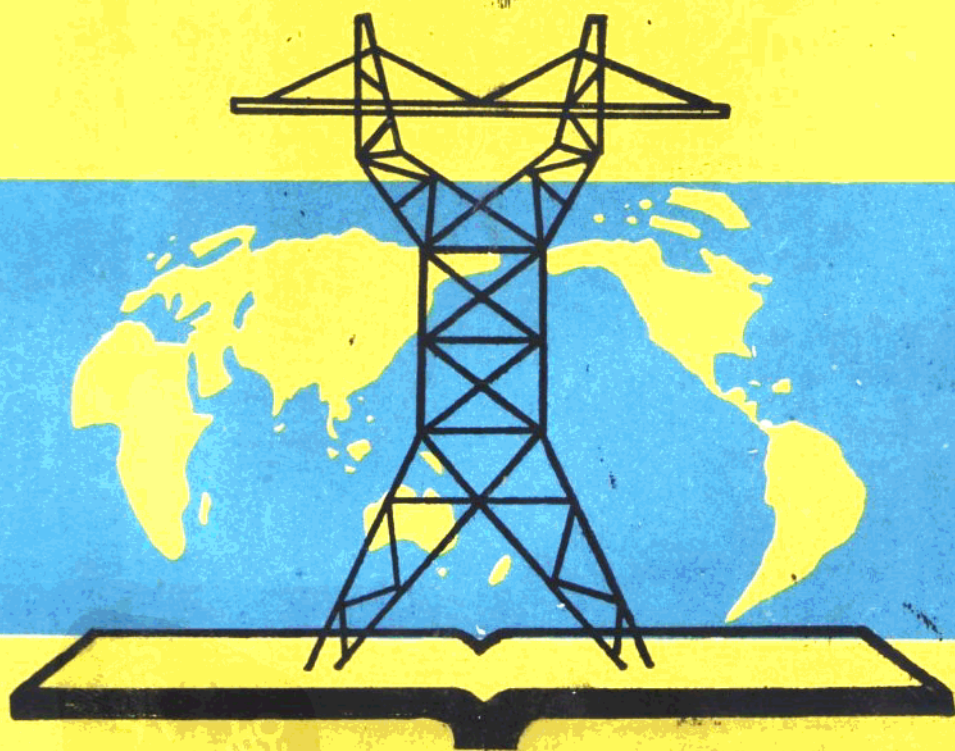


国外现代高压与超高压电力网

# 技术手册

第五卷



广西壮族自治区电机工程学会

72.1851  
9009995

# 国外现代高压与超高压电力网技术手册

## 第五卷

现代直流输电方式与运行经验

李桂中 吉多山 陈先禄 卢幸宁等 编译  
张宗鑫 游国权 卢延岳 审核

责任编辑： 华明 钟欣 岳园

广西电机工程学会

## 序 言

现代高压与超高压直流输电技术，在国外已有相当大的发展，取得了不少的成功经验，并向特高压直流输电迈进。为什么国外一些先进的工业国家关心、重视并积极建设与  
发展高压与超高压直流输电技术呢？！因为它具有很好的技术、经济优越性和效益，特别  
是在远距离输电情况下，就更加显得突出。

我国是发展中的社会主义国家，引进国外先进技术从中吸取先进经验是实现四化建设的重要手段之一。因此，在编译本书时，尽量挑选当前面临的实际问题，以利结合我国国情参考使用。

由于原文版本语言、文字简练，因而在编译中带来了颇大的难度；与此同时，又因时间紧迫，难免有不妥之处，为此恳望读者能提出宝贵意见，我们非常感谢！

如果说这本书能给读者们与同行们在工作上参考使用与解决一点实际问题，起到了一些社会效益的话，那么，我们就与您们一起共享工作上的快慰！

**编译者**

一九八七年十二月

## 出版前言

为了适应我国高压与超高压直流输电的建设与发展的需要,本学会根据美国能源部于1980年出版的《Incorporating Power Transmission into System Planning》一书及有关国外技术文献,组织有关专家、工程师、学者与教授编译《国外现代高压与超高压电力网技术手册》第五卷(也是本手册的最后一卷)《现代直流输电方式与运行经验》一书供技术交流与参考使用。

该书的第一章由李桂中同志编、译,第二章2—1节至2—5节由吉多山同志编、译,第二章2—6节、2—11节由陈先禄同志编、译,第二章2—7节由白云庆同志编、译,第二章2—8节、2—9节由何金良同志编、译,第二章2—10节由黄勇同志编、译,第三章由卢幸宁同志编、译。为保证本书质量,特请了科技界与学术界有关权威人士中国电机工程学会理事、广西电机工程学会理事长、原广西电力工业局总工程师张宗鑫高级工程师,广西电机工程学会副理事长,广西电力工业局副总工程师游国权高级工程师和广西电机工程学会秘书长卢延岳高级工程师进行了全面审核。

由于水平所限,经验不足,以及时间仓促,书中不妥之处在所难免,恳望读者与电机工程学会会员提出宝贵意见或指教。为此,本学会致以衷心感谢!

广西电机工程学会

一九八八年八月

# 目 录

## 第一章 总论

- 1—1 高压直流输电的基本理论……………( 1 )
- 1—2 1975—1978年世界高压直流系统的运行特性……………( 10 )
- 1—3 交、直流输电系统比较及其在系统规划中应考虑的事项……………( 27 )
- 1—4 交、直流互联的系统比较……………( 33 )
- 1—5 高压直流输电某些成本或效益估计……………( 45 )
- 1—6 比较交、直流输电方案时确定架空线路成本指数的方法……………( 52 )
- 1—7 长距离地下直流输电的技术经济评价……………( 62 )
- 1—8 关于负荷中心的高压直流输电规划……………( 72 )
- 1—9 高压直流联络线在电力系统互联中的作用……………( 76 )
- 1—10 对高压直流断路器的一些看法……………( 82 )
- 1—11 介绍拟建加州南部至山间电站的高压直流输电系统……………( 88 )

