

高压直流输电

(电力工程专业教材)

张建明 孙岩洲

焦作工学院电气系

前 言

当代直流输电技术发展很快,到目前为止,世界上已建成和正在建设的直流输电工程大约近 70 个,已建成投运的约 50 个左右,经统计已建成的 48 个直流输电工程中大致可分为三类:第一类为背靠背直流输电工程,共 19 个,主要解决不同步或不同频率电网间功率的交换;第二类为输送容量在 500MW 以下的直流输电工程,共 10 个;第三类为输送容量较大的直流输电工程共 19 个,其中 500~1000MW 容量的 8 个,输送容量在 1000MW 以上的 11 个。

我国的葛—上直流工程已有 10 年的实践经验,并且创造了 1000 多天的安全运行记录,随着我国电力工业的迅速发展,尤其是长江三峡工程和小浪底工程的建设,更进一步促进直流输电技术的发展。

为了满足电力工科院校和电力输送系统人员的需要,本书对直流输电的特点、概况、原理、运行、保护、测试等方面作较为系统的叙述,并收集了 1996 年以前的国内外最新研究成果,以期能对我国的直流输电起一定的作用。

本书的第四、六章由孙岩洲同志编写,其余各章由张建明编写并最后统一修改。

由于编者的理论水平和实践经验都很不足,书中难免存在缺点和错误,希望读者批评指正。

编 者

一九九七年元月

目 录

第一章 直流输电概况	
第一节 直流输电发展简史	(1)
第二节 直流输电与交流输电的比较	(3)
第三节 直流输电系统的构成	(9)
第四节 直流输电的优缺点和适用场合	(12)
第二章 高压直流输电换流器的工作原理	
第一节 整流器的工作原理	(14)
第二节 逆变器的工作原理	(20)
第三节 多桥换流器	(25)
第四节 换流器的理论关系式	(27)
第五节 直流输电系统的等值回路	(31)
第三章 换流站及其主要设备	
第一节 概述	(35)
第二节 可控硅换流阀	(36)
第三节 换流变压器和直流滤波电抗器	(50)
第四节 直流系统中的谐波、滤波器和无功功率补偿	(52)
第四章 高压直流输电的运行	
第一节 直流输电系统的运行方式及运行特性	(63)
第二节 换流器的触发脉冲相位控制	(68)
第三节 高压直流输电的调节	(71)
第四节 直流输电系统的起停	(89)
第五章 直流输电的故障与保护	
第一节 故障电流的计算与控制	(93)
第二节 直流输电的过电流保护	(112)
第三节 直流输电的过电压	(116)
第四节 直流输电的过电压保护	(118)
第六章 高压直流输电的测试	
第一节 直流输电的测量设备	(122)
第二节 直流输电的试验	(128)

第一章 直流输电概况

第一节 直流输电发展简史

1954年,瑞典在本土和果特兰岛之间建成一条海底电缆直流输电线,它是世界上第一条工业性的高压直流输电线。70年代后期,可控硅阀代替了汞弧阀,加快了直流输电的发展。许多电力系统之间采用直流联网,以消除交流联网对安全稳定的威胁。如美国东西部电网,通过7个背靠背直流工程联网,美国与加拿大之间建起了安德涅—明波里、沙特圭—高坝和新英格兰至魁北克等直流联网工程;在欧洲、西欧与东欧间用3个背靠背直流工程联网,西班牙用背靠背直流工程与中欧联网,北欧同中欧,英国同法国以跨海直流工程联网。在亚洲,马来西亚东部与西部之间采用了直流联网,印度全国电网分为五大区,正在采用直流相互联网。由于采用直流联网大大提高了电网运行的稳定性。我国先有华中、华东电网葛上±500KV超高压直流联网;并正在筹建天广±500KV、1.8GW的直流联网工程,四川电网规划2000年前建设宝鸡至成都的±400KV直流联网工程,长江三峡初步讨论采用交直流混合送电的方式,左坪右坪各建一回±500KV直流输电线路回华东送电,每回输送容量为3000MW,线路长度达1000多公里。

目前多端直流输电技术已逐渐成熟。意大利到撒丁岛和柯西加岛的三端直流输电工程已于80年代投运;美国波士顿经加拿大魁北克到詹姆斯湾拉迪生的五端直流工程,全长1500公里,92年全线建成并投入运行。由于直流联网可以在中间建换流站抽取功率,这给直流输电的发展起到进一步推动作用。

