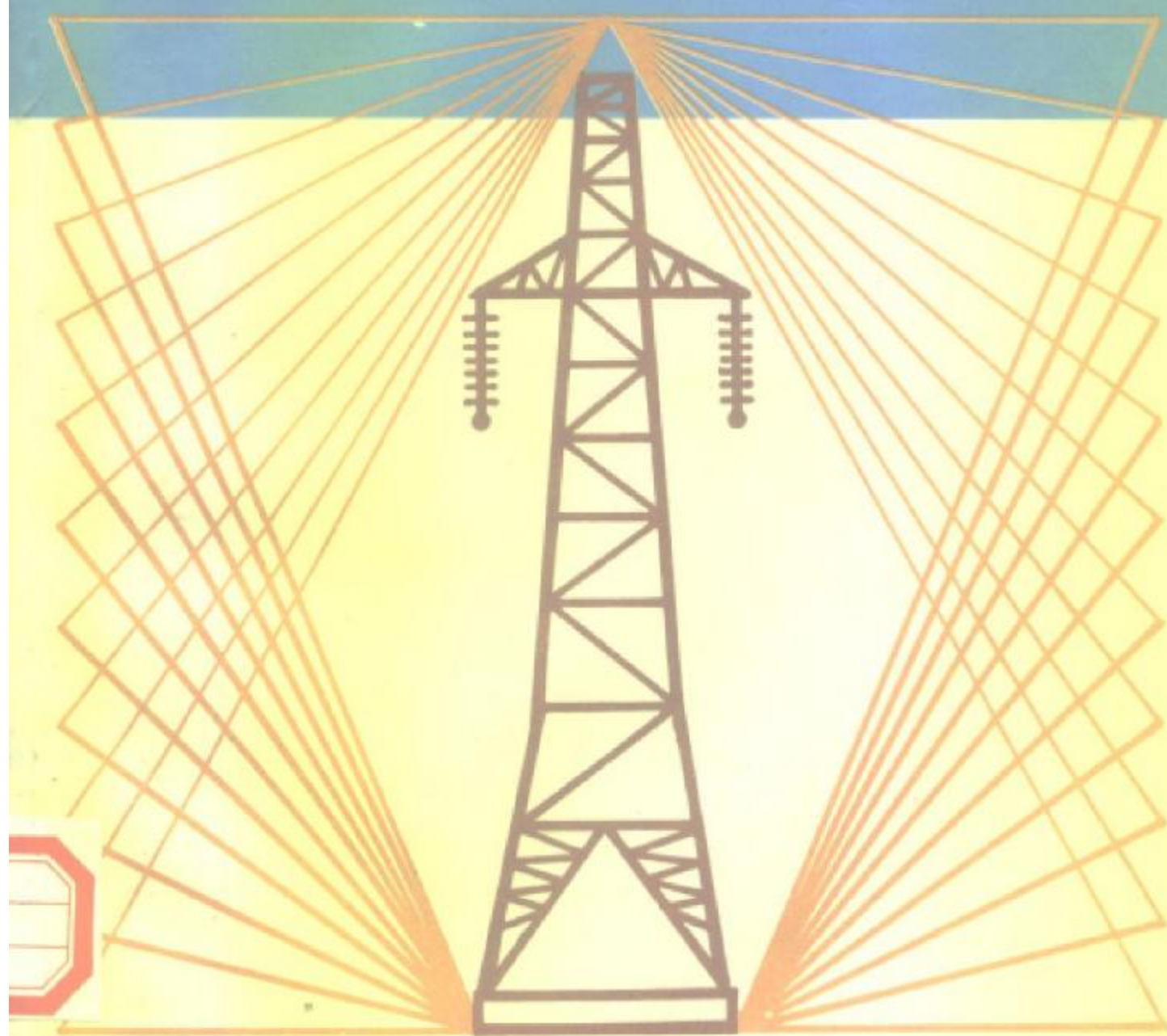


# 高压直流输电技术

王官洁 任 震 编



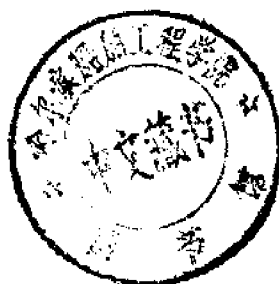
重庆大学出版社

771721.1  
W20

464187

# 高压直流输电技术

王官洁 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。

2015 21



## 高压直流输电技术

王官洁 任麓 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

<b>第一章 高压直流输电的基本概念</b>	<b>1</b>
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
<b>第二章 换流电路的工作原理</b>	<b>10</b>
2.1 引言	10
2.2 整流器的工作原理	10
2.3 逆变器的原理	16
<b>第三章 换流站及其主设备</b>	<b>21</b>
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
<b>第四章 高压直流输电线路</b>	<b>31</b>
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
<b>第五章 谐波和滤波器</b>	<b>44</b>
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
<b>第六章</b>	<b>高压直流系统的控制 .....</b>	<b>63</b>
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
<b>第七章</b>	<b>高压直流输电技术的发展前景 .....</b>	<b>77</b>
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
<b>汉英词汇对照 .....</b>	<b>84</b>	
<b>参考文献 .....</b>	<b>90</b>	

# 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:

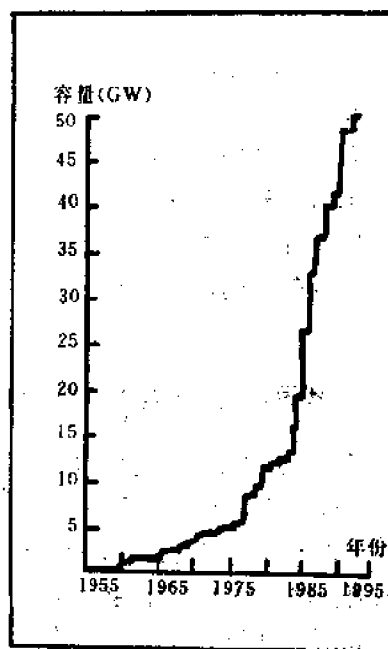


图 1.1 直流输电的发展概况

(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 $\pm 400$ 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 $\pm 500$ kV;CU工程其电压为 $\pm 400$ kV;莫桑比克-南非的卡布拉巴萨工程,其电压为 $\pm 533$ 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 $\pm 600$ 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: $\pm 100$ 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 $\pm 500$ 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。



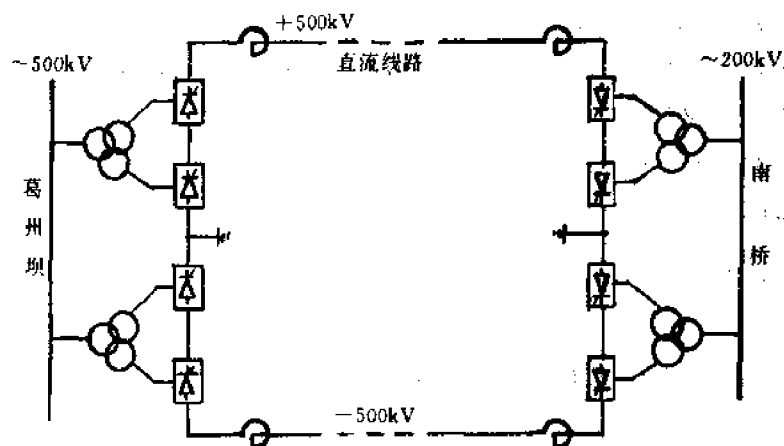


图 1-2 葛-上直流输电工程接线图

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:  $\pm 500\text{kV}$ 、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。

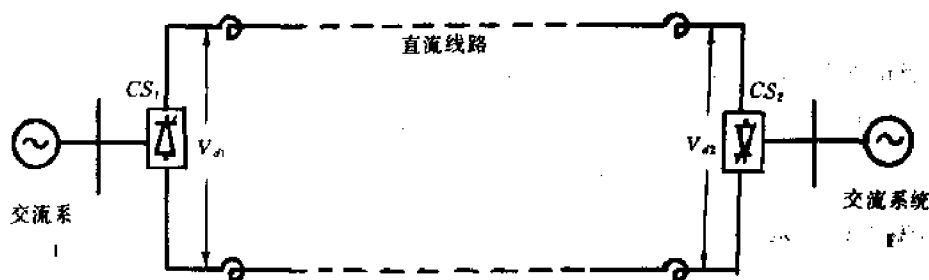


图 1.3 简单直流输电系统原理图

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。

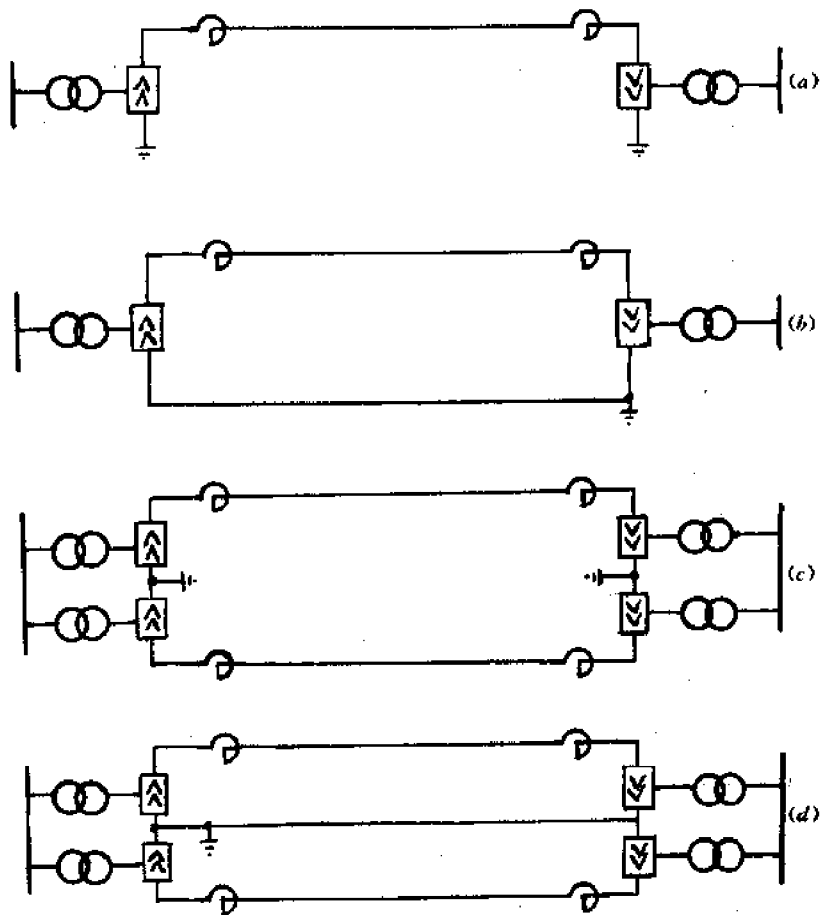


图 1.4 两端直流系统的接线方式

## 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扩容时限制短路容量,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;

$\delta_{12}$ —— $E_1$  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。

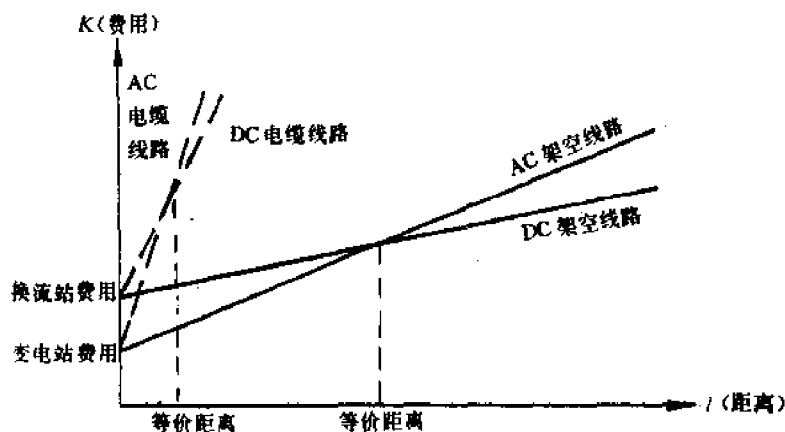


图 1.5 交直流输电比较的等价距离

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用。

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,以进一步提高直流联络线的性能。

(4)研究更大断流容量的高压直流断路器和多端直流系统。

(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。

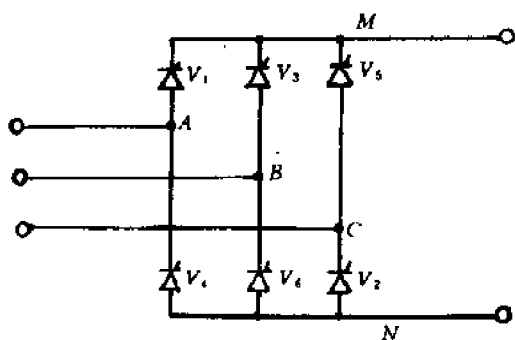


图 2.1 三相桥式换流器原理接线图

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( $60^\circ$ )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。



点的电位变化,用图 2.4(a)所示的上、下包络线(粗线)表示;直流母线  $MN$  间的直流输出电压  $V_d$  的波形用图 2.4(b)所示的曲线(粗线)表示。

所以理想情况下整流器的工作原理是:联系最高交流电压的晶闸管将导通,电流由此流出;而联系最低交流电压的晶闸管也导通,电流由此返回。通过按照一定次序的晶闸管阀的“通”与“断”,将交流电压变换成脉动的直流电压。

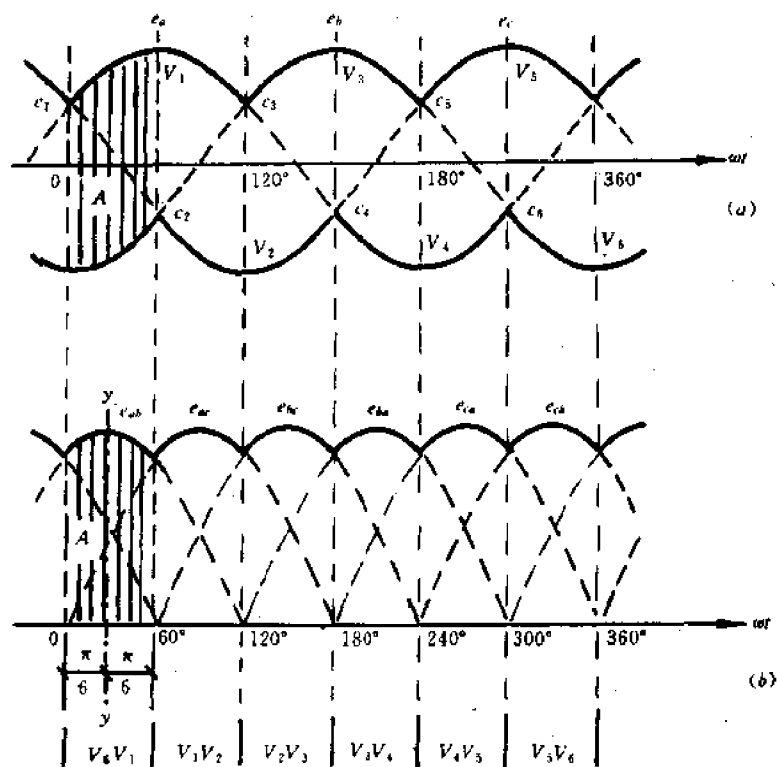


图 2.4 单桥整流器的电压波形

(a)直流端  $M、N$  对中性点的波形 (b)直流输出电压的波形

从上面的分析可知,理想情况下输出的直流电压瞬时值  $v_{d0}$  在一个周期中是由六段相同的曲线段所组成,所以称这种接线的整流器为六脉波整流器,只要取其中的任一段,即可求出其直流电压平均值  $V_{d0}$ 。

在图 2.4(b)中,取纵轴  $y$  位于  $\omega t = 30^\circ$  处,则曲线  $e_{ab}$  的纵坐标可用  $\sqrt{2} E \cos \omega t$  表示,当其  $\omega t$  从  $-\frac{\pi}{6}$  到  $\frac{\pi}{6}$  这段时间间隔内,可由积分求得其面积为

$$A = \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} E \cos \omega t d\omega t = \sqrt{2} E \sin \omega t \Big|_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} = \sqrt{2} E \quad (2.1)$$

将  $A$  值除以  $\pi/3$  即可得到直流电压平均值

$$V_{d0} = A / \frac{\pi}{3} = \frac{3 \sqrt{2} E}{\pi} = 1.35 E \quad (2.2)$$

式中  $V_{d0}$ ——当  $\alpha=0, \mu=0$  时的直流电压平均值;

$E$ ——交流线电压的有效值。

## 二、考虑延迟角(即 $\alpha > 0$ )的情况

对于图 2.4, 当阀  $V_1$  不是在  $c_1$  点导通, 而如图 2.5 所示要延迟一个角度  $\alpha$  才被触发导通 (这种延迟是必然的)。  $c_1$  点称为自然换相点, 也就是相电压的交点。从自然换相点到阀的控制极上加以控制脉冲这段时间, 用电气角度来表示, 称为延迟角  $\alpha$ 。这时直流母线  $M, N$  对中性点的电压波形 (重叠角  $\mu=0$ ) 如图 2.5(a) 中的粗实线所示, 直流母线  $MN$  之间的直流电压波形如图 2.5(b) 中的粗实线所示。

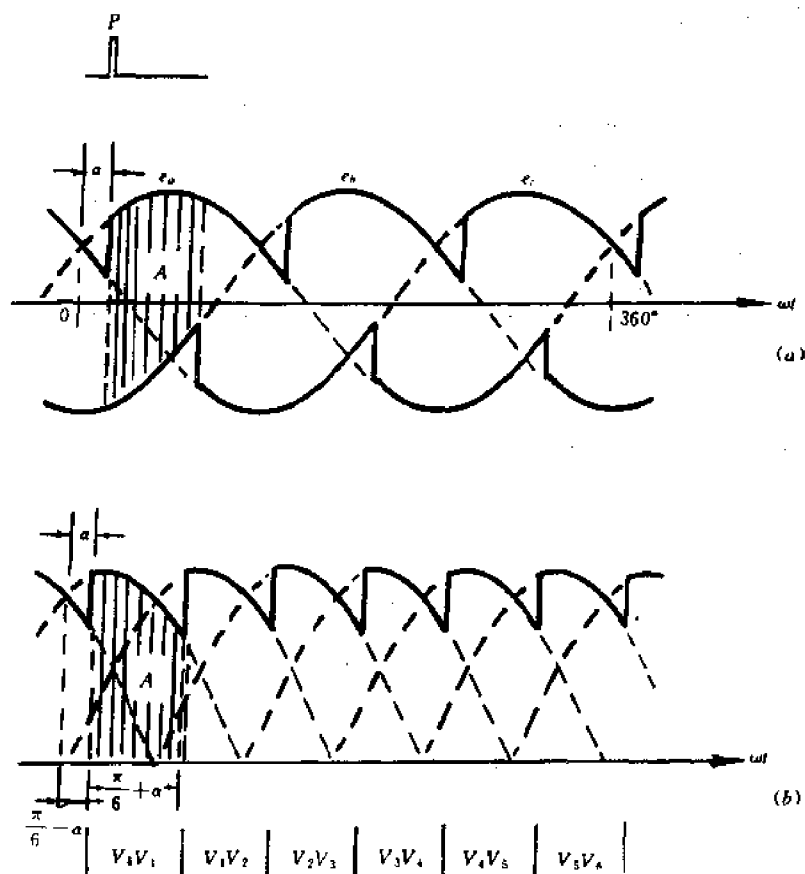


图 2.5  $\alpha > 0, \mu = 0$  情况下的电压波形

(a) 直流端  $M, N$  对中性点的波形 (b) 直流输出电压的波形

同理, 求其直流电压平均值, 可取一周的六分之一进行积分, 这段面积为

$$A = \int_{-(\frac{\pi}{6}-\alpha)}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2} E \cos \omega t d\omega t = \sqrt{2} E \sin \omega t \Big|_{-(\frac{\pi}{6}-\alpha)}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \\ = \sqrt{2} E \cos \alpha \quad (2.3)$$

同理, 将  $A$  除以  $\pi/3$ , 即得到这种情况下直流电压的平均值

$$V_d = \frac{A}{\pi/3} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \alpha = V_{d0} \cos \alpha = 1.35 E \cos \alpha \quad (2.4)$$

从式(2.4)可以看出, 在考虑到  $\alpha > 0$  的情况下, 与  $\alpha = 0$  时比较, 直流输出电压改变了一个

$\cos\alpha$ , 调节  $\alpha$  值, 可改变  $V_d$ , 从而改变直流输出功率。

### 三、既考虑延迟角( $\alpha > 0$ ), 又考虑换相电感( $\mu > 0$ )的情况

当导通的阀  $V_1$  换相至阀  $V_3$  的过程中, 由于系统存在着电感, 换流变压器也有漏抗, 所以

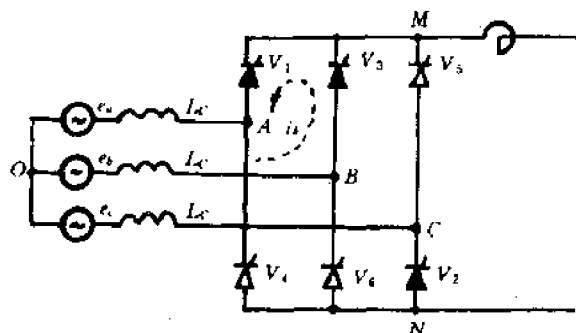


图 2.6  $\alpha > 0, \mu > 0$  时的换相电流

回路中的电流不能突变, 即阀  $V_1$  中的电流不会立即降到零, 阀  $V_3$  中的电流也不会立即上升到额定值, 而存在一个  $V_1$  和  $V_3$  共同导通的时间。在这段时间内, 相当于交流  $a, b$  两相短路, 如图 2.6 所示。图中, 二相短路电流  $i_k$  在  $MAOBM$  回路中流过, 短路电流的方程用下式表示

$$2L_c \frac{di_k}{dt} = \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (2.5)$$

求积分后可得

$$i_k = -\frac{\sqrt{2} E}{2\omega L_c} \cos \omega t + C = I_{k2} \cos \omega t + C \quad (2.6)$$

式中  $C$ ——积分常数。

当换相开始瞬间, 即电路从一组阀 (如  $V_1 V_2$ ) 导通改变至另一组阀 ( $V_1 V_2 V_3$ ) 导通的瞬间, 电流不会突变。此时  $\omega t = \alpha, i_k = 0$ , 所以

$$C = \frac{E}{\sqrt{2} \omega L_c} \cos \alpha$$

则

$$\begin{aligned} i_k &= \frac{E}{\sqrt{2} \omega L_c} (\cos \alpha - \cos \omega t) \\ &= I_{k2} (\cos \alpha - \cos \omega t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

当  $\omega t = \alpha + \mu$  时,  $i_k = I_d$

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{E}{\sqrt{2} \omega L_c} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \\ &= I_{k2} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

式中  $E$ ——交流线电压的有效值;

$\omega L_c$ ——换相电抗;

$I_{k2}$ ——交流系统二相短路电流;

$\mu$ ——换相角;

$\alpha$ ——延迟角。

由上述分析可知, 换相过程实质上是交流系统短时间的二相短路过程, 换相是依靠电源提供的短路电流进行的。这时的短路电流称为换相电流, 提供换相电流的交流电压称为换相电压, 每相从电源中性点到阀之间的短路电抗称为换相电抗; 而阀  $V_1$  和  $V_3$  共同导通的这段时间用电气角度来表示, 称为重叠角 (或换相角)  $\mu$ 。

当考虑  $\alpha > 0, \mu > 0$  时, 直流电压的波形如图 2.7 所示。从图中可以看出, 这时直流电压的

波形由图 2.4 的波形每  $60^\circ$  的面积中减掉  $\Delta A$  的面积。因此直流电压的平均值  $V_d$ ，可由下式求出

$$V_d = \frac{1}{\pi/3}(A - \Delta A) = \frac{3A}{\pi} - \frac{3\Delta A}{\pi} = V_{d0}\cos\alpha - \Delta V \quad (2.9)$$

式中  $\Delta A$ ——由于换相引起直流电压每  $60^\circ$  减掉的面积；

$\Delta V$ ——由于换相引起直流电压平均值的变化量。

由图 2.7 可求得

$$\Delta A = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \sqrt{2} E \sin\omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{2} E [\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (2.10)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta A}{\pi/3} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} E [\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)] = \frac{V_{d0}}{2} [\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (2.11)$$

将式(2.8)代入上式进行整理可得：

$$\Delta V = I_d \frac{3\omega L_c}{\pi} = I_d R_s \quad (2.12)$$

则

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - I_d R_s \quad (2.13)$$

式中  $R_s = \frac{3\omega L_c}{\pi}$ ——整流侧的等值换相电阻。

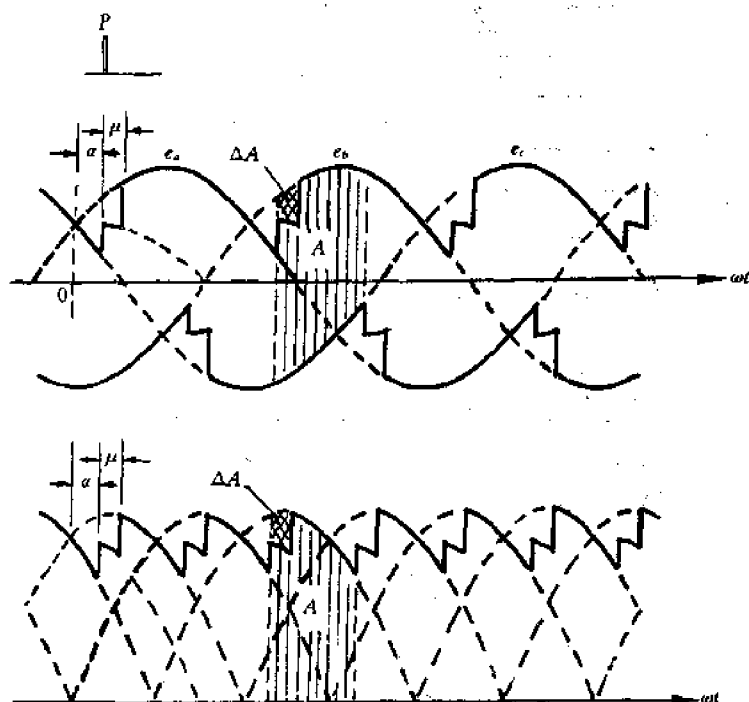


图 2.7  $\alpha > 0, \mu > 0$  时整流器的电压波形

有了重叠角  $\mu$  之后，直流输出电压降低了，比没有考虑选弧时降低了  $\Delta V$ 。由于  $\Delta V$  正比于  $I_d$ ，因此换相的效应也就相当于直流侧有一等效电阻  $R_s$ ，引起直流输出电压的下降。但实际上它不是一个真实的电阻，因为它不会引起有功损耗。由于这时交流电压和电流没有发生变化，直流功率的降低则可看作是交流侧有滞后功率因数的缘故，而使变压器原边输出的有

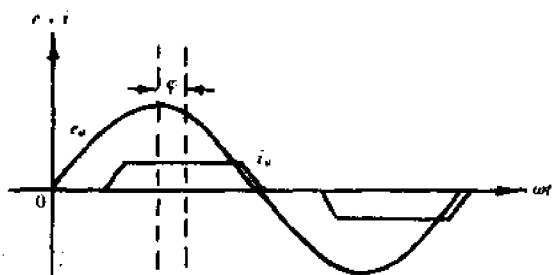


图 2.8 整流器的功率因数

一般  $\mu < 60^\circ$ , 在这种情况下, 换流器在非换相期间只有 2 个阀导通, 称为 2 方式运行; 在换相期间有 3 个阀导通, 称为 3 方式运行, 而且 2 个和 3 个阀导通是交替出现的, 所以就把换流器这种运行方式简称为 2-3 运行方式。在  $\mu = 0$  和  $\mu = 60^\circ$  情况下, 换流器分别以 2 和 3 方式运行, 在  $60^\circ < \mu < 120^\circ$  时, 换流器以 3-4 方式运行。

功率由  $\sqrt{3}EI$  降为  $\sqrt{3}EI\cos\varphi$ 。从波形上看, 有了  $\alpha$  和  $\mu$  后, 电流的相位要比原来滞后一个  $\varphi$  角, 这就是要求交流系统供给滞后无功功率的原因 (见图 2.8), 也就是换流器在换相时吸收无功功率的原因。