## 参考文献

## 第二章 直流输电技术几个问题

- 2—1 新型高压直流系统用于区域性功率互联的论证……………(101)
- 2—2 确定和比较交、直流输电系统方案的模型……………(108)
- 2—3 通过交流线路向直流线路的变换提高电力输送能力……………(121)
- 2—4 高压直流反馈联络线应用及其设计的若干问题……………(132)
- 2—5 在交流系统中模拟高压直流联络线的方法……………(138)
- 2—6 多端高压直流网络……………(149)
- 2—7 高压交直流线路电场效应的比较……………(162)
- 2—8 在特高压直流输电线路设计中电晕与电场效应的研究……………(167)
- 2—9 美国电力研究所的气体绝缘小型直流换流站……………(182)
- 2—10 高压直流断路器原型试验……………(188)
- 2—11 连接可控硅和二极管整流器的发电机—换流器组……………(194)

## 参考文献

## 第三章 直流输电的稳定性和输电能力

- 3—1 交流/直流输电系统配合动态控制提高输电能力……………(203)
- 3—2 包括高压直流输电在内能量系统的准同步频率的稳定性研究……………(212)
- 3—3 高压直流控制装置对低短路电流比值网络的稳定性影响……………(218)
- 3—4 高压直流系统在某些具体故障情况下的动态特性……………(233)

## 参考文献

# 第一章 总论

## 1-1 高压直流输电的基本理论

### 一、绪言

高压直流电力输送,是现代新增加的一种电能传输方式。第一条现代高压直流系统是在1954年投产运行,它是一条20兆瓦(100千伏、200安)长98公里在瑞典与哥德兰德(Gotland)岛之间的海底联络线。它利用汞弧阀作为换流器及(交流换直流及直流换交流)组,一直运行到现在。相形之下,在巴西的伊泰普系统,于1983年开始投入运行,输送电力为6300兆瓦( $\pm 600$ 千伏,2625安、双极),长800公里。它利用的是水冷可控硅阀。据目前统计有21个正要运行的直流输电系统,而且有8个以上在施工或交付投入直流系统使用。

尽管似乎看来目前交流应是电力输送的主要方式,不过,从1890年的情况来看,还不是象现在这样显著。那时,爱迪生的珍珠街配电站实际上是110伏直流,而且爱迪生和西屋在直流与交流输电之间的争论是激烈的(爱迪生主张直流是比较安全的)。同时,在1880年与1911年之间在欧洲安装的串联连接的直流电机的瑟里(Thury)系统至少已得到了承认。应当指出的是,它们与现代高压直流系统非常类似,因为它们具有的串联连接换流器跨接在联络线的两端。

对长距离架空输电线路或中等距离的海底输电来说,高压直流提供了节省投资的优越性,而且就“无损失”的基本概念而论,要经常在这些估算中提出。但是,有些运行对直流带来的优越性来说,值得考虑的有如下几点:

1. 非同步连接——两个互联的交流系统不需要同步。
2. 可控制性——电流或功率的数量级能调定与保持,而且也能调节来改善与交流系统有关的动态特性。
3. 可靠性——即使直流输电系统某一极发生故障(无论是正导线还是负导线),都可以利用大地回流承载健全极的电流。因此,能传输超过50%的额定功率(假设暂时超负荷)。对这些直流输电系统,是由换流器跨接的串联连接组成,在全系统电压下,如果出现由污染造成的闪络,那么就能实现在降低电压情况下运行。
4. 低短路电流——直流线路故障电流通过系统控制一般是每单位被限制在2。另外,借助于前述的非同步连接和可控制性的优点,直流线路不对互联的交流系统提供短路电流。

但是,直流系统也有如下的主要缺点:

1. 在换流器端接的设备费用是颇高的。
2. 无功功率需要量是高的——大约为各换流站兆瓦功率额定值的50%。
3. 产生电流谐波,而且必须从输入交流系统加以预防(如利用滤波器)。
4. 直流断路器仍在发展阶段,因此直流系统不能象交流系统那样成为“网络系

统”。

## 二、高压直流输电系统的元件

就检验直流系统的大量简单方法而言，都是研究通过单一直流联络线连接的两个隔开的交流系统。在图 1-1 中就说明了这种布置情况，在直流系统的两端所表示的桥形跨接换流器是作为可控电池的  $V_R$  与  $V_I$ 。这样，用集中电感  $L$  来代表输电线路，并忽略了系统电阻。于是，就有直流电流  $I_D$ ，并在系统稳态情况下。

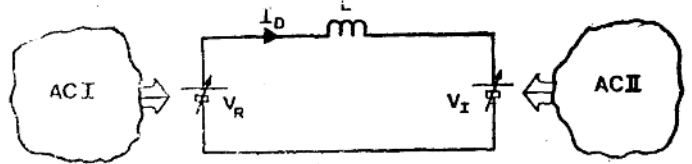


图 1-1 连接两个分开的交流系统的高压直流系统

潮流（即功率流动）是从左至右；而直流系统  $V$  则表示能源， $V_I$  即表示降落（即负荷）。这样， $V$  视为一种整流器，且正如任何整流器的情况一样，它可使功率从交流系统变换至直流系统。所以，这就要借助二极管来完成，但，由于可控性的原因，所以就要利用可控阀来代替完成。至于系统电感是确保相应脉动流畅直流电流  $I_D$ ，这样电流就完全迫使进入逆变器来抵制反电压  $V_I$ 。这种逆变器必须变换直流功率为交流功率与它的有关交流系统同步。对于可控阀的布置与决定整流器时相同，不过要把定时电流通入与原交流电压有关的三相系统中原有相。因此，整流器与逆变器是线路换向换流器；而交流系统电压必然出现，但不需要同步。

应当指出，在图中  $V_R$  与  $V_I$  之间要协调电流（或此时的功率）控制。一般说来，整流器控制电流，而逆变器却形成直流联络线电压（在异常情况下它们可以起交互控制作用）。在稳态情况下，由于阻性的线路压降  $V_R$  超过  $V_I$ （此时可忽略）。为了增加电流  $I_D$ ，则要增加整流器电压  $V_R$ ，在电感两端产生电压降，从而电流增加。根据达到新的电流水平， $V_I$  又恢复到它的先前值（ $=V_I$ ）。因此，它就能经受由于在整流器内电压相应微小变化而得到瞬时电流（或此时功率）的变化。就这点来讲，是颇为重要的。在直流系统中，能反应功率数量级变化是非常迅速的。例如，在太平洋跨越的验收试验上证实全功率的变换（由 440 兆瓦 北到南至 1440 兆瓦南到北）能在 300 毫秒完成。

在图 1-2 中表示出高压直流功率系统必须附加的部分。在直流侧，前面已叙述了谐波滤波器与无功补偿。不过，换流变压器要从直流系统隔开交流系统。而这种桥形电桥可以用串联或并联连接电桥

