

直 流 输 电

[瑞典] E. 乌尔曼 著

张金堂 等 译

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书为论述高压直流输电基本理论的专著,内容分为两篇。第一篇论述换流器及直流输电系统的基本原理,包括:理想状况下的换流器原理;实际情况下的换流器特性及其计算;以及直流输电系统及其控制。第二篇论述直流输电系统的各个部件,包括架空线,电缆,大地回路,直流线路侧设备,及换流站内直流设备等。此外,还论述了与直流输电系统相连接的交流系统部件,如电机及交流滤波器等,从而较全面地涉及到直流输电的各个领域。本书可供从事直流输电的科研、教学、工程技术人员及研究生阅读。

E. Uhlmann

POWER TRANSMISSION BY DIRECT CURRENT

Springer-Verlag Berlin Heideberg New York, 1975

直 流 输 电

[瑞典] E. 乌尔曼 著

张金堂 等 译

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年6月第一版 开本:787×1092 1/16

1983年6月第一次印刷 印张:18

印数:0001—5,600 字数:409,000

统一书号:15031·501

本社书号:3103·15—3

定价:2.80元

目 录

1. 绪论	1
-------	---

第一篇 换流器及输电系统理论

第一章 交流侧无电抗时的换流器

2. 换流器回路	6
3. 电压及电流波形	12
3.1 直流电压波形	12
3.2 阀电压波形	13
3.3 网络电流波形	14
4. 特殊情况下换流器的性能	15
4.1 网络电流不对称	16
4.2 直流电流谐波	18
4.3 网络电压不对称	21
4.4 幅值整流	25
4.5 直流电流波形	27
4.6 阀桥的接通与关断	28
4.7 阀桥的异常工况	32
4.8 特种控制方法	33

第二章 交流侧有电抗时的换流器

5. 换相过程	36
5.1 叠弧角	36
5.2 直流电压降	38
5.3 功率及无功功率	41
5.4 谐波	43
5.5 换相引起的暂态过程	44
6. 各种特性	56
6.1 整流器桥特性	56
6.2 逆变器桥特性	58
6.3 12-脉冲换流器特性	59
6.4 网络电抗的影响	62
7. 过电流	68
7.1 整流器的短路电流	68
7.2 逆弧电流	76
7.3 逆变器内的短路电流	81

8. 特殊情况下换流器的性能	83
8.1 不对称网络电压	83
8.2 强制换相	87

第三章 直流输电联络线

9. 直流输电的概貌	89
10. 直流输电线路的控制	100
10.1 电流控制	100
10.2 高级控制系统	108
10.3 交流网络的稳定	116
11. 多端点输电网络	123
11.1 结线方案	123
11.2 直流网络中的断路器	127
12. 模型	130

第二篇 直流输电线路的部件

第四章 直流侧

13. 架空线路	135
13.1 输电线路系统	135
13.2 架空线路参数的选择	138
13.3 电晕作用	144
13.4 输电线路的绝缘	150
13.5 直流输电线路的接地故障	154
13.6 直流线路的谐波	159
13.7 线路终端保护	169
14. 直流电缆	174
14.1 直流电缆参数的选择	174
14.2 漏电流	182
14.3 电缆中的过电压	183
15. 大地返回	184
15.1 地下电流分布	184
15.2 接地电极	187
15.3 海中电极	192
15.4 大地返回的优点与缺点	196
15.5 电极与换流站的连接	204
16. 直流侧设备	205
16.1 电容器	205
16.2 避雷器	205
16.3 直流断路器	208

第五章 换流站

17. 换流阀	211
17.1 汞弧阀	211
17.2 可控硅阀	218
18. 换流变压器及直流电抗器	229
18.1 换流变压器	229
18.2 直流电抗器	234
19. 辅助设备及辅助回路	236
20. 绝缘配合	240
21. 换流站的布置	246

第六章 交流网络元件

22. 电机	253
22.1 谐波负荷	253
22.2 转速控制	254
22.3 接到发电厂的各种整流器接线	256
23. 交流滤波器	257
23.1 交流网络的谐波阻抗	257
23.2 滤波器的参数选择	263
23.3 滤波器元件的保护	270
24. 交流网络的开关操作	271
参考文献	273
中英名词对照	274

