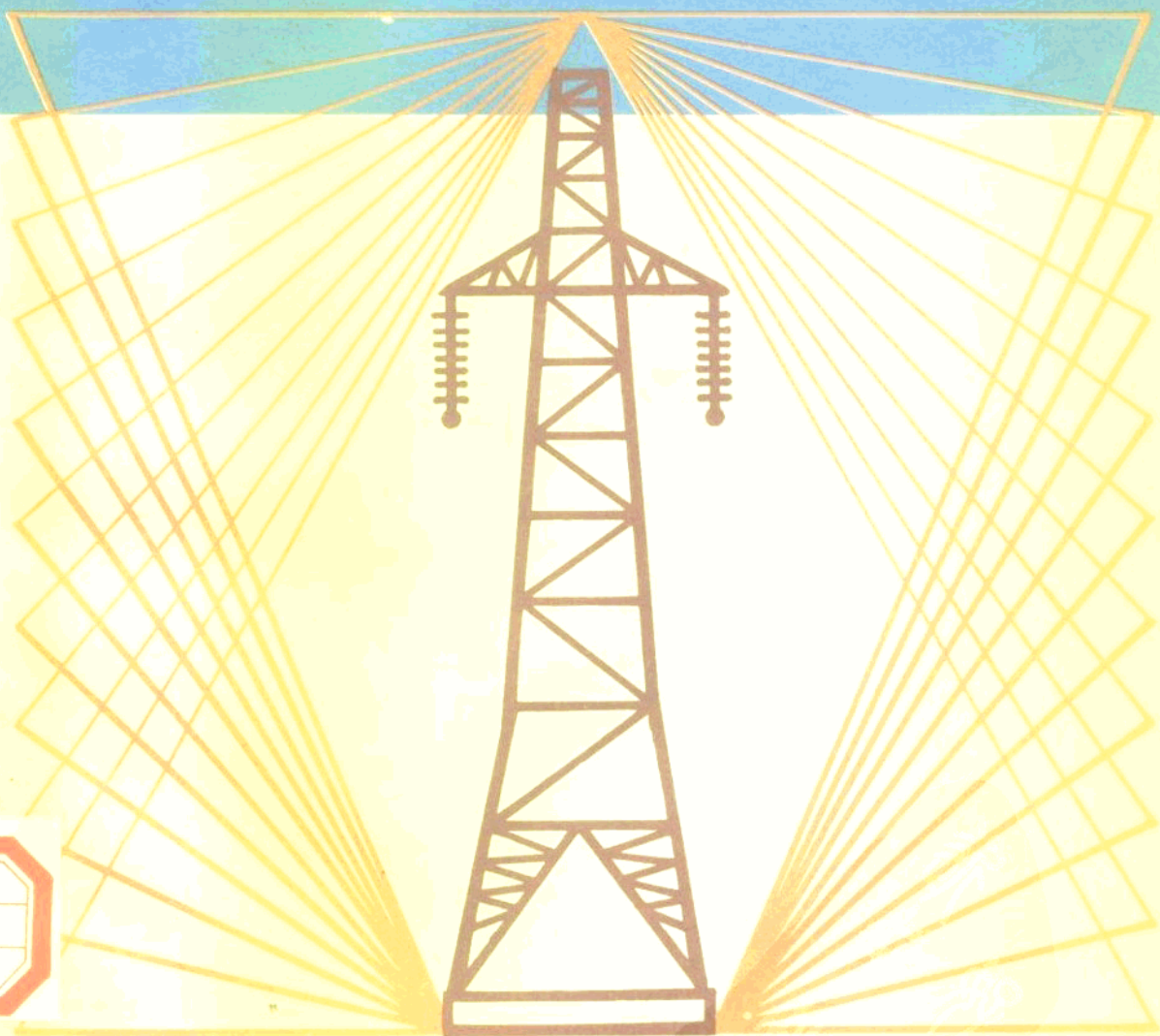


高压直流输电技术

王官洁 任震 编



重庆大学出版社

7717211
W20

404107

高压直流输电技术

王官浩 任震 编



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书介绍高压直流输电技术的发展及特点,换流电路的工作原理,换流站及其主设备,高压直流输电线路,谐波和滤波器,高压直流系统的控制及高压直流输电技术的发展前景。

本书可作为高等学校电力系统及其自动化专业本科生、研究生的选修课教材,也可供从事直流输电工作的工程技术人员参考。

高压直流输电技术

王官洁 任震 编

责任编辑 黄开植

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆电力印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:6 字数:150千