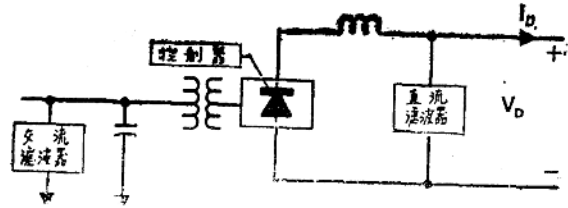


图 1-2 高压直流端接部分

表示，它决定于系统电压与电流。但是，则需要电桥与系统控制。应当指出，直流谐波需要滤除，作为平稳滤波电感线圈，用于脉动滤波与故障电流增加速率控制。显然可见，直流系统开关站或变电站要比它的交流系统开关站或变电站更加复杂。

## 三、高压直流硅可控整流阀

早先所具有的现代硅可控整流阀是汞弧阀，于 1954 年由美国工程师及建筑师学会

(ASEA)首创采用。这种阀制成后用在高压直流系统是完全可以行的，而且在1954年与1975年期间在12个系统中就有11个交付了施工与运行。

当前，在国外直流系统中，可控硅整流阀已代替汞弧阀作为变换装置。

在整个电气安装中，于1972年在伊里(Eel)河流域的高压直流系统首先应用可控硅整流阀。在魁北克水电站与新布伦斯威克(New Brunswick)发电厂之间，这种阀是一种异步连接方式，具有两个背对背的换流器端接，每个额定功率为180兆瓦、80千伏、2000安。正如图1-3所示那样，有8个40千伏电桥，各由1200个可控硅整流器组成。作为一个完整的单元，这些各自安装6个脉冲电桥，而不是6个独立的可看做是相同的阀(见图1-4)。这种最初的可控硅整流器电桥，与它的汞弧对方相比，并非明显小。但是，它是正应用在密集城市区域内小型气体绝缘换流站的先驱。

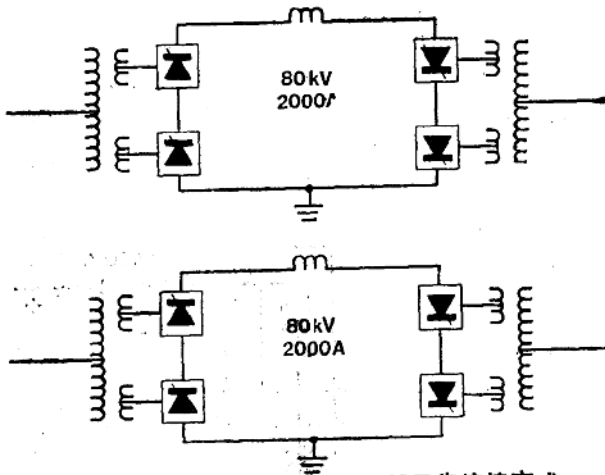


图1-3 伊里(Eel)河流域异步连接方式

所以，只要分析图1-4的电桥就会更加详尽。这里，备有一组6个脉冲桥形电桥布置，额定值为40千伏、2000安。这种6个阀在电桥内方式的各个额定值同样在40千伏、2000安。请注意，这是重要的一点，是指在精制性能方面上。假定在已定的定时阀1与阀2

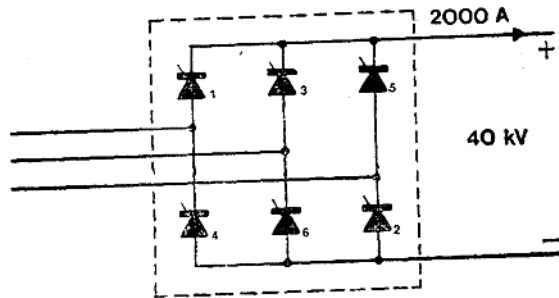


图1-4 六个脉冲桥形电桥

的瞬间是导通的，这时电桥输出电压(在这实例中它是一个整流器)为40千伏，该电压在阀4与阀5表显出反极性造成阀1与阀2“接通”(阀3与阀6分隔输出电压，使两者成“断路”)。因此，每个阀必须耐受额定的直流电桥电压，加上脉冲电压共达到约为15%外加的。这时，阀1与阀2在导通时的直流线路电流 $I_D=2000$ 安。但是，它们仅在120度时导通，这样它们工作在 $1/3$ 工作循环。事实上，它们的平均电流并不是2000安而是667安。当它们导通时，们就能承载2000安额定的电桥电流。



用于伊里河流域的这些可控硅整流器的阀，其额定值为2.6千伏、500安（平均值）。它们的配置必须满足40千伏、2000安（平均值667安）技术要求。而且必须无疑地是串联及并联布置。为了满足电压额定值，则需要50个串联连接可控硅整流器。同时，每个要耐受800伏，这样所提供的安全系数为3.25，才能抵住瞬变过电压，而且还要防备可控硅整流器故障。为了满足电流额定值，则需要有4个并联可控硅整流器分担667安的平均电流。这里每个要承载167安，以抵制500安的额定值，这样所提供的过电流安全系数为3.0。

应当指出，目前的可控硅整流器的工艺的状态已改善了性能。它们能耐压高达5千伏，一个单电桥由6个100毫米可控硅整流器组成能传递连续额定直流功率5兆瓦。只有比较少数可控硅整流器是这样需要给定功率额定值。不过，也要减少损耗。在换流站的总损耗大约是直流功率额定值的1%，约有损耗的1/3归因于可控硅整流阀（水冷却）。为了比较起见，约有一半的损耗由换流变压器所引起。这些阀约占换流站费用的1/3，而变压器约占1/4。

关于电桥布置，迄今已有6个脉冲电路。但是，在图1—3中考虑的闭路器，表示出与Y—Y/Y—△换流变压器（单初级，双次级）串联连接电桥成对。所考虑的这种电桥偶是一种单12个脉冲电桥，而且以后将表示出减少与直流系统有关的谐波电流问题。所谓单阀排列，根据已有的4个阀，现在就能组合成如图1—5所示的虚线部分。