到80年为止世界上已投运的直流工程大约20个,到95年世界已投运的直流工程达到50个左右,15年时间增加了2.5倍,可见直流输电工程发展之迅速。

下表列出世界各国直流输电系统的发展情况(根据国际大电网会议资料)。只包括已投入运行的。表1-1。

表1-1 世界各国直流输电一缆表

序号	工程名称	国别	功率 (兆瓦)	电压 (KV)	电流 (安)	线路长度 (Km)	阀型	投运年份
1	果特兰岛 ——瑞典本土	瑞典	20/30	100/50	200	96	汞弧 可控硅	1954/1970
2	英法海峡	英国 法国	160	±100	800	65	汞弧	1961
3	伏尔加格勒 ——顿巴斯	苏联	720	±400	900	470	汞弧	1962/1965

续表1-1

序号	工程名称	国别	功率 (兆瓦)	电压 (KV)	电流 (安)	线路长度 (Km)	阀型	投运年份
4	康梯——斯堪	瑞典 丹麦	250	250	1000	180	汞弧	1965
5	佐久间变频站 ——(50/60Hz)	日本	300	2×125	1200	0	汞弧	1965
6	库克海峡	新西兰	600	±250	1200	609	汞弧	1965
7	撒丁岛 ——意大利本土	意大利	200	200	1000	413	汞弧	1967
8	温哥华岛 I	加拿大	312	260	1200	74	汞弧	1969
9	太平洋岸联络线 I	美国	1440 2000	±400 ±500	1800	1362	汞弧 可控硅	1970/1974
10	伊尔河 (非同步联络站)	加拿大	320	2×80	2000	0	可控硅 风冷	1972
11	纳尔逊河 I	加拿大	1620	±450	1800	890	汞弧	1977
12	金斯诺思	英国	640	±266	1200	82	汞弧	1974
13	斯卡格拉克	挪威 丹麦	1000	±250	1000	240	可控硅 风冷	1977
14	斯提加尔(非同步)	美国	100	2×25	2000	0	可控硅 风冷	1977
15	卡布拉巴萨	莫桑比克 南非	1920	±533	1800	1414	可控硅 油冷	1979
16	温哥华岛 I	加拿大	370	-280	1320	72	可控硅 风冷	1979
17	斯夸尔比尤特	美国	500	±250	1000	479	可控硅 风冷	1977
18	新信浓(50/60赫 联络站)	日本	300	2×125	1200	0	可控硅 油冷	1977
19	纳尔逊河 I	加拿大	1800	±500	1800	930	可控硅 水冷	1985
20	CU工程	美国	1000	±400	1250	710	可控硅 风冷	1979

第二节 直流输电与交流输电的比较

一、直流输电所需的有色金属和绝缘材料可比交流线路节省三分之一

如下图 1-1 所示,直流线路可用两根导线,而三相交流线路则需用三根导线。

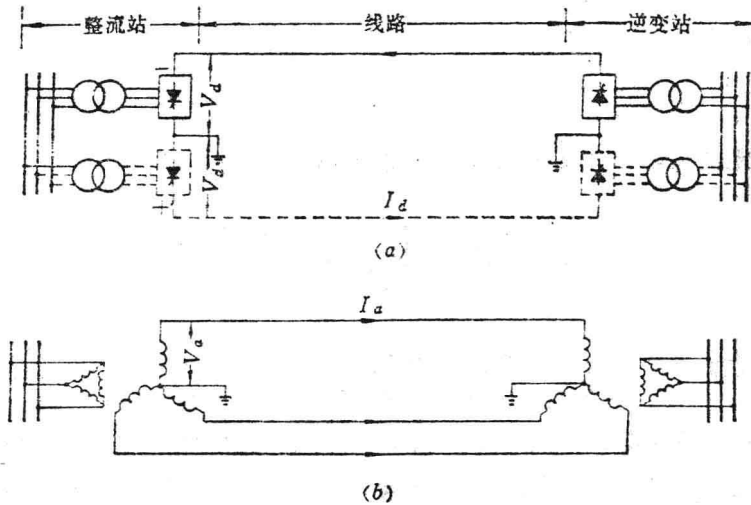


图 1-1 直流输电系统与交流输电系统的比较

(a) 直流输电系统图

(b) 交流输电系统图

如果每根导线具有相同的截面和绝缘水平,那么直流每根导线所输送的功率为:

$$P_d = V_d I_d$$

交流每根导线所输送的功率为:

$$P_a = V_a I_a \cos\varphi$$

其中 V_d —为直流线路对地电压;

V_a —为交流线路相电压有效值;

I_d 、 I_a —为直流、交流线路电流有效值;

$\cos\varphi$ —为交流线路的功率因数。

当两种线路采用相同电流密度时,每根导线载流量相等,即 $I_d = I_a$ 。

如果交流和直流线路所需的绝缘水平按过电压倍数而定,分别为 $\sqrt{2} K_a V_a$ 和 $K_d V_d$,对于超高压架空线路,交流线路过电压倍数取 2~2.5,而直流线路则约为 2,(这是因为交流线