1997年1月第1版 1997年1月第1次印刷

印数:1—3000

ISBN 7-5624-1256-1/TM·52 定价:8.00元

(川)新登字020号

前 言

随着电力系统的不断发展,采用高压直流输电的必要性也与日俱增。由于高压直流输电与交流输电相比,在一定条件下具有一系列优点,从而使直流输电成为电力系统中的一项新的输电技术。由于晶闸管换流元件价格的不断降低及直流输电运行管理水平的不断提高,直流输电方式将越来越被广泛采用。我国葛州坝-南桥±500kV 直流输电工程的建成和投入运行,对我国直流输电技术的进一步发展将是一个有力的促进。

本教材是我们结合直流输电科研工作所取得的成果,并在广泛收集国内外直流输电有关资料并经过多年教学讲授、修改、整理而成的。本书王官洁副教授编写第二、三、四、五、六章,任震教授编写第一、七章及中英词汇对照表。全书由任震教授审订。

在本教材的编写过程中,得到冉立副教授、张金玉副教授及葛州坝换流站有关同志的大力支持和帮助,对此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,望读者批评指正。

编 者

1996年4月

目 录

第一章 高压直流输电的基本概念	1
1.1 高压直流输电的发展历史	1
1.2 直流输电的基本原理	3
1.3 直流输电系统的分类	4
1.4 直流输电的优缺点	6
1.5 交流输电与直流输电比较的等价距离	8
1.6 直流输电的发展前景	9
第二章 换流电路的工作原理	10
2.1 引言.....	10
2.2 整流器的工作原理.....	10
2.3 逆变器的基本原理.....	16
第三章 换流站及其主设备	21
3.1 引言.....	21
3.2 晶闸管换流器.....	22
3.3 换流变压器.....	24
3.4 直流电抗器.....	27
3.5 换流站的平面布置.....	28
第四章 高压直流输电线路	31
4.1 引言.....	31
4.2 高压直流架空线路的额定电压与分裂导线.....	31
4.3 高压直流架空线路的电晕效应.....	33
4.4 直流架空线路的等值参数.....	37
4.5 直流电缆线路.....	39
4.6 大地回路.....	39
第五章 谐波和滤波器	44
5.1 引言.....	44
5.2 换流装置交流侧的特征谐波.....	45
5.3 换流装置直流侧的特征谐波.....	48
5.4 交流滤波器.....	50
5.5 直流滤波器.....	58

5.6	阻尼型滤波器	59
5.7	消除谐波的其它方法	60
第六章	高压直流系统的控制	63
6.1	引言	63
6.2	控制的基本方式	65
6.3	定电流控制	66
6.4	定电压控制	67
6.5	定触发角控制	67
6.6	定熄弧角控制	68
6.7	功率控制和频率控制	69
6.8	控制系统的实际应用	71
第七章	高压直流输电技术的发展前景	77
7.1	引言	77
7.2	高压直流断路器	77
7.3	多端直流输电	78
7.4	发电机-整流器单元	80
7.5	发电机-二极管整流器单元	81
7.6	强迫换相	81
7.7	现有交流输电设备变为直流的应用	82
7.8	紧凑型换流站	83
	汉英词汇对照	84
	参考文献	90

第一章 高压直流输电的基本概念

1.1 高压直流输电的发展历史

一、国外的发展概况

高压直流输电从1954年世界上第一条工业性直流输电线路投入运行以来,已有40多年的历史。40多年来,世界各国已先后投入了40多个直流输电工程,总的输送容量达到5000万kW左右,其发展概况如图1.1所示。

如果连同1954年以前的直流工程,我们把直流输电的发展大致分为如下三个阶段:

1. 1954年以前——试验性阶段

这是直流输电的初始阶段,其主要特点是:

(1)直流输电工程的参数比较低。输电电压为几十千伏(个别达到200kV),输送容量为几个兆瓦到几十个兆瓦,输送距离为几十千米到一百多千米。

(2)换流装置几乎都是采用低参数的汞弧阀。

(3)发展速度较慢。其主要原因是:a)50年代初期交流系统出现超高压输电,处于发展的黄金时代;b)直流设备制造水平的限制及运行水平低,并且可靠性也差。

这一阶段的代表性工程有:

①德国的爱尔巴-柏林工程(1945年) 其主要参数为:电压 $\pm 220\text{kV}$,输送容量60MW,输送距离115km(电缆),采用汞弧阀。

②瑞典的脱罗里赫坦-密里路特工程(1945年) 其主要参数为:电压 $\pm 45\text{kV}$,输送容量6.5MW,架空线路长度50km,采用汞弧阀。

③原苏联的卡希拉-莫斯科工程(1950年) 其主要参数为:电压 $\pm 200\text{kV}$ 、输送容量30MW、输送距离112km(电缆),采用汞弧阀(现已改为晶闸管阀)。