当重叠角  $\mu$  大小变化时, 换流器在运行中同时导通的阀数将是不同的, 如图 2.9 所示。换流器在正常工作情况下,

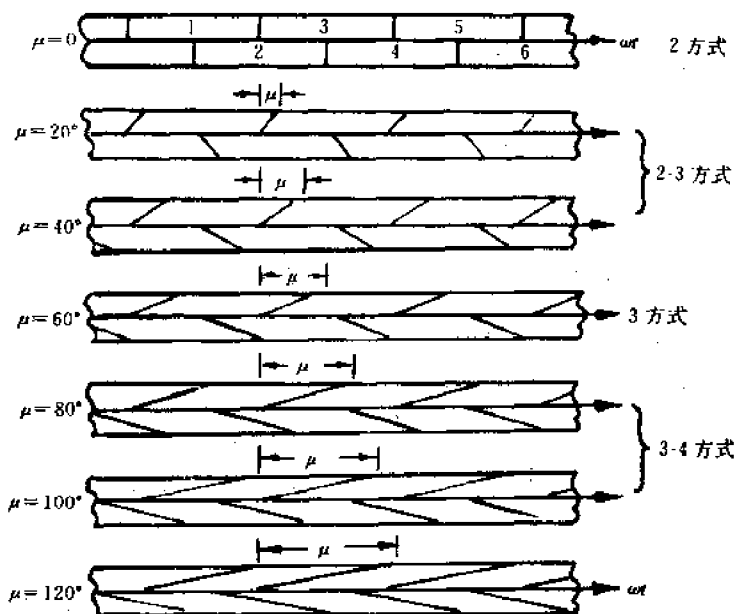


图 2.9 整流器的运行方式

## 2.3 逆变器的工作原理

在直流输电系统中, 为了满足用户的要求, 还需要把直流变换为交流, 这就需要所谓的逆变器。逆变器与整流器具有相同的换流装置, 只是各自的运行条件不同。

本节主要简述逆变的基本概念, 逆变器的运行特性, 有关各参数的基本关系式, 同时了解整流与逆变状态的相同和不同之处。

## 一、逆变的基本概念

前面所讨论的整流器工作原理,是在 $\alpha$ 角较小的情况。如果 $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ ,则换流器直流端电压瞬时值 $U_d$ 将交替地出现正值和负值,见图 2.10。如果整流器不经直流电抗器 $L_d$ 平波而直接接到纯电阻负荷,由于换流阀的单向导电性,只有在瞬时电压为正的各段时间内,才有断续的电流送出。

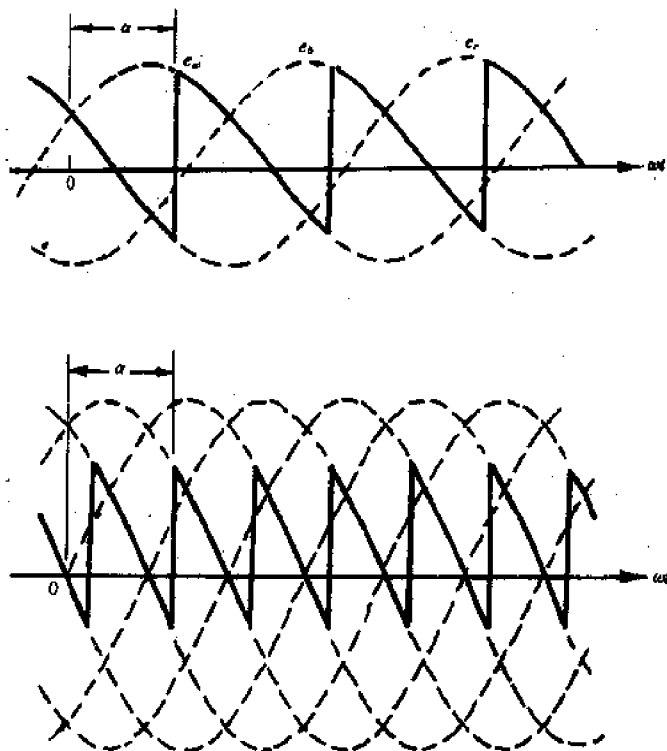


图 2.10  $60^\circ < \alpha < 90^\circ, \mu = 0$  时换流器的电压波形

当 $\alpha = 90^\circ$ 时,直流电压 $V_d$ 曲线所决定的正负面积相等,直流电压的平均值为零,换流器不能送出直流电流,也就是不能再起整流作用了。

如果 $\alpha > 90^\circ$ ,则直流电压 $V_d$ 曲线所决定的负面积大于正面积, $V_d$ 变为负值而反向。当 $120^\circ < \alpha < 180^\circ$ 时,代表电压的面积全部是负的,见图 2.11, $V_d$ 也就负得更多,到 $\alpha = 180^\circ$ 时, $V_d = -V_{d0}$ ,达到负的极值。

在 $\alpha > 90^\circ$ 情况下,换流器不可能沿着阀可导通的方向向负荷送出直流电流。但是,如果如图 2.11 的接线,则右边的换流器作为逆变器运行,电流就可沿回路流通了。

为了使换流器由整流状态转变为逆变状态,除改变直流电压的极性外,还必须加大延迟角,使 $\alpha > 90^\circ$ 。所以,对整流范围, $0 < \alpha < 90^\circ$ ;而对逆变范围, $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ 。在分析逆变状态时,为了方便,通常以超前角 $\beta$ 代替延迟角 $\alpha$ ,它们两者之间的关系为:

$$\begin{aligned} \beta &= 180^\circ - \alpha \\ \text{或} \quad \alpha &= 180^\circ - \beta \end{aligned} \quad (2.14)$$

## 二、逆变器的工作原理

逆变器的工作原理与整流器的工作原理有很多相同之处,也有一些不同点。其主要不同点在于逆变器是利用加在阀上的交流电压处于负半周时使阀导通。此时  $\alpha > 90^\circ$ , 直流平均电压  $V_d$  为负值, 实质上  $V_d$  起一个反电势的作用。

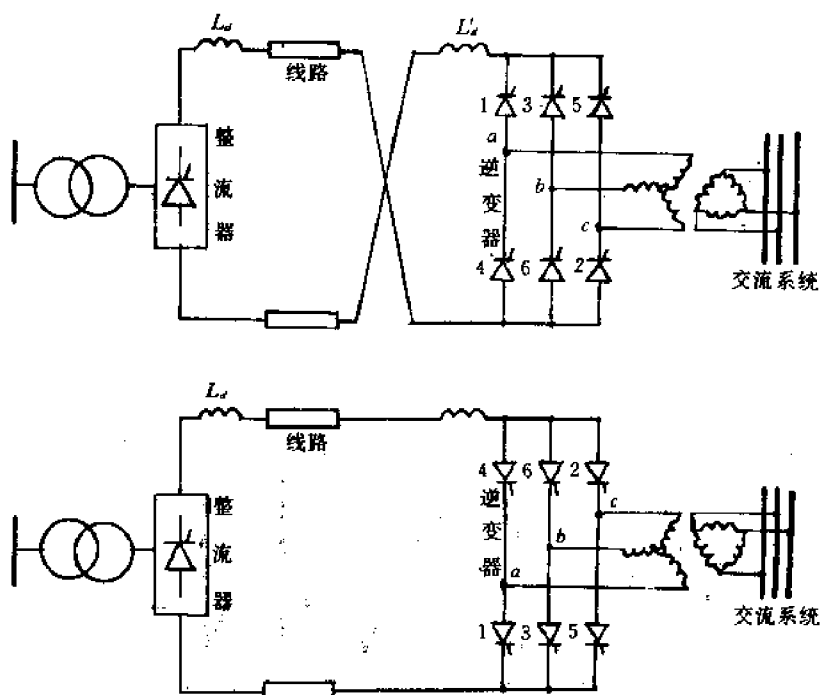


图 2.11 作为逆变器运行的换流器

要使逆变器导通, 必须满足下列充分必要条件:

(1) 在直流母线上加一个足够大的直流电压, 以克服反电势的作用, 才能使电流流通;

(2) 在直流电压小于交流反电势的瞬时值时, 为了保持电流的连续, 直流回路中要有充分大的电感, 利用贮藏在磁场中的能量帮助电流连续导通而不致中断。

下面通过图 2.12 来分析逆变器的工作原理。

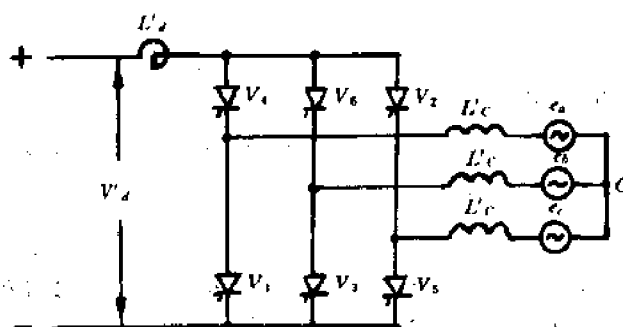


图 2.12 逆变器的原理接线图

图中, 系统的等值电抗为  $L_c$ , 直流平均电压为  $V_d$ 。应特别注意, 直流母线  $M$ 、 $N$  两极的接法与整流器正好相反,  $M$  接至上半桥的共阳极,  $N$  接至下半桥的共阴极。

首先分析阀  $V_1$  在  $e_1$  接近负半周时, 才给以触发脉冲使之导通, 见图 2.13。  $e_1$  是接在阀  $V_1$

的阴极上,它处于低电位为什么能使 $V_1$ 导通呢?这是因为外加直流电压 $V'$ ,在 $V_1$ 的阳极端提供了一个比 $e_a$ 还要低的电位,所以阀 $V_1$ 处于正向电压下,一经触发就能导通。由于在阀 $V_1$ 导通前,阀 $V_5$ 处于导通状态,为了使 $V_5$ 能向 $V_1$ 换相,必须使与 $V_1$ 联系着的 $e_a$ 电位高于与 $V_5$ 联系着的 $e_c$ 的电位,也就是说换相应在此点之前完成。否则, $V_5$ 的 $e_c$ 电位会迫使 $V_1$ 处于反向电压下使之关断。 $V_5$ 关断的时刻,即图 2.13 中 $L$ 和 $c_4$ 点之间的时间间隔用电气角度来表示,称为熄弧角 $\gamma$ ,它是逆变器运行中的一个重要参数。

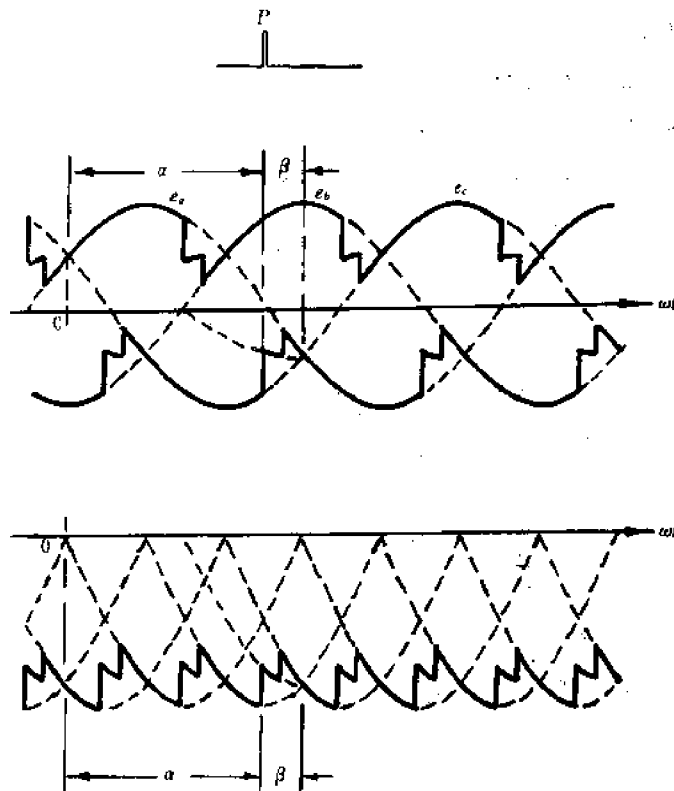


图 2.13 逆变器的电压波形图

每个晶闸管阀在熄弧角 $\gamma$ 期间内虽然已经关断,但是还需要使载流子有一个复合过程。如果熄弧角太小,在过 $c_4$ 点之后, $V_5$ 又承受正向电压,而它的载流子还未复合完时,则不再经触发就会导通,使 $V_1$ 承受反向电压而被迫关断( $e_c > e_a$ ),因而造成所谓的“换相失败”,所以逆变器的熄弧角 $\gamma$ 必须有一最小值 $\gamma_{min}$ 。从图 2.14 中可以看出: $\beta = \gamma + \mu$ 。

阀 $V_1$ 导通后, $e_a$ 下降至 $W$ 点之后,将低于外加的直流电压 $V'_d$ 。按理说,阀 $V_1$ 承受了反向电压应该关断,但因贮藏在 $L'_d$ 中的磁场能量放出,维持了电流继续导通而不致断流,直到阀 $V_5$ 触发时,这样上述过程又重新开始。

上半桥的 3 个阀( $V_4$ 、 $V_6$ 、 $V_2$ )其导通的情况也和下半桥阀 $V_1$ 相似,但是,它们是在交流反电势为高电位时导通。总的来说,逆变器的工作规律是:电流从高电位的阀流进,经低电位的阀流出。这种情况之所以成为可能,是因为直流回路提供有足够大的直流电压和磁场能量的缘故。

从前面分析可以看出,换流器运行在整流或逆变状态,取决于正确的选择调节触发脉冲的



相位(即触发角)。换流器的这一特点,为在直流输电的“潮流翻转”和其它方面的调节控制提供了非常有利的条件。

逆变器的换相过程和整流器相似,也是由逆变侧交流系统提供换相电流来实现,所以,根据换相原理也可推得直流电流的方程式

$$I_d = \frac{E}{\sqrt{2} \omega L'_c} (\cos \gamma - \cos \beta) = I_{d2} (\cos \gamma - \cos \beta) \quad (2.15)$$

式中  $\beta$ ——超前角;

$\gamma$ ——熄弧角;

$\omega L'_c$ ——逆变侧交流侧的换相电抗。

逆变器的直流平均电压

$$\begin{aligned} V'_d &= \frac{1}{\pi/3} (A_\beta + \Delta A) = -V_{d0} \cos \alpha + \Delta V \\ &= -V_{d0} \cos (180^\circ - \beta) + \Delta V \\ &= V_{d0} \cos \beta + \Delta V \end{aligned} \quad (2.16)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta A &= \frac{1}{2} \int_{\gamma}^{\gamma+\mu} \sqrt{2} E \sin \omega t d\omega t \\ &= \frac{\sqrt{2} E}{2} [\cos \gamma - \cos (\gamma + \mu)] \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta A}{\pi/3} = I_d \frac{3\omega L'_c}{\pi} = I_d R_\beta \quad (2.18)$$

则

$$V'_d = V_{d0} \cos \beta + I_d R_\beta \quad (2.19)$$

式中,  $R_\beta = \frac{3\omega L'_c}{\pi}$ ——逆变侧等值换相电阻。

## 第三章 换流站及其主设备

### 3.1 引言

高压直流输电系统主要包括换流站和线路两大部分。换流站(包括整流站和逆变站)由于设备较多,价格较贵,因此,它是高压直流输电系统最主要的组成部分。有关直流线路部分在第四章中介绍,本章将主要介绍换流站的主要设备。

换流站中主要电气设备包括:

1. 换流器 其主要作用是将交流电力转换成直流电力或反之。
2. 换流变压器 向换流器提供交流功率或从换流器接受功率的变压器。
3. 交流断路器 将直流侧空载的换流装置投入到交流电力系统或从其中切除。当换流站主要设备发生故障时,在直流电流的旁路形成后,可用它将换流站从交流系统中切除。
4. 直流电抗器 又称为平波电抗器,其主要作用是抑制直流过电流的上升速度,并用于直流线路的滤波,同时对于沿直流线路向换流站入侵的过电压也将起缓冲作用。
5. 阻尼器 并联于换流器阀的阻尼器,主要用来阻尼阀关断时引起的振荡,抑制相过电压,线路阻尼器用于阻尼线路在异常运行情况下发生的振荡。
6. 滤波器 主要作用是对交流侧和直流侧进行滤波。装于交流侧的称为交流滤波器,装于直流侧的称为直流滤波器。交流滤波器除了对交流侧进行滤波外,还可为换流站提供一部分无功功率。
7. 无功补偿装置 换流器在运行时需要消耗无功功率,除了滤波器提供部分无功外,其余则由安装在换流站内的无功补偿装置(包括电力电容器、同步调相机和静止补偿器)提供。逆变站的无功补偿装置,一般还应供给部分受端交流系统负载所需要的无功功率。另外,无功补偿装置可兼作电压调节之用,静止补偿器和装有快速励磁调节器的同步调相机也有助于提高直流输电系统的电压稳定性。
8. 过电压保护器 其作用是保护站内设备(特别是换流器)免受雷击和操作过电压之害。在有直流电压的结点必须装设直流避雷器。
9. 电压互感器和电流互感器 对交流系统采用交流电压互感器和电流互感器;对直流侧需采用直流电压互感器和直流电流互感器。
10. 接地电极 其主要作用是连接大地(或海水)回路、固定换流站直流侧的对地电位。
11. 调节装置 根据系统的运行情况,自动控制换流器的触发相位,调节直流线路的电压、电流和功率。
12. 继电保护装置 检测换流站内设备(特别是换流器)和直流线路的故障、并发出故障处理的指令。
13. 高频阻塞装置 抑制换流器在换相过程中所引起的无线电干扰。

本章主要讨论换流站中一次主要设备,包括换流器、换流变压器、直流电抗器、滤波器等,并了解对这些设备的一些特殊要求。

### 3.2 晶闸管换流器

直流输电工程中所用的换流阀有两种:汞弧阀和晶闸管阀(可控硅阀)。汞弧阀是一种具有汞弧阴极的真空离子器件。它是通过汞蒸汽的电离来实现单向导电的。由于汞弧阀在运行中会产生逆弧、熄弧等故障,阳极与阴极的温度有不同的要求以及安装、维护比较复杂等原因,目前已不采用。晶闸管阀由于克服了汞弧阀的缺点,因此降低了发生故障的概率,提高了运行可靠性;可以省去采用汞弧阀所需要的旁通阀,也延长了换流变压器的使用年限;采用晶闸管阀还可以较长时间地运行于较大的触发角,以实现无功功率和交流电压的调节。与汞弧阀相比,晶闸管阀还具有不需要真空装置、装配室等辅助设施,甚至可以装设于户外,维护简单,额定电压选择的自由度较大等优点。

随着电子工业的发展,晶闸管的造价将进一步降低,所以目前设计的直流输电工程换流器均采用晶闸管阀,以致早期的直流工程也将汞弧阀改换为晶闸管阀。

#### 一、对晶闸管元件的基本要求

在选择晶闸管元件时,一般要求各元件具有下列特性:

1. 耐压强度高 从晶闸管元件的阳极伏安特性可知,其反向特性与二极管相似,要求在正向电压时,控制极加上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。

2. 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 3.1 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。

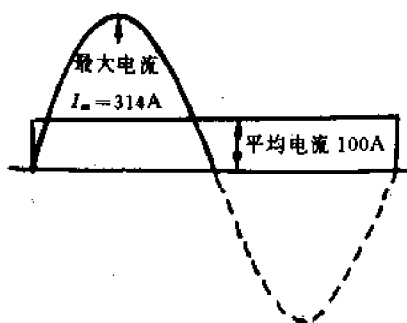


图 3.1 晶闸管元件通态电流平均值

#### 3. 开通时间和电流上升率( $di/dt$ )的限制

当晶闸管元件阳极电压为正,并在控制极加上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。它的通态电流上升和通态电压下降都有一个过程,如图 3.2 所示。

图中,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  $t_r$  (上升是指阳极电流相应的上升而言),两者之和 ( $t_d$

+ $t_k$ )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。

晶闸管元件在开通过程中,是由靠近控制极附近的很小区域导通,然后逐渐向外围扩展。如果刚刚开通时,就通过很大的阳极电流,势必在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  $di/dt$  有一个限值,约为  $100A/\mu s$ 。

#### 4. 关断时间与电压上升率 $dV/dt$ 的限制

在外电路的作用下,晶闸管阳极电流下降到零,而且在随后的一段时间内阳极电压处于反向的情况下,晶闸管元件可以从通态转入断态。它的关断同样也有一个过程,如图 3.3 所示。图中从阳极正向电流降到零开始,到正向阻断能力恢复为止,这一段时间称为关断时间  $T_g$ ,大功率晶闸管的关断时间为  $200\mu s$  左右。

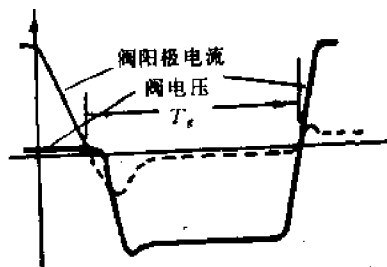


图 3.3 晶闸管元件的关断时间

晶闸管阀按绝缘方式分为空气绝缘阀和油浸式绝缘阀两类。按冷却方式分为风冷、油冷和水冷,按安装地点分为户内和户外式。一般空气绝缘阀为户内型,油浸绝缘阀为户外型,各有其优缺点。为了缩小阀的体积,使整个换流站更加紧凑,目前已开发了新型的 SF<sub>6</sub> 绝缘氟里昂冷却阀。

晶闸管阀是由数十个至上百个晶闸管元件串并联组成,其元件的额定值和它的串并联数,是阀设计的基本参数。在阀的设计中,通常用电压设计系数(VDF)和电流设计系数(CDF)作为选择晶闸管串并联数的依据。其 VDF 和 CDF 的表示式如下所示:

$$VDF = \frac{\text{元件的额定电压} \times \text{元件串联数}}{\text{阀的额定电压}} \quad (3.1)$$

$$CDF = \frac{\text{元件的额定电流} \times \text{元件并联数} \times 3}{\text{阀的额定电流}} \quad (3.2)$$

在晶闸管元件的选择中,VDF 和 CDF 一般取值在 3~4 的范围内。

显然,采用额定值大的元件,可以减少元件的串并联数,也可相应地减小和简化阀的控制。

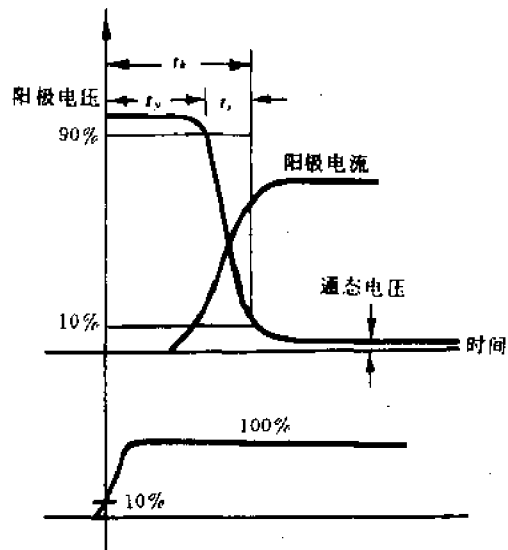


图 3.2 晶闸管元件的触发开通过程

如果晶闸管元件的控制极不加触发脉冲,但在阳极上突然加一个正向电压(即电压上升率  $dV/dt$  很高的电压),即使这一电压并未超过晶闸管的转折电压也会使其导通。因此晶闸管元件有一个允许的电压上升率  $dV/dt$ ,其数值为  $200V/\mu s$  左右。

## 二、晶闸管元件的分类及选择

晶闸管阀按绝缘方式分为空气绝缘阀和油浸式绝缘阀两类。按冷却方式分为风冷、油冷和水冷,按安装地点分为户内和户外式。一般空气绝缘阀为户内型,油浸绝缘阀为户外型,各有其优缺点。

为了缩小阀的体积,使整个换流站更加紧凑,目前已开发了新型的 SF<sub>6</sub> 绝缘氟里昂冷却阀。

晶闸管阀是由数十个至上百个晶闸管元件串并联组成,其元件的额定值和它的串并联数,是阀设计的基本参数。在阀的设计中,通常用电压设计系数(VDF)和电流设计系数(CDF)作为选择晶闸管串并联数的依据。其 VDF 和 CDF 的表示式如下所示:

$$VDF = \frac{\text{元件的额定电压} \times \text{元件串联数}}{\text{阀的额定电压}} \quad (3.1)$$

$$CDF = \frac{\text{元件的额定电流} \times \text{元件并联数} \times 3}{\text{阀的额定电流}} \quad (3.2)$$

在晶闸管元件的选择中,VDF 和 CDF 一般取值在 3~4 的范围内。

显然,采用额定值大的元件,可以减少元件的串并联数,也可相应地减小和简化阀的控制。

均压等组件,从而降低阀的造价。

### 三、晶闸管阀的结构

为了节省占地和使用空间,在晶闸管阀的结构方面也有了较大发展(如图 3.4 所示)。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和一台装有 4 个臂的 4 重阀结构(图 3.4(b))。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。

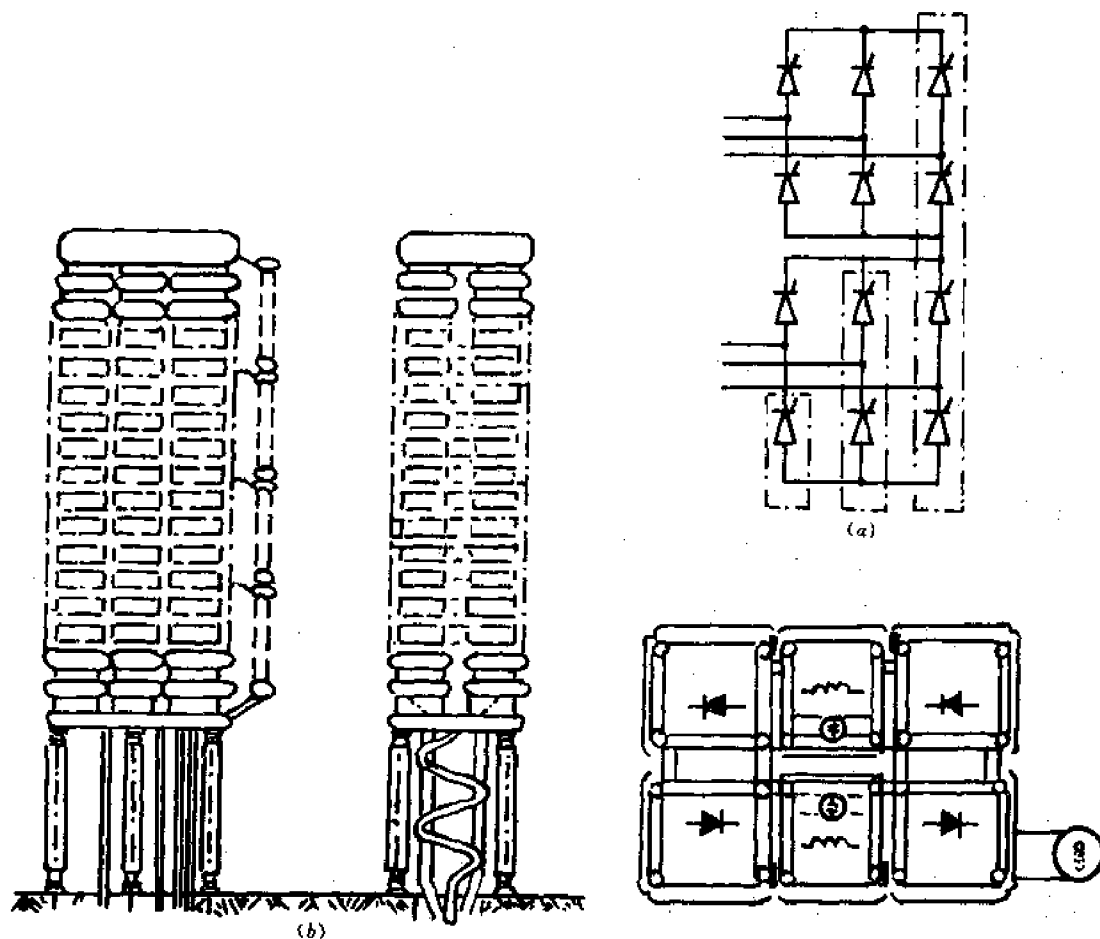


图 3.4 单阀和多重阀结构的原理接线和模型图

### 3.3 换流变压器

换流站所用的电力变压器称为换流变压器,它和普通电力变压器在结构上基本相同。但由于两者运行条件的不同,所以换流变压器在设计、制造和运行上都具有一定的特点。

## 一、换流变压器的特点

### 1. 短路电抗

当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。为了防止过大的短路电流通过当时正导通着的健全阀而损坏它的元件,所以换流变压器应具有足够大的漏电抗来限制短路电流。当交流系统容量比换流器容量大得多,即交流系统的等值电抗比换流变压器漏抗小很多时,把换流变压器的漏抗作为换相电抗(短路电抗)。但换流变压器的漏抗也不宜选择得过大,否则换流器在运行中消耗的无功功率将增加,需要加大无功补偿设备的容量,此外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兼顾到这两方面,一般取值为 15%~20%。