路的能量动荡比直流线路更为剧烈所致,并为实际测量所证实),作为一次近似假定过电压倍数 $K_0 = K_a$, 因此当线路具有相同的绝缘水平时,则有

$$V_d = \sqrt{2} V_a$$

所以

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{V_d I_d}{V_a I_a \cos\varphi} = \frac{\sqrt{2}}{\cos\varphi}$$

在交流远距离输电的情况下, $\cos\varphi$ 一般较高, 取为 0.945, 则

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{\sqrt{2}}{0.945} = 1.5$$

若设交流一根导线所输送的能量为单位 1, 则三根导线则为 3, 而两根直流导线所输送的能量亦为 $1.5 \times 2 = 3$, 也就是只有根据导线的直流线路所输送的总功率和三根导线的交流线路输送的总功率相等。因此单位长度的直流线路所需的有色金属和绝缘材料可比直流线路节省三分之一。如果采用架空线, 直流线路的杆塔荷载较小, 线路所需的走廊也较窄。

反过来也可以说, 如果线路建设费用相同, 直流线路所能输送的功率约为交流线路的 1.5 倍。

另一方面, 由于直流线路少一根导线, 在输送功率相同的条件下, 直流线路导线电阻的功率损耗也比交流线路少三分之一, 况且, 由于集肤效应, 大截面导线的交流有效电阻比直流电阻略大, 两者的损耗就相差更远。

上述是直流线路的建设费用和运行费用比较经济的基本原因。此外架空线路和电缆还有各自不同的特点。

二、交流与直流架空线路的差别

在导线表面电场强度相同时, 直流线路年平均电晕损耗大约仅为相应的交流线路的 50~65% 左右, 这主要因为直流和交流的电晕机理不同(参看高压技术), 而且在恶劣气候下, 直流电晕损耗要比交流小得多, 因而由电晕引起的无线电干扰交流也比直流强得多, 造成的环境污染就更为严重, 在输电压不断提高的情况下, 这一问题就显得非常重要。

直流线路导线之间和导线对地之间虽然也存在着电容, 但由于直流线路在正常运行时电压纹波很小, 所以基本上没有电容电流。而对超高压远距离的交流输电电路存在着很大的电容电流。当线路输送的功率不等于自然功率时, 由于电容效应, 在线路轻载的情况下, 线路靠近受端的电压可能升高到不允许的程度, 而须用并联电抗器加以补偿, 而在重载时又得退出电抗器。直流线路不存在这种问题, 沿线电压较平稳。

如图 1-1 所示, 直流线路可利用大地或海水作为回流电路, 当双极电路中有一个极因

障检修而退出运行时,或在单极线路中,大地或海水回流电路将通过全部直流电流,此时要在大地或海水中设置电极,这部分费用在整个线路造价中只占很小的部分。

这里要注意的是,直流电流在地中流动时对沿途的金属构件和管线有电解腐蚀作用,应采用一定的措施加以减小和防止。另外用海水作为回路时,要注意海水电极附近海洋生物的保护(海底单芯电缆上方船舶磁罗盘也会受到干扰,但一般不至于成为问题)。交流电路则不允许用地作为三相中的某一相作为回流电路运行,因为这对通讯线路的干扰超过允许水平,而且三相阻抗的不同将使交流电力系统变得不对称。

由于直流线路的导线少,其架空线路绝缘子的数量也比交流线路少,因而发生故障的机率也相应地减少。

当直流线路一个极发生持续性故障时,可利用另一个健全极和大地回流电路输送原来功率的一半。

三相交流电路如因故障断开一相时,不能长期非全相持续运行,如要保证不间断供电,就需架设双回路线路。

三、直流与交流电缆的差别

电缆的绝缘在直流电压和交流电压作用下其电位分布、极化损耗都有很大的区别,以同样厚度的油浸纸绝缘电缆为例,用于直流时的允许工作电压大约是交流下的3倍。因此在有色金属和绝缘材料相同的条件下,两根芯线的直流电缆线路输送的功率比三根芯线的交流电缆线路输送的功率大得多。在一些工程中曾考虑把原有的交流电缆改用于直流,输电能力可提高1.8~2.5倍。因此,在跨越海峡等必须用电缆线路输电的情况下,如果采用直流输电,线路部分的造价可比交流线路低得多。

当电缆用于直流时,基本上只有电阻损耗,而当用于交流时还存在介质损耗和感应损耗,因此绝缘的老化也比用于直流时快得多,直流电缆的年运行费用要比相应的交流电缆低得多。

另外,电缆线路的电容要比架空线路大得多,因此超高压电缆单位长度的交流电容电流很大,对交流220KV电缆线路,每相每公里达23A左右,当电缆长达40KM时,每相电容电流可达950A,几乎占用了芯线的全部载流容量,因此电缆存在极限长度,有的情况下在中途采用并联电抗器补偿又有实际困难、因此较长的海底电缆用交流输电实际上是不可能的,而用直流电缆线路就比较适宜。