2. 1954年至1972年——发展阶段

1954年由瑞典本土通过海底电缆向戈特兰岛送电,是世界上第一条工业性直流输电线路。从此,直流输电进入了发展阶段,这一阶段直流输电工程的主要特点是:

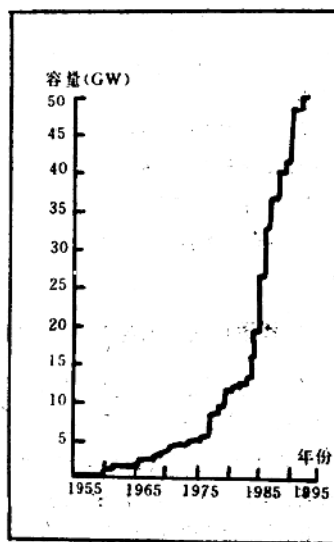


图 1.1 直流输电的发展概况

(1)直流输电设备的制造技术、施工质量、运行水平都有了很大的提高,使直流输电进入了工业实用阶段。

(2)采用直流输电具有多方面的目的:

①水下输电 如瑞典本土-戈特兰工程(1954年),其电缆长度为96km,电压100/150kV,输送容量为20/30MW。

②两个额定频率不同的交流系统互联 如日本的佐久间工程(1965年),把50Hz和60Hz的两个不同频率的交流系统连接起来。

③远距离、大功率输电 如美国的太平洋联络线工程(1970年),其架空线路长度达1362km、电压为 ± 400 kV,输送容量为1440MW。

(3)换流装置仍采用汞弧阀,不仅参数有很大的提高,而且质量也有很大的改善。

3. 1972年到现在——大力发展阶段

1972年,加拿大的伊尔河直流输电工程首次采用晶闸管阀(可控硅阀),由于晶闸管阀较汞弧阀具有一系列优点,从此直流输电进入了大力发展阶段。

这一阶段的主要特点是:

(1)新建设的直流工程几乎全部采用晶闸管阀,且一些早期的直流工程也改用晶闸管阀。

(2)这一阶段建设的直流输电工程几乎全是超高压工程,如美国太平洋联络线扩建工程,其电压为 ± 500 kV;CU工程其电压为 ± 400 kV;莫桑比克-南非的卡布拉巴萨工程,其电压为 ± 533 kV等。

(3)单回线路的输电能力比前阶段有了很大增加。

(4)发展速度很快,且规模越来越大,如1954年至1970年,17年间建成9个直流工程,平均0.5个/年;而1971年至1984年,14年间共建成16个工程,平均为1个/年。其中巴西-巴拉圭的伊泰普工程,电压为 ± 600 kV,输送容量3150MW,共两回,输送距离分别为783km和806km。

二、我国高压直流输电的发展情况

50年代,我国关于直流输电技术的研究工作就开始起步,但发展曲折而缓慢,而且从设计、运行、制造等方面来看,与世界先进水平还有相当大的差距。浙江舟山直流输电工程是我国第一个直流输电试点工程,工程兴建的目的是为了解决舟山电力发展的需要,同时也为发展我国的直流输电技术进行探索、积累经验。其输电参数为: ± 100 kV、100MW、55km(其中水下电缆12km)。整个工程全部由我国自行设计、制造、施工、调试和运行。

葛州坝-上海南桥直流输电工程是我国第一个跨地区、跨系统的超高压、远距离直流输电工程,其工程建设背景为:华东地区是我国主要的工农业基地之一,工农业产值均名列全国前列。由于技术水平和管理水平较高,劳动生产率和能源损耗指标均处于领先地位,随着改革开放的进一步深化,华东地区能源的需求量与日俱增。但华东地区能源资源严重短缺,直接影响到国民经济的发展和人民生活水平的提高。为了加快华东地区的开发,并进一步为发展我国的直流输电技术总结经验,我国决定修建葛州坝-上海南桥高压直流输电工程。

葛州坝-上海南桥直流输电工程的参数如下:额定电压 ± 500 kV、输送容量1200MW、输送距离1047km。从其参数可看出,该工程已达到国际水平。葛-上直流工程的接线图如图1-2所示。