#### 四、控制与保护

在图1—1中就已指出直流连接线由两个可控电压源组成，一个是整流器（ $V$ ）；一个是逆变器（ $V_1$ ）。这两种“换流器”是等同的，正如电流仅能在换流阀所标示的方向流动（见图1—4），在控制角接近 $0^\circ$ 时起动整流器，但另一方面，在控制角接近 $180^\circ$ 时起动逆变器。由于电桥电压为

$$V = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_1 \cos \alpha$$

从接近 $0^\circ$ 至接近 $180^\circ$ 变化 $\alpha$ ，则达到正极对负极电压的全程。所以需要增加一控制装置来形成一个可供使用的高压直流系统。

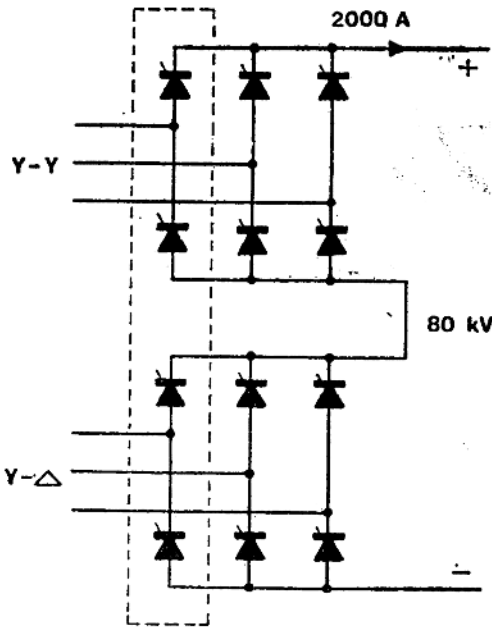


图1—5 12个脉冲电桥用在四端阀

图1—6则说明这种理想系统的运行特性。或称为 $V-I$ 曲线。如果逆变器所整定的系统电压在给定的水准上，就能变换整流器的起动脉（通过闭合回路控制），所以整流器电压是固有值，以形成所期望的电流。可见，在整流器内电流数量级任何变化都意味着整流器电压变化，不过，由于回路电阻是较小的，则仅需要整流器电压有较小的变化来达到系统电流大量变化，因此，就应具有“强增益”系统。

同样,对逆变器来说,通过操纵起  
动角 $\alpha$ 到逼近 $180^\circ$ 使之产生更高的可  
允许的 $V_D$ 值,来整定直流系统电压。  
这样就要利用本身绝缘的最大效能;  
对给定功率数量级来说,则相加,这  
样就使电流与附带的 $I^2 D R_D$ 损耗减少  
至最小值。

这种简化的控制系统,借助整流  
器与逆变器的特性立即到达限制所施  
加的影响。一般说来,当它们在起  
动时,通过整流器两端所具有的一些电压,整  
流器约有 $7^\circ$ 的最小 $\alpha$ 极限值便能在阀

上调节接通状态。这样,就给整流器电压给予了一上限值。事实上,整流器通常运用在约为  
 $15^\circ$ 的起  
动角,以便对可控制能力保留一些余度。在图1-7的整流器特性表示的是实际的  
特性。请注意,在垂直恒定电流部分左方负斜度,是由整流重叠所造成(正当电流在整流  
时电桥输出电压有损耗,在图1-4中表明来自阀1至阀3。那时电桥的上部点既不是在  
a相电压也不是在b相电压,但是在自从两个阀“接通”后之间的二分之一状态。这种电压  
损耗,是与换流变压器漏电抗乘上直流电流成正比。因此,这就有线性的负斜度)。

应当指出,在逆变器的情况下,  
就存在各种问题。首先是,起  
动角不仅需要与系统电压 $V_D$ 有关,而且也与  
整流余度有关。所以,它的临界重要  
意义,就是避免在接近零值电压跨接  
之前,起  
动阀3在周期之末而失去  
阀1,电流不能整流。当这种“整流  
失灵”出现时,电流返回阀1,反向  
电压消失,并且它通常所起的作用在  
一个全周期便达到恢复。因此,逆变  
器欲要在恒定的消弧角控制下运行,

就应设法在电流零值与后起的电压零值跨接之间保持有一定的余度(一般说来为 $15^\circ$ )。  
这样,通过合计等于整流时间的和加上 $15^\circ$ 期望余度,在 $180^\circ$ 点之前就必须起  
动逆变器阀。所以,逆变器的起  
动一般是在 $135^\circ \sim 145^\circ$ 之间,恰好离开 $180^\circ$ 。

在图1-7中也表示了实际逆变器特性,与整流器相类似它具有一个负斜度。它的格  
外特点是,已加上了电流控制段。实际上,在它的图例中说明了高压直流系统的变化性。  
通常,由于靠近交流系统故障,这就意味着整流器电压明显下降。如果没有逆变器特性的  
电流控制部分,即只是延伸直线至图中左侧,这样在图中就会没有整流器和逆变器曲线的交  
集。这时,整流器所供给电压将会低于需要施加电流进入逆变器的电压,请注意,于是使  
系统运行会逐渐变坏。在图1-7所示的特性情况下,逆变器将会取代电流控制,这样整  
流器会调整系统电压,并会按照图1-8所示的情况运行。在这种情况下,系统电压大致

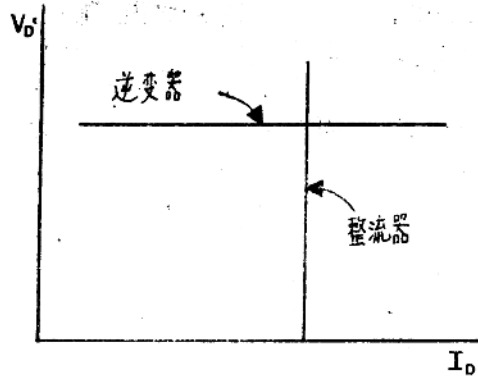


图1-6 理想化的换流器V-I曲线

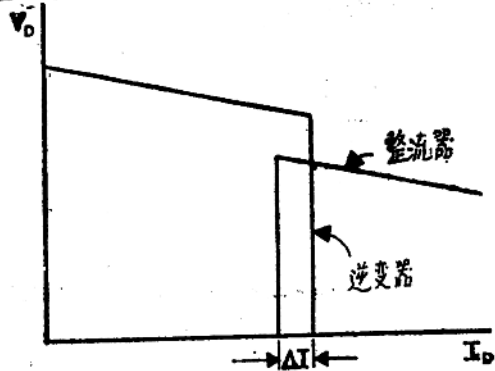


图1-7 在整流器控制电流时,正常换流器V-I曲线

与前述一样，而系统电流将会通过 $I_D$ 量减少，这样余度电流，一般为额定电流的10%。

正如直联联络线所介绍的动态特性那样，应考虑线对地故障的响应(见图1-9)。在故障前，电流 $I_D$ 存在于所有的4个换流器内。当故障发生在正极时，因为耦合行波的缘故，负极将呈现一些电压波动，但是，从一端到另一端按照以前状态它继续运行。此外，从 $V_{R2}$ 至 $V_{I2}$ 返回途径是通过大地。应当指出，在某一极发生闪络将不会另在一极上遮断功率。