四、两端设备

直流输电系统两端的换流站设备比交流输电系统中的变电所复杂,其中主要是换流器和谐波滤波器,所以它的造价比交流变电所要高。

换流器 70年代以前都采用汞弧换流器,以后多采用可控硅换流器。目前还比较贵,但可控硅换流器的造价随着电子工业的发展有不断下降的趋势。

换流器的过载能力较小,而且对于过电压也较敏感,但采取有效的保护措施后,它的可靠性也不断地提高,例如对于伊尔河工程,1974~1975年间,一个实效运行月(30×24小时)可控硅元件损坏率仅为0.004%~0.005%。采用可控硅阀的直流输电系统目前已有相当高

的可用率。

滤波器 换流器在运行中会在交流侧和直流侧产生谐波电压和谐波电流，特别是在和直流系统相连系的、而且延伸很广的交流系统中，这些谐波将使电力设备产生额外损耗而发热；对直流和交流线路沿线附近的音频通讯系统产生干扰；还可能引起局部谐波过电压。为了减小交流电网的谐波、换流站的交流侧要安装滤波器（交流滤波器中的电容器同时也能供给一部分无功功率）。而在直流侧的主电路中必须串联电抗器作为平波之用，有时也要加装滤波器。

无功补偿设备 直流线路本身在运行中不需要无功功率，而两端换流器在运行中需要较大的无功功率，在正常额定情况下运行时，换流器所需的无功功率约为直流功率的 40~60%，一般整流器所需的无功功率比逆变器稍小一些。除了交流滤波器中电容器能提供一部分无功功率之外，有时还需加电力电容器和同步调相机，整流站的无功功率有一部分可由发电机或系统供给。

当交流输电线路的输送功率超过自然功率时，需要在线路两端安装无功补偿设备，或者在线路中串联电容器，以补给线路的无功功率损耗，当负荷小于自然功率时，又要在线路两端安装同步调相机、并联电抗器来吸收多余的无功功率。

交流输电和直流输电都需要可调节的无功功率电源，但是直流输电两端所需的无功功率只随输送功率大小而增减，和线路长度无关。交流输电线在额定情况下运行所消耗的无功功率大约为 28 兆乏·兆瓦·公里，线路愈长，则所需补偿的无功功率愈多，经过实测人们得出，当线路长度超过 400~500 公里时，交流输电所补偿的无功功率将超过直流输电所要补偿的无功功率。

五、等价输电距离

直流输电和交流输电相比，虽然建设换流站的费用比建设变电所的费用要高，但建设直流输电线路的费用却远低于交流线路，当线路达到一定长度时，交、直流输电系统总的建设费用相等，这一输电距离称为交、直流输电等价距离。如图 1-2 所示。

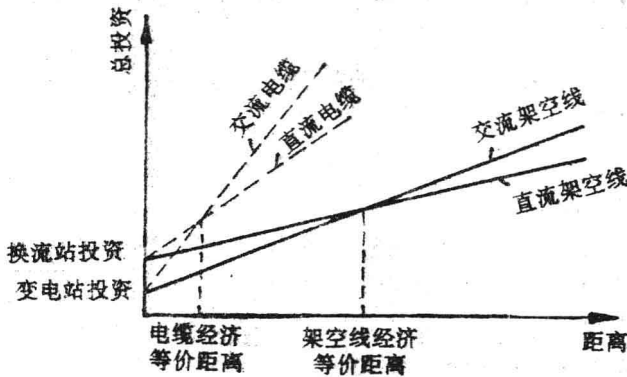


图 1-2 直、交流输电费用和输电距离的关系

到 1994 年为止，国外统计结果认为，对于架空线路来说，等价距离约 700KM，而且随着

电子工业的发展,等价距离在逐年下降。而对于电缆输电来说,等价距离大约在 56~90 公里之间。而海底直流电缆单位长度的费用比海底交流电缆单位长度的费用低得多,它的等价距离则为一般电缆线路的一半。

六、潮流的调节

我们从交流电力系统分析中得知,当送端系统向受端系统通过交流输电线路送电时,输送的功率为

$$P = \frac{E U}{X_{\Sigma}} \sin \delta \quad (1-1)$$

其中 E—为送端发电厂的等值电势;

U—为受端系统的等值电势;

δ —两个电势之间的相位差,又称功率角;