1. 绪 论

利用直流输电的优点而使之作为输电工具，并非是新近才提出来的建议。早在本世纪初，就有人致力于解决这个问题，并确实在当时的技术基础上取得了满意的解决方案。

在当时的各种直流系统中，以塞雷系统（Thury System）最为著名。塞雷所建造的系统容量最大，到三十年代仍在法国运行。它利用安装在绝缘子上的串级直流发电机产生 57 千伏的直流电压，将 4 兆瓦的电力送达约 180 公里之遥，并在末端利用相应的串级电动机-发电机组，将输电电压降到用户所需要的电压水平。当时的直流输电线路也和目前一样，比交流输电线路的投资便宜，补偿了两终端的额外投资。

但目前我们提到直流输电时，情况已有了根本变化。应该承认：交流电无论在发电或配电方面，都居于独占地位。这种对交流有利的状况应归功于无整流子发电机，而最重要的原因则在于能将发电电压很方便地升到适当的输电电压，而在用户侧又能同样方便地降到所需要的电压。因此目前在从发电厂向用户输电的整个过程中，有利于应用直流电的场合只限于高压输电领域。

因此，就现代直流输电来说，总是将电能由一个交流网络输送到另一交流网络的问题，即将一个交流网络的电能变换为高压直流电流（整流），而在输电系统的另一端，则将直流电能反过来再变为交流（逆变），送到另一网络。只是在经历了几十年的研究工作以后，制成了在耐压方面和承受负荷方面都满足技术要求的汞弧阀时，才实际上解决了这个问题。此外，近年来可控硅在低压领域内取得的成就，促进了它在高压领域的应用，从而扩大了高压直流输电可用的技术范围。

有关整流及逆变问题中需要研究的内容相当广泛。为了今后能集中考虑主要内容起见，妥当的办法是从开始起就论述极有普遍性的命题，以便于决定去掉那些偏离主题的题材。

正如交流系统那样，直流系统的运行方式可以有两种选择，即恒电压方式与恒电流方式。在美国三十年代初期的实验性计划中，采用了恒电流制，其主要优点是能限制直流侧故障时所引起的故障电流。但恒电流制的缺点却是很明显的，主要为：电源来自于交流恒电压系统，从而需要增添附加设备；直流系统侧断路时要产生过电压；而首要的缺点是电阻损耗为恒定值，使轻负荷运行时得不到满意的总效率。这些缺点事实上与恒电流制用于交流系统时相同。因此我们决定采用恒电压制。但应当记住，在适当情况下应有可能用快速栅极控制将恒电压制变换为恒电流制，以便利用恒电流制的优点。

关于换流装置方面，必须讨论另一基本问题。换流装置是用以连接交流侧和直流侧的装置。图 1.1 示出其接线原理，用换流装置 A 将一无阻抗的交流网络接到直流网络，并用足够大的电容器表示直流电压恒定不变。换流装置包括增加交流网络相数用的无阻抗变压器，及具有自动选择能力的开关装置。这种开关装置能每时每刻地从接入的各相中选取与直流网络电压 D 最接近的一相，使之与 A 的输出端子相连接。图 1.2 示出了这种选择过程的结果。在这张图上，将换流装置的电压 D_A 与电容器上的直流电压 D 进行了

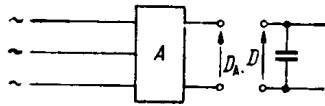


图 1.1 用换流器装置 A 连接直流与交流网络的接线图



图 1.2 图 1.1 中电压 D 与 D_A 随时间的变化

比较。因为电压 D_A 是由交流网络得来的，必然由各个电压的一些部分组成。即使这些开关装置能够成功地使两个电压的平均值相匹配，但必然存在电压偏差，因为选择只能在有限的相数中进行。由于接线图中任何部分都没有阻抗，因此如将两个电压接在一起，就会产生无限大的暂态电流。结果是必须接入串联阻抗，以承受图 1.2 所示的电压差。