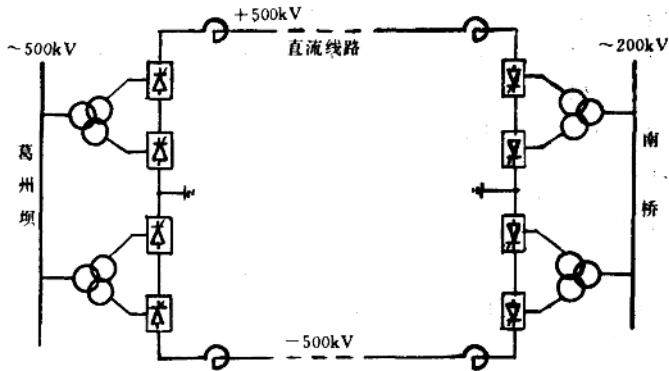


图 1.2 葛-上直流输电工程接线图

我国正在兴建的另一个高压直流输电工程是天生桥水电站至广州的直流输电工程,这是一个交直流并联输电工程。该工程由一回输电电压为 500kV 的交流输电线路和一双极双桥直流输电系统组成。直流输电的参数为:±500kV、1800MW、960km。

我国正在设计或拟议中的其它工程有:西北-华北直流输电互联工程、宝鸡-成都直流输电工程、长江三峡-华东交直流并联输电工程等。

1.2 直流输电的基本原理

直流输电的基本原理如图 1.3 所示,它表示一个简单的直流输电系统。

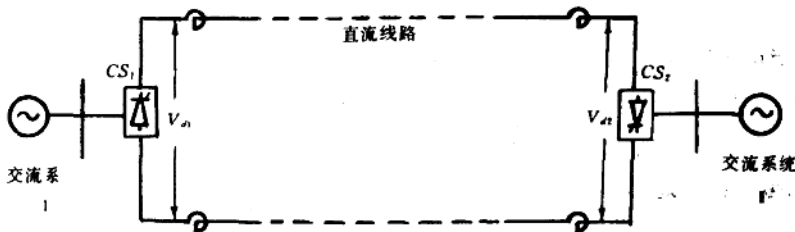


图 1.3 简单直流输电系统原理图

图 1.3 中包括两个换流站 CS_1 和 CS_2 及直流输电线路。两个换流站的直流端分别接在直流线路的两端,而交流端则分别连接到两个交流电力系统 I 和 II。换流站中主要装设有换流器,其作用是实现交流与直流的相互转换。

换流器由一个或多个换流桥串联或并联组成,目前用于直流输电系统的换流桥均采用三相桥式换流电路,每个桥具有 6 个桥臂。由于桥臂具有可控的单向导通能力,所以又称为阀或

阀臂。

从交流电力系统 I 向系统 II 输送电能时,换流站 CS_1 把送端系统 I 送来的三相交流电流转换成直流电流,通过直流输电线路把直流电流(功率)输送到换流站 CS_2 ,再由 CS_2 把直流电流转换成三相交流电流。通常把交流转换成直流称为整流, CS_1 也称为整流站;把直流转换成交流称为逆变, CS_2 又称为逆变站。

设整流站 CS_1 的直流输出电压为 V_{d1} ,逆变站 CS_2 的直流输入电压为 V_{d2} ,则从图 1.3 可知直流线路电流为:

$$I_d = \frac{V_{d1} - V_{d2}}{R} \quad (1.1)$$

或
$$V_{d1} - V_{d2} = I_d R$$

式中 V_{d1} ——整流站 CS_1 的直流输出电压;

V_{d2} ——逆变站 CS_2 的直流输入电压;

I_d ——直流线路电流;

R ——直流线路的电阻。

直流线路和交流线路不同,它只输送有功功率,不输送无功功率。换流站 CS_1 送到直流线路的功率和换流站 CS_2 从直流线路接受的功率分别为

$$P_{d1} = V_{d1} I_d \quad \text{和} \quad P_{d2} = V_{d2} I_d \quad (1.2)$$

两者之差,即

$$P_{d1} - P_{d2} = V_{d1} I_d - V_{d2} I_d = I_d (V_{d1} - V_{d2})$$

为直流线路的损耗。

当直流电压 V_{d1} 大于电压 V_{d2} 时,就有电流沿着图 1.3 的方向流通。只要改变两端直流电压 V_{d1} 和 V_{d2} ,就可以调节电流 I_d ,从而也就改变了直流线路的功率 P_{d1} 或 P_{d2} 。如果需要,通过调节可保持输送的电流或功率不变。

1.3 直流输电系统的分类

由于目前各种类型的直流断路器都还处于研制阶段,致使直流输电系统还不能像交流系统一样构成各种复杂的网络,所以目前直流输电也大多是两端供电系统。该系统常见的接线类型如图 1.4 所示,它们适用于不同的条件,现分述如下。