X_{Σ} —为两个电势间的总等值电抗,包括发电厂、线路和变压器的电抗。

我们知道 E 和 U 受到额定电压的限制是不能大幅度调节的,即使大幅度调节也只能在短时间内使输送的有功功率有所改变而最终的结果只是改变了无功潮流。要改变有功功率只能改变功角 δ 的大小,也就是调节输入到发电机转子的机械功率,而由于转子的机械惯性改变功角 δ 是需要时间的,因此交流输电功率的调节是比较缓慢的。

直流输电线路输送的电流和功率由整流站电压、逆变站电压和直流线路的电阻所决定的,如图 1-3 所示,即

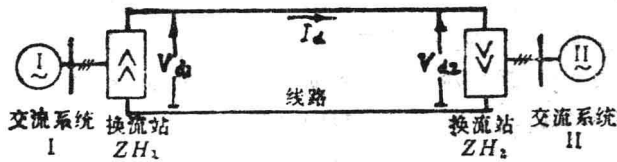


图 1-3 直流输电示意图

$$P_{d1} = \frac{V_{d1} - V_{d2}}{R} V_{d1} = I_d V_{d1} \quad P_{d2} = I_d V_{d2}$$

其中 V_{d1} —为整流站电压(换流站);

V_{d2} —为逆变站电压(换流站);

R—为线路电阻。

它所输送的功率与两端交流系统的频率和电压相位完全无关。直流线路电压的变化不会直接影响系统中交流电力设备的运行电压,也不会像交流线路那样受较大的限制,只有不

超过允许的最高电压都可以根据需要加以改变,以调节直流线路的电流和功率。另一方面两端直流电压的变化是通过换流站中改变换流器的触发相位来实现的。调节器的时间常数较小,因此直流线路电流和功率的调节过程较快。

调节直流线路功率时,发电机可以不必立即承担全部的功率变量,只是使两端系统中发电厂负荷和频率改变到新的平衡状态,一端系统频率升高,另一端系统频率降低;然后两端交流系统可各自改变发电厂的输出功率使频率恢复。

直流输电系统的调节方式是很多的,既可按直流电流、功率或电压等参量来调节,也可按交流系统的频率、电压以及输电线功率角等参量来调节,还可用其它参量组合进行调节。

七、运行的稳定性

在交流电力系统中,所有接在电力系统中的同步发电机都要保持同步运行,不但电力系统受到小的扰动时,电机要保持同步,称为静稳定;就是受到大的扰动亦要保持不失步,称为动稳定。由于交流线路具有电抗,输送的功率有一定极限,由公式 1-1 可知,当 δ 达到 90° 时输送功率达到最大值,即

$$P_n = \frac{EU}{X_\Sigma}$$

当 $\delta > 90^\circ$ 时, $\frac{dp}{d\delta} < 0$, 失去保持同步的能力,这也称为静稳定极限,电网最低限度也要满足静稳定的要求。从上式可以看出,线路越长, X_Σ 就越大,稳定极限也就越小。为了提高静稳定极限必须采取一些措施,例如用串联电容器补偿线路电抗,但这样就相应增加了投资。图 1-2 中用虚线表示交流输电超过一定距离时为提高静稳定措施所增加的费用。

如果采用直流输电线联接两个系统进行输电,由于直流线路没有电抗,所以不存在上述的稳定问题,因而直流输电不受距离的限制,还可以用来联接两个不同频率的系统。目前国外用所谓变频站或曰非同步联络站把两个不同频率(50 和 60 赫)的系统联系起来实际上就是线路长度等于零的直流输电系统。由此我们也可以推论得出,当水电厂、潮汐电站或者抽水蓄能电站用直流线路与 50Hz 的交流电网相连时,这些电厂可以根据不同的工况和不同的水头,采用较为经济合理的频率和转速,以期取得最佳效益,而无须局限于工频。

八、限制短路电流

如果用交流输电线联接两个交流系统,将使短路电流增大,有时增大到超过原有断路器的遮断容量,这就要更新设备。而如果用直流输电线联接两个交流电网时,由于直联联络线的电流能按给定值迅速加以控制,因此两个系统各自的短路容量不会因为互联而有明显的增大。而且当直流线路发生短路故障时,同样也可通过整流器的调节来限制短路电流。在直流线路电容放电电流消逝之后,短路电流的峰值一般可控制到为线路额定电流的 1.7~2 倍,这时整流器向送端交流系统汲取的短路电流也和上述倍数相当。逆变器则不会向交流系统汲取短路电流。

另外直联联络线的投入不存在同期问题,不像交流输电线在合闸时,必须考虑到如果发

生非同期合闸可能带来的问题。

九、直流断路器比交流断路器难于制造

由于直流电流不过零点,熄弧困难,这就给直流断路器的制造带来一定的困难,目前把换流器的控制脉冲信号闭锁,能起到部分开关功能的作用,但在多端供电时,就不能单独切除故障线路。