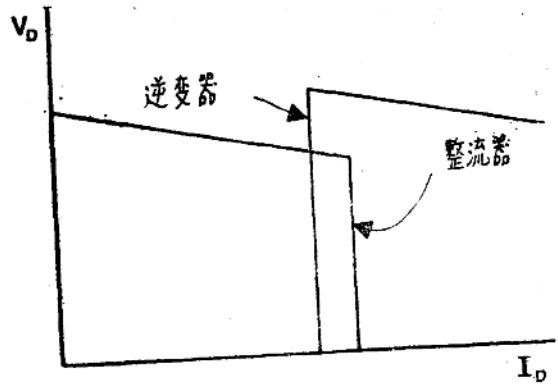


图1-8 在逆变器控制电流时，异常整流器的V-I线

在正极上的整流器通过注意整流器电流迅速增高来识别系统电压消失(这时整流器正馈入一个低阻抗故障，而不是逆变器的高返回电压)。而整流器通过反向接近 $\alpha=90^\circ$ 时才

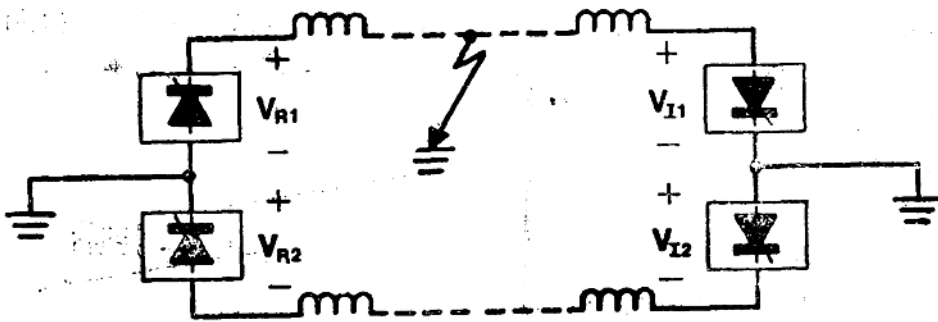


图1-9 在双极高压直流系统的正极发生故障

起反应，在电流开始增加之后，每单位出现约10毫秒时维持峰值整流器电位至约为2毫秒。为了减少这个整流器的电流达到它的整定值，这时暂时把整流器转入到反向、相反的极性。于是它就稳定在一些低正极电压，以使整流器电流成为故障前的 $I_D$ 。

另一方面，通过注意增加整流器电流而逆变器要经受系统电压的消失。它应根据图1-7的特性返回，变弱至零值电压，而实际上反极性(变成整流器)为的是保持它的期望电流 $I_D - \Delta I_D$ 。除非有其它保护作用，否则整流器与逆变器保持在接近零值电压按它们的特性遮断。这时，整流器电流为 $I_D$ ；逆变器电流为 $I_D - \Delta I_D$ ；而故障电流是它们的差为 $\Delta I_D$ 。

以上所述是用来阐述为什么会在双极高压直流系统控制回路发生，但是，实际上为了控制这种情况更加有效，所以才设计了起快速作用的线路保护。一般说来，按照电压导数或电压量测来检测故障。逆变器维持在反向，而整流器是驱入在反向。这样它们共同消除线路能量，恢复它到交流系统。于是能促使故障电流很快达到零值，不过对反电离与使电极又通上电流来说，只允许暂短的时间。应当指出，在证实所存在的永久性线路故障之前，可以着手若干重新启动，这时只允许负极运行。

由于在直流系统上的扰动从而对交流系统有影响。对这样检测、消除与重新启动的过程约占用0.5秒。在这个时间内，在两个交流系统之间要使功率中断，而最终系统摆动将与它们的功率转入直线联络线的百分率有关。此外，因为无功功率变化的需要，将会瞬间增加交流系统电压。

另一方面，交流系统的扰动，同样也会对直流系统起影响，不过，这个因素难已在逆变器出现。在交流电压骤降时需要整流及整流失灵增长时间来说，是一个影响。除非对邻近的平滑电抗器的电流限制影响，否则将会进一步加深扰动。因此，应要求大部分整流失灵是短暂的与自恢复的。

据早期对高压直流系统的实际情况所进行的咨询得知，已不对交流短路电流产生影响。同时，也正确的解释了直联联络线快速可控性能力对限制快速增长故障电流所起的作用。因此，可以通过直联联络线不需要使附近现有的交流设备超载，而把大量的功率输进市区范围内。然而，在交流输电的选择方案中，大概不会是这种情况。

### 五、无功功率与系统谐波

采用高压直流系统的一个固有结果，那就是直联联络线成为供应交流系统两端需要的无功功率。所需要的这种无功伏安(VAR)在两端一般为换流器兆瓦额定值的50%。所以，其补偿量是相当大的。为了检验这种需要量，应在交流与换流站的直流系统之间考虑功率平衡。一般说来，在交流侧的功率作为输送至换流器，则为 $\sqrt{3} E_{11} I_1 \cos \phi$ ；忽略整流重叠影响，直流侧的功率则为

$$V_D I_D = \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{11} \cos \phi \right) I_D$$

现在考虑的是功率变化。对于直流侧来说，那就要维持电流恒定在整定点上，这样任何功率变化，都会是起动机角 $\alpha$ 变化的结果。至于交流侧，线路电压是不能变化，而且两边电流值都不产生变化。这是因为阀充当开关，流通的交流电流要通过换流器，并到直流线路上作为 $I_D$ 。如果维持 $I_D$ 为常量，这时在直流侧上的 $I_1$ 也为常量。