一、单极线路方式

单极线路方式是用一根架空导线或电缆线,以大地或海水作为返回线路组成的直流输电系统,如图 1.4(a)所示。这种方式由于正常运行时电流需流经大地或海水,因此要注意接地电极的材料、埋设方法和对地下埋设物的腐蚀以及对地下通讯线路、航海罗盘的影响等问题,通常用正极接地的方式较多。

单极两线制方式(或称同极方式),是将返回线路用一根导线代替的单极线路方式。单极两线单点接地是将导线任一根在一侧换流站进行单点接地,如图 1.4(b)所示。这种方式避免了电流从地中或海水中流过,又把某一导线的电位箝位到零。其缺点是当负荷电流在流过导线

时,要产生不小的电压降,所以仍要考虑适当的绝缘强度。这种方式大多用于无法采用大地或海水作为回路以及作为双极方式的过渡方案。

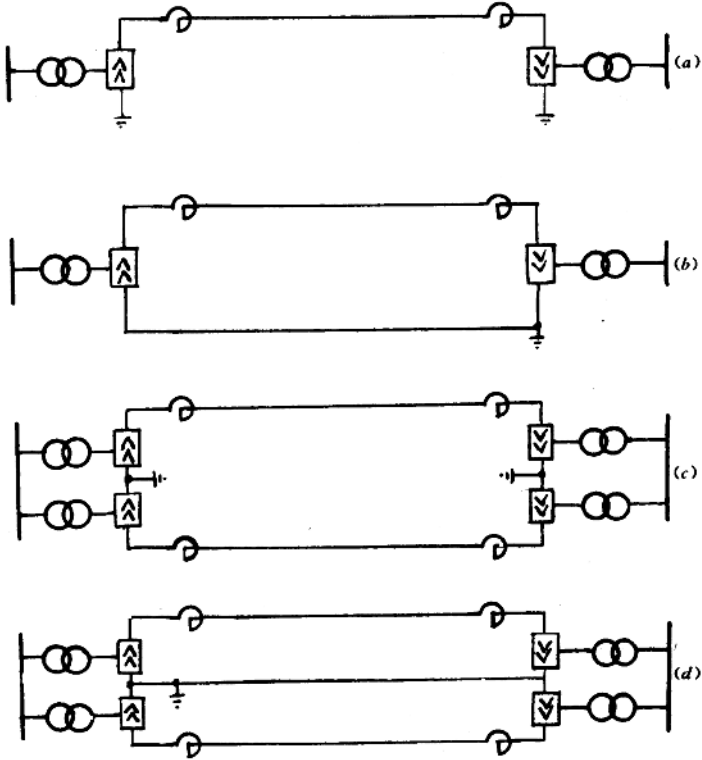


图 1.4 两端直流系统的接线方式

二、双极线路方式

双极线路方式有两根不同极性(即正、负极)的导线,可具有大地回路或中性线回路,现分述如下:

1. 双极两线中性点两端接地方式

这种方式如图 1.4(c)所示,将整流站和逆变站的中性点均接地,双极对地电压分别为 $+V$ 和 $-V$ 。正常运行时,接地点之间没有电流通过。实际上,由于两侧变压器的阻抗和换流器控制角的不平衡,总有不平衡电流以大地作为回路流过。当一线路故障切除后,可以利用健全极和大地作为回路,维持单极运行方式。

2. 双极中性点单端接地方式

这种运行方式在整流侧或逆变侧中性点单端接地,正常运行时和上述方式相同。但当一线故障时,就不可以继续运行了。

3. 双极中性线方式

将双极两端的中性点用导线连接起来,就构成双极中性线方式,如图 1.4(d)所示。这种方式在整流侧或逆变侧任一端接地,当一极发生故障时,能用健全极继续输送功率,同时避免了利用大地或海水作为回路的缺点。这种方式由于增加了一根导线,在经济上将增加一定的投资。

4. “背靠背”(back-to-back)换流方式

没有直流输电线路,而将整流站和逆变站建在一起的直流系统称为“背靠背”换流站。这种方式适用于不同额定频率或者相同额定频率非同步运行的交流系统之间的互联。因为没有直流输电线路,所以直流系统可选用较低的额定电压。这样,整个直流系统的绝缘费用可降低,有色金属的消耗量和电能损耗的增加就较少。目前世界各国已修建和准备投建的“背靠背”直流工程较多,其主要用途是系统的增容时限制短路容量,从而不致更换大量的电气设备。

1.4 直流输电的优缺点

根据高压直流输电的特点,在可比条件下与高压交流输电相比较时,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。因此,在输送相同功率的条件下,直流输电可节省大量的有色金属、钢材、绝缘子和线路金具,同时也可减少大量的运输、安装费。另外,直流输电对其线路走廊、铁塔高度、占地面积等方面,也比交流输电优越。