目前世界上正在研制的高压直流断路器的灭弧方法有多种,主要可分为三种方式:一是迭加振荡电流方式,利用电容器通过开关触头间弧道放电产生振荡电流,迭加在将要被断开的直流电流上,使弧道中的总电流能有经过零值的机会,从而实现灭弧。二是耗散电弧能量限流断弧方式。三是磁场控制气体放电管断流的直流断路器形式。

根据巴西伊泰普直流输电工程介绍,目前世界上正在研制或已投入使用的高压直流断路器共有七种类型,它们的工作原理都基本相似,现以我国葛洲坝换流站使用的日立公司研制的 MRTB 型直流断路器为例来说明其基本原理。其断路器电路图如图 1-4 所示。

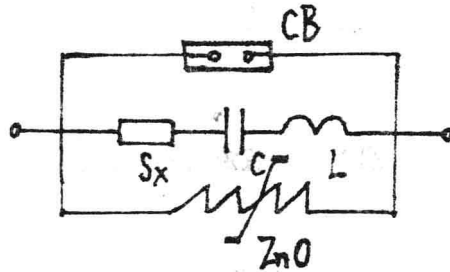


图 1-4 MRTB 型直流断路器电路图

其中 CB 为空气断路器(也有的制造厂用油浸式断路器或 SF₆ 断路器的),L-C 转换电路自然频率约 7KHZ,通过 S_x 触发式火花间固定的跨接在 CB 上,ZnO 为氧化锌避雷器。

当 CB 触头打开并产生电弧时,触头间电压开始上升,S_x 投入,C-L 通过弧道形成振荡电流,叠加在原有电流上。当过零时 CB 灭弧成功,当 L-C 电压达到 ZnO 动作值时此时电流转移到 ZnO,由于氧化锌避雷器接近理想阀体而达到泄流的目的。这台断路器在 89 年调试过程中,曾发生过断路灭弧不成功,90 年进行了改进,从这几年的运行实际情况来看,该断路器在不停电实现运行方式转换时使用过多次,成功率达 100%,但是只是在小负荷的情况下(300MW 左右),大负荷情况下能否成功,有待于在实践中进一步考验。

第三节 直流输电系统的构成

首先,我们熟悉一下直流输电主回路图,如图 1-5 所示。

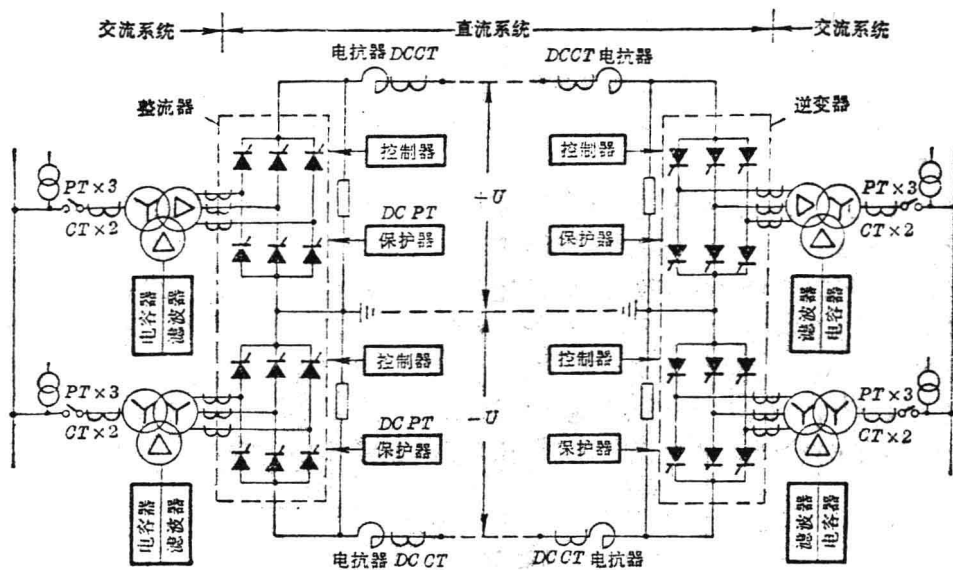


图 1-5 直流输电主回路图

一、两端直流系统

它的构成有单极、双极、无直流线路三类。

单极系统

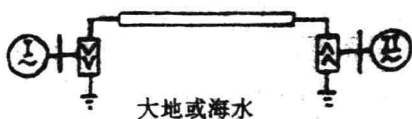


图 1-6 单极一线地制

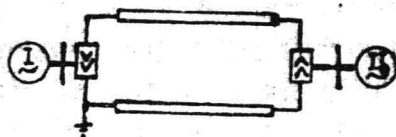


图 1-7 单极两线制

此系统利用大地或海水作为回流电路，单极线往往以负极性运行，因为负极性架空线路电晕对无线电干扰较小，气隙击穿电压较高，而且受到雷击的机率也稍小，采用该接线的工程有：果特兰岛，用海底电缆向海岛输送电力；康梯—斯塔，撒丁岛、温哥华岛。