不过，在这种方程中仅舍去 $\cos \phi$ 。因此，就能获得这样的重要结论，在直流侧功率变化导致电压变化；而在交流侧借助于 $\alpha$ 控制表达功率，则在电流与电压之间产生相位差。或者是，大概为：

$$\cos \alpha = \cos \phi = P_f \text{ (功率因数)}$$

在图1-10中说明这种情况。正如从交流系统所看到那样，换流器可作为欠励磁的同步装置考虑。这时，在其两端需要无功伏安（如果整流器起动机角与逆变器余度的角是相等的话，那么它能表示出，而且换流变压器具有相等的泄漏电抗；这时无功伏安需要量是相等的）。

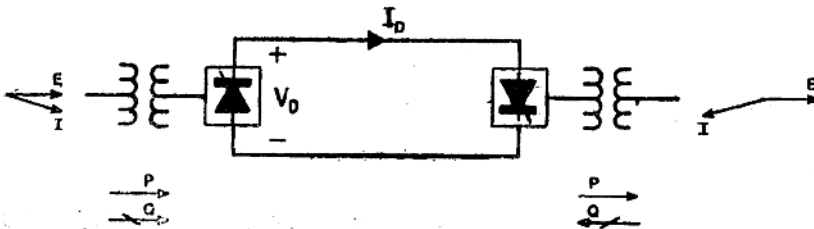


图1-10 交流侧对高压直流系统的相互关系

显然可见，无功分量的变化必然造成交流系统电压变化，而且必须补偿。在这方面，静态电容器是最简单方法，但是，它将降低系统抗扰性及产生谐振问题。虽然静态无功伏安控制器具有一个周波的反应时间，但是费用昂贵。另一方面，同步调相器虽能增加系统抗扰性，但是必须对其费用和运行维护加以考虑。同样，有可能在近处的发电机上产生激励振荡。最后，交流谐波滤波器在基频时提供容抗。通常，则需要对上述技术设施进行一些综合性考虑。

谈到高压直流系统第二个后果是，向交流系统注入谐波电波。而这些谐波电流是不希望有的。因为它们能造成发电机过热；它们能与系统谐波阻抗相互配合造成电压畸变；它们能造成控制系统不稳定；以及它们能产生与通讯系统的干扰。

按照图 1—4 在 6 个脉冲电桥时，图 1—11a 表示了在换流变压器初级内的交流电流。这种电流在  $120^\circ$  时是正确的，在  $60^\circ$  时消除；在  $120^\circ$  时为负，在  $60^\circ$  时消除。所以，可以忽略不计整流重叠影响。假定具有 1 : 1 变压器，Y—Y 或  $\Delta$ — $\Delta$ ，这时峰值电流为  $I_D$ 。为了平衡这样的波形，在这方面可能既不是偶次谐波（2、4……），又不是根据平衡的三相系统三次谐波（3、6……）。其它剩下的是基波、5 次、7 次、11 次、13 次等等。对于 6 个脉冲系统来说，可用 R—L—C 滤波器来表示这些谐波频率，如外加一个高通滤波器可用于 17 次及以上谐波。

在图 1—11b 中，可以看出交流线路电流相当于 Y— $\Delta$  变压器连接。对上述的在大小方面，这些谐波是等同的，但是与 5 次和 7 次有关的符号，则相反。在图 1—11c 中，亦可看出交流线路电流相当于图 1—5 所示的 12 个脉冲换流器。这种波形是平滑的，这时 5 次与 7 次谐波已不存在（正如了解到在 Y— $\Delta$  连接中所记录的符号相反），并且滤波是颇易的。应当指出，在这当中，对四极阀 12 个脉冲换流器的普及来说，是处于主要的理由。显然可见，可以预料到是优于电桥布置。

然而，在直流侧也存在谐波，在 6 个脉冲电桥时，即 6 次谐波的倍数；在 12 个脉冲电桥时，即 12 次谐波的倍数。所以，除需要谐波滤波器外，与平滑的电感线圈和冲击电容器（如果应用的话）一起把在直流线路上的谐波限制在最低程度。事实上，如果有一条长直流线路与平行的电话线路运行时，由于电感的耦合会足以造成干扰影响。

### 六、交流或直流系统动态

为了提供交流或直流系统动态的可控制能力，直联联络线控制系统的优点是能够利用。对于这个课题，本节仅能给予肤浅的论述，但是实例还从要实际系统得到，这样

也许会激起科技人员进一步弄明白的愿望。

就这个原理而言，是易懂的。言归图 1—1，根据来自交流系统误差信号，不是在整

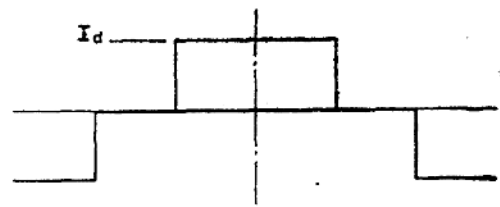


图 1—11a 6 个脉冲 Y—Y 电桥，交流电流

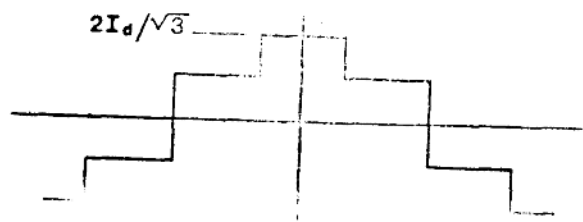


图 1—11b 6 个脉冲 Y— $\Delta$  电桥，交流电流

流器上变化电压，要不就是在逆变器上变化电压。例如，假定交流系统Ⅰ失去主要的（交流）相互连接，并开始摆动。这样，可检验系统Ⅰ与Ⅱ之间功率角的变化率，并注入功率进入Ⅱ内同步以阻尼摆动。

如果在系统Ⅰ与Ⅱ之间具有强的交流连系，则应用增强交流连系接近到它的稳定极限。例如，在太平洋高压直流联络线上调节3%的功率，就已使平行的500千伏交流联络线增加额定功率由2100兆瓦到2500兆瓦。

应当指出，在有自动电压调整器与系统负荷的情况下， $1/3$ 的负阻尼能在发电机之间的互连引起同时发生的振荡。对于直流调节信号是从直流功率传感器获得，通过滤波来得到适当的反应以支配 $1/3$ 赫兹频率，并施加到直流连接线电流调节器。图1-11示出现场试验结果，这些试验结果，是在当时的分路操作串联电容器补偿那点上在有与没有调节情况下得到的。在这方面，也尽可能应用交流电流而不是功率作为调节（误差）信号。就大量的摆动角而言，电流更加线性的，因此，当交流系统振荡接近稳定极限时会更加有效。