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、线路有功损耗小

由于直流架空线路仅使用 1 根或 2 根导线,所以在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。这样,直流架空线路不仅在投资上,而且在年运行费上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,这是显而易见的。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。以同样截面积的油浸纸绝缘电缆为例,用于直流时的允许工作电压比在交流下约高 3 倍。因此,在有色金属和绝缘材料相同的条件下,2 根心线的直流电缆线路输送的功率 P_d 比 3 根心线的交流电缆线路输送的功率 P_a 大得多。所以海下输电采用直流电缆在投资上比采用交流电缆经济得多。

运行中,电缆用于交流时,除了心线的电阻损耗外,还有绝缘中的介质损耗以及铅包和铠装中的磁感应损耗等。用于直流时,则基本上只有心线的电阻损耗,而且绝缘的老化也慢得多,

使用寿命相应也较长。因此,直流电缆线路的年运行费要比相应的交流电缆低。

四、没有系统的稳定问题

在交流输电系统中,所有连接在电力系统的同步发电机必须保持同步运行。所谓“系统稳定”,就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。

电力系统中输送的功率为

$$P = \frac{E_1 E_2}{x} \sin \delta_{12} = P_M \sin \delta_{12} \quad (1.3)$$

式中 E_1, E_2 ——交流系统送端和受端的电势;
 x ——表示输电线路、发电机、变压器的电抗;
 δ_{12} —— E_1 和 E_2 两电势的相角差;
 P_M ——静态稳定极限。

从式中可以看出,线路越长, x 越大,静稳定极限也越小,所以超高压长距离交流输电就受到很大的限制。

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,所以以不存在上述的稳定问题,也就是说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,由于系统容量增加,将使短路电流增大,有可能超过原有断路器的遮断容量,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,就不存在上述问题,这对于交流系统的互联具有极大的实用价值。

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。这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紧急支援;或者在交、直流线路并联运行时,当交流系统发生短路,可暂时增大直流输送的功率以减小发电机转子加速,从而提高系统运行的可靠性。

如果采用双极线路,当一极故障,另一极仍可以大地或水作为回路,继续输送一半的功率,这也提高了运行的可靠性。

随着直流设备制造技术的不断提高,运行经验的不断积累,直流输电的可靠性也将不断地提高。

直流输电与交流输电相比,也有如下缺点:

1. 换流站的设备较昂贵。

由于换流桥是由许多晶闸管元件串并联而成,而目前高压、大电流的晶闸管元件价格较高;另外,滤波器、平波电抗器等直流设备也较昂贵。总之,与交流变电站相比,直流换流站的建设费用要高得多。

2. 换流装置要消耗大量的无功功率(详见第二章 2.2 节)。
3. 换流装置是一个谐波源,在运行中要产生谐波,影响系统的运行,所以需在直流系统的交流侧和直流侧分别装设交流滤波器和直流滤波器,从而使直流输电的投资增大。
4. 换流装置几乎没有过载能力,所以对直流系统的运行不利。
5. 由于目前高压直流断路器还处于研制阶段,所以阻碍了多端直流系统的发展。
6. 以大地作为回路的直流系统,运行时会对沿途的金属构件和管道有腐蚀作用;以海水作为回路时,会对航海导航仪表产生影响。

根据以上优缺点,直流输电适用于以下场合:

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

1.5 交流输电与直流输电比较的等价距离

在输送功率相同和可靠性指标相当的可比条件下,直流输电与交流输电相比,虽然换流站的投资比变电站的投资要高,但是直流输电线路的投资比交流输电线路的投资要低。如果当输电距离增加到一定值时,采用直流输电其线路所节省的费用,刚好可以抵偿换流站所增加的费用(即交直流输电的线路和两端设备的总费用相等),这个距离就称为交、直流输电比较的等价距离(break-even-distance),如图 1.5 所示。

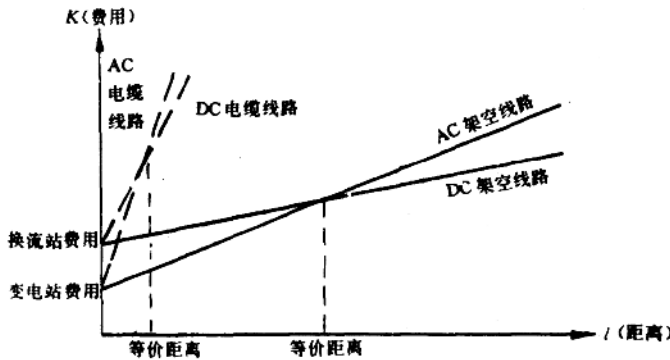


图 1.5 交直流输电比较的等价距离

通常情况下,当输电距离大于等价距离时,采用直流输电比采用交流输电经济;反之则采用交流输电比较经济。目前国际上对架空线路其等价距离约为 500km~700km;电缆线路约为 20km~40km。随着换流装置价格的不断下降,等价距离必然也将不断地下降。当然,输电系统