### 2. 直流磁化(直流偏磁)

如果换流器触发相所用的时间间隔不相等,则交流相电流的正负半波不同,它的平均值将不等于零。也就是相电流中存在着直流分量,这一直流分量流过换流变压器桥侧绕组时,将产生直流磁化现象(也称直流偏磁)。

这种现象可用图 3.5 来说明。当外加在换流变压器绕组的电压波形为正弦波时,变压器的感应电势和铁心中磁通的波形也接近于正弦波。假定磁通波形如图左侧的  $\Phi(t)$  曲线所示有一个直流分量  $\Phi_0$ ,由于感应电势和磁通变化率成正比,所以  $\Phi_0$  的大小对感应电势没有影响。通过  $\Phi-i$  曲线上对应点的坐标,可以得到产生磁通  $\Phi(t)$  所需的激磁电流  $i(t)$ 。有了激磁电流波形后,即可求得它的平均值  $i_0$ ,也就是相应的激磁电流的直流分量。

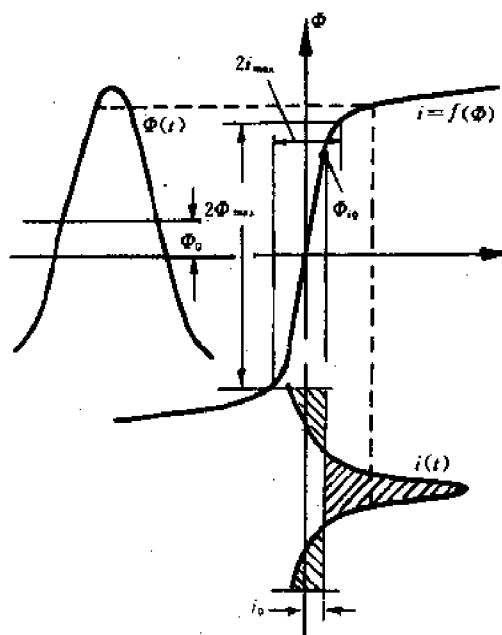


图 3.5 换流变压器的直流磁化

在正常情况下,  $i_0=0$ , 相应的  $\Phi_0=0$ ,  $i(t)$  正负半波是对称的。 $\Phi-i$  曲线在  $2\Phi_{\max}-2i_{\max}$  的对称范围内,其幅值较小。

如果激磁电流有了直流分量后,  $\Phi_0$  增大,激磁电流在每周期中有一个很高的尖峰值,铁心偏于  $\Phi-i$  曲线一边运行,这就是换流变压器的直流磁化(偏磁)现象。由于铁心周期性饱和,发出低频的噪声,它的频率只有正常激磁情况下的变压器噪声频率的一半,可以把这种低频噪声作为换流变压器发生直流磁化的征兆。与此同时,变压器的损耗和温升也将增加。

### 3. 噪声

由于换流变压器铁心的磁致伸缩使变压器发出噪声(不同于前述的低频噪声),一般换流变压器的噪声频率为工频的 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

$L_a$ ——每相阳极电抗感的总和, H。

由于换相电抗  $X_c$  主要是由变压器电抗  $X_L$  所决定, 则适当选择变压器电抗百分数, 就能基本确定  $X_c$  的数值, 从而使短路电流限制在晶闸管阀能够承受的范围之内。

### 三、对换流变压器分接头调压的要求

为了使换流器的触发角在不同的运行情况下都能保持在适当的范围内, 以免功率因数过低, 并使经常运行的换流变压器无功消耗最小, 要求换流变压器最好能带负荷调压。调压范围一般为  $\pm 15\%$ , 每档分接头调节量以  $1\% \sim 2\%$  为宜。

## 3.4 直流电抗器

直流电抗器(又称平波电抗器)在主回路中的作用主要有以下几个方面: 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输电回路发生故障时能抑制电流的上升速度。从以上作用来看, 希望它的电感量  $L_d$  越大越好。但是  $L_d$  过大, 当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。另外作为一个延时环节,  $L_d$  过大对直流电流的自动调节不利。所以在满足上述三项要求的前提下, 直流电抗器的电感  $L_d$  应尽量小。

#### 1. 减少直流侧的交流脉动分量

换流器对于直流输电线路来说, 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

$$n = Kp \quad (3.12)$$

式中  $p$ ——脉波数, 对三相桥式  $p=6$ (单桥);

$K$ ——正整数, 取  $1, 2, 3, \dots$ 。

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

$$V_{(n)0} = V_{a0} \frac{\sqrt{2}}{(n^2 - 1)} \quad (3.13)$$

对于不同的  $\alpha$  和  $\mu$ ,  $n$  次谐波电压的有效值  $V_{(n)}$  将随这些参数而变。例如, 对 6 次谐波, 可查图 3.6 得出其 6 次谐波电压  $V_{(6)}$  与基波电压  $V_{(1)}$  的比值。

根据允许的谐波电流百分含量  $I_{(n)\%}$  (通常在  $3\%$  左右), 就可用下式计算出直流电抗器的电感值  $L_d$

$$L_d = \frac{V_{(n)\max}}{n \cdot \omega \cdot I_{(n)\%} \cdot I_d} \times 100 \quad (3.14)$$

式中  $V_{(n)\max}$ —— $n$  次谐波电压最大值, V;

$I_d$ ——额定直流电流, A;

$\omega$ ——角频率;

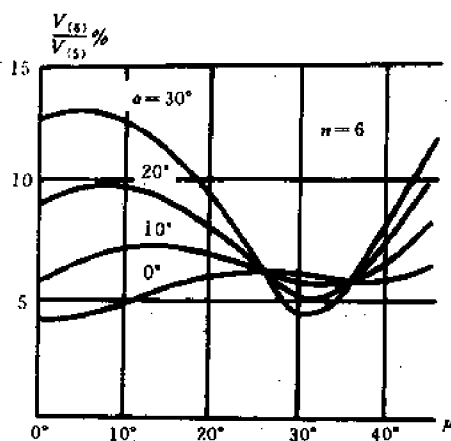


图 3.6 6 次谐波电压和  $\alpha, \mu$  角的关系图

$n$ ——谐波次数。

## 2. 小电流时保持电流的连续性

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

$$L_P = \frac{V_{d0}}{\omega I_{d\min}} \times 0.0931 \sin \alpha \quad (3.15)$$

对双桥运行时

$$L_P = \frac{V_{d0}}{\omega I_{d\min}} \times 0.023 \sin \alpha \quad (3.16)$$

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  $0.1I_d$ )。

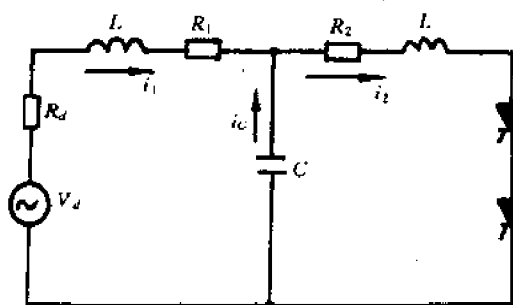


图 3.7 逆变阀换相失败的等值图

## 3. 直流短路时抑制电流上升速度

在直流输电系统中,逆变阀换相失败是一种常见的直流短路故障。事故阀不仅流过整流器提供的短路电流,而且还流过线路电容的放电电流。特别是电容  $C$  的放电电流  $i_c$  并不受电流调节器的控制,只有依靠逆变侧直流电抗器  $L_d$  来抑制,其等值图如图 3.7 所示。

短路电流  $i_k$  可用下式求得

$$i_k = i_1 + i_c \quad (3.17)$$

$$i_1 = I_{d0} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{V_d}{2R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) - \frac{1}{2} i_c \quad (3.18)$$

$$i_c = \frac{2V_d}{\omega L_d} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega t \quad (3.19)$$

式中  $I_{d0}$ ——事故前的直流电流。

$$\tau = \frac{2L}{R} \quad \omega = \sqrt{\frac{2}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad R = \frac{R_d + R_1 + R_2}{2}$$

由上式可知,  $i_k$  是直流滤波器电感  $L_d$  的函数,以一定的  $L_d$  值代入,可以画出  $i_k$  和时间变量  $t$  的关系曲线,由此可以验算这个  $L_d$  值是否能把故障电流上升速度限制在允许的范围内。

根据上述三个要求,选取直流电抗器电感值  $L_d$  的具体方法是:按第 1 种情况确定电感值;以第 2 种和第 3 种情况进行验算,在实际工程中  $L_d$  一般取  $0.5\text{H} \sim 1\text{H}$ 。

为避免电流发生间断,有时要求直流电流为额定值的 10% 时,  $L_d$  的值能增大到额定值的二倍。这时采用带铁心的电抗器,能更好地满足这个非线性要求。

## 3.5 换流站的平面布置

现代晶闸管换流站的面积仅仅是早期汞弧换流站面积的几分之一。

图 3.8 表明一典型的双极换流站的平面布置图。



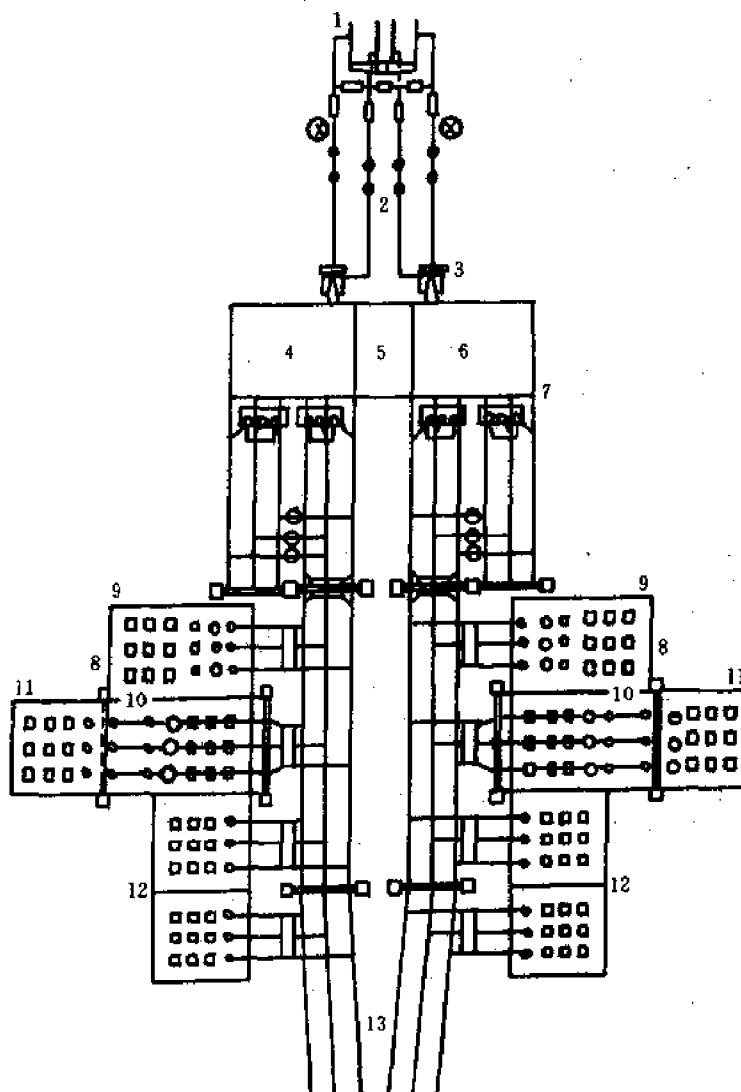


图 3.8 典型双极换流站的平面布置图

- 1—直流和电极线路 2—直流开关场 3—平波电抗器 4—阀厅、极 1  
5—带有控制室的生产用房 6—阀厅、极 2 7—换流变压器 8—交流滤波器  
9—高通滤波器 10—11 次滤波器 11—13 次滤波器 12—并联电容器 13—交流开关场

在整个换流站中,滤波器和电力电容器所占面积最大,约为  $1/3$ ,所以这些装置的小型化是换流站建设中的一个重要课题。

换流站的平面布置是围绕阀厅而展开的。阀厅中安装有换流阀及其辅助设备,并需要一定的维护和检修面积。所以,对阀厅有如下的特殊要求:①环境要求清洁;②要求防止和降低阀触发时可能引起的无线电干扰;③满足对温度的调节。

在阀厅的布置中,要考虑下述一些基本的条件:

- (1)各设备之间要有一定的距离。
- (2)要有检修、维护及测量的通道。

(3)便于运输和事故时拆除设备。

(4)阀组之间的连接要尽量减少杂散电容。

根据一般的情况,阀厅的布置有以下几种布置方式:

(1)直线布置方式(一字型)。

(2)背对背布置方式。

(3)垂直布置方式。

各种布置方式各有其优缺点,布置方式如图 3.9 所示。

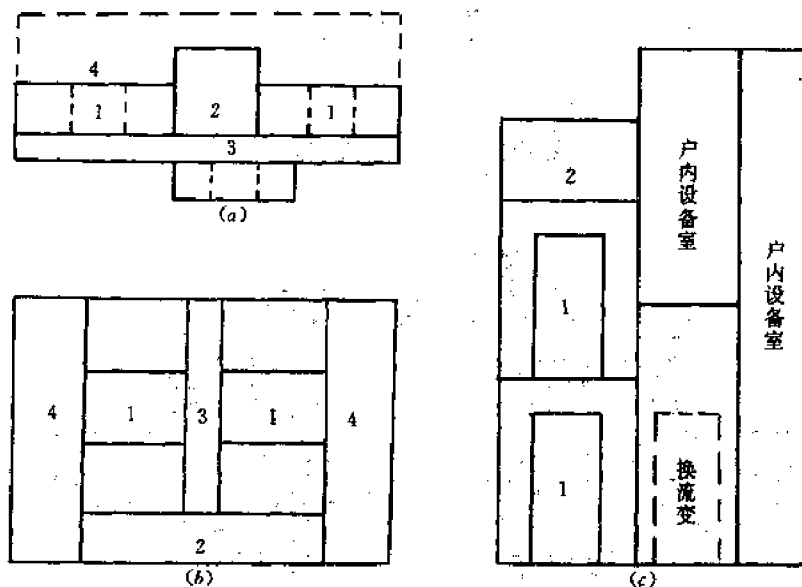


图 3.9 阀厅的布置方式简图

1—阀厅 2—控制室 3—通道 4—开关场

(a)直线布置方式 (b)背靠背布置方式 (c)垂直布置方式

## 第四章 高压直流输电线路

### 4.1 引言

高压直流输电线路按其结构可分为架空线路、电缆线路以及架空、电缆混合线路三种类型;按其接线方式可分为单极线路、双极线路等。

一般直流系统中的“极”对应于三相交流系统中的“相”,但应注意,从电力传输的角度来说,交流系统中的三相是同时起作用的;而直流系统中的“极”则能单独地输送电力。

从第一章的分析中,已经了解到直流架空线路在线路投资和运行费等方面都比交流架空线路经济。对于电缆线路,在有色金属和绝缘材料相同的条件下,两根心线的直流电缆线路输送的功率  $P_d$  比三根心线的交流电缆线路输送的功率  $P_a$  大得多。在跨海峡等必须用电缆线路进行输电时,如果用直流电缆,则线路部分的造价可比交流电缆输电低得多,而在有些情况下,只能采用直流电缆进行送电。

电缆用于交流时,除了心线的电阻损耗之外,还存在绝缘的介质损耗以及铅包和铝装中的磁感应损耗,而用于直流时,则基本上只有心线的电阻损耗且绝缘的老化也缓慢得多。因此,直流电缆的年运行费用比相应的交流电缆低得多。

### 4.2 高压直流架空线路的额定电压与分裂导线

#### 一、额定电压

直流架空线路的额定电压,不但决定着输电线路本身的建设费用,而且也直接影响换流站的投资。当输送功率一定时,采用不同的线路电压将影响线路每极导线的总截面积,而当导线的总截面积一定时,采用不同的导线分裂数和相应的导线直径,又将导致不同的导线表面电场强度,从而引起不同的电晕损耗以及无线电干扰水平。因此,在选择线路电压时,不仅要考虑线路本身及两端换流站的全部费用,而且要使所选择的导线截面和分裂数满足导线表面允许电场强度的要求;同时,还必须考虑线路的输送容量和电压应与阀桥的额定电压及电流相配合,以便使线路和阀桥都得到充分的利用。

目前,交流输电电压在世界各国已有标准的电压等级系列,但对直流输电的标准电压等级各国都没有作出统一的规定,这是因为,把晶闸管元件或阀桥串并联,可以方便地获得不同的直流电压和电流。根据输送的容量和距离,目前世界各国常采用的直流输电电压有:  $\pm 400\text{kV}$ 、 $\pm 500\text{kV}$ 、 $\pm 600\text{kV}$  等。

直流输电线路的额定电压,可以根据其经济电压  $V_e$  进行初步选择,然后经过技术经济论

证才能最终确定。其  $V_m$  可按下述经验公式进行计算

$$V_m = \pm \sqrt{\frac{P_d \cdot l \cdot 10^3}{3.398l + 1.408P_d}} \text{ kV} \quad (4.1)$$

式中  $P_d$ ——输送的直流功率, MW。

$l$ ——输送距离, km。

为了限制电晕损耗和无线电干扰, 选择的额定电压值, 还应根据临界电晕电压进行校验, 满足额定电压小于临界电晕电压的要求。

临界电晕电压的计算, 可根据下述步骤进行:

(1) 求取起始电晕的临界应力  $\epsilon_c$ , 其值与导线表面、污秽以及天气条件(雨、雾、湿度等因素)有关。

对半径为  $r$  的光滑单导体, 根据公式

$$E_c^2 - 2E_c \ln E_c = 1 + \frac{A_0}{r} \frac{p}{p_0} \quad (4.2)$$

再利用牛顿-拉夫逊法解得电晕起始场强  $E_c$ , 则起始电晕的临界应力  $\epsilon_c$  为

$$\epsilon_c = E_c \epsilon_0 \quad (4.3)$$

在式(4.2)和(4.3)中

$\epsilon_0$ ——导线表面电位梯度, 一般取 22.8 kV/cm;

$p$ ——大气压力;

$p_0$ ——标准大气压, 为 760 mm 高汞柱;

$A_0$ ——常数  $A_0 = \ln \left( \frac{1+\theta}{\theta} \right) / 0.168 \epsilon_0^2$ ;

$\theta$ ——每个离子发射的二次电子数, 取  $10^{-4}$ 。

(2) 对于  $n$  根光滑导线组合的分裂导线束

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_m &= E_m \epsilon_0 \\ E_{cn} &= E_c - \Delta n \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

式中

$$\Delta n = (n-1) \sin \frac{\pi}{n} \frac{r}{d} \frac{E_c \left( 2 + \frac{1}{2E_c} - \frac{5}{2} E_c + (E_c + 2) \ln E_c \right)}{(E_c - \ln E_c - 1)}$$

$d$ ——分裂间距。

(3) 单极线路的临界电晕电压

$$V_c = \epsilon_0 \gamma_m \ln \frac{2h}{r} \quad (4.5)$$

式中  $m$ ——导线不光滑系数, 对不光滑导线  $m=0.82$ , 对光滑导线  $m=1$ 。

(4) 双极线路的临界电晕电压

$$V_c = 2\epsilon_0 r m \ln \frac{A}{r} \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{A}{2h} \right)^2}} \quad (4.6)$$

式中  $A$ ——线路导线的极间距;

$h$ ——导线平均对地高度。

#### (5) 计算分裂导线的临界电晕电压

$$V_{ca} = k_n V_c \quad (4.7)$$

式中  $k_n$ ——分裂系数,可查有关资料。

### 二、分裂导线数

无论采用哪种接线方式,直流架空线路每极导线都可以采用单导线或分裂导线。不过在直流架空线路上采用分裂导线的优点不如交流线路那样显著。

在电压为 $\pm 400\text{kV}$ 及以上的超高压直流输电的情况下,导线截面和每极分裂导线数的选择受到电场强度与电晕损耗的影响。为了减少电晕损耗与无线电干扰,一般应考虑采用分裂导线,但在同样的电压等级下,直流导线的分裂数可比交流线路少。

为了保证导线表面电场强度不大于光滑导线整体电晕起始电场强度的 $0.75\sim 0.82$ 倍,容许的最小导线截面和最小分裂导线数如表4.1所示。

表 4.1

电压(kV)	每极导线的最小分裂数	最小截面 $S_{\min}(\text{mm}^2)$
$\pm 400$	2	712
$\pm 500$	3	480
$\pm 600$	3	712
$\pm 700$	4	712

## 4.3 高压直流架空线路的电晕效应

### 二、直流电晕的基本特点

电晕放电是一种自持放电现象,开始产生电晕时的电压称为电晕起始电压  $V_c$ ,而电极表面的场强称为电晕起始场强  $e_c$ 。

气体放电过程中的光、声、热等效应以及化学反应都将引起能量损耗。电晕放电过程中,由于起始阶段的放电特点及电压较高时流注不断熄灭和重燃爆发,会出现放电的脉冲现象。因此电晕放电会形成高频电磁波,引起干扰。电晕放电还能使空气发生化学反应,造成臭氧及氮氧化物等产物引起腐蚀作用。

在直流电压作用下,由于导线附近强场区发生游离的结果,使整个电极空间出现了离子流或空间电荷。空间电荷的存在改变了原有的电场分布,也就是说直流电晕的强度受到本身空间电荷的限制。这些电荷一经产生就必然移动到地面或极性相反的另一极上去。在单极直流电晕的情况下,整个电极空间充斥着符号与导线极性相同的空间电荷,这将使导线附近的电场减弱,起到良好的“屏蔽”作用。在双极情况下,由于在导线间同时存在着两种极性相反的离子流彼此削弱对方所造成的屏蔽效应,因此双极导线的电晕损耗要比两根极性相反的单极线路的电晕损耗之和大得多。

交流电晕特性与直流电晕特性大不相同,由于导线的极性周期地易号,交流电晕后的离子

群只在导线附近的空间来回振荡,很少有离子漂游到较远的地方。正是由于这一区别,在导线表面电位梯度相同的情况下,交流电晕损耗比相应的双极直流电晕损耗要大得多。

对于直流线路,只要导线表面的电位梯度超过某一数值,正、负极导线上都会发生电晕放电,但正、负极性导线周围的放电机理是不相同的,所以正、负极性下的电晕现象也有很大的差别。

对直流电晕根据其试验研究结果,有如下一些特点:

(1)对单极线路,负极性的电晕损耗约为正极性的两倍。

(2)双极线路的电晕损耗要比两种极性的单极电晕损耗之和大得多(3倍~5倍),它近似地与极间距离的平方成反比。

(3)与交流线路的情况相反,直流线路的电晕损耗基本上取决于好天气时的损耗。因为在坏天气时(雨、雾、雪等),直流电晕损耗比好天气时只增加几倍,而交流电晕损耗在此种情况下则增加几十倍,甚至上百倍。

(4)交、直流线路的年平均电晕损耗的比较表明:当导线表面电位梯度相等时,双极直流线路的年平均损耗仅为相应交流线路的50%~65%;在年平均电晕损耗相同时,直流线路的导线表面工作梯度可比交流线路大5%~10%。

## 二、直流电晕损耗的计算方法

直流电晕损耗的大小受到许多因素的影响,而且其中有些因素是随机的。这些因素主要包括:线路电压、导线截面及表面状况、分裂导线数、分裂间距、极间距离、导线平均对地高度、架空地线以及气象条件等等。因此,要从理论上推导出一个完整的计算方法是相当困难的。目前国外的解决办法是对已经投运的直流线路或试验线路进行实测,通过大量的统计和数据处理,进行理论分析并经修正而得出其经验公式。在目前的经验公式中,较具代表性的皮克公式(Peck)、安乃堡公式(Annebery)、巴布可夫公式(Popkov)、乌尔曼公式(Uhlmann)等。其中,巴布可夫公式比较简单,但考虑的因素较少,误差较大;乌尔曼公式实质上与安乃堡公式相近。因此,国外最常用的是皮克公式和安乃堡公式。

### (1)皮克公式

皮克最初提出的关于电晕损耗的计算公式是针对交流系统的,后经修正的适用于双极直流线路的计算公式为

$$\Delta P_c = \frac{K}{\delta} \sqrt{\frac{r'}{A}} \left[ V - (g_0 m_0 r') \ln \left( \frac{A}{r} \right) \right]^2 \times 10^{-5} \text{ kW/双极} \cdot \text{km} \quad (4.8)$$

式中  $K$ ——经验常数,取  $K=123$ 。

$\delta$ ——大气校正系数,  $\delta=2.94p/273+\theta_0$ 。

$r'$ ——导线等效半径,cm。

$A$ ——极间距离,cm。

$V$ ——极对地电压,kV。

$g_0$ ——导体表面的电晕起始电位梯度,  $g_0=29.8\text{kV/cm}$ 。

$m_0$ ——导体表面粗糙系数,  $m_0=0.47$ 。

$P$ ——大气压,  $p=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

$\theta_0$ ——气温, ( $^{\circ}\text{C}$ )。

## (2) 安乃堡公式

这个公式是根据瑞典的安乃堡试验工程所得到的数据,经分析而得出的。

对单极线路:

直流的电晕电流为

$$I_c = K_c \cdot n \cdot r \cdot 2^{0.25(g_{\max} - g_{02})} \times 10^{-3} \text{ A/极} \cdot \text{km} \quad (4.9)$$

式中  $n$ ——分裂导线根数

$r$ ——分裂子导线半径,cm。

$g_{\max}$ ——在运行电压下导线最大表面电位梯度,kV/cm。

$g_{02}$ ——导线表面的电晕起始电位梯度, $g_{02} = 22\delta$ ,kV/cm。

$\delta$ ——在大气校正系数。

$K_c$ ——导线表面校正系数,取0.5(光滑)~0.35(不光滑)。

直流电晕损耗为:

$$\Delta P_c = V \cdot I_c \text{ kW/极} \cdot \text{km} \quad (4.10)$$

式中  $V$ ——极对地电压,kV

对双极线路:

在双极线路情况下,有一定数量的电流在极间区流过,总的电晕电流将扩大 $(1+K)$ 倍

$$I_{c2} = (1 + K)I_c \quad (4.11)$$

式中

$$K = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{2H}{A}$$

$$g_{\max} = \left[ 1 + (n-1) \frac{r}{R} \right] g$$

$$g = \frac{V/r}{\ln\left(\frac{2H}{r}\right) + (n-1)\ln\left(\frac{2H}{d'}\right) - \frac{n}{2}\ln\left[1 + \left(\frac{2H}{A}\right)^2\right]}$$

$d'$ ——分裂导线中的一根导线对其它导线的几何均距,cm。

$$d' = \frac{d}{\sin \frac{\pi}{n}} \sqrt{\prod_{i=1}^{n-1} \sin \frac{i\pi}{n}}$$