应当说明，它对所考虑到直流系统来说，能对变化的指令作出迅速的反应是有用处的。在具有代表性的10毫来时间恒定的情况下，能得到一个10%的电流梯级，且所得到的整流器全电压反向在小于 $1/3$ 周波之内。在起动下一个阀之前，正好按交流电压波向下浮动。为了用于功率调节，这个问题涉及的范围是由于检验与适当整流一个恰当误差信号而作出的。此外，根据稳定性研究，对该系统证实了高压直流是经济的。在这方面，直流连接线的价值不仅是它的可控制能力，而且事实上也是在整个直流线路上点对点的功率输送，而不是在整个比较弱的交流线路上周围漂移。

在该系统中，具有两条交流线路出现11赫兹同步谐振（汽轮发电机的最初扭振频率），由直流系统制动控制器与传感器激励。为了消除这个问题，就必须重新设计制动控制器，以使在开始动作时就较快的截止。

对提供交流与直流系统动态的可控制能力来说，在一些方法中可以利用高压直流连接线快速反应的性质。通常得到的范例有：

1. 使变为终端频率控制；
2. 负荷频率控制；
3. 交流电压升与降补偿；
4. 联络线路功率损失补偿；
5. 内区域振荡阻尼。

$$I_d (1 + 2/\sqrt{3})$$

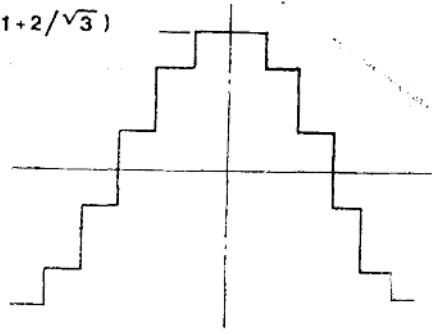


图 1-11C 12个脉冲电桥，交流电流

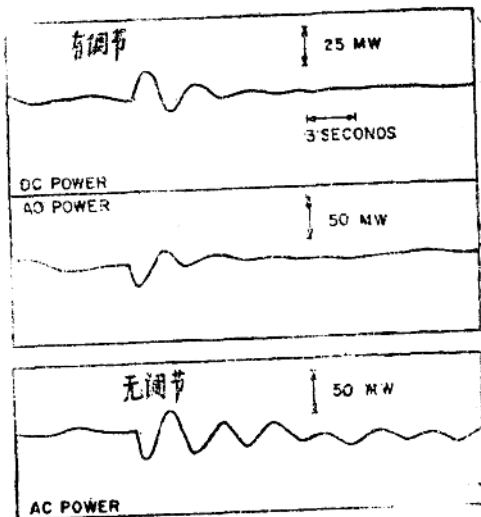


图 1-12 交流联络线串联电容器分路在有与没有直流调节的情况下系统反应

## 1—2 1975~1978年世界高压直流系统的运行特性

### 一、引言

就国外情况而言，自对一条高压直流输电线路所赢得的经验给予公认后，不仅对其它直流线路有借鉴使用的价值，而且国际大电网会议（CIGRE）研究委员会的工作组在六十年代后期按“高压直流系统的特性”这个范围制定了No.14“直流连接线”。另一方面，它授权调查的范围，其中包括对在工业系统使用的所有高压直流系统的运行经验，要承担集中搜集技术情报的义务。特别是要考虑到这样的情报资料能在设计、施工与新规划的运筹中对电力系统工程师们有用。此外，也可以预计运行特性那部分资料能对参与运行的现有高压直流系统有益。

为了提供这种情报，以及在国际大电网会议的早期报告，都对高压直流系统作了每年的详尽报告草案。应当指出，由于预料到高压直流输电已成为全世界都在关注的电力系统技术，这些报告草案皆都全面对照提出了考虑可行工作状况的估评，不仅对专家们在高压直流输电方面研究是一种有用的形式，而对非专家们也是如此。

应当指出，在这些报告中对时间与能量的定义，见本节的附录所述。

### 二、高压直流系统走向世界

就国外高压与超高压直流输电系统而言，从1954年开始至1985年为止已遍及全世界，正如图1—13所示，这里包括有在运行的、在架设的或现在考虑研究中的。应当指出，由于汞弧阀与可控硅阀的工作特性不同，所以在组成这些系统时应作以下的分析。

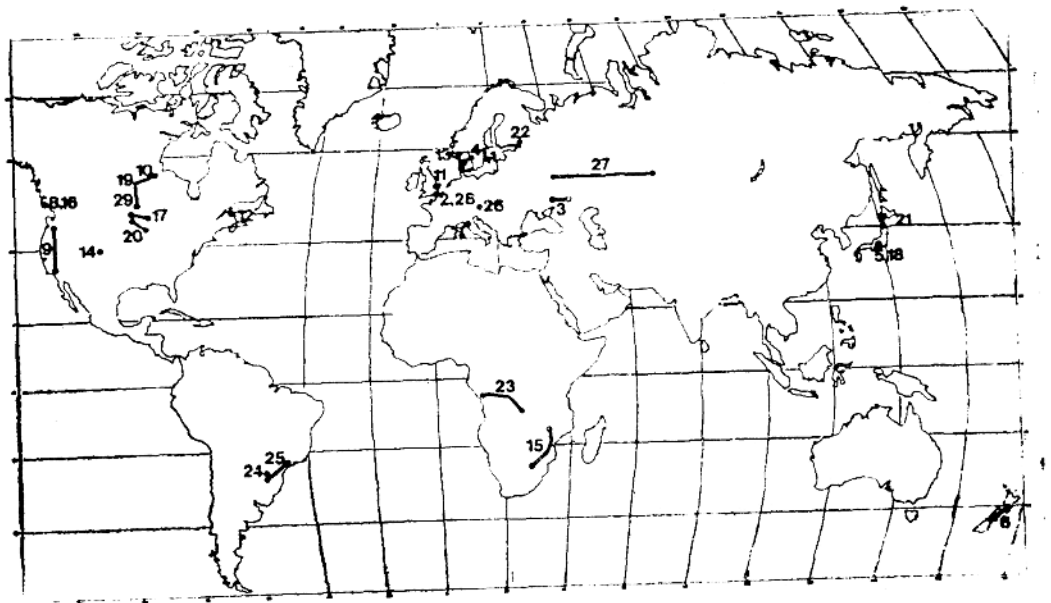


图1—13 国外八十年代中期高压直流系统概况

正如图1—14所示,于1979年末可控硅阀直流系统早已达到12000兆瓦整个安装容量的50%。而按照图1—13在八十年代中期作为可控硅阀直流系统安装的容量大约为20000兆瓦。对于可控硅阀技术的可靠程度来说,是基于这些直流系统运行的良好特性。