在上述接线图中，可以用两种基本上不同的方法加进一个阻抗。图 1.3 是在直流侧加进一个串联阻抗。假定该阻抗为一大塞流线圈，主要地只通过直流电流。开关装置 A 使直流电流只通过在此瞬间与直流端子接通的那些变压器绕组，而与此同时，这些绕组以相应的比例将电流转换到交流侧的一次绕组中去。因此这种装置被称为**电流换流器**。

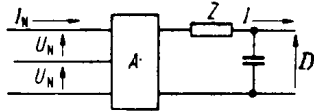


图 1.3 直流侧有阻抗 Z 的电流换流器原理图

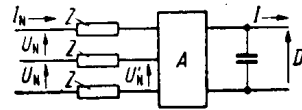


图 1.4 交流侧有阻抗 Z 的电压换流器原理图

因此，交流侧的各个电流与直流电流成比例。这些交流电流处于 A 的两次开关操作之间，与直流电流同样地恒定，其不变程度取决于塞流线圈的 Z 值。这些交流电流含有谐波，用 I_{N1} 表示，与直流电流的比例关系可用下式表示

$$\frac{\sqrt{3} I_{N1}}{I} = k \quad (1.1)$$

直流侧及交流侧的功率为

$$P = DI = \sqrt{3} U_N I_{N1} \cos \varphi_N \quad (1.2)$$

式中 D 为直流电压， U_N 为交流线电压有效值，而 $\cos \varphi_N$ 为基波的功率因数。由以上两式得

$$D = k U_N \cos \varphi_N \quad (1.3)$$

因此对一已知变压比而言，电流换流器交流侧的电流与直流侧的电流比为一固定比值 (k)，而电压比则还要随功率因数而变化。因此当采用阀作开关装置时，可用栅极控制来整定电流通过各阀时对应于交流电压的时刻，从而选取功率因数值。采用这样的方式，就能在电流换流器的情况下调整直流电压，而电流比值则仍然保持不变。

在图 1.4 中，限制暂态电流的阻抗放在交流侧。假定该阻抗对基波来说代表电抗值 X ，而对所有高次谐波来说实质上是完全堵塞的。任一瞬间与直流端子连接的各相上的恒定直流电压 D ，现在与切换装置 A 相连接，同时变压器使这些电压按适当比例出现在 A 的交流侧接线端子上。因此这种装置被称为**电压换流器**。每次开关操作都使交流侧电压以分段形式改变。因此这种阶跃曲线的基波有效值 U'_{N1} 与直流电压成比例，而与系统电压不同相，相差一个角度 δ 。由此得

$$\frac{U'_{N1}}{D} = k' \quad (1.4)$$

及

$$P = DI = \frac{U_N U'_{N1}}{X} \sin \delta \quad (1.5)$$

从以上两式得

$$I = k' \frac{U_N}{X} \sin \delta \quad (1.6)$$

因此在电压换流器情况下,换流装置的直流侧端子电压与交流侧端子电压之间有一固定比值(k')(注意后一电压不是系统电压),而直流电流则还要受电抗器两侧电压基波分量之间的相位角的影响。因此,当采用阀作换流装置时,就能用栅极控制来决定 U'_N 的各电压段对应于电压 U_N 的开闭瞬间,从而决定相位角 δ 及直流电流。

这样我们就可以推论:跨接在直流侧输出端子上的电容器是电压换流器的鉴别特性。再进一步说,在这种换流装置情况下,能用栅极控制来控制调整电流。而上述的电流换流器则与此相反,塞流线圈接在直流侧,而栅极控制则影响直流电压。

关于在电压换流器与电流换流器之间如何选择应用的问题,作进一步的研究是很重要的。如果换流装置是由理想的阀所组成,即由电流只有单一导通方向的设备所组成时,则只有在阀电压已到达正确极性以后,这只阀才能流过电流。如果不打算用人为方法去影响电压而使电流提前导通(强制换向)的话,则电流就决不能超前于有关相电压。这就是说,换流装置可以通过交流端子从交流网络取用无功功率,但不能供给交流网络以无功功率。这一点对电压换流器和电流换流器都同样适用。对电流换流器而言,这就是说式(1.3)的相位角 φ 不能超过下述范围

$$0 \leq \varphi \leq \pi \quad (1.7)$$

而在电压换流器情况下,无功功率则受下述条件限制

$$U_N \cos \delta > U'_{N1} = k'D \quad (1.8)$$

在电压换流器情况下,虽然换流装置两侧的电压有一固定比值,但直流电压与交流网络电压之间仅存在不等式(1.8)的关系。

在直流输电系统装置方面,可以考虑电压换流器与电流换流器的三种不同组合:

甲、直流系统两侧均为电压换流器

令下标1表示输电侧,下标2表示受电侧,则可根据式(1.6)用控制 δ_1 的方法来整定 I_1 值,而用控制 δ_2 的方法整定 I_2 值。在静态情况下,这两个电流当然彼此相等。利用两者的差值,就能调节输电电压。如果 $I_1 > I_2$,直流侧的电容就要充电,引起直流电压升高,反过来如果 $I_1 < I_2$,直流电压就要下降。由于直流电压与交流网络之间没有关系,因而需要对直流电压作精确而快速的调节,以保证两端的电压换流器在每一瞬间都满足不等式(1.8)。

当直流输电系统只有汞弧阀可用的时候,何以要取消采用电压换流器的所有建议,只要用几个字就足以说明理由,即有逆弧危险。即使在几组阀组串联的情况下,只要一组短路,就会引起所有各组全部崩溃,因为在这种条件下,全部直流电压就要加到数目减少了的阀组上去,即使相位角 $\delta = 0(P = 0)$ 时,也不能满足式(1.8)。这种崩溃使直流侧的电容短路,并伴有极大的电流,实际上只有操作直流断路器才能予以切除。

由于目前已经能够采用可控硅阀,电压换流器似又可重行采用,因为可控硅阀能被妥善设计,事先也能预料其运行特性非常可靠,因而无需再考虑逆弧现象。

研究由于网络电压 U_N 的变化所引起的有关情况时,不等式(1.8)同样适用。当 U_N 变化缓慢时,可用操作变压器的抽头(k')来抵消。但在快速变化的情况下,就必须采用适当选取 X 值的办法而使 δ 角有裕量。但这种办法的可能性受到严重限制,因为它在正常运行时要增加无功功率的需用量,而且它对功率输出($\sin \delta$)所产生的影响,要比它帮助满足不等式(1.8)($\cos \delta$)的影响确实要大得多。在任何情况下,一旦达到限值($\delta = 0$)以下,就不再能抵偿交流网络的电压降。在所有的能引起一定电压降的交流网络故障下,电压换流器都将失灵,从而引起如上节逆弧叙述中那样的同样事件。即使交流网络发生大电压降的机会要比前面所提到的逆弧少得多,但仍然要考虑电压换流器的失灵。在这种情况下,就成为输电系统有秩序运行的严重障碍。此外,还要恰当地规定可控硅阀的容量,使之在事故中未受到破坏时,能够应付直流侧的巨大放电电流。直流侧的无阻抗结线是电压换流器的一项特性,即使采用可控硅阀,仍然限制了它在高压直流输电中的应用。

乙、一侧为电压换流器而另一侧为电流换流器

甲节论及在高压直流输电系统中不采用电压换流器的理由,此处显然同样适用。不论我们按照何种方式提出了这种组合,其动力在于这种组合方式是较有发展前途的。根据式(1.3),电流换流器可处于调节输电电压的地位,而根据式(1.6),则电压换流器可以调节输电电流。如果有两个以上换流站的话,则所有其他换流站都可采用电压换流器。这种系统的优点是每个站在当地就能处理它本身的调节参数,可以独立地调节而与其它各站无关,从而使互换的信息量最少。

丙、两侧均为电流换流器

在此情况下,两侧的电压均按式(1.3)调节,并通过联络线的电阻接在一起。若输电侧仍用下标 1 标示,受电侧用下标 2 标示,则直流电流将按下述关系自行整定

$$I = \frac{|k_1 U_{N1} \cos \varphi_1| - |k_2 U_{N2} \cos \varphi_2|}{R} \quad (1.9)$$