$d$ ——分裂间距,cm。

$V$ ——极对地电压,kV。

$H$ ——导线平均对地高度,cm。

$A$ ——极间距离,cm。

$r$ ——分裂子导线半径,cm。

$n$ ——分裂导线根数。

电晕损耗为

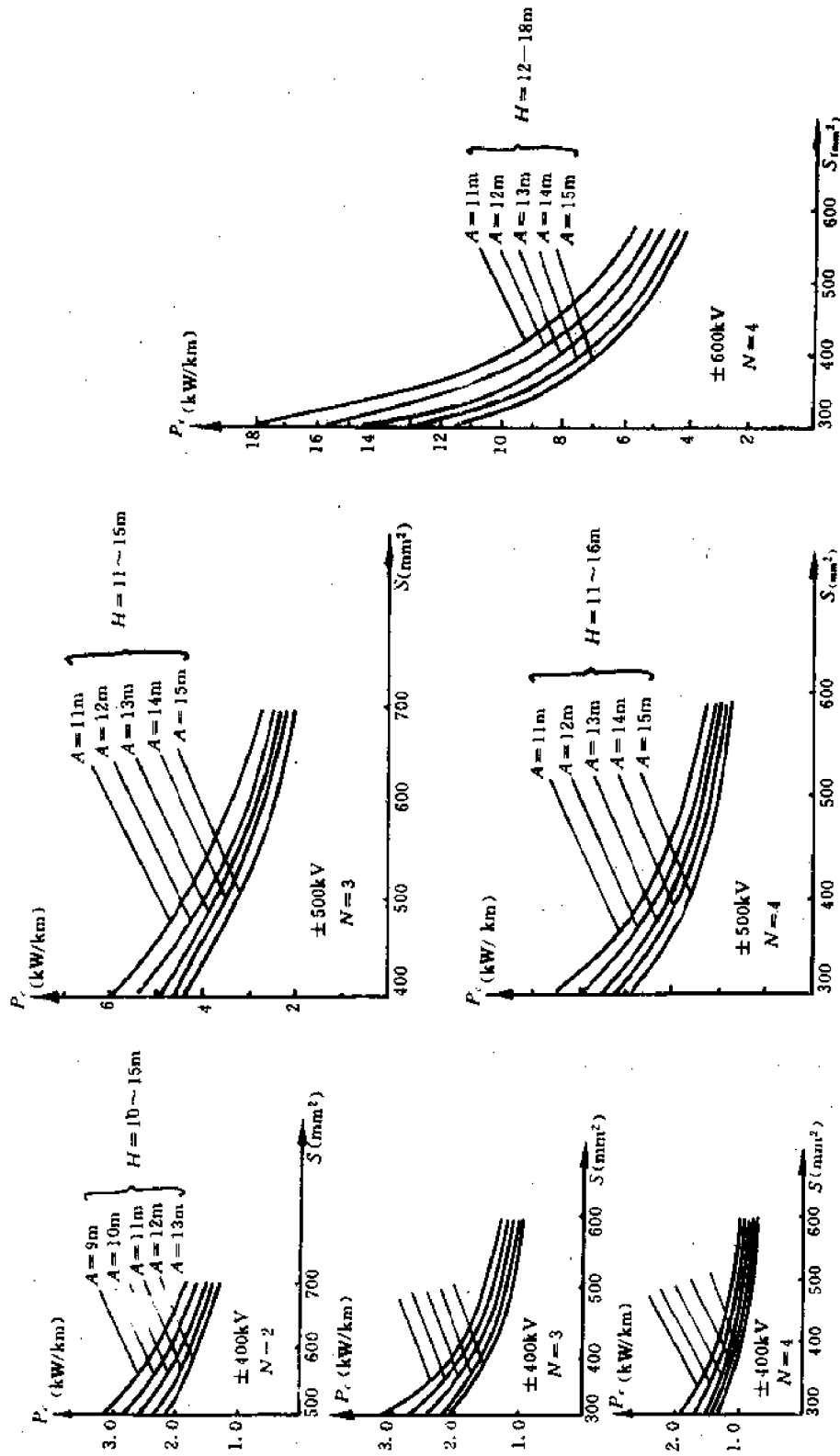
$$\Delta P_{c2} = 2V \cdot I_{c2} \text{ kW/双极} \cdot \text{km} \quad (4.12)$$

(3) 实用计算曲线法:

根据国内外最常用的 $\pm 400\text{kV} \sim \pm 600\text{kV}$ 超高压直流架空线路的具体工程实际需要,考虑

图 4.1 双极直流线路电晕损耗实用计算曲线

图中  $H$ —导线对地高度  $A$ —极间距离  $N$ —分裂导线数





了分裂导线根数  $n=2\sim 4$ , 子导线截面  $S$  为  $300\text{mm}^2\sim 600\text{mm}^2$  (个别情况为  $700$ ), 极间距离  $A$  分别为  $9\text{m}\sim 13\text{m}$ ,  $11\text{m}\sim 15\text{m}$  以及导线平均对地高度  $H$  分别为  $10\text{m}\sim 15\text{m}$ ,  $11\text{m}\sim 16\text{m}$  以及  $12\text{m}\sim 18\text{m}$  等不同的组合, 得出了一组好天气时的电晕损耗实用计算曲线, 如图 4.1 所示。

使用实用计算曲线有如下特点:

1) 电晕损耗曲线的横坐标采用子导线截面 (不是导线表面电位梯度), 使用极为方便。

2) 使用时不必进行繁杂的起始电晕电压的验算工作。

3) 与交流电晕损耗不同, 年平均直流电晕损耗基本上取决于好天气时的值。因此从这些曲线查得的值乘以千米数、再乘以线路的年运行小时数, 即可得出该双极线路的全年电晕损耗电量。

4) 当所要计算的线路的某些参数, 如  $A$  或  $H$  与曲线中的不一致时, 可用插值法得出结果, 不致引起较大的误差, 因此这些曲线具有一定的广泛性。

采用电晕损耗实用计算曲线, 在保证一定的计算精度基础上, 计算十分简便。这对于减少高压直流输电系统的可行性研究、规划设计、工程设计以及交直流输电方案的比较方面的计算工作量, 有明显的作用。

### 三、无线电干扰

高压直流架空线路从三个方面产生无线电干扰: a) 换流阀导通时发生的脉冲, 并经开关站传到线路上; b) 线路上的电晕放电; c) 绝缘子上的局部放电。

随着输电电压的提高, 解决导线电晕所引起的无线电干扰问题就显得日益重要。允许的电晕损耗水平随着电压的提高与输送功率的增加而显著提高, 而允许的无线电干扰水平的绝对值都是固定不变的, 这就给问题的解决带来了困难。有许多国家在交流试验线路上广泛地研究过解决无线电干扰问题的方法, 这些研究所得出的限制方法同限制能量损耗的方法基本上是相同的, 即用增大导线的实际直径 (或有效直径) 来减小导线表面的电场强度。

在直流电压下进行的实验表明: 无论是晴天或雨天, 正极性下的无线电干扰总是比负极性下的干扰强得多, 所以采用负极性单极线路可以在很大程度上降低直流线路所引起的无线电干扰水平, 这是单极线路一般采用负极性为多的一个重要原因。

双极直流线路所造成的干扰水平要比正极性单极线路要高, 在双极线路上, 用分裂导线代替单导线可使干扰水平降低  $5\text{dB}$  左右。在对地电压相等的条件下, 晴天时双极直流线路所造成的无线电干扰水平大致等于或略小于相应的交流线路的干扰水平, 雨天时的干扰水平则低于交流线路。

## 4.4 直流架空线路的等值参数

直流架空线的布置通常如图 4.2 所示, 它是由正、负导线和架空地线  $GW$  组成, 也可以用图 4.3 所示的  $T$  型等值图表示。

在  $T$  型等值图中, 相应等值参数可根据不同的条件求得。

(1) 双导线自成回路, 每根导线的单位电感  $L$  用下式计算

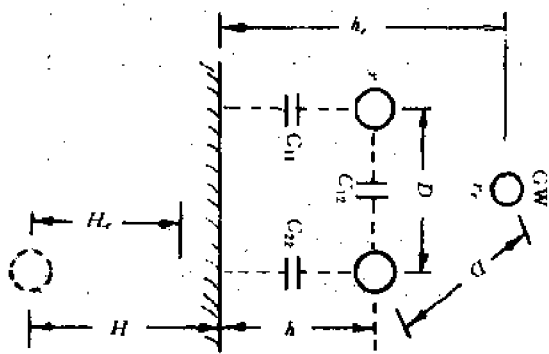


图 4.2 直流架空线布置图

$H$ ——接地极的埋深, m。

(3) 双导线以大地作回路(双极导线), 每根导线的单位电感  $L$  除了考虑单导线大地回路系统的  $L_e$  外, 还需考虑二个大地回路系统的互感  $L'_e$ , 由下式计算

$$L'_e = 0.05 + 0.4605 \lg \frac{2H_e}{D} \quad \text{mH/km} \quad (4.16)$$

而  $L = L_e - L'_e$ , mH/km。

(4) 电容参数

相互为回路的二根导线间的电容  $C_{12}$  和单独对地电容  $C_{11}$ 、 $C_{22}$  由下式求得

$$C_{11} = C_{22} = \frac{1}{P_{11} + P_{12}} \quad \text{F/m} \quad (4.17)$$

$$C_{12} = \frac{P_{12}}{(P_{11})^2 - (P_{12})^2} \quad \text{F/m} \quad (4.18)$$

式中

$$P_{11} = 2 \lg \frac{2h}{r} - \frac{\left[ \lg \left( 1 + \frac{4hh_e}{D^2} \right) \right]^2}{2 \lg \frac{2h_e}{r_e}} 9 \times 10^9 \quad \text{m/F}$$

$$P_{12} = \lg \left[ 1 + \left( \frac{2h}{D} \right)^2 \right] - \frac{\left[ \lg \left( 1 + \frac{4hh_e}{D^2} \right) \right]^2}{2 \lg \frac{2h_e}{r_e}} 9 \times 10^9 \quad \text{m/F}$$

等值电容  $C$  (一根导线对地电容) 可由下式求得

$$C = C_{11} + 2C_{12} = \frac{1}{P_{11} - P_{12}} \quad (4.19)$$

如果图 4.2 中,  $h \gg D$  时, 则

$$L = 0.05 + 0.4605 \lg \frac{D}{r} \quad \text{mH/km} \quad (4.13)$$

(2) 单导线以大地作回路的单位电感  $L_e$  由下式计算

$$L_e = 0.1 + 0.4605 \lg \frac{2H_e}{r} \quad \text{mH/km} \quad (4.14)$$

式中  $H_e = (h + H)/2$ ;  $2H_e$  为等值深度, 它随土壤电导率和频率变化, 可根据下述公式计算

$$2H_e = \frac{1.78 \times 10^{-3}}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot 10^{-9}}} \quad \text{m} \quad (4.15)$$

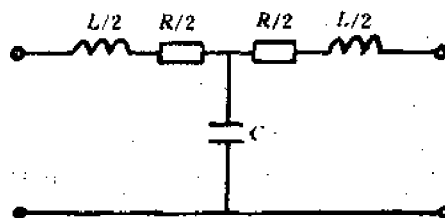


图 4.3 T 型等值图

$$C \approx \frac{1}{2 \lg \frac{D}{r}} \times \frac{1}{9 \times 10^9} \text{ F/m}$$

$$\approx 0.02413 \times \frac{1}{\lg \frac{D}{r}} \text{ } \mu\text{F/km} \quad (4.20)$$

#### (5) 有效电阻 $R$

有效电阻  $R$  因受集肤效应影响比直流电阻  $R_0$  大, 可由下式算出

$$\left. \begin{aligned} K = \frac{mr}{2\sqrt{2}} < 1 \text{ 时 } R/R_0 &= 1 + \frac{K^2}{3} \\ K = \frac{mr}{2\sqrt{2}} > 1 \text{ 时 } R/R_0 &= \frac{1}{4} + K + \frac{3}{64K} \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

式中  $m = \sqrt{8\pi\mu f/\rho}$ ;

$\rho$ ——电阻率;

$f$ ——频率;

$r$ ——导体半径;

$\mu$ ——导磁率。

## 4.5 直流电缆线路

随着高压直流输电的飞速发展, 特别是跨海峡等水下直流输电工程的兴建以及大城市供电亟待解决线路走廊和城市美观等问题, 直流电缆又得到了广泛的应用。

目前使用的高压直流电缆有下列几种:

(1) 胶浸实心电缆: 这种直流电缆的工作电位梯度只能达到 25kV/mm 左右, 电缆的电压只能达到 250kV~300kV。适用于长距离海底敷设, 因为它不需要供油, 而且海水良好的冷却作用能避免浸渍剂的流失, 这种电缆不宜作大落差的敷设。

(2) 充油电缆: 这种电缆在线路额定电压超过 250kV 时被广泛采用, 近年来由于解决了长距离供油的问题, 除了陆地上广泛采用外, 也作为海底电缆。

(3) 充气电缆: 电缆中的介质通常选用高密度浸渍纸再充以压缩氮气组成, 这种电缆有较高的绝缘强度, 其工作电位梯度可达 25kV/mm 以上, 适用于长距离海底敷设以及大落差敷设。但由于电缆内的压缩气体对电缆及其附件的密封性和机械强度提出了很高的要求, 所以这种电缆目前还没有被广泛采用。

(4) 挤压聚乙烯电缆: 这种电缆结构简单而坚固, 作为海底电缆是比较适宜的。但按其直流耐压能力来看, 工作电压只能达到 200kV 左右。

## 4.6 大地回路

直流输电的一个很大的特点就是可以利用大地作为回路输送电力。当采用单极或同极线

路方式时,其正常运行均是利用大地(或海水)作为回流电路;采用双极线路方式时,正常情况下无大地电流,但当一极导线发生故障,另一极导线利用大地(或海水)作为回流电路,还可以输送一半容量的电能。所有这些长期或暂时以大地(或海水)作为回流电路的直流线路,都称为大地回路。分析计算表明,以大地(或海水)作为回流电路,可以节约投资和降低损耗,在直流输电系统中获得了广泛应用。

要以大地(或海水)作为直流输电的回流电路,首先要解决的问题是直流接地,它是一项专门的技术,与交流输电系统的接地有许多不同的地方。在采用单极或同极大地回路运行时,将会有持续大电流通过接地电极入地,因此对该接地电极的接地电阻、地表面电位分布及热稳定性都有较高的要求。此外,强大的直流电流流入地后,可能对周围设施(如地下金属管道、交流输电系统、通讯系统等)带来一系列影响。

接地电极按布置场所的不同,可分为陆地电极和海岸电极两种,本节主要介绍前者。

典型陆地电极的形状如图 4-4 所示。通常为直线棒、圆环及星形。我国的第一条直流输电“葛-上”线,葛州坝侧采用的圆环电极,圆环直径为 510m,上海侧采用的是直线棒接地电极,其长度为 640m。

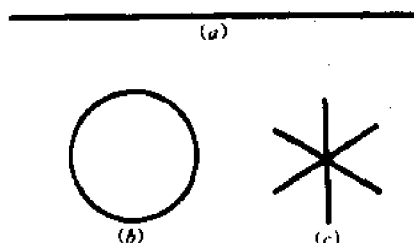


图 4-4 陆地接地电极  
(a)直线型 (b)圆环型 (c)星型

如图 4-4 所示的接地电极都是采用恒定的圆形截面导体制成,并以同一深度  $h$  埋入电阻率  $\rho$  均匀的土壤中时,它们的接地电阻可分别用下列各式计算。

直线棒(或圆柱体)电极,当  $h \ll l$  时

$$R_d = \frac{\rho}{\pi l} \left[ \ln \frac{2l}{b} - 1 \right] \quad (4.22)$$

圆环型电极

$$R_d = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{4l}{\pi b} = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{b} \quad (4.23)$$

$n$  条臂的星型电极

$$R_d = \frac{\rho}{\pi l} \left[ \ln \frac{2l}{\pi b} + N(n) \right] \quad (4.24)$$

式中  $R_d$ ——接地电极的接地电阻,  $\Omega$ ;  
 $\rho$ ——大地的电阻率,  $\Omega\text{m}$ ;  
 $l$ ——接地电极导体的总长度,  $\text{m}$ ;  
 $d$ ——导体的直径,  $\text{m}$ ;  
 $D$ ——圆环的直径,  $\text{m}$ ;  
 $h$ ——接地电极的埋深,  $\text{m}$ ;  
 $b$ —— $\sqrt{dh}$ ,  $\text{m}$ ;  
 $N$ ——修正系数,其值见表 4-2。

表 4-2 对应于不同导体根数  $n$  的修正系数  $N$  值

$n$	3	4	6	8	10
$N(n)$	0.53	1.45	3.43	5.50	10.00

接地电极可用钢铁、石墨、高硅铸铁等材料制成。要求其具有良好的导电性、较强的耐腐蚀

性,同时又比较经济、施工方便等。

对陆地接地电极而言,在大电流入地的情况下,土壤发热会很严重,接地电极的尺寸应根据其热稳定性确定,并以跨步电压的要求进行校验。设计时,首先根据埋设接地电极场地的环境温度,规定的极限温度,确定出允许温升  $\theta_e$  值;再利用在均匀媒质中电流场与热流场相似的这一特点,可推出接地电极的电位限值  $V_e$  与允许温升  $\theta_e$  的关系式

$$V_e = \sqrt{2\lambda\rho\theta_e} \quad \text{V} \quad (4.25)$$

式中  $\lambda$ ——土壤的热导率,  $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

$\theta_e$ ——接地电极的允许温升,  $^\circ\text{C}$ 。

设夏季土壤的最高温度为  $25^\circ\text{C}$ ,地中水的沸点为  $100^\circ\text{C}$ ,土壤的热导率  $\lambda=1\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ,代入上式可得

$$V_e = I_d R_d = \sqrt{2\lambda\rho\theta_e} = \sqrt{2 \times 1 \times (100 - 25) \times \rho} = 12 \sqrt{\rho} \quad (4.26)$$

它表明了 in 最大允许温升的限制下,接地电极的电位限值与土壤电阻率的关系。

若设流入地中的电流  $I_d=1200\text{A}$ ,进而可得到表 4-3 中的有关数据。

表 4-3 土壤电阻率与接地电阻及其损耗

$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	接地电阻 $R_d(\Omega)$	功率损耗 $I_d^2 R_d(\text{kW})$
10	0.03	46
100	0.10	160
1000	0.31	460

由此可见,接地电极的功率损耗随土壤电阻率的增大而增加,在高土壤电阻率中可达几百千瓦。因此,在选择接地电极的场地时,要求其土壤电阻率较低( $\rho \leq 100\Omega \cdot \text{m}$ ),且经常保持一定的水份。

确定出  $V_e$  和已知直流输电的额定电流  $I_d$  值后,就可确定出接地电极要求的接地电阻值

$$R_d = \frac{V_e}{I_d} \quad (4.27)$$

接地电极的地面电位梯度直接影响人、畜的安全,也是接地电极设计的重要问题。

在计算图 4-5 所示接地电极的地面电位梯度时,如果其埋深远远小于导体的总长度时(通常  $h=2\text{m} \sim 3\text{m}$ ),可假定电极 of 无限长的直线,取圆柱形导体单位长度的电流为  $\frac{I}{l}$ ,则圆柱形导体的电位梯度  $E_1$  可表示为

$$E_1 = \rho \cdot J = \rho \cdot \frac{I}{2\pi l r} \quad \text{V/m} \quad (4.28)$$

式中  $J$ ——圆柱形导体表面的电流密度,  $\text{A/m}^2$ 。

$I$ ——电极的入地电流,  $\text{A}$ 。

$r$ ——导体距地表参考点的距离,  $\text{m}$ 。

利用镜象原理,如图 4-5 所示,可计算出地面上任意点  $A$  处的电位梯度  $E_e$ 。

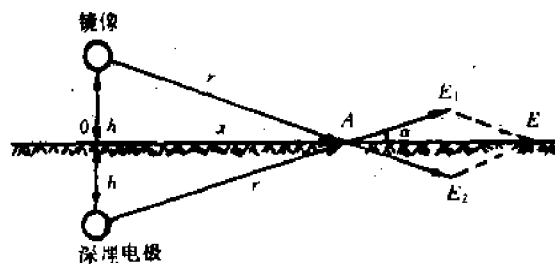


图 4.5 陆地电极地面电位梯度计算用示意图

图中:  $a$  为圆柱形导体的截面,  $a'$  为其镜像,

$h$  为电极的埋深,  $OA = x$ ,  $r = \sqrt{x^2 + h^2}$ 。

$$E_r = 2E_1 \cos \alpha = 2 \times \frac{E}{2\pi r l} \times \frac{x}{r}$$

$$= \frac{\rho I}{\pi l} \times \frac{x}{x^2 + h^2} \quad \text{V/m} \quad (4.29)$$

将式(4-29)对  $x$  求导,并令其为零,不难得到地面最大电位梯度发生在  $x = h$  处,其值为

$$E_{\max} = \frac{\rho I}{2\pi l h} \quad \text{V/m} \quad (4.30)$$

由上式可见,最大电位梯度与导体单位长度电流  $\left(\frac{I}{l}\right)$  及土壤电阻率  $\rho$  成正比;与埋设深度  $h$  成反比。为了确保人、畜的

安全,这些因素都是至关重要的。

在校核人、畜的安全时,应以触电后能够本能地甩脱限度为依据。试验表明,“能够甩脱”流过躯体的直流电流值、容许的跨步电压和电位梯度计算式,分别列于表 4-4 和表 4-5 中,供参考。

表 4-4 人、畜在不同状态下允许流过的直流电流值

	直流电流(mA)	躯体的直流电阻( $\Omega$ )	备 注
站立的人	5	1000	赤脚与地面的接触电阻为 $3\rho_s(\Omega)$ $\rho_s$ 为地面的土壤电阻率( $\Omega \cdot \text{m}$ )
俯伏的人	22.5		
站立的动物	$\frac{22.5 \times \text{体重(kg)}}{70}$	$1000 \times \frac{70}{\text{体重(kg)}}$	

表 4-5 人、畜容许的跨步电压和电位梯度计算式

	人		站立的牛或马
	步 行 中	俯 伏 状	
容许跨步电压(V)	$5 + 0.03\rho_s$	$22 + 0.07\rho_s$	$22 + 0.18\rho_s$
容许电位梯度(V/m)	$5 + 0.03\rho_s$	$\frac{1}{2}(22 + 0.07\rho_s)$	$\frac{1}{2}(22 + 0.18\rho_s)$

为了消除直流线路对大地回路,对其它公用设施的不利影响,最重要的措施就是使接地电极的位置与有关设施保持足够的距离;如有必要,还可对电极埋设地附近的金属构件采用阴极保护或对地下的金属物加涂绝缘层。

为了避免接地电极的电流对换流站接地网的腐蚀和对站内变压器铁心饱和程度的影响,通常将接地电极埋在离换流站 8km~50km 的地方。

所谓阴极保护就是使被保护物体对周围土壤保持负电位。从而使电流只流入被保护物,而不从被保护物流出。在金属物上涂附绝缘层,可使电流不能或至少很难离开被保护物体,其有

效程度取决于涂附层的高电阻率、不透水性、及涂层与金属物间的粘合质量等。常用的涂层材料有：水泥砂浆、沥青、磁漆、树脂等。最好的涂层材料是聚氯乙烯。

必须指出，加绝缘涂层的缺点是：由于安装时或运行中的损坏，绝缘层可能产生小的破裂，这样，在该处会出现较大的电流密度和腐蚀率，其破坏性会比无绝缘涂层时更大。因此，在现场往往将绝缘涂层与阴极保护结合起来使用。

## 5.2 换流装置交流侧的特征谐波

### 一、换流变压器阀侧线电流

当不计换流器的换相角  $\mu$  (即  $\mu=0$ ) 时, 换流变压器阀侧 (即换流装置交流侧) 线电流的波形为一系列等时间间隔、并轮流出现的正的和负的矩形脉冲, 如图 5.1 所示 (单桥)。

对于上述的波形, 可用付里叶级数展开成三角函数级数, 付立叶级数的三角函数式为

$$F(\omega t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (5.1)$$

式中

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\omega t) d\omega t$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\omega t) \cos n\omega t d\omega t$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\omega t) \sin n\omega t d\omega t$$

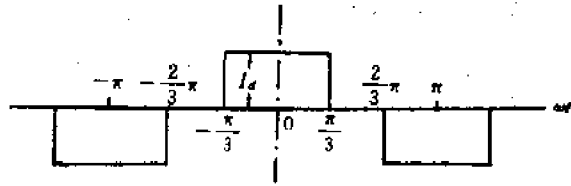


图 5.1 换流变压器阀侧线电流波形 ( $\mu=0$ )

$A_0$  为直流分量、 $A_n$  和  $B_n$  是  $n$  次谐波相量的两个直角坐标分量 (即余弦分量和正弦分量), 它们对应的谐波矢量为

$$A_n - jB_n = C_n e^{j\Phi_n}$$

其中  $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$  是  $n$  次谐波相量的幅值;

$\Phi_n = \tan^{-1} \frac{-B_n}{A_n}$  是  $n$  次谐波相量的初相位。

因此  $A_n = C_n \cos \Phi_n$   $B_n = C_n \sin \Phi_n$

对于图 5.1 的波形, 由于对纵轴对称, 是一偶函数, 所以  $B_n = 0$ 。同时, 还因为在一个周期内, 横轴上方的面积与下方的面积相等, 所以直流分量  $A_0 = 0$ 。付里叶级数只有余弦项, 所有余弦项的幅值为

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\omega t) \cos n\omega t d\omega t \\ &= \frac{I_d}{\pi} \left( \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \cos n\omega t d\omega t + \int_{2\pi/3}^{4\pi/3} (-\cos n\omega t) d\omega t \right) \\ &= \frac{I_d}{n\pi} \left( \sin n\omega t \Big|_{-\pi/3}^{\pi/3} - \sin n\omega t \Big|_{2\pi/3}^{4\pi/3} \right) \\ &= \frac{2I_d}{n\pi} \left( \sin \frac{n\pi}{3} + \sin \frac{2n\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

用  $n$  (为任意正整数) 代入上式可得各次谐波的系数 (对于偶次项即 2, 4, 6, 8, ... 及 3 和 3 的倍数项为 0), 将  $A_n$  代入 (5.1) 式, 可得换流变压器阀侧线电流的表达式

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left( \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t \right)$$



$$+\frac{1}{13}\cos 13\omega t - \frac{1}{17}\cos 17\omega t + \frac{1}{19}\cos 19\omega t + \dots) \quad (5.3)$$

由(5.3)式可见,在 $\mu=0$ 时,三相6脉波换流变压器阀侧线电流中,除基波电流外,只含有其 $k\neq\pm 1$ 次的谐波,而基波电流的幅值为

$$I_{(1)\pi} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}I_d = 1.103I_d \quad (5.4)$$

基波电流有效值为

$$I_{(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi}I_d = 0.78I_d \quad (5.5)$$

$n$ 次谐波有效值为

$$I_{(n)} = I_{(1)}/n \quad (5.6)$$

## 二、换流变压器交流侧线电流

当换流变压器接成“Y—Y”或“ $\Delta$ — $\Delta$ ”接线,且当变比为1:1时,则交流侧电流波形与阀侧电流波形相同,如图5.2(a)所示,其付氏级数展开式与式(5.3)相同,即

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}I_d \left[ \cos\omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t \right. \\ \left. + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \frac{1}{17}\cos 17\omega t + \frac{1}{19}\cos 19\omega t + \dots \right] \quad (5.7)$$

当换流变压器接成“ $\Delta$ —Y”、且变比为 $\sqrt{3}:1$ 时,交流侧电流波形如图7.2(b)所示,其付里叶级数展开式为

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}I_d \left[ \cos\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t \right. \\ \left. + \frac{1}{13}\cos 13\omega t + \frac{1}{17}\cos 17\omega t - \frac{1}{19}\cos 19\omega t + \dots \right] \quad (5.8)$$

式(5.7)和(5.8)相比较,不同之处仅在于第5、7、17、19等项(即 $n=6k\pm 1$ ,且 $k$ 为奇数时)的符号相反,其余项(即 $k$ 为偶数时)符号相同,且每次谐波的幅值是相同的,两个波形的有效值仍相等。

## 三、双桥12脉波时换流变压器交流侧线电流

双桥12脉波换流器是由2台6脉波换流器组成,并设各由一台换流变压器供电,其接法分别为Y—Y及 $\Delta$ —Y;变比分别为2:1和 $\sqrt{3}:1$ ,其波形图如图5.2(c)所示。

两台换流变压器交流侧总电流应为(5.7)和(5.8)两式之和的一半。

$$i_{a(12)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}I_d \left[ \cos\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t \right. \\ \left. - \frac{1}{23}\cos 23\omega t + \frac{1}{25}\cos 25\omega t - \dots \right] \quad (5.9)$$

从式(5.9)可看出,交流侧线电流中只含有 $12k\pm 1$ 次的谐波,而第5、7、17、19、……等次谐波将在两台换流变压器的交流侧绕组中环流,而不进入交流电网。