为了避免回流电路中的电流引起电解腐蚀等问题，有的工程中用低绝缘的导线作为回流电路，形成图 1-7 的单极两线制系统，这种系统只有一端换流站有接地点，用以固定直流系统中的线路和设备的对地电位。采用该接线方式的工程有北海道—本州。

双极系统

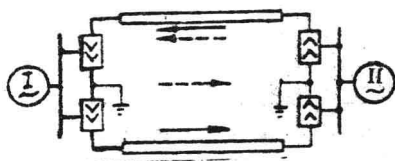


图 1-8 双极两线一地制

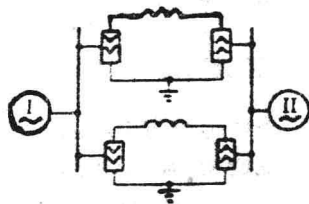


图 1-9 非同步联络站并联型

图 1-8 的双极两线一地制在正常运行时两个极的电流方向相反大小相等,大地回路中无直流电流,由于两极之间的电位差相等,故换流站的接地点也可称为中性点。应用此接线方式的工程较多,如中国的葛州坝—上海,新西兰,太平洋岸联络线,温哥华岛(I期),CU工程,纳尔逊河等。

为了避免大地回路引起的问题,把图 1-8 电路取消一端换流站的接地点就成为双极两线制,英法海峡线路就采用这种接线方式。

如果把图 1-8 电路再增设一条低绝缘线作为回流电路,即成为双极三线制,它们的一端接地点仅作为固定对地电位之用。采用这种接线方式的有北海道—本州。

没有直流线路的非同步联络站。

因为没有线路,故直流系统可选用较大的电流而可选用较低的额定电压,这时有色金属的消耗和电能损耗的增加都有限,而对于换流器和其中的元件也不过将原来的串连改为并联而已,但是整个直流系统的绝缘费用可降低。联络站的连接有串联和并联两种,如图 1-9 和 1-10 所示。

采用图 1-9 接线方式的工程有:伊尔河、斯蒂加尔,它们联的是同频率不同步的两个系统。还有新信浓,它联的是不同频率的两个交流系统。

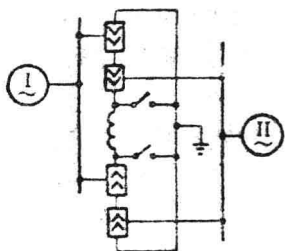


图 1-10 非同步联络站串联型

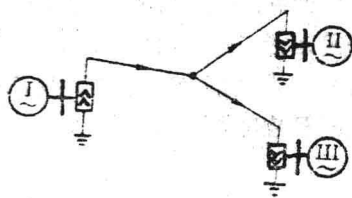


图 1-11 并联型多端系统

采用图 1-10 连接方式的工程有佐久间(不同频率用),在串连型中,分别连接到两个非同步交流系统的换流器可以交叉串联,在这样的直流系统中,除了换流器外,绝大部分电路等于或接近于地电位。绝缘费用更省,并可共用一个平波电抗器,它与并联型比较起来缺点

是当一个换流器故障时整个直流系统就要受到影响,而并联没有这种不便。

二、多端直流系统

联系三个以上交流电网的直流系统,称多端直流系统。根据换流站在直流电网中的连接方式可分为串联和并联两种型式,我们举两个较简的例子,其余读者可类推。

如图 1-11,各换流站通过直流电网并联,在同一直流电压下运行,电网可以是树枝形或环形结线,各换流站之间的功率分配主要靠改变各换流站的电流来实现。其中除了一个换流站之外,其余的各站均按需要或予定的电流运行,而由一个换流站为承担电流的平衡和电压的调节。在直线路发生故障时,换流站调节装置可将线路电压降低到零,以消除故障,然后自动再启动,这段过程所需时间与交流系统重合闸差不多。如果用直流断路器来切除故障,当然可以处理得更快一些,但各换流器也应做相应的调节。如果系统中某一个换流站要改变潮流方向时,(即把整流变为逆变或反之),必须把整流器的两端倒过来再接入电网,这是很不方便的。