这个方程式包含了改变电流的四种可能性,两种慢速的采用变压器抽头调节(k_1 及 k_2),两种快速的采用栅极控制调节($\cos \varphi_1$ 及 $\cos \varphi_2$)。由于式(1.9)的分子为两个大数之差,而分母的电阻值又很小(例如与相当的交流线路电抗值相比时),可以看出电流值对两个交流电压微小的变化都很敏感。这就需要它本身能自行调整电流,即用快速动作的栅极控制调整式(1.9)的整个分子部分。由于控制调节不能超过式(1.7)的限制,因此需要每侧备一台电流调节器,并按下列方式运行:即其中一台电流调节器必须连续保持可能的最大功率因数,而仍能按照式(1.3)使变压器抽头能保持输电电压于规定范围之内;另一侧的电流调节器则保证取得所需要的电流。例如在某些瞬间 $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_{2\max}$ 时,则增加电流的指令就要靠提高 $\cos \varphi_1$ 的方法来实现。如果在此过程中 $\cos \varphi_1$ 碰上了它的极限,则受电站就要接手管理电压调整,而用降低 $\cos \varphi_2$ 的方法使电流进一步增加。应用相似的方式,也可以降低电流。

当与电流换流器连接的交流网络发生故障时，直流电流就要视那一侧发生故障而试图增大或减小。电流调节器则抵制这种变化，而直流塞流线圈则限制暂态电流的冲击，否则当交流电压严重崩溃时，这种电流冲击将使阀过负荷。

因此，输电系统两侧均为电流换流器的方案，看来是最能提供满意运行条件的方案。从现在起，我们就把注意力全部集中在这种方案上。在这个意义上，我们认为直流塞流线圈与电流调节器是直流输电系统的鉴别特性。

这种决策还具备另一种不同性质的优点，即它比较简单，同时也比较便宜，因为它只与直流塞流线圈一道工作，而不象电压换流器那样，必须与能满足阻抗要求的三相塞流线圈在一起。此外，关于换流器本身，也还有进一步的简化。如果换流器本身是由导通方向固定的阀所组成，则每条电流路径基本上都要用两台这样的阀，亦即每个电流方向需要一台。图 1.5 示出了这种三相桥型回路的完整的阀结线图。电压换流器需要这种完整的阀结线，虽然其中的半组可能由不受控制的阀所组成。而对电流换流器来说，则两组阀都必须可控。但如在功率反向时容许改变电压方向而不改变电流方向，或者将电流换流器接到直流网络的连接线而用机械装置变更极性的话，则在电流换流器情况下，可以去掉一半阀而只以半数阀运行。

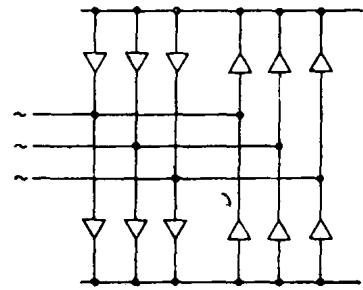


图 1.5 完整的阀布置结线图

因此，后面所论述的系统都是恒电压系统。它的换流装置都是电流换流器，意味着具有直流塞流线圈（直流电抗器）和电流调节器；此外，这些电流换流器只有一个电流方向（只用图 1.5 中阀结线的一半）。

* * * *

备注：由于**电压换流器**一词在本书后面部分不再出现，因此用**换流器**这个名词来代替**电流换流器**时，不致引起含混。

用于汞弧阀换流器的专门名词和用于可控硅阀的习惯上稍有不同。无论所遇到的阀型是哪一种，我们都只采用一种专门名词，即正常用于汞弧阀的名词。由于同一原因，图中用于换流器和阀的符号也不表示具体阀型的特征，而只指示电流的导通方向，如图 1.5 所示。

第一篇 换流器及输电系统理论

由于低压换流器已经应用多年,换流器的理论已为大家所熟知,因此这里只限于给出定义和结论,而不予推导.但在直流输电应用中进一步发展起来的那些部分,则予以详尽的讨论.为了使这种做法有一个开端,也为了方便读者而将各主要计算步骤合在一处起见,这里将各部分的理论基础讨论到合乎我们意图的程度.同时还要指出,有些章节已作了大量删节.这种做法当然是假定读者已经具备了一定程度的有关基础知识.