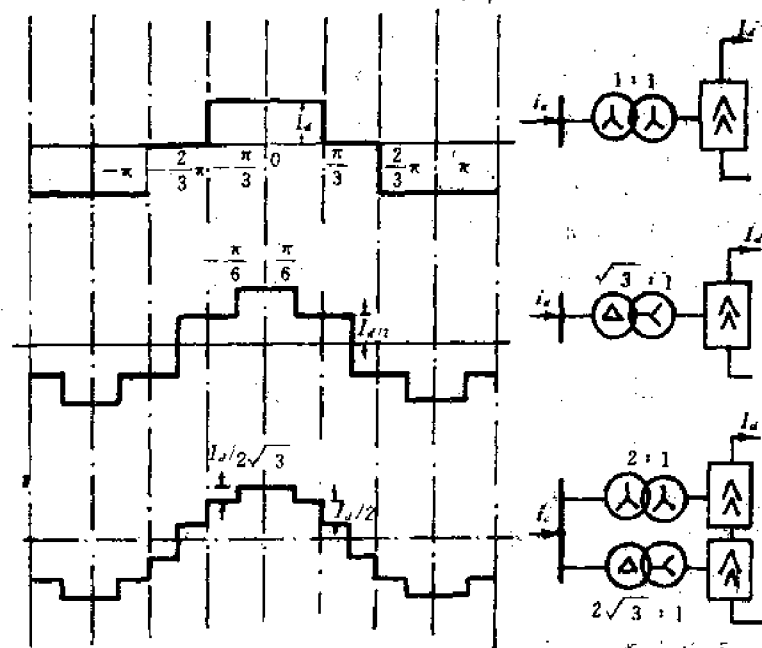


图 5.2 换流变压器交流侧电流波形

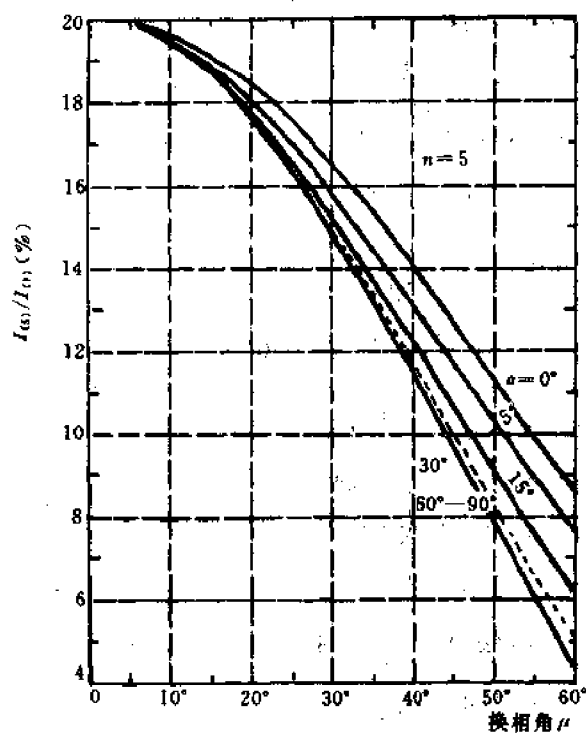


图 5.3 5 次谐波电流与  $\alpha, \mu$  之间的关系曲线

以上分析是没有考虑换相角(即  $\mu=0$ )的情况,如果考虑到延迟角  $\alpha$  和换相角  $\mu$ ,计算将变

得极为复杂。实际计算只须从谐波电流  $I_{(n)}$  与基波电流  $I_{(1)}$  的百分数与  $\mu$  和  $\alpha$  的关系曲线中查取就行。图 5.3 给出了  $n=5$  的 6 脉波换流器的谐波电流与  $\alpha$  和  $\mu$  的关系曲线图。

换相角  $\mu$  和延迟角  $\alpha$  对谐波电流的影响,可归纳如下:

- (1) 换相角  $\mu$  增大,谐波电流将下降,谐波次数越高,谐波电流下降得越快。
- (2) 在一定的范围内,谐波电流下降的速度也随  $\mu$  角的增大而加快。
- (3) 每次谐波在  $\mu = \frac{360^\circ}{n}$  附近时,谐波电流  $I_{(n)}$  下降到最小值,然后再略有增大。
- (4) 如果  $\mu$  为定值,各次谐波电流随不同的  $\alpha$  值的变化是微小的。
- (5) 在任何情况下,谐波电流有效值不会超过下述数值,即  $I_{(n)} = I_{(1)}/n = 0.78I_d/n$ 。

### 5.3 换流装置直流侧的特征谐波

直流侧的谐波计算,通常是根椐直流电压曲线,利用付里叶级数展开式求出各次谐波的正弦分量、余弦分量和直流分量,从而求出各次谐波电压。再根据各次谐波所对应的等值电路由谐波电压及阻抗求得谐波电流。

#### 一、换流器直流侧的谐波电压

在分析直流侧的谐波电压时,仍以前面的假设为基础。换流器的直流电压  $U_d(\alpha, \mu)$  可以看成是两个分量之和的一半,即一个是延迟角为  $\alpha$  时的空载电压  $U_d(\alpha, 0)$ ;另一个是触发角为  $\alpha + \mu$  时的空载电压  $U_d(\alpha + \mu, 0)$ ,则有

$$U_d(\alpha, \mu) = \frac{1}{2} [U_d(\alpha, 0) + U_d(\alpha + \mu, 0)] \quad (5.10)$$

直流侧的电压  $U_d$  不但含有直流分量  $V_d$ ,也含有各次谐波分量  $\sum U_{d(n)}$ ,因此直流电压可用下式表示

$$U_d = V_d + \sum U_{d(n)} \quad (5.11)$$

对直流分量和谐波分量可分别按式(5.10)写出其表达式

$$V_d(\alpha, \mu) = \frac{1}{2} [V_d(\alpha, 0) + V_d(\alpha + \mu, 0)] \quad (5.12)$$

$$U_{d(n)}(\alpha, \mu) = \frac{1}{2} [U_{d(n)}(\alpha, 0) + U_{d(n)}(\alpha + \mu, 0)] \quad (5.13)$$

如果把  $U_{d(n)}(\alpha, 0)$  和  $U_{d(n)}(\alpha + \mu, 0)$  展开成付里叶级数,则不难确定换流器带负载时直流侧电压中的直流分量  $V_d(\alpha, \mu)$  和各次谐波分量  $U_{d(n)}(\alpha, \mu)$ , 设

$$\begin{aligned} U_d(\alpha, 0) &= V_d(\alpha, 0) + \sum U_{d(n)}(\alpha, 0) \\ &= V_d(\alpha, 0) + \sum [A_{(n)}(\alpha, 0) \cos n\theta + B_{(n)}(\alpha, 0) \sin n\theta] \end{aligned}$$

因为在  $\theta = \alpha$  和  $\theta = \alpha + \frac{\pi}{3}$  的时间间隔内

$$U_d(\alpha, 0) = \sqrt{6} E_s \cos(\theta - \frac{\pi}{3})$$

$U_d(\alpha, 0)$  中的直流分量  $V_d(\alpha, 0)$  可以由积分求出

$$V_d(\alpha, 0) = \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} U_d(\alpha, 0) d\theta = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_2 \cos \alpha = V_{d0} \cos \alpha \quad (5.14)$$

而  $n$  次谐波分量中的  $A_{(n)}$  和  $B_{(n)}$  可由下式求出

$$\begin{aligned} A_{(n)}(\alpha, 0) &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} U_d(\alpha, 0) \cos n\theta d\theta \\ &= \frac{2}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} \sqrt{6} E_2 \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \cos n\theta d\theta \\ B_{(n)}(\alpha, 0) &= \frac{2}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} U_d(\alpha, 0) \sin n\theta d\theta \\ &= \frac{2}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} \sqrt{6} E_2 \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \sin n\theta d\theta \end{aligned}$$

求积分可得

$$\begin{aligned} A_{(n)}(\alpha, 0) &= V_{d0} \left[ \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right] \\ B_{(n)}(\alpha, 0) &= V_{d0} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right] \end{aligned} \quad (5.15)$$

由同样的方法求得换相角等于  $(\alpha + \mu)$  时的  $n$  次谐波电压  $U_{d(n)}(\alpha + \mu, 0)$  的余弦分量  $A_{(n)}(\alpha + \mu, 0)$  和正弦分量  $B_{(n)}(\alpha + \mu, 0)$ 。

总的谐波电压  $U_{d(n)}(\alpha, \mu)$  的余弦分量  $A_{(n)}(\alpha, \mu)$  及正弦分量  $B_{(n)}(\alpha, \mu)$  即可求出。

$$\begin{aligned} A_{(n)}(\alpha, \mu) &= V_{d0} \left[ \frac{\cos(n+1)(\alpha + \frac{\mu}{2}) \cos(n+1) \frac{\mu}{2}}{n+1} - \frac{\cos(n-1)(\alpha + \frac{\mu}{2}) + \cos(n-1) \frac{\mu}{2}}{n-1} \right] \\ B_{(n)}(\alpha, \mu) &= \left[ \frac{\sin(n+1)(\alpha + \frac{\mu}{2}) \cos(n-1) \frac{\mu}{2}}{n+1} - \frac{\sin(n-1)(\alpha + \frac{\mu}{2}) + \cos(n-1) \frac{\mu}{2}}{n-1} \right] \end{aligned} \quad (5.16)$$

由  $A_{(n)}(\alpha, \mu)$  和  $B_{(n)}(\alpha, \mu)$  不难求出各次谐波电压。

通常在计算各次谐波电压  $U_{d(n)}(\alpha, \mu)$  时,可采用查曲线的方法。图 5.4 表示  $n=6$  时,谐波电压有效值  $V_{d(n)}(\alpha, \mu)$  与理想空载电压  $V_{d0}$  之比与  $\alpha$  和  $\mu$  的关系曲线。

对不同的  $n$ , 根据不同的  $\alpha$  和  $\mu$ , 即可查得  $V_{d(n)}(\alpha, \mu)$  与  $V_{d0}$  的比值, 从而求得  $V_{d(n)}(\alpha, \mu)$  的值。

## 二、直流侧的谐波电流

换流器直流侧的谐波电流可以根据上面所求得的谐波电压来计算, 在图 5.5 所示的电路中可以得出

$$I_{d(n)} = \frac{V_{d(n)}}{Z_{(n)}} = \frac{V_{d(n)}}{\sqrt{R^2 + [n\omega(L_d + L)]^2}} \quad (5.17)$$

式中  $Z_{(n)}$  —— 换流器的负载阻抗;

$R$  —— 换流器的负载电阻;

$L_d$  —— 平波电抗器的电感;

$L$  —— 换流器的内电感。

由于  $L \ll L_d$ , 所以近似计算时

$$I_{d(n)} = \frac{V_{d(n)}}{\sqrt{R^2 + (n\omega L_d)^2}} \quad (5.18)$$

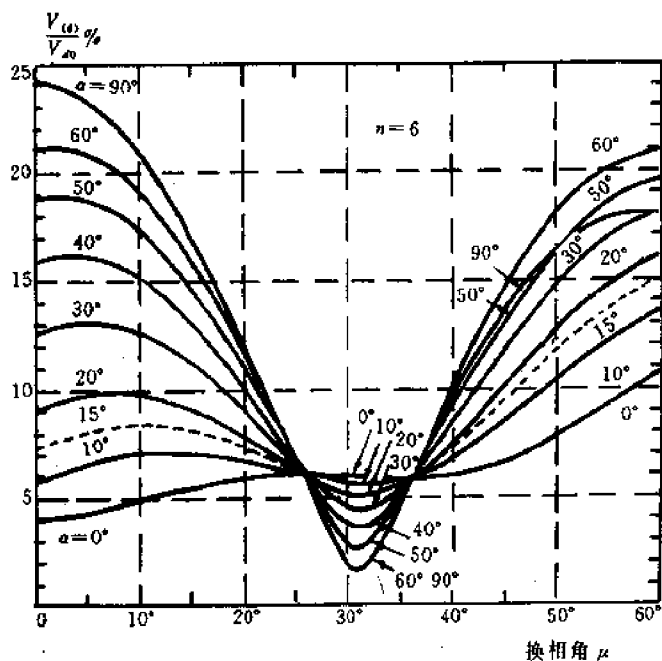


图 5.4 6 次谐波与  $\alpha, \mu$  的关系曲线

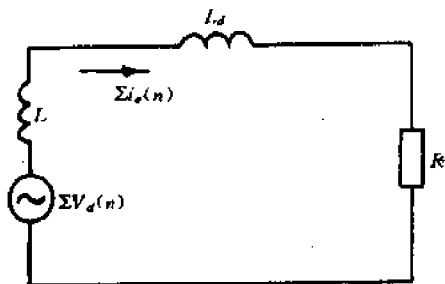


图 5.5 换流器直流侧电流谐波分量的等值图

## 5.4 交流滤波器

由于谐波的危害性, 所以电力系统设计、运行中常采用某些方法来抑制谐波, 目前在直流系统中常用的方法是增加脉波数和装设滤波器, 有关限制谐波的一些新方法将在后面几节中作一简单介绍。

如前所述, 增加脉波数可以抑制部分谐波, 这种方法将受到其它条件的约束, 如变压器接线复杂, 经济性变差等。而相对来说采用滤波器是比较有效的, 本节主要介绍交流滤波器的种

类、特性及配置。

### 一、滤波器的分类

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;按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。

### 二、交流滤波器的阻抗特性

#### 1. 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 5.6(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 5.6(b)所示。

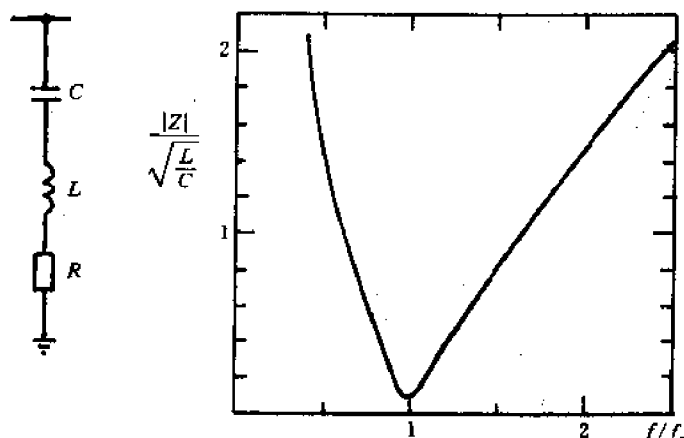


图 5.6 单调谐滤波支路及阻抗频率特性

#### 2. 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 5.7 所示。

#### 3. 高通滤波器

这种滤波器是在一个很宽的频带范围内(例如 17 次及以上的各次谐波频率)呈一个很低的阻抗。其滤波器支路及阻抗频率特性如图 5.8 所示。

### 三、调谐滤波器的参数

对于单调谐滤波器(包括双调谐),由图 5.6 可知,这是一个串联的  $RLC$  电路,当角频为  $\omega$

时,滤波器的阻抗为

$$Z = R_{(n)} + j\left(\omega L_{(n)} - \frac{1}{\omega C_{(n)}}\right) \quad (5.19)$$

当支路谐振时 $\left[\omega L_{(n)} = \frac{1}{\omega C_{(n)}}\right]$ 的角频率 $\omega_{(n)}$ 显然为

$$\omega_{(n)} = \frac{1}{\sqrt{L_{(n)}C_{(n)}}} \quad (5.20)$$

令 $\omega$ 与 $\omega_{(n)}$ 的偏差的标么值 $\delta$ (失调度)为

$$\delta = \frac{\omega - \omega_{(n)}}{\omega_{(n)}} \quad (5.21)$$

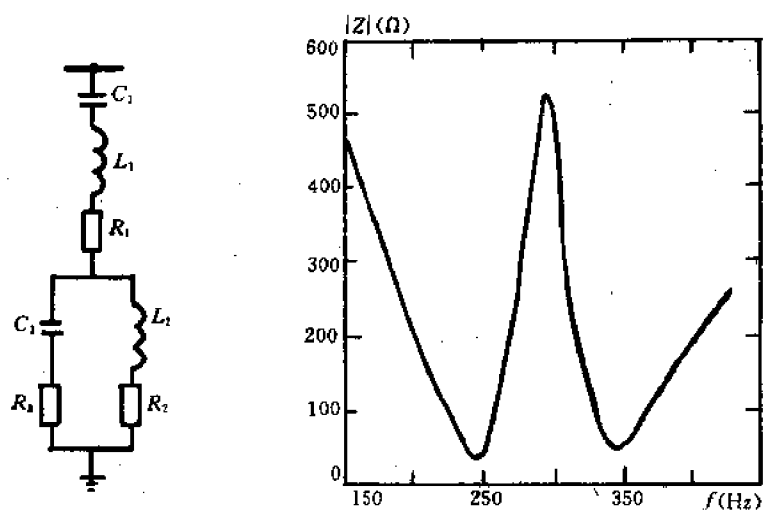


图 5.7 双调谐滤波支路及阻抗频率特性

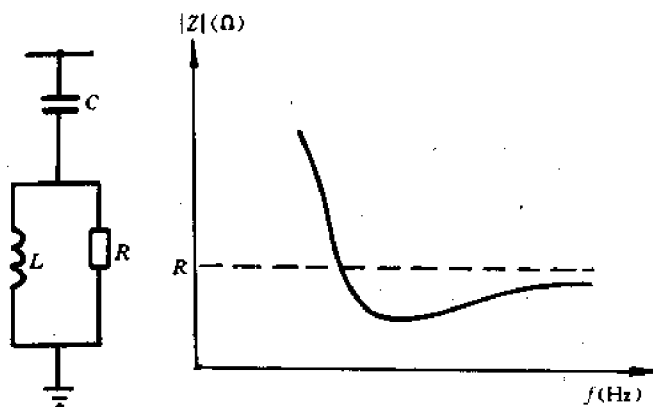


图 5.8 高通滤波器支路及阻抗频率特性

电感线圈或电容器在谐振角频率 $\omega_{(n)}$ 时的电抗 $x_0$ 为

$$x_0 = \omega_{(n)} L_{(n)} = \frac{1}{\omega_{(n)} C_{(n)}} = \sqrt{\frac{L_{(n)}}{C_{(n)}}} \quad (5.22)$$

$$\text{则} \quad Q = \frac{x_0}{R_{(n)}} \quad (5.23)$$

称为滤波器的调谐锐度(又称为品质因数)。

由上述公式可写出下列公式

$$\omega = \omega_{(n)}(1 + \delta) \quad (5.24)$$

$$C_{(n)} = \frac{1}{x_0 \omega_{(n)}} = \frac{1}{\omega_{(n)} R_{(n)} Q} \quad (5.25)$$

$$L_{(n)} = \frac{x_0}{\omega_{(n)}} = \frac{R_{(n)} Q}{\omega_{(n)}} \quad (5.26)$$

将式(5.24)~(5.26)代入式(5.19)可得

$$Z = R_{(n)} \left( 1 + jQ\delta \frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right)$$

由于  $\delta \ll 1$ , 则

$$Z = R_{(n)} (1 + j2Q\delta)$$

$$\text{则} \quad |Z| = R_{(n)} \sqrt{1 + 4\delta^2 Q^2} = x_0 \sqrt{Q^{-2} + 4\delta^2} \quad (5.27)$$

由上式可以看出,当品质因数  $Q$  值越大,则谐振频率阻抗  $|Z|$  就越小,滤波效果就越好,同时有功功率的消耗也就越小。但是  $Q$  值也不能太大,否则系统频率的变化以及电感和电容受温度变化而变化时,滤波器容易失调,影响滤波效果。通常,单调谐滤波器的品质因数的参考值在 30~60 的范围内。

对高通滤波器,由图 5.8 可得其阻抗为

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (5.28)$$

则调谐角频率  $\omega_{(n)}$  为

$$\omega_{(n)} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.29)$$

其品质因数为

$$Q = \frac{R}{x_0} = \frac{R}{\omega_{(n)} L} = R\omega_{(n)} C \quad (5.30)$$

注意,上式中  $Q$  的定义与单调谐时的定义相反,这是因为高通滤波器的接法( $R$  与  $L$  并联)与单调谐滤波器中的接法( $R$  与  $L$  串联)不同。

高通滤波器的特性还可下面两个参数来描述

$$m = \frac{L}{R^2 C} \quad (5.31)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.32)$$

式中,  $m$  是一个直接与品质因数  $Q$  有关的参数,它们都将影响阻抗频率特性曲线的形状,  $f_0$  称为截止频率。  $m$  一般取值在 0.5~2 的范围内比较适宜,  $f_0$  一般接近并略高于单调谐滤波器的最高特征谐波频率(如 13 次,则  $f_0 = 650\text{Hz}$ )。

#### 四、交流滤波器的选择设计

交流滤波器是换流站的重要设备之一,其投资约占换流站总投资的 5%~15%,而其中的



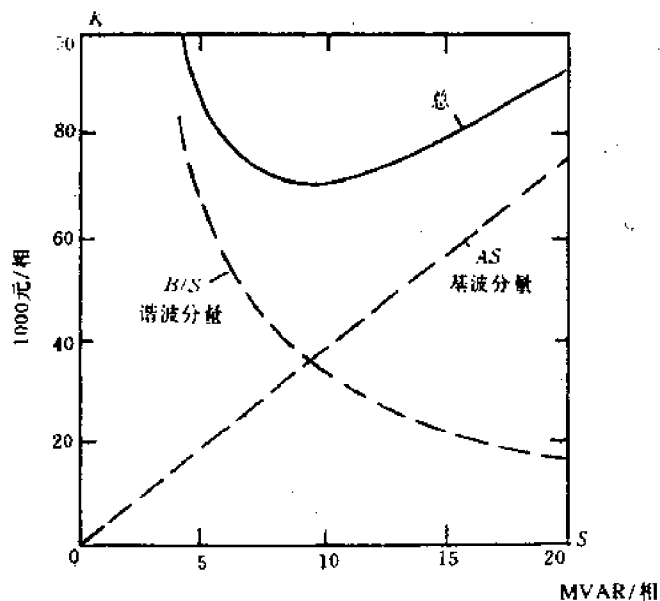


图 5.9 滤波器投资与容量的关系曲线

$$K = AS + BS^{-1} \quad (5.33)$$

式中

$K$ ——投资,元;

$S$ ——滤波电容器的基波容量;

$A, B$ ——常数,元/MVAR 和元·MVAR。

#### 1) 滤波电容器所需的总功率

滤波电容器所需的总功率为工频无功功率和调谐谐波的无功功率之和,工频无功功率(基波无功功率)就是它本身的基波容量,谐波无功功率则与此容量成反比。

滤波电容器所需总功率近似为

$$P_{rc} = V_1^2 \omega C + \frac{I_{nf}^2}{n \omega_1 C} = S + \frac{V_1^2 I_{nf}^2}{n S} \quad (5.34)$$

式中  $C$ ——电容量, F;

$\omega_1$ —— $2\pi f$ , Rad/s;

$V_1$ ——基波电压, kV;

$S$ ——电容器的基波容量, MVAR;

$I_{nf}$ ——流过滤波器的  $n$  次谐波电流, kA。

$$I_{nf} = S_c \left( \frac{\varphi_n}{2} \right) I_{nc}$$

其中  $\varphi_n$ ——系统阻抗角,一般取  $75^\circ$ ;

$I_{nc}$ ——换流器发出的  $n$  次谐波电流。

#### 2) 电抗器所需的功率同样可近似为

$$P_{rx} = \frac{S}{n^2} + \frac{V_1^2 I_{nf}^2}{n S} \quad (5.35)$$

电容器又占滤波器投资的主要部分,所以交流滤波器的选择首先应根据技术经济分析选择电容,然后根据要求的调谐频率计算出相应的电感,最后再根据最佳  $Q$  值,确定其电阻值。

#### 1. 按最小投资选择滤波器容量求取参数

调谐在某一特定频率的滤波器,它的投资将随滤波器的容量而变。在某一容量时,投资有一最小值,则投资和容量之间的关系如图 5.9 所示。

该关系曲线由二个分量组成:一是正比于滤波电容器的基波容量  $S$ ,另一个和此容量成反比的谐波分量  $S^{-1}$ 。即

### 3) 滤波器的总投资

$$K = P_c K_c + P_L K_L \quad (5.36)$$

式中  $K_c, K_L$ ——分别为电容器和电抗器的单位投资  $K_c \approx 30$  元/kVAR,  $K_L \approx 65$  元/kVAR。

$$K = S \left( K_c + \frac{K_L}{n^2} \right) + \frac{V_1^2 I_{cn}^2}{nS} (K_c + K_L) = AS + BS^{-1} \quad (5.37)$$

最小投资滤波器的容量,可将上式对  $S$  求导得出

$$\frac{dK}{dS} = A - BS^{-2} = 0$$

$$S_{\min} = \left( \frac{B}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.38)$$

当滤波器容量小于  $S_{\min}$  时,投资增加很快,当大于  $S_{\min}$  时,投资增加缓慢。

在最小投资时,滤波器的电容量为

$$C = \frac{S_{\min}}{\omega_1 V_1^2} \quad (5.39)$$

则

$$L = \frac{1}{C(n\omega_1)^2} \quad (5.40)$$

$$R = \frac{X_0}{Q}$$

### 2. 校验谐波电压求取参数

为了限制被调谐次数的谐波电压不超过基波相电压的 1%~1.5%, 首先应求出该次谐波电压值, 谐波电压可用下式计算

$$V_{(n)} = K \delta_n X I_{cn} \quad (5.41)$$

式中  $K$ ——系数(可查表 5.2 选择);

$\delta_n$ ——允许的频率偏差;

$I_{cn}$ ——换流器发出的  $n$  次谐波电流;

$X$ ——谐振时阻抗。

表 5.2 谐波电压计算系数表

系统阻抗角 $\varphi_n$	15°	30°	45°	60°	75°	80°	85°	90°
$\delta_n Q$	3.8	1.87	1.21	0.87	0.65	0.6	0.55	0.5
$K$	2.03	2.14	2.35	2.67	3.17	3.41	3.68	4.00

只要根据允许的  $V_{(n)}$ , 由已知的  $I_{cn}$  和  $\delta_n$ , 就可确定出  $X$  及  $C$ , 再求出  $L$  和  $R$  参数。

对于高通滤波器, 通常可粗略地由系统无功功率平衡决定电容  $C$ , 再按最低次的高次特征谐波(如 17 次)为调谐频率决定  $L$ , 最后按  $R=QX$  算出  $R$ 。

### 五、交流滤波器的配置及评定准则

对于单桥 6 脉波的直流系统, 交流侧通常接有 5 次、7 次、11 次和 13 次 4 个单调谐波器支路和一个高通滤波器支路, 其接线如图 5.10 所示。

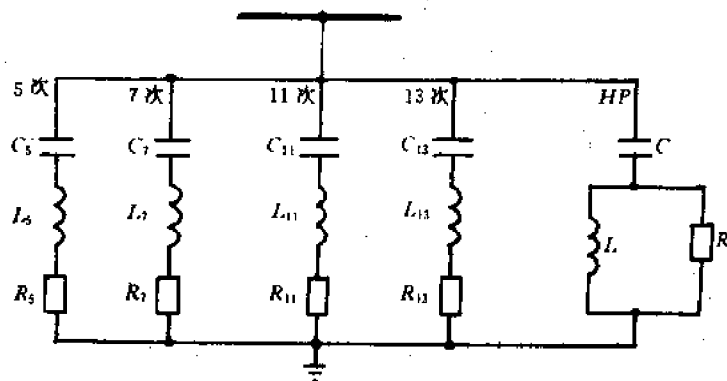


图 5.10 交流滤波器的配置(单桥)

对于双桥 12 脉波的直流系统,正常时的谐波只有  $(12k \pm 1)$  次,所以对单调谐支路只需配置 11 次和 13 次以及高通滤波器就行了。但如果考虑到双桥系统可以改变为单桥系统运行时,则需装设 5 次、7 次、11 次和 13 次滤波器以及高通滤波器。

评定滤波器效果是否适当的准则应当是:经滤波以后完全没有谐波的有害影响。但这样的准则从技术和经济来说是不现实的。目前一般按照现有直流输电工程中采用的下列极限值作为参考。

(1) 交流正弦波的最大理论偏差

$$H = \frac{1}{V_{(1)}} \left( \sum_{n=2}^{\infty} V_{(n)} \right) \quad (5.42)$$

应不超过 3%~5%。

(2) 在 5 至 25 次谐波电压中,任何一个特征谐波电压不超过 1%,其它各次特征谐波电压的算术和应不超过 2.5%。

(3) 根据国际电话电报咨询委员会建议的电话谐波波形系数 (THFF) 应不超过 1%~2%。

$$\text{THFF} = \left[ \sum_{f=0}^{\infty} (k_f p_f V_f)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / V \quad (5.43)$$

式中  $f$ ——谐波频率;

$k_f$ —— $f/800$ ;

$p_f$ ——杂音评价系数/1000,见表 5.3;

$V_f$ ——电力线路上频率为  $f$  的谐波电压有效值;

$V = \sqrt{\sum V_f^2}$ ——全电压有效值。

(4) 在美国和加拿大,一般采用  $I \times T$  乘积和  $KV \times T$  乘积来评价电力线路对电话线路的干扰影响。

$$I \times T = \sqrt{\sum (I_f T_f)^2} \quad (5.44)$$

式中  $I_f$ ——频率为  $f$  的均方根电流, A;