在表1—1中提供了汞弧阀与可控硅阀直流系统的换流器详细情节。

### 三、高压直流系统特性

在本节所表示的高压直流系统的主要运行数据,是参考有关图表而得出的〔2〕

#### 1. 能量利用

这里所讲的能量利用,实际上是输送在高压直流系统上的能量的量度。例如,这样能量利用已在表1—2中给出,它基于持续运行时的最大容量。当持续容量按照季节条件变化时,其最高值被用作额定值。但是,如果是过负荷运行,则限于一天,所以这种容量将被认为是非持续过负荷容量。在年内投产系统,其能量利用是根据投产后年的百分率。

一般说来,高压直流系统的能量利用,大量地决定于系统的需要。所以,低利用系数通常不是表示系统的低有效利用率。

应当说明,所有高压直流系统的平均每年能量利用大约为45%。对于各个系统一年一年地变化取决于需要与燃料供应情况,例如氢资源。应当指出,在这种场合,系统早已在运行与扩建,这时电力额定值会增长,但是这种利用百分率可以增加直到需要的增长为止。

#### 2. 能量有效利用率

除了由于一些预先安排或非预先安排的情况造成设备停电而使容量受到限制外,这里所讲的能量有效利用率是通过高压直流系统已能传输能量的量度。应当指出,高压直流系统的能量有效利用率是受下述因素的显著影响:

- (1) 系统设计,例如备用设备,主要加强影响(非定期的)非有效利用率;
- (2) 分阶段地扩建系统,以影响定期的非有效利用率;
- (3) 系统正在运行的设备,例如低等级的系统要求,除了最小时间外,它可允许经济地延长停电,加强影响定期非有效利用率。

在表1—3中,不仅介绍了整个系统能量有效利用率,而且也提供了不计入输电线路迫使的停电。不计入输电线路迫使停电的目的,是为了比较好的表示与高压直流变电站有关的设备的性能,正如有时输电线路被迫停电限制大量能量有效利用率,特别是在海底电

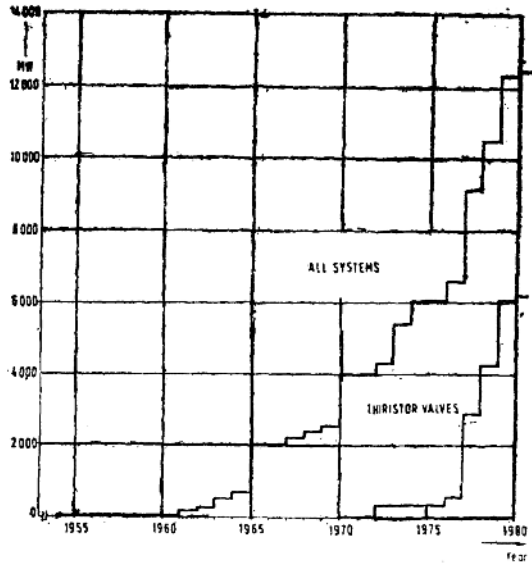


图 1—14 直到1980年为止国外高压直流系统整个安装容量的进展



表 1-1 1975~1978年国外高压直流系统换流器的详细情节

系 统	阀类型	阀绝缘	阀冷却	每极弧阳 极数	换流器 元件类型	每系统换流器 元件数	每换流器分路 电压(千伏)	每换流器分路 串联可控硅数	每换流器分路 并联可控硅数	每系统可控硅 总数	每可换元件 可控硅数
Volgograd-Doubass	泵 可控硅	— 空气	阳极: 空气 阴极: 油 水	1 —	6脉冲 6脉冲	15/14(2) 1/2(1)	100(1) 100	— 216	— 3	— 3888/7776(2)	— 108
Konti-Skan	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	4	6脉冲	4	125				
Sakuma	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	4	6脉冲	4	125				
New Zealand	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	4	6脉冲	8	125				
Sardina-Italian Mainland	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	4	6脉冲	4	100				
Vancouver Pole 1	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	4	6脉冲	4	130				
Pacific Intertie	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	6	6脉冲	12	133				
Neison River Bipole 1	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	6	6脉冲	6/10/12(3)	150				
Kingsnorth	泵	—	阳极: 空气 阴极: 水	4	6脉冲	6	133				
Eel River	可控硅	空气	空气		12脉冲	4	40	50	4	9600	40
Skagerrak	可控硅	空气	空气		12脉冲	2/4(4)	125	144	1	3456/6912(4)	6
David A. Hamil	可控硅	空气	空气		12脉冲	2	25	30	4	2880	40
Cabora Bassa-Apollo	可控硅	油	油		6脉冲	8/12(5)	133	280(192)(6)	2	26880/36096(5)	—
Vancouver Pole 2	可控硅	空气	空气		6脉冲	2(7)	140	180	2	4320	24
Square Butte	可控硅	空气	空气		12脉冲	4	125	144	1	6912	12
Shin-Shimano	可控硅	油	油		6脉冲	2(8)	125	192(8) 120	1(8) 2	2304(8) 2880	—
Nelson River Bipole 2	可控硅	空气	水		12脉冲	4(9)	125	96	2	9216	12

注: (1) 每换流器分路串联时两个换流器  
 (2) 第一个可控硅换流器元件投产: 74-04-10  
 第二个可控硅换流器元件投产: 77-04-12  
 (3) 换流器元件投产 (No.5): 76-04-01  
 换流器元件投产 (No.6): 77-06-09  
 (4) 电级投产 (No.1): 76-10-05  
 电级投产 (No.2): 77-09-09  
 (5) 第一阶段投产: 77-03-26  
 第二阶段投产: 78-04-16  
 (6) 在第一阶段时每换流器分路串联可控硅换流器的  
 数量 (280) 与在最后一阶段时的数量 (192)  
 (7) 第二阶段投产: 1979; 换流器元件总数: 4  
 (8) 在59赫兹侧 (值高) 与在60赫兹侧 (值低) 时  
 可控硅阀是不同的  
 (9) 在最后一阶段时换流器元件总数: 8