第一章 交流侧无电抗时的换流器

2. 换流器回路

电流路径

在绪论中所提到的开关装置,系由变压器和阀所组成,在交流网络电压的一个周期中,向直流侧输出端提供由变压器输入的 p 个不同电压.这些电压系由正弦电压经过变压器而得,因而本身也是正弦波.假设它们的幅值相等,且相邻两电压间的相位差均为 $2\pi/p$.在任何特定瞬间,阀都选接它们中的最高电压.图2.1示出 $p=4$ 时的变压器电压波形,及换流器装置两端子间的直流电压波形.从图中可见,每经过 $2\pi/p$ 的等时间间隔,就换接到下一个毗连的变压器电压.

这样,就在交流电压的一个周期内,出现了经由 p 条不同路径而流过开关装置的直流电流,此处假定直流电流是被充分平波了的.每一条这种电流路径至少包含一只阀和一个变压器绕组,但也可以由几个局部的电流路径组成,而其中每一局部路径还必须包含一个绕组和一只阀.这样的局部路径可以成为若干条不同路径的一个组成部分,但在此情况下,它必须能与其他各个局部路径依次连接,从而构成所考虑的各条不同路径.图2.2示出具有四个局部路径1—4的例子,其中每个局部电流路径包含一个绕组和一只阀,

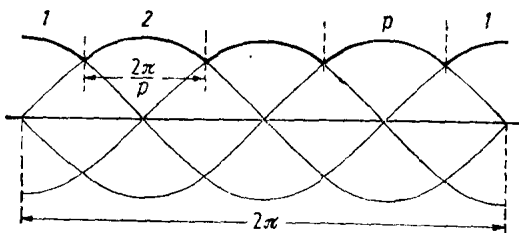


图2.1 在一个电压周期内具有 p 个脉冲的直流电压波形

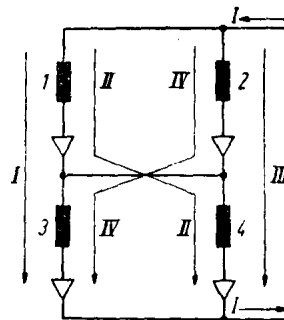


图2.2 由四个局部电流支路(1—4)组成四条路径(I—IV)的例子
($p=4, r=1, s_0=2, q=2$)

由这些局部电流路径形成了四种不同的电流路径 I—IV。局部路径 1 与路径 I 和 II 有关，前者是由局部路径 1 与局部路径 3 连在一起所构成，而后者则由局部路径 1 与局部路径 4 连在一起所构成。

各个局部电流路径可以串联运行，也可以并联运行。在任意时间间隔内，电流可以在 r 个并联局部电流路径之间均分。所以每一条路径都传导 I/r 的瞬时电流，而每一瞬时电流又可流过 s_0 个串联路径。因此，在每一瞬间都有 $r \cdot s_0$ 个路径同时导通。再进一步，每一局部电流路径还可成为 q 个路径组的元件之一 ($q > 1$)，即在每一瞬间， q 个元件中仅有一个传导电流 I/r 。要满足这个条件，构成换流组的各个路径要有一个公共连接点，以便在每一瞬间通过此点向某一路径馈送电流 I/r 。在图 2.2 中共有两个这样的换流组。每组的 $q = 2$ 。路径 1 和路径 2 属于一个换流组，而路径 3 及路径 4 则属于另一换流组。每组都含有路径 I—IV 一次，从而保证了在每个换流组中总有一个而且只有一个元件导通。此外，在所有时间内都有两个路径串联 ($s_0 = 2$)，而每个路径都流过全部直流电流 ($r = 1$)。