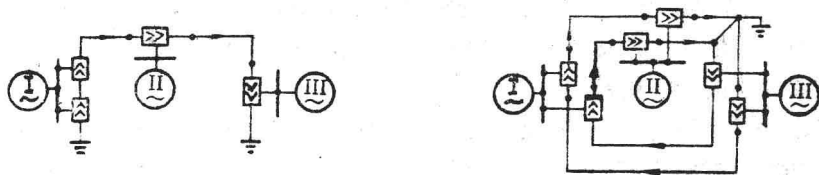


图 1-12 串联型多站系统

如图 1-12,各换流站以同一直流电流运行,各换流站的功率分配主要靠改变换流器的直流电压来实现,一般由一个换流站来承担整个电路中直流电压的平衡,同时也起调节电流作用。当线路发生故障时,由各换流站将直流电压调节到零。以消除故障,若永久性故障,则系统不能运行,串联系统不需要直流断路器。

当串联系统某一换流站要改变潮流方向时,不必改变结线,只需调节换流器,改变它的直流电压极性即可实现。

第四节 直流输电的优缺点和应用场合

在前面的直流输电线路与交流的比较中,对直流输电的优缺点已有所了解,现总结如下。

优点:

- (1) 线路在稳态运行时没有电容电流,沿线电压分布平稳,线路不需无功补偿。
- (2) 在同一电压等级下,直流比交流电晕对无线电干扰要小,落雷概率也小,所需绝缘

水平亦较低。

(3) 直流线路的短路电流较小,用以连接两个交流电网,短路容量增加甚微。

(4) 直流线路造价低,杆塔简单,所需走廊较窄,线路损耗较小,运行费用省。

(5) 直流线路两端交流系统不需要同步或同频率运行,输电距离不受运行稳定性的限制。还可以用来提高与直流线路并列运行的交流输电系统的稳定性。

(6) 每个极可以作为一个单独回路运行。当一个极故障时,健全极仍可送一部分功率。换流器可以分期投资和建设。

(7) 电流电压变动灵活,可作较大幅度的调整,当用以联系两个交流系统时,可避免大面积停电事故的发生。

缺点:

(1) 换流器较贵:换流器在运行中需要较多的无功功率,并要装设滤波装置,而且换流器的过载能力小。

(2) 直流断路器制造困难。

(3) 以大地作为回流电路时,对沿途金属构件会产生电解腐蚀。

高压直流输电的主要应用范围

(1) 海底电缆送电。这一点很重要,因为如果用交流电缆送电,因为交流电缆的电容大,波阻抗很小,因此电缆只能在小于自然功率的情况下运行,这就要在沿途安装大量的电抗器来进行补偿,这显然是办不到的。

(2) 长距离大功率送电。

(3) 非同步或不同频率联线。

(4) 为了提高稳定性不增加短路容量两个交流电网相连。

(5) 用电缆向用电密度高的城市送电。

第二章 高压直流输电换流器的工作原理

第一节 整流器工作原理

用于高压直流输电的换流器都采用三相桥式接线方式,为了抑制直流过电流的上升速度和直流侧谐波,并使轻载时直流电流保持连续,在换流器的直流侧都装有直流电抗器,亦称平波电抗器。

为了阐明换流器的工作原理,我们做如下的假设。

- (1) 直流平波电抗器的电感很大,因此直流侧输出电流中的波纹可以略去。
- (2) 六个阀以 $1/6$ 基波周期的等相位间隔依次轮流触发。
- (3) 忽略可控硅元件的管压降和断态漏电流。
- (4) 不计整流侧负荷对交流侧电压的影响,交流系统的频率和幅值都是恒定的三相对称正弦电势源。

整源器的原理接线图如图 2-1 所示,图中的等值电感 L_r 是从电势源到交流桥的每相

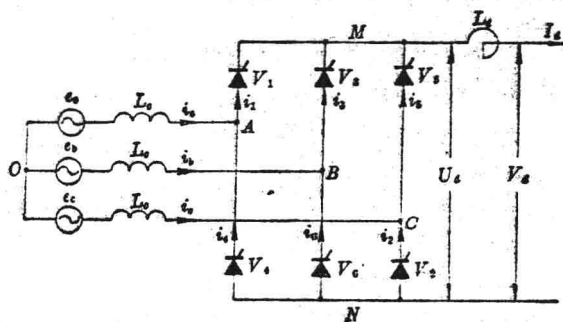


图 2-1 整流器原理接线图

等值电感,六个桥阀按正常轮流导通次序编号。可控硅只有在承受正向电压同时又得到触发信号时才开始导通,它一经导通,即使除去触发信号仍保持导通状态,只承受反向电压时才会被关断,须载流子完全复合后才恢复正向阻断能力。

在理想的情况下,不考虑变压器漏感造成的迭弧,即 $\gamma=0$,并不考虑控制角,即 $\alpha=0$,直流母线 mn 对电源性点 0 的电位变化如图 2-2a 中的粗线所示,直流母线 mn 间电压 V_{d0} 如图 2-2b 中粗线所示。