$T_f$ ——相应的单频率的电话干扰系数,见表 5.4 内的 TIF 值。

$KV \times T$  乘积是电力线路上各种频率的电压(kV)乘上相应的电话干扰系数值的平方和的方根值。

表 5.3 国际电话电报咨询委员会杂音评价系数( $1000p_f$ )和电话干扰评价系数  $p_f k_f$

$n$	$f(\text{Hz})$	$1000p_f$	dB	$p_f k_f$
1	50	0.71	-63.0	0.000044
2	100	8.91	-41.0	0.00111
3	150	35.5	-29.0	0.00665
4	200	89.1	-21.0	0.0223
6	300	295	-10.6	0.111
8	400	484	-6.3	0.242
10	500	661	-3.6	0.413
12	600	794	-2.0	0.595
16	800	1000	0.0	1.000
20	1000	1122	+1.0	1.40
24	1200	1000	0.0	1.50
30	1500	861	-1.3	1.62
40	2000	708	-3.0	1.77
50	2500	617	-4.2	1.93
60	3000	525	-5.6	1.97
70	3500	376	-8.5	1.65
80	4000	178	-15.0	0.89
100	5000	15.9	-36	0.10

表 5.4 C—信息评价和 1960 年制定的单频率的 TIF 值

$n$	$f(\text{Hz})$	$C$	dB	TIF	$n$	$f(\text{Hz})$	$C$	dB	TIF
1	60	0.0017	-55.7	0.5	10	600	0.579	-4.5	1790
2	120	0.0167	-35.5	10	11	660	0.685	-3.3	2260
3	180	0.0333	-29.6	30	12	720	0.767	-2.3	2760
4	240	0.0875	-21.2	105	13	780	0.862	-1.3	3360
5	300	0.1500	-16.5	225	14	840	0.912	-0.8	3830
6	360	0.222	-31.1	400	16	960	0.977	-0.2	4690
7	420	0.310	-10.2	650	18	1080	1.000	0.0	5400
8	480	0.396	-8.0	950	20	1200	0.977	-0.2	5860
9	540	0.489	-6.2	1320	22	1320	0.944	-0.5	6230

续表

$n$	$f$ (Hz)	$C$	dB	TIF	$n$	$f$ (Hz)	$C$	dB	TIF
24	1440	0.924	-0.7	6650	44	2640	0.804	-1.9	10610
26	1560	0.871	-1.2	6790	46	2760	0.750	-2.5	10350
28	1680	0.840	-1.5	7060	48	2880	0.692	-3.2	9960
30	1800	0.841	-1.5	7570	50	3000	0.645	-4.0	9670
32	1920	0.841	-1.5	7050	55	3300	0.490	-6.2	8090
34	2040	0.841	-1.5	8580	60	3600	0.359	-8.9	6460
36	2160	0.841	-1.5	9080	65	3900	0.226	-12.8	4400
38	2280	0.841	-1.5	9590	70	4200	0.143	-16.9	3000
40	2400	0.841	-1.5	10090	75	4500	0.0812	-21.8	1830
42	2520	0.832	-1.6	10480	83.3	5000	0.0336	-29.5	840

## 5.5 直流滤波器

如前所述,虽然平波电抗器能够起到限制直流谐波的作用,但对于架空线路,通常还需装

设直流滤波器。直流侧谐波的次数为  $n = kp$ , 当  $p=6$  时,  $n$  为 6、12、18 等。因此对 6 脉波直流系统,则直流侧滤波电路如图 5.11 所示。

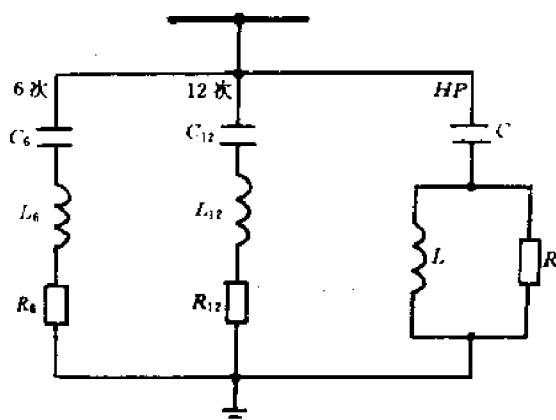


图 5.11 直流滤波器的配置(单桥)

设计直流侧滤波器的步骤和交流滤波器基本相同,但由于直流侧没有无功功率补偿问题,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,而是按照线路电压、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<sup>[2]</sup>:

(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大不一样,这是因为电抗值很大的直流电抗器将直流谐波减小到一个比较小的值。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。

## 5.6 阻尼型滤波器

目前已投运的绝大多数直流工程中都采用了单调谐波交流滤波器,但是由于技术和经济方面的原因,调谐型滤波器将逐渐被一种新型滤波器——阻尼型滤波器所代替。

采用阻尼型滤波器可使滤波器支路得到简化,例如,可用一个单阻尼滤波器代替 11 次和 13 次这两个调谐滤波器支路。阻尼滤波器的调谐频率应当在 12 次,这样可以同时消去 11 次和 13 次谐波。在这种情况下,该阻尼滤波器的调谐锐度(品质因数) $Q$  值约在 20~50 左右。

我国已投运的葛洲坝-南桥高压直流工程中也采用了阻尼型滤波器,其接线如图 5.12 所示。图中旨在消除 11 次和 13 次谐波的 12 次阻尼滤波器分为两组,其目的是当运行方式变化时所需滤波器容量不同时便于投切。

由于某些高压直流系统的额定参数同系统短路水平具有同样的数量级,因此增大了系统和滤波器电容之间发生低次谐波谐振的概率。至于是串联谐振还是并联谐振,这取决于低次谐波源是在交流系统内,还是在换流站内。

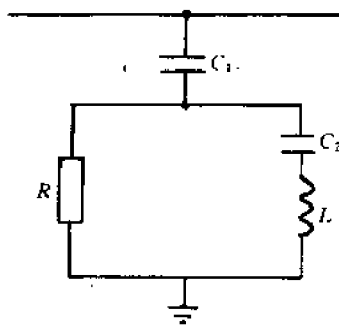


图 5.13 C 型阻尼滤波器

也相应减少了占地面积。

3. 减少了维护工作量,基本上不需在现场进行调谐工作。

4. 根据滤波器的  $Q$  值和中心频率的条件下,非特征谐波也得到吸收。

5. 对无功功率的控制来说,将滤波器分成较小的组是容易而又经济的;谐波电流在这些组之间的分布也不会有什么问题的。

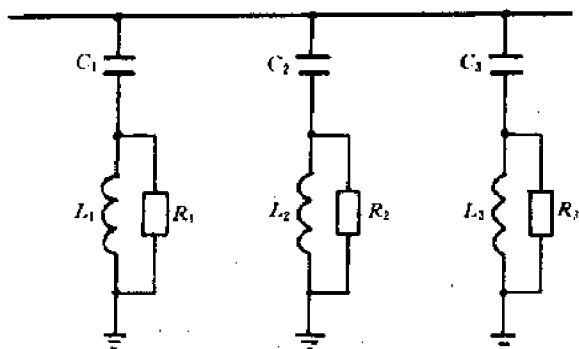


图 5.12 阻尼型滤波器接线图

为了解决这一问题,对于低次谐波可采用阻尼型滤波器,但是在阻尼电阻器中会产生较高的基波功率损耗。为了减小这一损耗,已经设计出一种称为 C 型阻尼滤波器的装置,如图 5.13 所示。图中其电阻器与基波频率调谐臂( $C_2-L$ )相并联。这种电路由于是基波频率调谐,因此对频率的变化比较敏感,而且它的损耗也较小。

阻尼型滤波器的主要优点是:

1. 滤波器的性能和承载负荷对于温度、系统频率偏移和元件的允许偏差都是不敏感的。

2. 由于滤掉的是较宽范围的谐波频率,因此就减少了按谐波次数分组的调谐滤波器相当可观的投资费用。

另一方面,为了达到同调谐滤波器同样的滤波特性水平,阻尼滤波器需要的基波无功功率要多一些。通常,调谐滤波器比阻尼滤波器中的谐波损耗要小,然而基波损耗则相反。

## 5.7 消除谐波的其它方法

因为滤波器的复杂性和费用问题,目前世界上有的国家采用了以下几种方法来达到控制谐波的目的,即①采用磁通补偿法;②采用谐波注入法;③采用直流纹波再注入法。

### 一、磁通补偿法

图 5.14 基本上说明了这种消除谐波的方法,一台电流互感器用来检测来自非线性负载的谐波分量,通过放大器把这些分量输入变压器的第三绕组上,使其能够消除有关的谐波电流。

与这个系统有关的主要问题是放大器的输出同第三绕组的耦合问题,使基波电流不致于损坏放大器。为了减小放大器输出的基波电流,如图所示采用有第四绕组的变压器。

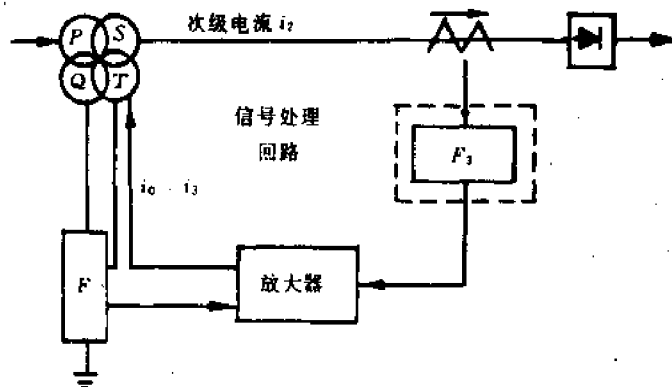


图 5.14 利用磁通补偿的谐波电流消去法的简单结构

该方法的另一优点是能够把诸如 3 次、9 次等非特征谐波也考虑进去。主要缺点是如果没有功率很大的反馈放大器,它就不能有效地消除幅值较大的低次特征谐波。如对于 300MW 的整流器负荷,典型的放大器额定值为 750kW。

### 一、谐波注入法

该方法是利用外部电源施加一个谐波电流,从而改变换流器矩形电流的波形,如图 5.15 所示。通常,来自外部电源的 3 倍次谐波注入到导通的变压器各相中。

这种方法的优点在于系统阻抗不再是设计准则的一个部分,然而它们也有下列一些缺点:

1. 需要 3 倍次谐波电流发电机,而且要与工频同步。
2. 难以将注入的正弦电流的幅值和相位调整到适应于每一种特定的运行状态。
3. 在任何运行点,都不能消除一个以上的谐波次数。
4. 由于注入的 3 倍次谐波功率的无谓消耗,导致效率较低。

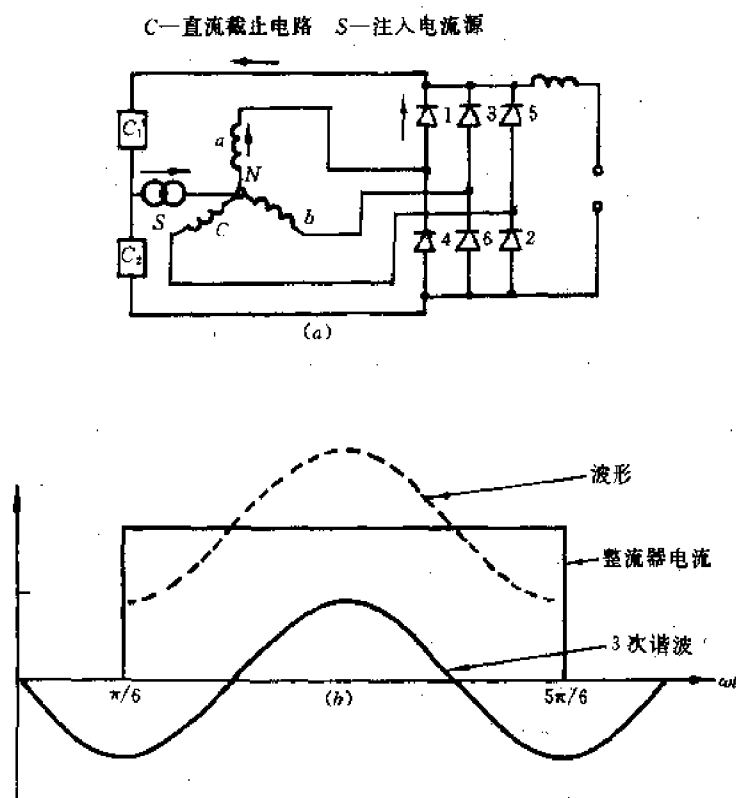


图 5.15 谐波注入法电路图及电流波形  
(a)整流桥电路 (b)电流波形

### 三、直流纹波注入法

这一方法的基本原理在于得出 3 倍频电流波形,其幅值取决于直流电流的大小和形状。把这个电流注入到主变压器副绕组的中性点,然后通过导通的变压器绕组流动。则修正后的变压器相电流将只包含与 12 次脉波有关的谐波电流。

图 5.16 说明的直流纹波再注入原理,适用于具有  $120^\circ$  导通阀的静止换流器。在整流侧,变压器必须接成星形,变压器的一次绕组或者第三绕组必须要有一个接成三角形。

图中把同直流阻塞电容器 C 相串联的单相变压器初级绕组,接到共同模式直流纹波电压上。这个变压器向连接到次级绕组的单相 3 倍频全波整流器(即反馈换波器  $D_1$ )提供换相电压。 $D_1$  的输出端同 6 脉波换流器的直流输出端相串联。因此,反馈变压器的交流输出是 3 倍频的矩形电流,然后通过变压器的变比将它调整到适当的水平。

采用这一方法,电流的波形变化如图 5.17 所示。6 脉波换波器的直流纹波和反馈换流器在主变压器次级绕组的直流侧(即换流器侧)共同产生 12 脉波的波形,如图 5.17(e)所示。

再注入谐波的频率来源于电源频率,因而不存在谐波源同电源频率同步的问题。此外,再注入电流的相位调节问题可采用可控整流器反馈来解决。这样,反馈换流器的触发角控制同整流器的主控制是联锁的,即如果反馈换流器的晶闸管在对应的主换流器晶闸管之后  $30^\circ$  触发,则其波形结果如图 5.17 所示。



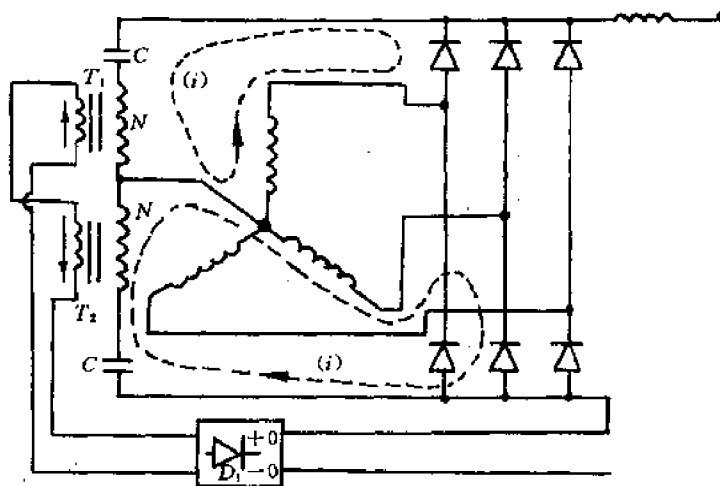


图 5.16 具有直流纹波再注入的整流桥

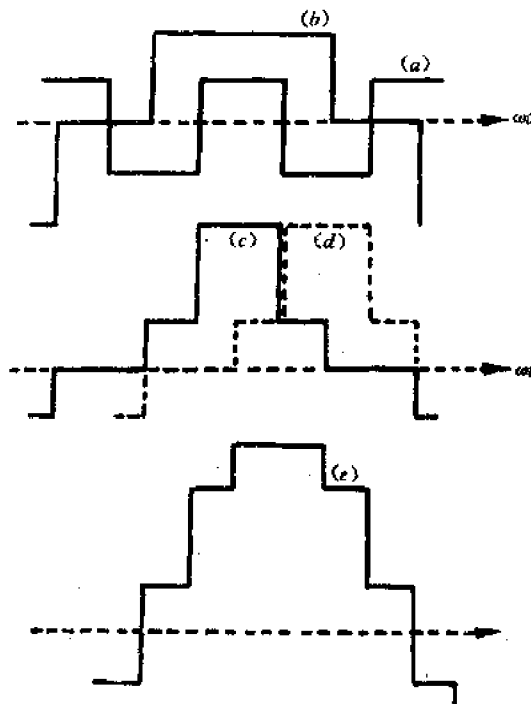


图 5.17 采用直流纹波再注入法的电流波形

(a)三倍频注入电流 (b)修正前的整流器电流 (c)修正后的相电流  
(d)次级相位移  $120^\circ$  (e)合成相电流

从图 5.17(e)所示波形的付里叶分析表明,对于一个特定的注入整流器电流的比值,次数为  $n=6k \pm 1$  ( $n=1, 3, 5, \dots$ ) 的所有谐波都为零,而其它次数的谐波( $n=2, 4, 6, \dots$ )却与以前一样同基波保持着同样的关系。这一结果表明,根据交流和直流系统谐波的观点,原来的 6 脉波换流器已经转换成为一个 12 脉波的换流器系统。

## 第六章 高压直流系统的控制

直流输电的一个重要优点就是通过各种控制和调节元件组成的系统,对直流系统实现快速和多种调节。改善直流输电系统本身的运行特性,并可以扩大到以交流系统为对象的调节。本章着重讨论直流输电系统的主要控制和调节方式的基本原理。

### 6.1 引言

#### 一、控制系统的配置

直流输电系统在稳态正常运行方式下的运行参数主要是两端的直流电压、直流电流和输送功率。在运行中,各种因素的变化(如负荷的变化、电压的波动以及各种扰动)都会使上述运行参数发生变化。这就需要各种有关的控制和调节元件来进行调节,以使各运行参数回到设计所要求的原来的或新的稳态值。

直流输电的控制系统的配置如图 6.1 所示。图中所示的总控制是高压直流输电控制系统的一部分,它的主要作用是对直流系统的每一个换流站提供该站控制系统所需的输入指令,使直流输电系统按设计要求运行(例如实现功率、频率或电流的控制等)。

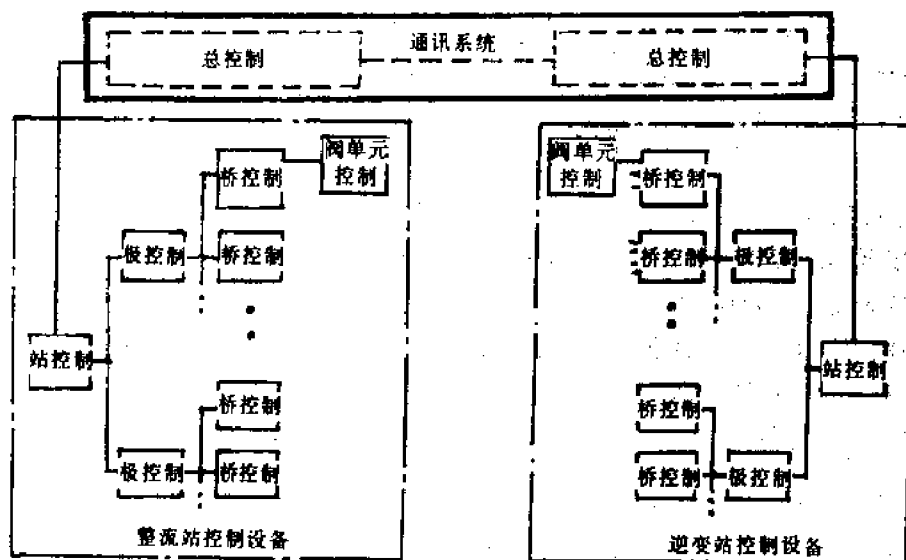


图 6.1 高压直流输电系统控制配置图

站控制是构成一个完整的整流站或逆变站的控制、监视和保护系统的公共部分,它对换流站内每一个极(正、负极)提供互相协调的被调量指令,如电流或功率指令等。

极控制是使换流站内每一个极的各个换流器单元(又称换流桥)的控制系统互相协调,使提供的被调量指令只产生最小的谐波量。桥控制用于控制构成换流器的每个阀的触发相位。所设计的直流输电系统的各种运行控制特性,最终是通过桥控制来实现的。因此,桥控制是构成直流输电控制系统的重要单元,通常包括:

(1)脉冲相位控制装置:用来产生触发换流阀的控制脉冲。

(2)换流桥监视装置:用来测量、记录和显示与换流桥有关的重要电气量、机械量和热量的参数。

(3)换流桥保护装置:用来保护换流桥有关部件,以防止由于异常工况或事故而造成的损害。

(4)换流桥程序控制装置:用来使换流桥的相位控制装置、监视和保护装置的工作协调起来,并且能够在运行工况发生变化时,对换流桥进行有关的程序控制。

## 二、控制系统的基本要求

控制系统功能的好坏与健全,将直接关系到直流输电系统的运行。因此,必须对控制系统提出一些基本要求,以使它在各种运行状态下能够全面地、快速地执行控制和调节各有关量的作用。

对控制系统的基本要求是:

(1)为了避免电流流过阀和其它载流元件出现危险的状况,应限制电流的最大值。

(2)要求限制由于交流系统的波形而引起的直流电流波动。

(3)尽可能使功率因数保持较高的值。

(4)尽可能防止逆变器换相失败。

(5)为了使功率损耗最小,要求保持线路送端电压恒定并且等于额定值。

(6)为控制所输送的功率,有时则要求控制某一端的频率。

在上述基本要求中,尽可能使功率因数保持较高值的原因有下述四点:

(1)对于给定的阀和变压器的电流和电压额定值,要求尽可能高的保持换流器的功率额定值。

(2)减小阀和阻力回路的应力。

(3)使接至换流器的变流回路中所需要的电流和铜耗达到最小值。

(4)当换流器的负荷减小时,使换流器的交流端的电压降低到最小值。

功率因数可以通过接入并联电抗器而得到提高,当然这样必然增加电抗器的投资及增设当换流器负荷变化时改变电容的切换装置。

换流器的功率因数为:

对整流站:

$$\cos\varphi \approx \frac{1}{2}[\cos\alpha + \cos(\alpha + \mu)] \quad (6.1)$$

对逆变站:

$$\cos\varphi \approx \frac{1}{2}[\cos\gamma + \cos(\gamma + \mu)] \quad (6.2)$$

从上两式可知,如果要得到较高的功率因素,则应使延迟角 $\alpha$ 或熄弧角 $\gamma$ 尽可能小。对于

整流器,可使  $\alpha=0$ ,则  $\cos\varphi=1$ 。但对于逆变器,为了避免换相失败,在换相电压易号之前换相必须完成,所以  $\gamma$  必须要大于某一临界值。

## 6.2 控制的基本方式

对于两端直流输电系统,其等值电路如图 6.2 所示,图中左侧为整流器桥、右侧为逆变器桥。

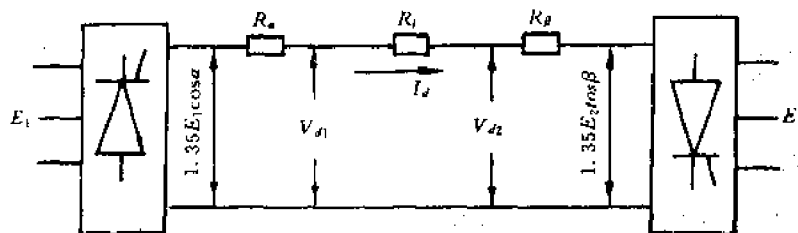


图 6.2 直流输电系统的等值电路图

由图 6.2 可知,直流电流

$$I_d = \frac{V_{d1} - V_{d2}}{R_i} \quad (6.3)$$

(1)当越前角  $\beta$  恒定时

$$I_d = \frac{E_1 \cos\alpha - V_{d1}}{R_{c1}} \quad (6.4)$$

或

$$I_d = \frac{V_{d2} - E_2 \cos\beta}{R_{c2}} \quad (6.5)$$

因此,由(6.3)、(6.4)、(6.5)式可得

$$I_d = \frac{E_1 \cos\alpha - E_2 \cos\beta}{R_{c1} + R_i + R_{c2}} \quad (6.6)$$

(2)当熄弧角  $\gamma$  为恒定时

$$I_d = \frac{V_{d2} - E_2 \cos\gamma}{-R_{c2}} \quad (6.7)$$

因此,由(6.3)、(6.4)、(6.7)式可得

$$I_d = \frac{E_1 \cos\alpha - E_2 \cos\gamma}{R_{c1} + R_i - R_{c2}} \quad (6.8)$$

在上述式中, $E_1$  和  $E_2$  分别为整流器和逆变器的理想空载直流电压, $R_{c1}$  和  $R_{c2}$  分别为整流器和逆变器的换相电阻, $R_i$  为直流线路电阻。

从式(6.6)和(6.8)可以看出,要改变直流电流  $I_d$  (或功率)可以从如下两个方面来进行调节:

①调节整流器的触发延迟角  $\alpha$  或逆变器的越前角  $\beta$  (或熄弧角  $\gamma$ ),即调节加到换流阀控制极的触发脉冲相位,简称控制极调节。

②调节换流器的交流电势  $E_1$ 、 $E_2$ ,一般靠调节发电机励磁或改变换流变压器分接头来实

现。

用控制极进行调节,不但调节范围大,而且非常迅速,是直流输电系统的主要调节手段,用改变发电机励磁和换流变分接头来进行调节其速度较慢,如改变换流变分接头通常每挡需要5s~6s,而改变 $\alpha$ 或 $\beta$ (或 $\gamma$ )则只需要20ms~30ms,通常这两种方法是配合使用的。

直流输电系统基本的控制方式有:定电流控制、定电压控制、定越前角 $\beta$ 控制、定熄弧角 $\gamma$ 控制和定延迟角 $\alpha$ 控制等。在直流电流控制的基础上,如果修改控制指令,即可发展成为功率控制、交流系统频率控制以及潮流翻转控制等。下面分别介绍几种常用的控制方式。

### 6.3 定电流控制

#### 一、控制特性

定电流控制是直流输电系统最基本的控制方式之一。在正常运行时,由于某种原因而引起的输电线路上的直流电流 $I_d$ 的偏移,都将由这一控制系统快速地将电流调整到正常值,也就是说这种控制系统的任务是要维持直流电流 $I_d$ 为恒定值。所以其控制特性为一垂直线,如图6.3所示。

#### 二、控制原理

控制的原理接线图如图6.4所示,其控制系统所执行的控制步骤如下:

- 1) 通过直流互感器测量直流电流 $I_d$ 。
- 2) 将 $I_d$ 与电流整定值 $I_{d0}$ (也称电流指令)进行比较。
- 3) 将 $I_d$ 与 $I_{d0}$ 比较后的差值 $\epsilon$ (称为误差或误差信号)输入控制放大器A中进行放大。

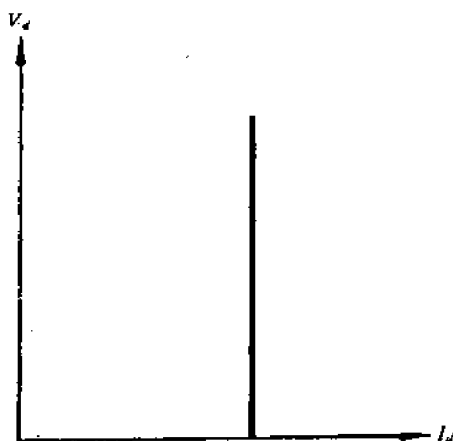


图 6.3 定电流控制特性

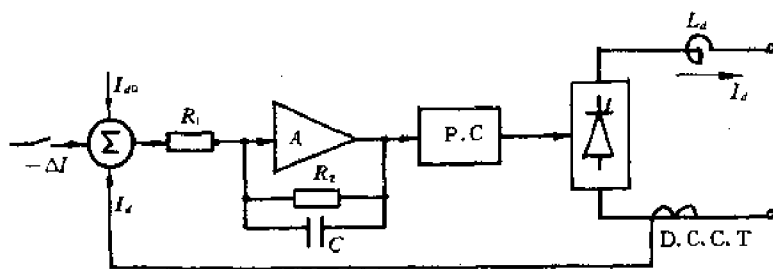


图 6.4 定电流调节器原理图

$I_d$ —线路电流信号  $A$ —高增益放大器  $I_{d0}$ —电流指令信号  
 $P.C$ —相位控制器  $\Delta I$ —电流裕度信号  $R_1$ —输入电阻  $L_d$ —直流电抗器  
 $R_2$ —反馈电阻  $D.C.C.T$ —直流电流互感器  $C$ —反馈电容

