,而电容器堆的杂散电感成为决定过电压的重要参数,因而在电路中以电感模型表示,同样电抗器以杂散电容模型表示。有时在引线较长时,甚至必须采用分布参数模型。

在换流站设计阶段,设备和引线的杂散参数不可能准确获得,以这种不准确的模型和参数进行过电压研究没有实际意义。另外,由于避雷器保护特性的改善,选取较大的配合电流对换流站交流母线和直流设备的绝缘水平影响不大,决定设备绝缘能力和避雷器能量要求主要是操作过电压和暂时过电压。因此,过电压研究也主要针对这两种形式的过电压进行。

过电压研究一般针对特定避雷器进行。主要考虑以下三方面的因素,第一,操作或故障前的运行工况,包括交流系统接线方式、系统强度和阻尼、输送功率方向和大小、无功补偿设备投入情况、触发角和关断角、是否由于其他过电压已引起其他避雷器动作等;第二,操作和故障情况,主要包括操作和故障型式、故障地点、故障相位和故障阻抗等;第三,避雷器情况,主要包括避雷器的配置情况,通常在研究一种避雷器在操作和故障情况下的表现时,可假定其他所有避雷器不存在或不动作,对正在研究的避雷器,不管其物理结构如何。都用一支避雷器模型表示,由于过电压研究主要关心通过避雷器的电流幅值和能量,因而可选用较低的特性曲线。表 10-2 所示为针对各种避雷器的过电压研究所需考虑的因素。

表 10-2 过电压研究因素汇总表

| 避雷器名称    | 稳态工况   | 故障和操作  |
|----------|--|--|
| 交流母线避雷器  | 短路比取稳态最小,故障后可再次损失一回交流线路,功率方向取整流,双极大功率,容性无功补偿设备投入最大             | 交流线路单相对地金属短路,短路地点靠近换流站交流母线,故障相位使换流站变压器剩磁通最大,双极停运,一定时段后切除线路,切除相位使变压器偏磁最严重 |
| 阀避雷器     | 短路比取稳态最小,故障后可再次损失一回交流线路,功率方向取整流,其中一极为最大功率,另一极为小功率,容性无功补偿设备投入最大 | 交流系统故障,切除一回交流连线,引起输送大功率的一极停运   |
| 换流器避雷器   | 同阀避雷器  | 换流变压器阀侧对地短路  |
| 直流线路避雷器  | 直流侧不同接线方式,直流滤波器不同投入方式  | 不同地点的直流单极短路故障  |
| 直流母线避雷器  | 同直流线路避雷器   | 同直流线路避雷器   |
| 直流中性点避雷器 | 同阀避雷器、考虑直流侧不同的接线方式   | 换流变压器阀侧对地短路、直流单极对地短路   |

### 三、换流站主要设备绝缘水平确定

经过避雷器选择和过电压研究后,绝缘配合应针对每一个或一类设备按四个步骤进行:第一,确定哪种避雷器动作将会在设备上引起最高的过电压;第二,根据配合电流确定对应避雷器在各种冲击波下的保护水平;第三,根据规程规定的绝缘裕度要求,确定设备的最低绝缘水平要求;第四,根据 IEC 标准试验电压序列,将设备绝缘水平向上归整到最近一个

标准试验电压。表 10—3 给出了各种换流站设备绝缘配合应考虑的相关因素。

表 10—3 换流站设备绝缘配合中应考虑的相关因素

| 设备名称                              | 避雷器名称                          | 绝缘程度 |                           |     |
|-----------------------------------|--------------------------------|------|---------------------------|-----|
|                                   |                                | 陡波   | 雷电                        | 操作  |
| 交流母线设备, 含换流变压器系统侧绕组               | 交流母线 FA                        | —    | 40%, 不计距离, 如果计距离, 可采用 25% | 15% |
| 换流阀 Y, y 型换流变压器阀侧绕组               | 阀避雷器 FV 2 倍阀避雷器加中性点避雷器, 2FV+FE | 20%  | 15%                       | 15% |
| 换流阀 Y, d 型换流变压器阀侧绕组               | 阀避雷器加中性点避雷器, FV+FE             | 25%  | 20%                       | 15% |
| 换流器高压侧平波电抗器阀侧                     | 换流器避雷器 FC                      | 25%  | 25%                       | 20% |
| 直流母线设备平波电抗器线路侧                    | 直流母线避雷器 FDB2                   | 25%  | 20%                       | 15% |
| 直流中性点设备, 含换流器低压侧 Y, y 型换流变压器阀侧中性点 | 中性点避雷器 FE                      | 25%  | 25%                       | 20% |
|                                   | 同阀侧绕组                          |      | 同阀侧绕组                     |     |

换流阀制造成本和运行损耗都直接与阀内所串联的元件数成正比, 而串联元件数又是直接由阀绝缘水平而决定。因此, 根据理论分析和几十年的运行经验, 绝缘裕度可以适当降低。另外, 换流阀中元件损坏都能够通过实时监视及时发现, 并在计划检修中更换, 经检修后的阀重新达到新阀的绝缘水平, 从而使阀的绝缘能力不会随运行时间而显著变化。