采用交流或直流是由诸多因素决定的,等价距离不是唯一的因素。工程实际上的等价距离是在一定的范围内变化的(交流 $\pm 5\%$ 、直流 $\pm 10\%$)。

1.6 直流输电的发展前景

由于直流输电的特点,而使应用直流输电技术可以提高电力系统的经济指标、技术性能、运行可靠性和调度灵活性等。随着直流输电技术的日趋成熟,输电设备(主要指换流器)价格的下降和可靠性的提高以及直流输电运行管理经验的不断积累,直流输电在电力系统中必将得到进一步的发展和应。

根据我国的国情,直流输电技术也日益受到重视。我国幅员广阔,能源资源丰富,水力资源 $2/3$ 左右分布在西南、西北地区;煤矿资源 $2/3$ 左右集中在内蒙、山西等地。利用这些资源发电输送到负荷中心需要长距离大功率输电,我国沿海岛屿星罗棋布,需要发展海底输电,全国大城市的供电,各大电力系统的互联,都宜采用直流输电。

世界各国在现有直流输电工程设计、建设和运行经验的基础上,正广泛深入地开展如下的研究工作:

(1)研究电压更高、容量更大的晶闸管元件,改进换流阀的机、电、热各方面的结构,以进一步降低换流器的造价和提高可靠性。

(2)研究采用大规模集成电路元件和微机处理技术,充分发挥直流输电优越的调节性能,以适应各种运行工况的需要。

(3)研究交、直流的并列运行和调节,以提高输送功率极限。采用静止无功功率补偿装置,以进一步提高直流感络线的性能。

(4)研究更大断流容量的高压直流断路器和发端多端直流系统。

(5)采用多功能微机控制系统,充分发展直流控制快速、灵活的优点。

(6)研究高压直流电场以及电晕、无线电干扰对环境的影响。

(7)研究高次谐波的测量方法和消除谐波的新措施及装置。

(8)进一步开展直流输电系统的数字仿真及其计算方法的研究。

(9)进一步开展高压直流系统可靠性计算方法的研究。

(10)开展高压直流过电压、直流污秽及绝缘配合的研究。

第二章 换流电路的工作原理

2.1 引言

换流电路主要由换流器组成,换流器的功能是实现交流-直流或直流-交流的变换,前者称为整流,后者称为逆变。换流器是直流输电系统的关键设备,它的运行情况与整个直流系统各方面的技术性能密切相关。

换流器的接线方式的形式很多,对于大功率换流器,大多数采用三相桥式电路,如图 2.1 所示。三相桥式换流器由 6 个桥臂组成,每一个桥臂由几十个至几百个串联的晶闸管元件组成。桥臂具有阀的特性,所以桥臂又称为阀臂,它在正常情况下,只能从阳极到阴极单方向导通。

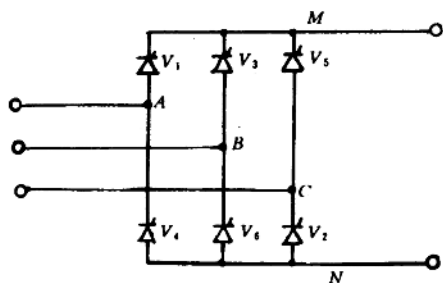


图 2.1 三相桥式换流器原理接线图

三相换流器中的 6 个阀臂按正常开通的次序编号,为了分析的方便和便于记忆,阀 1、阀 3、阀 5 依次构成上半桥,阀 4、阀 6、阀 2 构成下半桥,阀 1 和阀 4、阀 3 和阀 6、阀 5 和阀 2 构成三个阀对。阀对的中心端子 A、B、C 称为桥的交流端,它们对应地连接到换流变压器的三相。上半桥的 3 个阀的阴极同接于直流母线 M 上,下半桥的 3 个阀的阳极同接于直流母线 N 上。M 和 N 也称为桥直流端的两个极(正极和负极)。

为了阐明基本原理,在本章的分析中采用如下的假设条件:

- (1)三相交流电源的电动势是对称的正弦波,频率恒定。
- (2)交流电网的阻抗是对称的,而且忽略不计换流变压器的激磁导纳。
- (3)直流侧平波电抗器具有很大电感值,使直流侧电流滤波后其波形是平直的,没有纹波。
- (4)阀的特性是理想的,即通态正向压降和断态漏电流可忽略不计。
- (5)三相六个阀以六分之一周期(60°)的等相位间隔依次轮流触发导通。

2.2 整流器的工作原理

我们首先分析单桥整流器的工作原理,其原理接线图如图 2.2 所示。图中 e_a 、 e_b 、 e_c 分别表示换流器交流侧三相电势; L_c 表示交流系统每相的等值电感,各相电压的波形如图 2.3 所示。

在分析单桥整流器工作原理以前,重述一下晶闸管阀的基本特性:

1. 只有当晶闸管元件承受正向电压时(即阳极电位高于阴极电位),晶闸管才有导通的可能。

2. 晶闸管承受正向电压,控制极又得到触发脉冲信号,晶闸管元件才完全导通。

3. 已导通的晶闸管,即使除去触发脉冲信号,仍能继续保持导通,直到其承受反向电压时,才会关断。

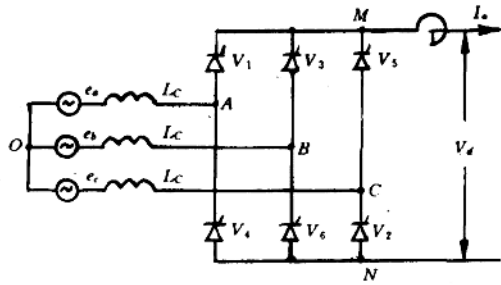


图 2.2 单桥整流器原理接线图

一、理想情况下的工作原理

所谓理想情况是指换流桥上、下桥各有一个阀导通,不考虑变压器漏抗造成的选弧(即重叠角 $\mu=0$),也不考虑阀导通时的延迟(即延迟角 $\alpha=0$)。

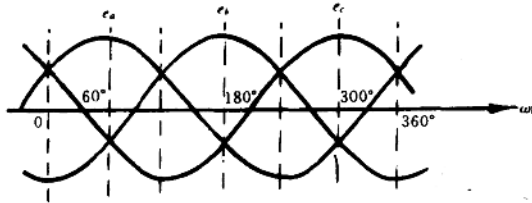


图 2.3 交流相电压的波形图

如图 2.4(b), 阀 V_1 和阀 V_2 导通时, 直流母线 M, N 上的直流输出电压为 $e_{ac} = e_a - e_c$ 。

当 ωt 经过 60° 过其 c_3 点后, 从图 2.4(a) 中可看出 b 相电压高于 a 相电压, 则图 2.2 中 B 点电位高于 A 点电位。由于阀 V_1 导通, M 点电位等于 A 点电位, 使阀 V_3 的阳极电位高于阴极电位, 阀 V_3 承受正向电压; 又根据假定 $\alpha=0$, 阀 V_3 的控制极上加有触发脉冲, 则阀 V_3 立即导通。阀 V_3 导通后, 由于 b 相电压高于 a 相电压, 阀 V_1 承受反向电压而关断。这就是说阀 V_1 向阀 V_3 换相, 变成 V_2 和 V_3 导通。这时对换流器而言, 电流总是从高电位流向直流系统。这时线电压 $e_{bc} = e_b - e_c$ 通过阀 V_2 和阀 V_3 加到直流输出端 M, N 两母线上, 其波形如图 2.4(b) 中的 e_{bc} 段。

当 ωt 再经过 60° 之后(即过 c_4 点), a 相电压低于 c 相电压, A 点电位低于 C 点电位, 而阀 V_2 又处于导通状态, 使阀 V_4 的阴极电位低于阳极电位, 阀 V_4 立即导通。阀 V_2 则承受反向电压而关断。阀 V_4 联系着的是处于低电位的 a 相电压, 电流从直流系统经阀 V_4 流回电源。所以对整流器来说, 电流总是从低电势流进, 这时线电压 e_{ac} 通过阀 V_3 和阀 V_4 加到直流输出端。

随后每隔 60° 依次换相一次, 如此循环往复, 直流正极母线 M 和负极母线 N 对电源中性

参见图 2.2 和图 2.3, 设开始时刻阀 V_1 和阀 V_2 导通, 交流电源的线电压 e_{ac} 通过导通的阀加在直流输出端 M, N 上, 成为直流输出电压的一部分, 其波形图如图 2.4 所示。

在图 2.4(a) 中, 用 c_1, c_3, c_5 点表示相电势上半波形的交点, c_2, c_4, c_6 点表示相电势在下半波形的