4)将放大的信号输入相位控制回路作为控制电压,进行所需的相位控制,从而达到控制直流电流为恒定的目的。

实际上,电流调节器是一种简单的带反馈的高增益放大器。对于整流状态,如果测得的电流实际值小于整定值,则必须减小 $\alpha$ 角, $\cos\alpha$ 增加,也就是增大整流器空载电压,使电流增大到(或接近)整定值。如果测得的电流实际值大于整定值,则增大 $\alpha$ 角,使电流减小到整定值。对于逆变状态,如果实际电流偏大时,则必须提高逆变器的空载电压,即减小 $\beta$ 角值。因为 $\beta=180^\circ-\alpha$ ,所以触发相位所移动的方向和整流状态是一致的。也就是说,同一个调节器,对整流和逆变两种状态都适用,不必改变接线。但用于逆变状态时,电流的整定值必须减小一个电流裕度 $\Delta I$ 。

## 6.4 定电压控制

定电压控制的基本原理与定电流控制相似,只是反馈信号改变为直流电压。图 6.5(a)所示为定电压控制特性,在这种控制系统的作用下,是以维持直流电压等于整定值为目标。图 6.5(b)是该控制系统原理接线图,其控制步骤与定电流控制大致一样。

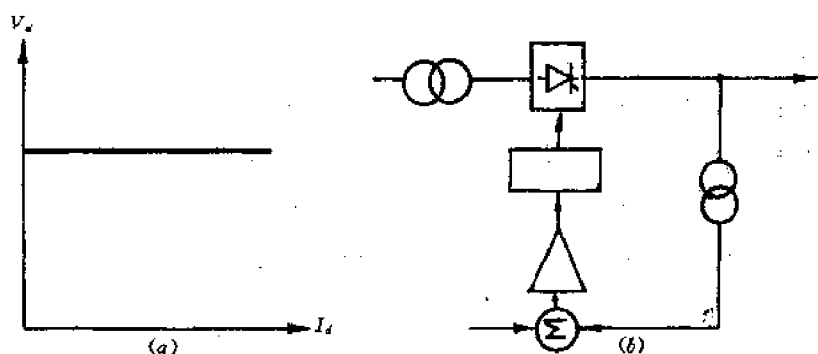


图 6.5

a)定电压控制特性 b)定电压控制原理图

## 6.5 定触发角控制

定触发角控制又分为两种情况:对于整流器而言,为定延迟角控制(定 $\alpha$ 角控制);而对逆变器而言,为定越前角控制(定 $\beta$ 角控制)。

对定 $\alpha$ 控制,由式(6.4)可以写出

$$V_{d1} = E_1 \cos\alpha - I_d R_{c1}$$

由上式即可作出其控制特性曲线为一束向下倾斜的平行线族,如图 6.6(a)所示,随着 $\alpha$ 角的增加,斜线往下移动,斜线的斜率为 $-R_{c1}$ 。

对定 $\beta$ 控制,由式(6.5)可以写出

$$V_{d2} = E_2 \cos \beta + I_d R_{c2}$$

同样根据上式可作出图 6.6(b) 所示的定  $\beta$  角控制特性曲线, 为一束往上倾斜的平行线族, 随着  $\beta$  的增加, 斜线向下移动, 斜率为  $+R_{c2}$ 。

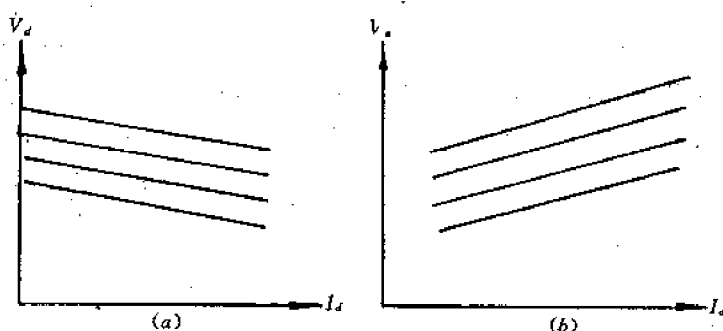


图 6.6 定触发角控制

a) 定  $\alpha$  角控制特性 b) 定  $\beta$  角控制特性

## 6.6 定熄弧角控制

在实用中, 逆变器的控制方式并不以  $\beta$ , 而是以熄弧角  $\gamma$  作为控制对象。所以定熄弧角  $\gamma$  控制是逆变器最常用的控制方式, 由于  $\beta = \gamma + \mu$ , 所以控制  $\gamma$  也就控制了  $\beta$ 。

在直流输电系统中, 当换流器作为逆变器运行时, 必须设定熄弧角控制系统, 才能保证直流输电系统的安全、经济运行。

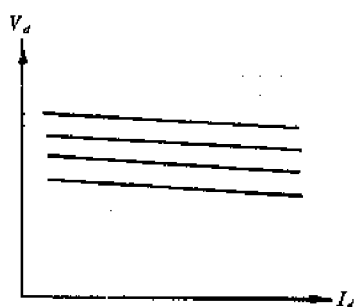


图 6.7 定熄弧角的控制特性

### 一、定熄弧角控制系统的控制特性

由式(6.7)可以写出

$$V_{d2} = E_2 \cos \gamma - I_d R_{c2}$$

并可得出如图 6.7 所示的控制特性曲线, 由图可见, 特性曲线为一族向下倾斜的平行线,  $\gamma$  角越大, 曲线越低。

### 二、定熄弧角控制的基本原理

逆变器设定定熄弧角  $\gamma$  控制系统除了确保直流系统运行的安全可靠运行之外, 还具有提高交流侧功率因数及提高逆变器的利用率等经济因素。

定熄弧角控制系统要比定电流控制系统复杂, 就其基本原理而言, 也具有某些相似之处。目前, 有两种不同原理构成的定熄弧角控制方式。一种称为预测式, 另一种称为实测式。

#### 1. 预测式定熄弧角控制

由逆变器换相原理分析中可知

$$\Delta V = \frac{V_{d0}}{2} [\cos \gamma - \cos \beta] = I_d R_s$$

用  $\gamma = \gamma_0, V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_i$  代入上式整理可得

$$E_i \cos \beta = E_i \cos \gamma_0 - \frac{\sqrt{2}\pi}{3} I_d R_\beta$$

或 
$$E_i \cos(180^\circ - \beta) + E_i \cos \gamma_0 - \frac{\sqrt{2}\pi}{3} I_d R_\beta = 0$$

上式由三项组成,可表达为

$$V_A + V_B + V_C = 0$$

预测式的原理框图可用图 6.8 表示。

如  $E_i, I_d$  为已知,可求出  $\beta$ ,根据计算出来的  $\beta$  角去触发逆变器,就能保证逆变器运行在  $\gamma = \gamma_0$  状态。



图 6.8 预测式定熄弧角控制原理框图

## 2. 实测式定熄弧角控制

在 6 脉波的逆变器中,实际测定 6 个阀的熄弧角  $\gamma_i$  与整定值  $\gamma_0$  相比较,若其中最小的一个熄弧角  $\gamma$  也大于  $\gamma_0$  时,则通过减小越前角  $\beta$  将熄弧角调整到  $\gamma_0$ ,从而提高了运行的经济性,这种调节称为“经济调节”。若某个阀的  $\gamma_i$  小于整定值  $\gamma_0$ ,为了确保安全起见,通过处理元件将下一阀的触发相位提前,即增大  $\beta$  角来满足要求,这种调节称为“安全调节”。

实测式定熄弧角控制的原理框图如图 6.9 所示。

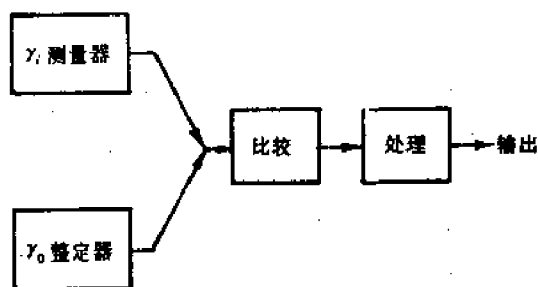


图 6.9 实测式定熄弧角控制原理框图

## 6.7 功率控制和频率控制

高压直流输电系统中作为基本的受控参数是直流线路电流和直流线路电压。通常,前者通过整流站的定电流控制而得到调节;后者则利用定熄弧角控制来维持直流线路电压。

由于直流输电线路需要按计划输送一定的功率,如果直流输电只设计定电流控制,那么在两侧交流系统电压波动不大时,基本上能满足定功率输送的要求。如果两侧交流系统电压波动较大时,则必须装设定功率控制来满足要求。

### 一、定功率调节器的工作原理

定功率调节器可分为具有乘法器和具有除法器的两种方式,分别如图 6.10(a)和(b)所



示,下面简单分析具有乘法器的定功率调节器的原理框图。

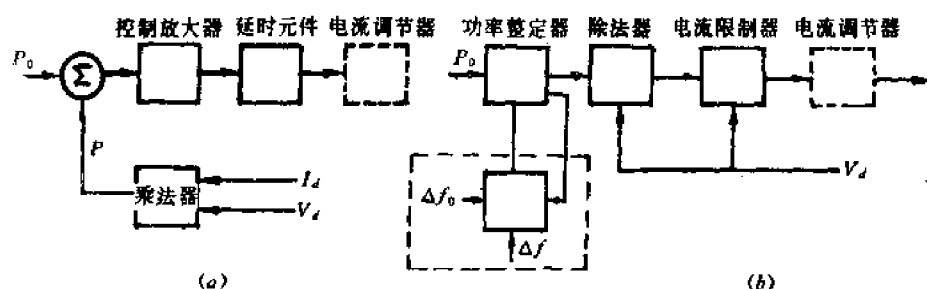


图 6.10 定功率调节器原理框图

(a) 具有乘法器的控制框图 (b) 具有除法器的控制框图

如果由于某种原因,整流侧交流电压下降,使交流功率值和直流功率值均减小。因此,实际测量所得的直流功率  $P$  和功率整定值  $P_0$  之间就出现功率差值  $\Delta P = P_0 - P$ 。该差值经过控制放大器后,产生一个与差值  $\Delta P$  成一定比例的信号,此信号经延时元件延时后,输入定电流调节器作为新的电流指令(比原来的指令值要大)。按照新的电流指令,电流调节器朝增大直流电流的方向调节,使传输的直流功率得以增大,并恢复到整定值  $P_0$ 。为止,反之亦然。

具有除法器的定功率调节器是利用功率整定值  $P_0$  和直流线路电压  $V_d$  进行除法运算,产生相应的电流指令,再经过电流限制回路输出,作为电流调节器的电流指令  $I_{d0}$ 。然后  $I_{d0}$  与实际的直流电流进行比较,产生差值控制电压进行所需的相位控制。

## 二、频率控制

高压直流输电系统不但能实现定电流和定功率调节,而且还可以利用直流线路功率便于快速控制的特点,来承担或参与交流系统的频率调节,以改善交流系统的供电质量。

在一个定功率控制环中,假如没有频率控制,直流输电系统有时会无法稳定运行。例如,在逆变侧交流系统部分负荷被甩掉后,若直流输电系统仍按定功率方式运行,此时,送到逆变侧的功率将会引起该侧交流系统频率的上升。同样,若输送的功率超过整流侧交流系统能够输送的功率,则将使整流侧交流系统进入停止状态。为此,当采用定功率控制时,应该引入频率控制以改善运行的稳定性。

由于高压直流换流装置对交流系统频率没有固有的响应能力,因此,必须人为地把交流系统频率引入换流装置,才能进行频率控制。

通常,设计的功率-频率调节器在正常运行时,定功率调节器的工作是为满足额定功率传输。但是,如果交流系统频率偏差超过整定值时,则频率控制参与作用,改变传输功率的大小,以援助故障的交流系统。相当于对交流系统起阻尼作用,而增加的频率控制元件数量少,万一交流系统一部分瓦解时,也可以阻止该交流系统频率发生大幅度的升降。

此外,如果直流输电系统的额定传输功率和它所连接的一端交流系统中的发电机容量相对为  $\frac{1}{2}$  到  $\frac{1}{3}$  时,则直流输电要分担该系统的调频任务,甚至承担全部的频率调节。

实现频率调节的原理方框图和定功率调节器相似,也是以定电流调节器为基础,引入频率调节的信号来改变电流的指令值,通过对直流输送功率(电流)的调节,达到频率调节的目的。

图 6.10(b)中虚线框部分即为功率-频率调节器中增加的频率控制部分。

## 6.8 控制系统的实际应用

在高压直流输电系统中,实际应用的控制方式并不是某一种,而是几种基本方式的组合,它们各自担负着不同的控制调节任务而又相互配合,即使在整流器或逆变器中也不是仅仅单一地采用某一种控制方式。因此,在本节中将介绍直流系统中控制系统的实际应用情况。

### 一、联合控制特性

#### 1. 整流站的控制特性

整流站的控制特性通常由三种基本控制特性组成,即定 $\alpha$ 角控制特性,定电流控制特性和定熄弧角控制特性,其控制特性如图 6.11 所示。

整流器在 $\alpha=\alpha_{\min}$ 条件下运行,相当于在最高的直流电压下使用设备,且无功损耗最小。因此,对于最佳利用运行设备来说是较为有利的(一般为了确保阀在正向电压下的最佳触发, $\alpha_{\min}$ 取为 $5^\circ$ )。但却使整流器失去了增加直流电流的控制能力。所以为了实现电流控制,整流器的直流端电压(由逆变器的直流电压和直流线路压降所确定)应该位于 $\alpha_{\min}$ 上限控制特性的下方。使得在正常运行时,电流调节器通过调节整流器直流电压来维持线路电流恒定,从而使定电流控制特性为一垂线。在暂态过程期间(如线路故障),为了迅速消除故障,往往还设计有整流器的快速移相控制,大幅度地增加 $\alpha$ 角至 $120^\circ$ 左右,使整流器暂时转入逆变工况运行。这时,直流电压进入负电压区,故障线路所贮藏的能量可以通过逆变工况运行的换流器馈入整流侧的交流系统,故障得以快速消除。

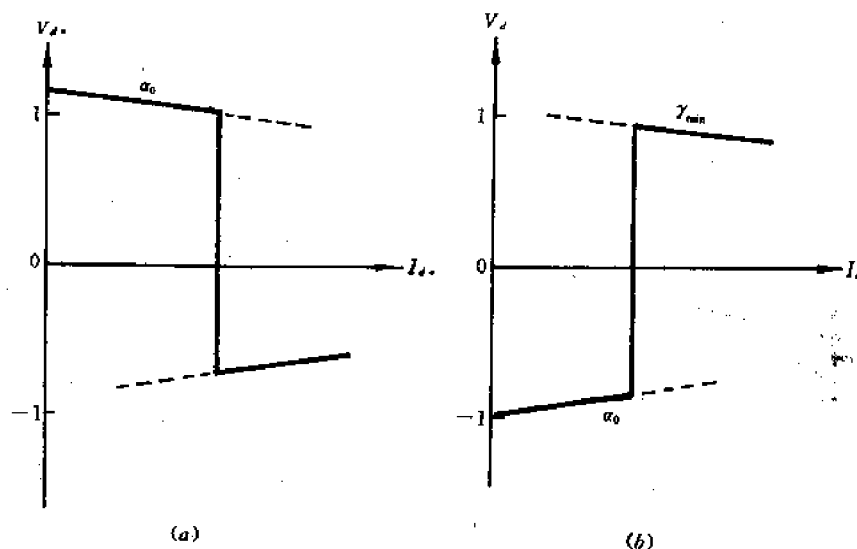


图 6.11 换流站的控制特性

(a) 整流站的控制特性 (b) 逆变站的控制特性

应该指出,整流器移相控制进入负电压区时也应设有角度的限制。因为,当 $\alpha$ 角移相接近 $180^\circ$ 时,如果在结束移相之后,这一点的定熄弧角小于某个给定的最小熄弧角,则会引起换相

失败。为此,即使是整流器也必须具有某种基本的熄弧角控制,以保证运行所需的安全裕度。

## 2. 逆变站的控制特性

逆变站的控制特性也是由三种基本控制特性组成:定熄弧角控制特性、定电流控制特性和定 $\alpha$ 角控制特性,如图 6.11(b)所示。由于逆变器的接法与整流器相反,因此,逆变器的定熄弧角控制特性位于图中横坐标上方。

由前面分析可知,逆变器定熄弧角控制特性具有向下倾斜的性质,其斜率是由换流变压器和交流系统阻抗值所确定的。

整流器可以在 $\alpha_{\min}$ 条件下正常运行,而逆变器要在 $\gamma_{\min}$ 条件下运行却存在一定的困难,暂态期间尤为突出。因为对于晶闸管阀,为了熄弧或使多数载流子复合,均要求有一定的反向恢复电压时间,这段反向恢复电压时间被规定为熄弧角(约 $8^\circ\sim 10^\circ$ )。若这段时间太短,阀内的电流继续存在而不能正常换相引起换相失败。从经济上需要保持熄弧角尽量地小,但为了安全起见,要求给出一个稍大于所需熄弧角的合理裕度(考虑到在交流电压或直流电流变化时不致发生换相失败),熄弧角典型的经验值为 $\gamma_0=15^\circ\sim 18^\circ$ 左右。

逆变站正常运行在 $\gamma_0$ 控制特性,这就确定了线路最高直流电压,并使逆变器运行的无功损耗最小。逆变站的定电流控制(又称最小电流控制)的电流整定值比整流站的整定值要小一个电流裕度 $\Delta I(0.1I_d\sim 0.15I_d)$ ,它只是在暂态期间直流电流降至一定的数值时才被投入,以防止线路电流的急剧下降。而此时整流器工作在 $\alpha_{\min}$ 控制特性以维持直流线路的电压值。当需要潮流翻转控制时,逆变器可通过相应的控制作用进入整流器“工况”运行,则相应地采用定 $\alpha$ 控制特性。

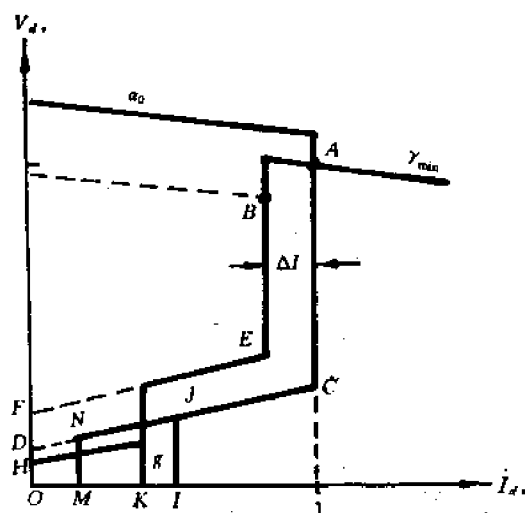


图 6.12 两端直流系统的联合控制特性

## 3. 整流站、逆变站的联合控制

两端直流输电系统运行时,其联合控制特性见图 6.12 所示。

正常运行时,整流站运行在定电流控制特性。此时,整流器直流电压为了满足定电流控制而留有一定的调节裕度( $\alpha=15^\circ$ 左右),逆变器则运行在定熄弧角控制特性,从而确定了直流线路的额定电压( $U_{d0}=1$ ),其对应的工作点为 A。

假如由于某种原因造成整流站电压下降而使直流电流低于某一数值时,逆变器就自动转入定电流控制(又称最小电流控制)。此时,整流站转入运行在 $\alpha_{\min}$ 控制特性上,以控制直流线路电压,则运行点为 B。

当逆变站交流系统发生故障时,逆变器会产生换相失败。若为近处故障,由于交流电压下降过大,逆变器将无法自行消除换相失败。此时,为了限制持续的过电流(即短路电流),整流器控制特性应进行改进,使它只有一个由低电压控制的电流限制特性,如图 6.12 中的到 CD 为止,逆变器控制特性也需作同样的改进,见 EF。这就能在发生故障时限制短路电流,从而大大减小了换流器的电流应力,提高了电压的稳定性。

此外,在暂态期间为了阻止逆变器进入整流工况,逆变器还应装设相角限制器,以保证控制角不进入整流状态( $\beta < 90^\circ$ )(见控制特性  $GH$ )。控制特性  $IJ$ 、 $KL$  分别表示整流器和逆变器在低电压时的最大电流限制,以减小线路有功损耗和逆变器的无功损耗。控制特性  $MN$  是整流器最小电流限制,用来防止直流电流间断而引起的过电压。

从上述整流站和逆变站的控制特性可以看出,如整流站按  $\alpha_{\min}$  控制特性运行,而逆变站按定熄弧角  $\gamma$  控制特性运行,若整流器定  $\alpha$  控制特性的斜率( $R_a$ )小于逆变器定  $\gamma$  控制特性的斜率( $R_p$ ),则当直流电流稍微增加时,根据前述整流器的输出电压  $U_{dr}$  和逆变器输入电压  $U_{di}$  表达式

$$U_{dr} = 1.35E_1 \cos \alpha_{\min} - I_d R_a$$

$$U_{di} = 1.35E_2 \cos \gamma_0 - I_d R_p$$

可知  $(U_{dr} - U_{di}) > 0$ , 结果使直流电流继续增加。反之,由于  $(U_{dr} - U_{di}) < 0$ , 将会使  $I_d$  下降至 0, 因而直流系统的运行是不稳定的。

由上述分析可知,只有当  $R_a > R_p$  时,直流系统才能稳定运行。因此,如果整流器按定电流控制特性运行,即  $R_a = \infty$  时,逆变站采用定熄弧角控制特性(或定  $\beta$ )运行,都能获得稳定的运行点。

## 二、直流输电的快速相位控制

从前面直流输电的基本控制可以看出,换流器的相位控制是直流输电控制的基础,对于三相桥式接线的换流器,其空载直流输出和输入电压分别为

$$U_{d10} = 1.35E_1 \cos \alpha$$

$$U_{d10} = 1.35E_2 \cos \beta$$

改变  $\alpha$  和  $\beta$  角就可改变每极输出和输入直流电压的大小和极性,其  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $U_{d0}$  的关系如图 6.13 所示。

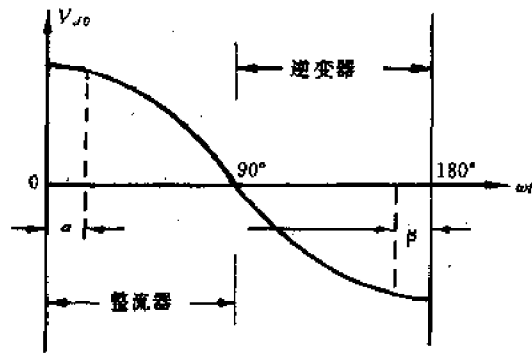


图 6.13  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $U_{d0}$  的关系曲线

为了改变控制角而设计的快速相位控制,按原理基本上可分为分相控制和等距离脉冲相位控制两种方式。

### 1. 分相控制方式

这种控制方式的特点是,每个调整定的控制角取决于该阀的换相电压。最常用的方法是建立在检测换相电压零点的基础上,从该零点开始计时,经过一个预先确定的时延,由相位控制单元发出控制脉冲。这种方法使每个换流阀控制脉冲相位的确定随各相而定,且时延是相等的,因此也称为等延迟角  $\alpha$  控制方式。由于所确定的控制角只与每个阀实际的换相电压零点有关,因此即使在交流系统发生扰动时(如失去一相交流电压),预置的控制角在健全相仍能维持。如整流器还需要保持最大可能的直流电压,则这种方式还是具有一定的优点。

图 6.14 表示分相式控制脉冲产生的原理,图中(a)表示锯齿波移相原理,(b)表示正弦波移相原理。

锯齿波移相原理是利用与交流电压同步的的矩形波,在两个正向换相电压零点之间积分,产生一个锯齿波电压  $U_p$ ,并使该电压与控制电压  $E_c$  进行比较,在两电压相等时产生一个控制

相环形计数器能产生 6 个间隔为  $60^\circ$  电角度的等距离脉冲,并依次分配给对应的换流阀。在稳态时,振荡器输出脉冲的频率自动地恰好调整到交流系统频率的 6 倍。因此,经过 6 拍环形计数器输出的控制脉冲,被精确地按照  $60^\circ$  等距离排列。当交流系统受到扰动时,通过控制电压  $E_c$  的变化直接改变振荡器的频率,从而使环形计数器输出脉冲的相位得到所需的调整,图中所示的控制电压  $E_c$  是由电流控制环产生的。

### 3. 潮流翻转控制

直流输电的优点之一是能迅速而方便地实现潮流翻转,这样不仅在正常运行时可以按照经济的原则调节输送功率的大小和方向,而且还可以在事故情况下很方便地实现事故紧急支援。因此,潮流翻转这一特点,大大加强了两个交流系统的联系,从而提高了系统运行的稳定性和可靠性。

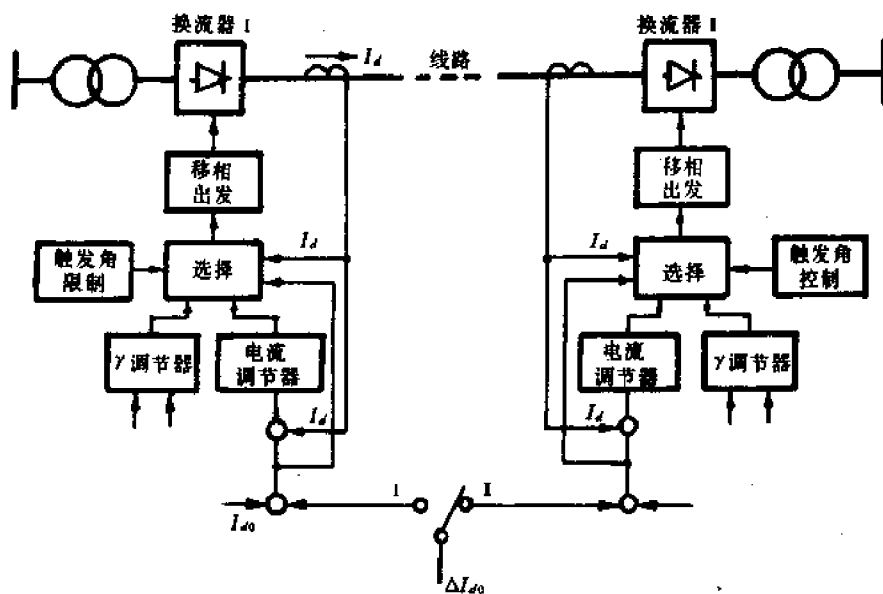


图 6.16 潮流翻转控制原理图

由于换流阀单向导电的特性,所以直流电流的方向是不能改变的。要实现潮流(功率)的翻转,只有使线路的直流电压改变极性。这可通过调整整流器的触发相位,使延迟角  $\alpha$  大于  $90^\circ$ ,变为逆变状态运行,而同时把原来的逆变器触发相位提前,变为整流状态运行,翻转过程是自动进行的。

利用电流调节器控制潮流翻转的原理如图 6.16 所示。图中两侧的换流器都有电流调节器和定熄弧角调节器。它们的调节特性都由定  $\alpha$  控制、定电流控制和定熄弧角控制三段组成。

潮流翻转控制特性如图 6.17 所示,设功率翻转前,整流器和逆变器的正常运行点为 A,功率由整流侧输送至逆变侧。当需要进行潮流翻转时,可将电流差值  $\Delta I$  指令(电流裕度)传送到整流侧(相当于图 6.15 中将开关移动到翻转位置),此时整流侧的电流整定值由  $I_{d0}$  变为  $(I_{d0} - \Delta I)$ ,而逆变侧的电流整定值由  $(I_{d0} - \Delta I)$  变为  $I_{d0}$ 。在送端的换流器检测出的直流电流  $I_d$  大于整定值  $(I_{d0} - \Delta I)$  时,电流调节器便不断加大  $\alpha$  角,力图降低运行电流。同时,受端的逆变器检测出电流小于整定值  $I_{d0}$  时,则由定熄弧角控制转换到定电流控制(最小电流控制),并不断增大  $\beta$  角,企图使电流值维持在新的整定值。当  $\beta > 90^\circ$  时,则转入整流状态。同时送端也调到

$\alpha > 90^\circ$ , 由整流状态变为逆变状态, 这一过程一直进行到当送端换流器的  $\gamma = \gamma_0$ , 转入定  $\gamma_0$  控制, 并重新稳定在新的运行点  $B$ , 完成潮流翻转过程。