#### 四、避雷器参数确定与规范

通过过电压研究, 确定了流过避雷器的冲击电流和能量要求。在这种情况下, 一般不改变避雷器的额定电压, 而直接将额定电压与能量要求会同其他电气和机械参数, 提交避雷器厂家。有时由于交流系统特别薄弱, 有些阀避雷器和中性点避雷器的冲击电流可能大于根据规程和经验选择的配合电流, 或者能量要求大于单支避雷器的生产能力, 需要采用多柱避雷器并联。其最简单的方法是使用同一瓷套内的多柱避雷器并联, 其性能由避雷器厂家进行匹配。当能量要求更高, 同一瓷套内多柱避雷器并联仍不能满足要求, 必须采用多支避雷器并联。

当采用多支避雷器并联时, 不能随意使用同样额定参数的避雷器直接并联, 并联的避雷器必须具有完全一致的特性。对于常用的避雷器, 在冲击电流为某一较大值 (通常为 1kV

左右) 时, 其残压得设计值为  $U_p$ , 制造特性误差为  $\pm \beta\%$ , 即最高保护残压为  $U_p$

$(1+\beta/100)$ , 最低保护残压为  $U_p (1-\beta/100)$ ,  $\beta$  最大可达 1~2。当这样的两支避雷器

直接并联并耐受相同电压时, 根据式 (8-4) 并取  $\alpha$  为 30 的典型值, 如果  $\beta$  为一, 则具有高保护特性的避雷器中通过的电流只有具有低保护特性的避雷器中通过的电流的 1/2, 即 3

支避雷器并联后的效果只相当于 2 支避雷器的作用。如果  $\alpha$  为 50，则较小的电流只有较大电流的 1/3，因此 4 支避雷器并联的效果只相当于 2 支避雷器的作用。如果  $\beta$  取 2，则  $\alpha$  为 30 和 50 时，较小的电流分别只有较大的电流的 1/3 和 1/7。

采用并联多柱或多支避雷器时，通常采用同一配方甚至同一炉烧制的芯片，并进行特性测试和匹配。为了准确测量，通常将需要匹配的两支或多支避雷器并联，施加标准波形、幅值接近保护残压的冲击电压，测量出流过避雷器的最小电流是最大电流  $B$  倍。这一差异将用于多柱和多支并联避雷器的设计，并作为避雷器厂的保证值。为便于应用，在  $N$  支避雷器并联时，假设  $N-1$  支具有小电流特性而只有一支具有大电流特性，并联以后相当于  $NA$  支避雷器，其中  $A$  等于  $[(N-1)B+1]/N$ 。

## 10.4 换流站防雷保护

### 10.4.1 换流站防雷设计特点

换流站的防雷保护与常规交流变电所防雷保护没有本质的区别，都是采用避雷针和避雷线等方法将具有某种强度的雷电波直击概率降低到工程上可以不考虑的程度。由于换流站存在交流开关场，因此防雷保护有着不同于普通变电所的特点。

开关场的雷电波来源主要有两个，第一是线路侵入波，即连接到交流厂、直流厂和直流中性电场的交流、直流和接地极线路靠近换流站线路落雷，雷电波几乎没有衰减而侵入换流站的对应部位。线路上的落雷又分直击雷和地线落雷后的反击波两种，对于开关场的雷击波绝缘配合，一般只考虑直击雷。第二个是换流站直击雷，是换流站进行绝缘配合的选择雷击波配合电流的基础。雷击波直击开关场的原因是屏蔽失败。

### 10.4.2 换流站防雷措施

#### 一、防雷标准

确定换流站各部分防雷标准的基础是绝缘配合中采用的雷电波配合电流。

表 10-4 给出换流站各部分雷电波配合电流的参考值

| 位置         | 电压水平<br>(kV) | 雷电波配合电流参考值<br>(kA) |
|------------|--------------|--------------------|
| 交流开关场      | 220 以下       | 10                 |
|            | 220~500      | 15                 |
|            | 500 及以上      | 20                 |
| 直流开关场      | 200 及以下      | 10                 |
|            | 200~500      | 15                 |
|            | 500 及以上      | 20                 |
| 交流滤波器低压设备区 |              | 2                  |
| 直流滤波器低压设备区 |              | 2                  |
| 直流中性点区域    |              | 2                  |

表 10-4 所示的雷电波配合电流参考值，除用于换流站防雷设计外，还应用于相应线路的防雷设计，工程中必须注意。

## 二、防雷措施

换流站防雷措施主要有避雷针和避雷线两种。避雷针根据需要可以安装在构架上或独立基础上。

避雷针和避雷线的防雷原理及设计方法与交流变电所类同，可根据选定的防雷标准（如 20kA）和规定的屏蔽概率（如 99.99%），通过合理设计避雷针的高度和密度，可以按要求达到覆盖全部变电设备。

在滤波器低压设备区域和直流中性点区域，由于屏蔽要求较高，如果仍然采用避雷针，则必须提高避雷针的高度，这将引起针体和基础造价的大幅提升；或者提高采用避雷针的密度，引起布置困难并增加占地，并且不经济。因此，可以在构架避雷针和位于站区边沿的独立避雷针之间架设避雷线。避雷线的防雷原理与避雷针极为相似，只是屏蔽区域有显著的扩展，从原来以避雷针为轴心的一个柱体扩展为沿避雷线的一个条状体。