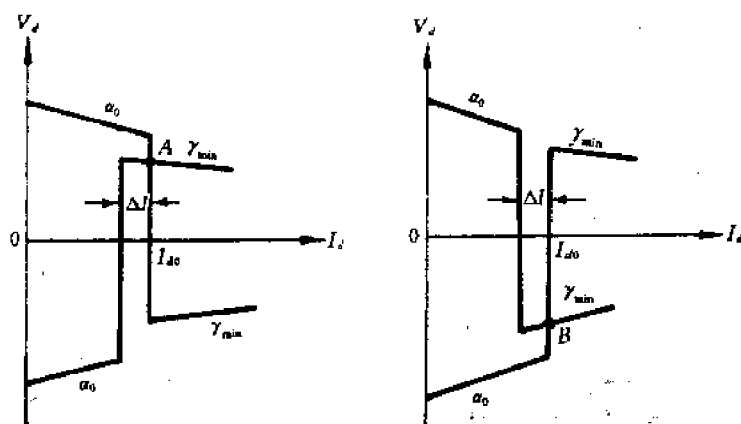


图 6.17 潮流翻转的控制特性

## 第七章 高压直流输电技术的发展前景

### 7.1 引言

目前,高压直流输电技术正处于大力发展阶段,世界各国在现有建设和运行经验的基础上,正在大力开展高压直流技术的研究和发展工作。由于高压直流系统所涉及到的问题非常广泛,现将一些主要的并对高压直流输电技术的发展速度影响较大的问题列举如下:

1. 高压直流断路器的研制。
2. 高参数、高质量晶闸管元件的制造。
3. 多端高压直流系统的特性研究。
4. 发电机-换流器单元接线方式。
5. 二极管整流器的应用。
6. 强迫换相技术。
7. 静止无功功率补偿器的采用。
8. 把现有交流输电设备改为直流的应用。
9. 紧凑型换流站的设计与使用。
10. 高压直流系统的过电压和绝缘配合。
11. 高压交直流并联系统的运行特性和数字仿真。
12. 微机控制和直接数字控制。
13. 高压直流系统的可靠性评估。
14. 新型发电方式和电能储存方式的发展与直流输电的配合。

本章只对其中一些主要问题作简单的介绍。

### 7.2 高压直流断路器

在交流电路中的电压、电流,每个周期两次自然过零点,而在直流电路中却不存在这种现象。因此,直流电路的开断就比较困难。同时,又由于在高压系统中具有大量的电能,因此用于低压直流电路的技术并不适用于高压直流输电。

对于直流电路故障的开断,可应用两种不同的原理。一种是取决于换流器控制将电流限制到一个合理的低水平,以使断路器的负担不致于太重。但是,其缺点是在整个扰动期间全系统的电压水平要降低。另一种与交流系统清除故障相类似,即在探测故障后,断路器并不依赖于换流器的任何控制,而是尽可能快的隔离故障段。由于要切断的电流非常大,采用这种原理,断路器动作是困难的。但另一方面,系统的扰动较小,即系统的电压不致于降低。

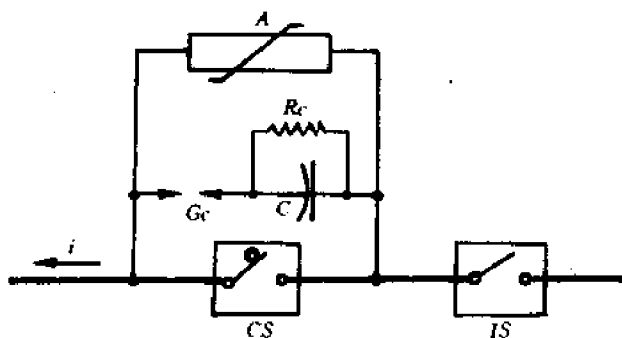


图 7.1 具有弧光间隙可控换相电路的直流断路器

的迅速减少,冲击电流涌入未经充电的电容器  $C$ 。但是,  $C$  的电压迅速增加受到经过全部电流的冲击避雷器  $A$  的限制。此时, 电流逐渐减小至零, 而断路器的端电压则取决于它的残压。

根据第二种原理, 已经研制出了几种不同类型的高压直流断路器。图 7.2 所示的电路就是其中的一种。这种断路器具有两个旁路: 一个是电容器, 另一个是直流冲击分流器, 该电路中电容器要预充电。由于真空设备具有切断高频以及在切断后迅速恢复其绝缘强度的优点, 因此所用的断路器采用真空断路器。

当开关  $S_1$  的触点断开时, 电弧非常小, 而且几乎没有能量消耗, 因而满足预充电电容器的要求。当  $S_1$  的触点完全分离时, 开关  $S_2$  闭

合,  $C_1$  产生一个幅值足够大的振荡放电过程, 并产生电流零值, 以便切断  $S_1$  电路。此时, 电流流过电容器, 并直到其电压足以触发吸收了大部分能量的冲击分流器为止。

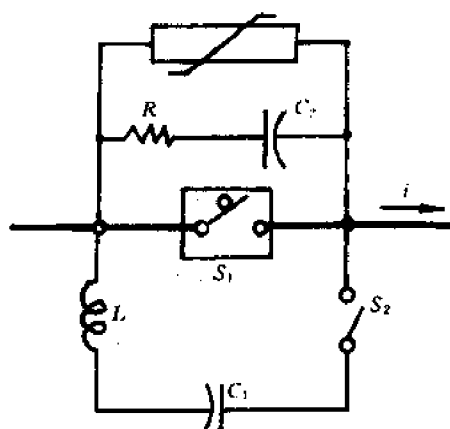


图 7.2 具有预充电电容器的直流断路器

### 7.3 多端直流输电

虽然在高压直流输电技术发展的早期, 多端直流系统控制的可行性已经得到了证实, 但是, 至今还没有实际的多端高压直流系统投入运行。然而, 现有的两个工程: 尼尔逊河和金斯诺思工程具有实际上的多端控制特性。

近年来, 由于已经认识到多端直流系统的潜在的效益, 对于这种结构在未来的应用方面的兴趣, 又重新活跃起来。多端直流系统一旦能成为现实, 则对高压直流输电技术的发展具有无可估量的作用。同时, 多端直流系统对交直流联合系统的动态行为会有很大的改善, 这是因为按选定的控制策略的快速功率调节, 在多端直流系统中比单端系统更易于实现。

对所提及的多端结构响应速度的限制主要取决于主电路的特性以及远方通讯的延误等,



而不在于控制系统本身。

研究多端直流系统必须考虑到控制、通讯、保护等系统以及操作设备格外的复杂性。尤为重要而又难以评估的是,在所选用的多端直流系统中可靠性的问题。

多端直流系统有三种可能的作用,即:

- (1)大功率输电;
- (2)交流系统间的互联;
- (3)强化交流系统。

上述作用可以采用不同的结构来实现,基本结构如图 7.3 所示。图中(a)为并联或幅射形分支;(b)为网状或环形系统;(c)为串联结线。

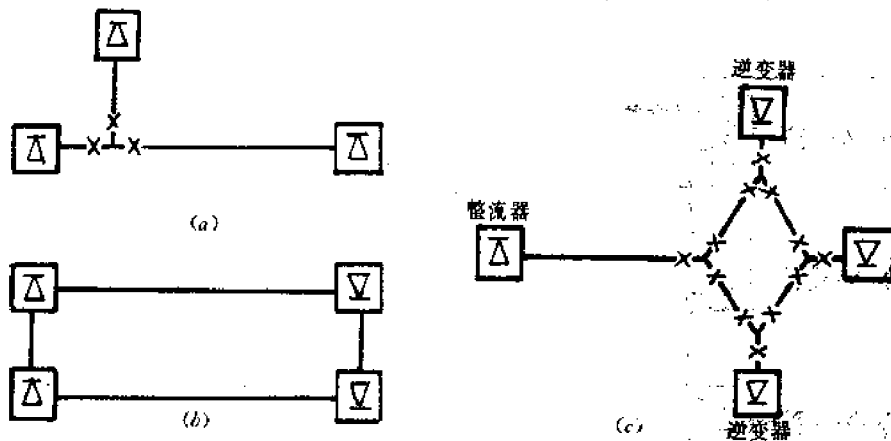


图 7.3 多端直流系统的结构

(a)具有并联分支的线路 (b)环形系统 (c)串联连接的系统

下面对上述几种结构作一技术比较。

对于图 7.3(a)所示的并联多端系统有严格的限制,即:

- (1)直流线路的停运会引起整个系统的停运。
- (2)诸如线路故障或换相失败这样的扰动,会影响整个或大部分系统。
- (3)一台逆变器换相失败,会从其它终端汲取电流,如果在额定参数较低的换流站发生换相失败,则难以恢复供电;而且可能的话,不要造成全系统短时停电。
- (4)任何换流站的潮流翻转,都需要进行机械操作。
- (5)直流线路任何部分的断开,都会使系统的输送容量至少减少一个极的额定容量。而且在断开之前必须对潮流分布进行调整。另一方面,潮流分布对于多重连结点之间的功率交换则是非常灵活的。

在图 7.3(b)所示的环形系统中,每个换流站都与几条线路相连。因此,停运一条线路对输送容量的影响较小。对并联系统所列举的限制也同样适用于环形系统。

对于图 7.3(c)所示的串联系统,在具有分支的换流站容量允许有一定的灵活性时,则有其优越性,而且对于某些额定容量较小的分支站来说,也许是一种有吸引力的选择。另一方面,如果没有大范围的有载分接头调节(OLTC),电力输送的灵活性就可能受到限制。对于这个系统,主功率输送要求固定输电线路上的电流。其它具有分支换流站则根据这个电流运行,而且

通过包括 OLTC 和连续触发角控制在内的直流电压控制,来实现对功率的控制。

在串联系统中,不进行机械操作就能实现潮流翻转。而且系统的扰动在大多数情况下不会影响其余的系统。对于系统的最优化运行,完整的控制系统仍然是很必要的。此外,对于串联系统,特别需要注意绝缘配合问题。

## 7.4 发电机-整流器单元

在现有与高压直接连接的发电厂中,发电机-变压器单元接成并联。已经提出了一种“单元型”方案,在这种方案中,每台发电机都独立运行,且直接连接到换流变压器单元。

与传统的整流站相比,这种单元接线的优点如下:

(1)由于发电机都互相独立运行,因此没有同步或稳定问题。

(2)不需要专门的测量装置以确保发电机之间的无功功率的平衡。

(3)可以取消交流滤波器,从而避免了甩负荷后产生发电机自励磁的危险。也避免了在变压器或发电机与滤波器之间可能发生的谐振。

(4)由于发电机隔离的结构,交流系统的故障水平将显著下降。

如果需要,直流侧的几个阀还可接成串联或并联,如图 7.4 所示。

发电机-整流器单元的使用,使换流站的控制

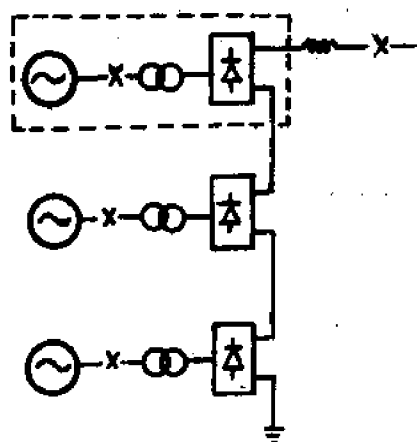


图 7.4 单元型接线方案

更为简单。它可以通过由发电机控制的整流桥来实现,亦可以通过具有二极管整流器的发电机来实现。

对此种方案而言,整流器的快速电流控制确定了输送功率,并提供了必要的阀保护。对于低速的汽轮机控制才需要确定该装置的频率。此外,低速电压调整器足以确定理想的空载直流输电电压。

这种方案的运行和保护,与前面所述及的方案基本相同。它能够实现潮流的翻转及其速度的变化,这对于在抽水蓄能方面的应用也许是有益的。

图 7.5 所示接线是采用自激式感应发电机-晶闸管整流器单元,应用于远方水电站远距离直流输电的一种实例。

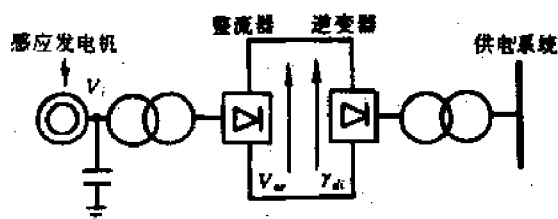


图 7.5 通过整流和逆变的异步功率注入

## 7.5 发电机-二极管整流器单元

图 7.6 所示为发电机-二极管整流器单元的串连接线。它除了需要快速发电机励磁控制以外,整流器的交流侧与可控整流器单元的情况基本上是相同的。

由于增加重叠换相的结果,二极管运行时电流的谐波含量将明显地减少。因此,有可能取消交流滤波器。

用发电机励磁去控制送端的恒定直流电压是可取的。逆变器采用快速电流控制,其熄弧角是通过换流变压器分接头的低速动作来加以控制的。

为了防止频繁地换相失败,有必要采用较大的超前角去启动逆变器。这会导致逆变站费用的增加(大约 5%~10%),在逆变侧还需要额外的无功功率补偿(大约 15%~25%)。

二极管整流器单元所占的空间比相应的晶闸管单元要小,如果把它与发电机、变压器一起建造在发电机厂房内,有可能把直流终端取消掉。

由于二极管整流器的结构简单,它不要求复杂的分级控制、通讯以及可控整流器的阻尼等。因此,其可靠性比相应的晶闸管元件高。

由此可见,对于水力、坑口或核电等发电厂系统,二极管整流器将使高压直流设备明显地减少,而且还提供了更为可靠而又便于维修的系统。

然而,发电机-二极管整流器单元的实用性取决于发电机的励磁机容量,以便在直流电路期间提供充分地保护和控制。尽管已在模拟器和数字机上对其动态响应进行了试验,迄今为止,它还没有在实际的系统中得到证实。

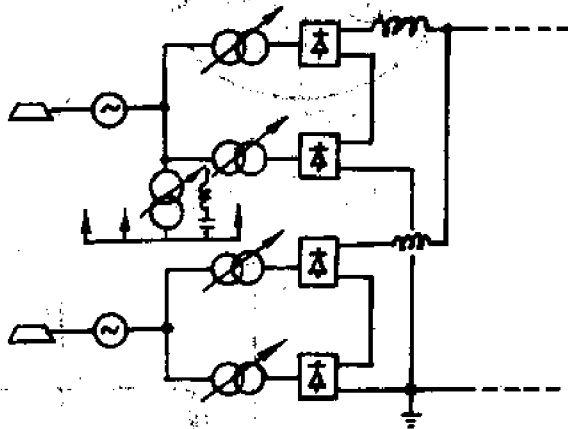


图 7.6 发电机-二极管整流器系统

## 7.6 强迫换相

在高压直流系统中,只有当进入换相的相电压相对于结束换相的相电压为正值时,换相才有可能;此时,把从一个阀到另一个阀电流的转换称为自然换相。因此,换流桥的运行范围落在第 1 和第 2 象限之内,如图 7.7 所示。而且整流和逆变这两个过程所消耗的无功功率与功率因数成正比。

在换相期间,可通过阀间电压的短时易号,在第 3 和第 4 象限中强迫换相;此时,换流器以超前功率因数运行。在这些条件下,电流的转换,称为强迫换相。

图 7.8 为强迫换相的典型电路。该电路包括辅助晶闸管( $A_1 \sim A_6$ )和电容器。这些电容器

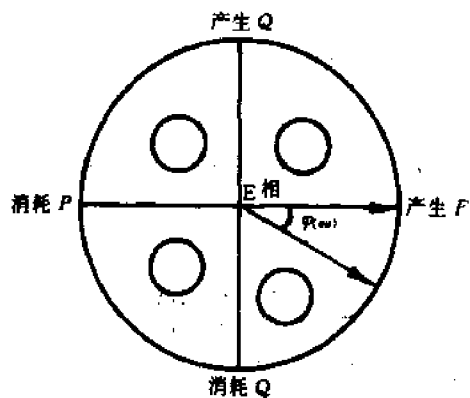


图 7.7 运行象限

在强迫换相之前就进行充电,对于从 4 到 6 的换相,其极性如图 7.8 所示。但是,电容器的极性变化会在阀间和换流站产生相当大的电压降,因此,目前看来,强迫换相的经济性是很差的。

强迫换相与自然换相的组合使用,可提供有功功率和无功功率控制的完全独立性,即在保持交流母线电压控制的同时,使高压直流线路的潮流控制成为可能。

由于近年来固态开关技术的发展,强迫换相技术将来在特殊场合的应用,也许不会超出这个问题的范围。

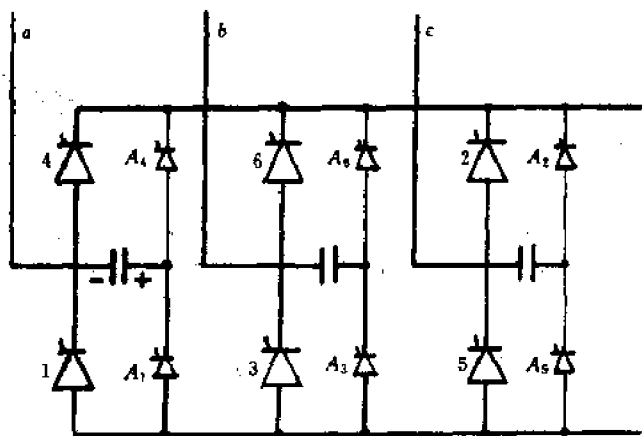


图 7.8 强迫换相电路

## 7.7 现有交流输电设备变为直流的应用

通常,交流输电线路的负荷不会达到最大额定热容量,而且交流多回路的恒定输送功率比同样的设备用直流输电时可能输送的容量要小。如果把交流线路用于直流,则其导线就成为可以独立运行的直流系统的极;而且如果需要,输送功率可以增大到额定热容量。

按交流系统的要求选择的绝缘水平,一般都适用于直流对地电压的绝缘要求,后者为交流对地电压的峰值。在停运情况下,采用以大地作回路的可能性也增添了吸引力。

对采用地下和海底直流电缆输电的形式,情况亦类似。它已在温哥华岛的直流输电工程中得到了应用。

此外,变交流输电为直流的附加效益是降低故障水平。然而,当采用此法来增加输电能力时,可能会出现下述两方面的问题:

- (1) 在转换期间,短时退出运行;

(2)有些系统需要在中间落点,以供给负荷。

变交流输电设备为直流的应用实例,如图 7.9 所示,它是在人口稠密地区把配电系统进行非周期强化。

这个方法对于进一步增加交流的回路数或采用更高的交流电压输电系统都是一种现实的方法。

## 7.8 紧凑型换流站

未来的高压直流工程至少有一端靠近大城市,换流站的占地面积常常受到空气污染的限制,在此情况下,紧凑型技术显示出优越性。

美国电力研究所(EPRI)提出的一份研究报告描述了充气绝缘母线系统和所谓“无外壳”设计的紧凑型阀的发展情况。六氟化硫充气绝缘母线可用来互联直流端套管、平波电抗器、阀和换流变压器。

充气母线与空气绝缘阀和普通阀厅一起使用具有下列优点:

(1)使阀厅的面积和费用最小;

(2)使直流场所的外露部分,可以避免污染的沉积。

实现紧凑型的主要手段是采用充气绝缘和液态冷却,后者是通过采用液态氟利昂来散热。

采用氟利昂冷却系统或许是实现“无外壳”设计的唯一方法。与水相比它是非常好的绝缘物质,且不会引起闪络。因此,对于阀来说,这是比水冷却系统更有吸引力的一个方案。

显然,这种技术主要应用于市区。“无外壳”设计不仅使换流站的占地最小,而且使所需要的空间也最小。由于建筑物的造价是所占空间的函数,因此这一点是很重要的。

在技术上取得进展的其它方面有:

(1)直接光触发晶闸管的发展。这将极大地减少阀中其它电子元件的数量,并且还提高了整个阀的可靠性和效率。

(2)晶闸管额定电压的提高,从而减少了为达到所要求的额定电压而串联连接的晶闸管数量,从而也减少了阀的损耗。

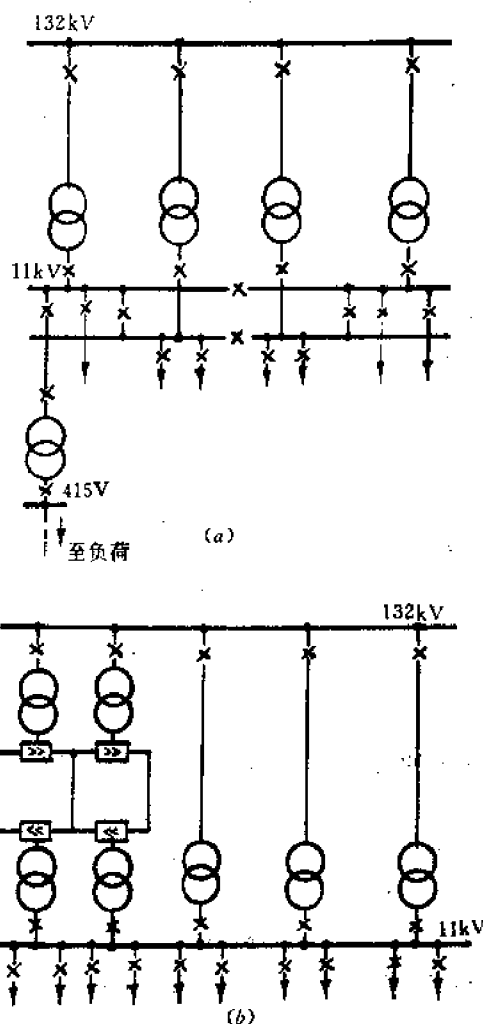


图 7.9 配电系统的非周期强化  
(a)普通交流系统 (b)一回馈电线变为直流

## 汉英词汇对照<sup>①</sup>

### 二 画

二极管 Diode

### 三 画

大地返回 Ground Return  
干扰 Interference

### 四 画

双调谐滤波器 Double Tuned Filter  
双极架空线路 Bipolar overhead Line  
分接头 Tap Changer  
分接头控制 Tap Changer Control  
分裂导线 Bundle Conductor  
分流器 Current Divider  
无功功率 Reactive Power  
无线电干扰 Radio Interference (RI)  
不稳定性 Instability  
互感 Mutual Inductance  
开关站 Switchyard

### 五 画

失通 Misfire  
平波电抗器 Smoothing Reactor  
正序分量 Positive-Sequence Component  
正弦波 Sine Wave  
可听噪音 Audible Noise  
功率控制 Power Control

<sup>①</sup> 考虑到英文词汇中很多场合缩写,所以所有词第一个字母均大写,以便和缩写词大小对应。

功率翻转	Power Reversal
电缆输电	Cable Transmission
电抗器	Reactor
电容器	Capacitor
电容性换相	Capacitive Commutation
电阻性电压降	Resistive Voltage Drop
电流控制	Current Control
电流控制器	Current Controller
电流裕度	Current Margin
电流路径	Current Path
电极	Electrode
电阻率	Resistivity
电晕	Electrical Corona
电晕损耗	Electrical Corona Losses
电话干扰	Telephone Interference
电话干扰系数	Telephone Interference Factor (TIF)
电压畸变	Voltage Distortion
电压调整	Voltage Regulation
电压控制	Voltage Control
电压稳定性	Voltage Stability

## 六 画

阳极电抗器	Anode Reactor
阴极保护	Cathode Protection
多极	Multi-pole
多端	Multi-terminal
光导纤维	Optical Fib
负荷	Load
同步调相机	Synchronous Condenser
同步连接	Synchronous Connection
过电压	Overvoltage
过电流	Overcurrent
过负荷容量	Oveload Capacity
远距离通讯	Telecommunication
网络	Network

## 七 画

汞弧阀	Mercury-arc Valve
阻尼	Damping
阻尼回路	Damping Circuit
阻尼线圈	Damping Winding
阻尼滤波器	Damped Filter
冷却	Cooling
串联换流站	Series Converter Station
串联滤波器	Series Filter
极	Pole
极性	polarity
极性反转	Polarity Reversal
延迟角	Delay Angle
纹波	Ripple
纹波再注入	Ripple Reinjection
系统互联	System Interconnection

## 八 画

环形计数器	Ring Counter
定电流控制	Constant Current Control
定电压控制	Constant Voltage Control
定触发角控制	Constant Ignition Angle Control
定熄弧角控制	Constant Extinction Angle Control
并联阳极	Parallel Anode
并联换流器	Parallel Converter
并联滤波器	Parallel Filter
非同步连接	Asynchronous Connection
非特征谐波	Uncharacteristic Harmonic
直流电抗器	D. C. reactor
直流断路器	D. C. Breaker
直流输电	D. C. transmission
视在功率	Apparent Power
波传导	Wave Propagation
波阻抗	Surge Impedance
单极架空线路	Homopolar Overhead Line
单调谐滤波器	Single-tuned Filter



物理模型	Physical Model
变压器	Transformer
变压器分接头	Tap Changer

## 九 画

逆弧	Arc-back
逆变	Inversion
逆变器	Inverter
逆变站	Inverter Station
阀	Valve
阀桥	Valve Bridge
阀厅	Valve Hall
阀损耗	Valve Losses
栅极	Grid
故障	Fault, Failure
绝缘	Insulation
绝缘子	Insulator
绝缘水平	Insulation Level
脉波数	Pulse Number
架空地线	Ground Wire
背靠背	Back-to-back
架空线路	Overhead Line

## 十 画

换流站	Converter Station
换流器	Converter
换流器故障	Converter Failure
换流变压器	Converter Transformer
换流装置	Conversion Device
换相	Commutation
换相角	Commutation Angle
换相电压	Commutation Voltage
换相电流	Commutation Current
换相电抗	Commutation Reactance
换相失败	Commutation Failure
调谐锐度	Sharpness of Tuning
旁通阀	Bypass Valve

旁通对	Bypass Pair
振荡器	Oscillator
海中电极	Sea Electrode
海水返回	Sea Return
高通滤波器	High-pass Filter
特征谐波	Characteristic Harmonics

## 十一画

谐振	Resonance
谐振滤波器	Resonance Filter
谐振频率	Resonant Frequency
谐振角频率	Resonant Angular Frequency
谐波	Harmonic
谐波阻抗	Harmonic Impedance
谐波源	Harmonic Source
谐波畸变	Harmonic Distortion
谐波注入	Harmonic Injection
控制脉冲	Control Pulse
控制器	Controller
接地	Ground, Grounding
接地电极	Grounding Electrode
接地系统	Ground System
接地故障	Ground Fault
断路器	Breaker, Circuit Breaker
辅助设备	Auxiliaries
基准值	Reference Value
移相	Phase Shift
第三绕组	Tertiary Winding
理想空载电压	Ideal no-load Voltage

## 十二画

最小熄弧角	Smallest Extinction Angle
短路	Short Circuit
短路计算	Short-circuit Calculation
短路容量	Short-circuit Capability
短路特性	Short-circuit Characteristic
短路电流	Short-circuit Current

短路阻抗

Short-circuit Impedance



十三画

叠弧

Overlap

叠弧角

Overlap Angle

滞后角

Delay Angle

滤波器

Filter

雷击

Lightning

频率

Frequency

频率控制

Frequency Control

零序分量

Zero-Sequence Component

数学模型

Mathematical Model

十四画

熄弧角

Extinction Angle

漏电流

Leakage Current

漏磁通

Leakage Flux

稳定度

Stability

腐蚀

Corrasion

十五画

整流

Rectification

整流器

Rectifier

整定

Setting

整定值

Reference Value

模型

Model

十六画

噪音

Noise

避雷器

Arrester

避雷器均压环

Arrester Grading Ring

避雷器接地

Arrester Ground

操作回路

Operating Circuit

## 参考文献



1. Kimbark, E. W, Direct Current Transmission, Vol. I, 1971 年
2. Uhlmann, E, Power Transmission by Direct Current, 1973 年
3. 浙江大学, 直流输电, 电力工业出版社, 1982
4. 林永生等, 高压直流输电, 上海科学技术出版社, 1983 年
5. Arrillaga, J, High Voltage Direct Current Transmission, 1983
6. [苏]波谢 A. B, 华北电力学院译, 直流输电结线及运行方式, 1979 年
7. 任震, 我国发展直流输电的必要性及其前景, 高电压技术, 1984 年第一期
8. 任震、王官洁, 加拿大的直流输电技术电力系统自动化, 1984 年第 6 期
9. 任震、甘捷、王官洁, 超高压直流架空线路电晕损耗的实用计算曲线, 重庆大学学报, 1985 年第 4 期
10. 王官洁、冉立、任震, 高压直流输电比较的计算机方法, 重庆大学学报, 1988 年第 1 期