因此，组成 p 条路径的阀的总数及其有关的路径总数为

$$p = r \cdot s_0 \cdot q \quad (2.1)$$

其中 r, s_0, q 只取整数，而且 $q > 1$ 。就本文而言， p 表示脉冲数，而 q 则为换流器的换相数。

表 2.1 $p = 6$ 时的基本电路及其参数

回路	q	s_0	r	$\frac{i_v}{I}$	$\frac{\bar{i}_v}{I}$	$\frac{I_v}{I}$	$\frac{D_{i_0}}{U}$	$\frac{U_{i_v}}{D_{i_0}}$
1	6	1	1	1	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} = 1.35$	$\frac{2\pi}{3} = 2.09$
2	3	1	2	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2\sqrt{3}}$	$\frac{3\sqrt{6}}{2\pi} = 1.17$	$\frac{2\pi}{3} = 2.09$
3	3	2	1	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{3\sqrt{6}}{\pi} = 2.34$	$\frac{\pi}{3} = 1.05$
4	2	1	3	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3\sqrt{2}}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0.90$	$\pi = 3.14$
5	2	3	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{6\sqrt{2}}{\pi} = 2.70$	$\frac{\pi}{3} = 1.05$

表 2.1 示出了 $p = 6$ 时将 p 分解为三个整数乘积的五种可能情况。由此得到 6-脉冲换流器的五种基本电路，而这五种中的任一种还可以有不同的附加变化。

每一局部路径及其相应的阀在 q 分之一周期内流过电流，因此相应的阀电流

$$\begin{aligned}
 \text{瞬时值} \quad i_v &= \frac{I}{r} \\
 \text{平均值} \quad \bar{i}_v &= \frac{I}{rq} \\
 \text{均方根值} \quad I_v &= \frac{I}{r\sqrt{q}}
 \end{aligned} \quad (2.2)$$

表 2.1 列出了 $p = 6$ 时五种基本电路的各项数值。

反向电压

令每条局部电流路径的交流正弦电压有效值为 U 。适当选取这些电压的相对相位关系,使相继切换而得的直流电压波形与图 2.1 所示的波形相似。通过积分,可得理想空载直流电压如下

$$D_{i0} = s_0 \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} \cdot \sqrt{2} U \quad (2.3)$$

如果 q 是偶数,则在同一整流组中,对任一局部路径而言,必另有一电压与之相差 180° 的路径存在。如果这对路径中的某一路径导通,则在另一路径的阀两端之间有一峰值为

$$\hat{U}_{rev} = 2 \sqrt{2} U \quad (2.4)$$

的电压,这一电压必须由该阀承受。

如果 q 是奇数,则产生电压极大值 \hat{U}_{rev} 时的相位移为 $\pi^* \pm \frac{\pi}{q}$, 且

$$\hat{U}_{rev} = 2 \sqrt{2} U \cos \frac{\pi}{2q} \quad (2.5)$$

由式(2.3)至(2.5)可得

$$\begin{aligned} q \text{ 为偶数时 } q_{\text{even}}: \frac{\hat{U}_{rev}}{D_{i0}} &= \frac{2\pi}{s_0 q \sin \frac{\pi}{q}} \\ q \text{ 为奇数时 } q_{\text{odd}}: \frac{\hat{U}_{rev}}{D_{i0}} &= \frac{\pi}{s_0 q \sin \frac{\pi}{2q}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

根据式(2.3)至(2.6)所得的数值列在表(2.1)中。前面所述的这些电路,都是在低压技术方面所熟悉的。例如电路 2,就代表具有相间变压器的常用 2×3 相电路。

如果要选一个供高压用的电路,自然要首先考虑加在阀上的电压值。就这一点而言,表 2.1 示出了各 \hat{U}_{rev}/D_{i0} 值的巨大差别。因此根据表中所列数值,一开始就排除了电路 1, 2 和 4, 但电路 3, 5 则都可入选。

变压器容量

为了得到选取电路进一步的依据,可计算 p 个变压器绕组的容量总和。由式(2.1), (2.2), 和(2.3), 得 p 个变压器绕组容量总和为

$$S_{iv} = pUI_v = p \frac{\pi D_{i0}}{s_0 q \sin \frac{\pi}{q} \sqrt{2}} \frac{I}{r \sqrt{q}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{D_{i0} I}{\sqrt{q} \sin \frac{\pi}{q}} \quad (2.7)$$

此处假定 p 个电压中的每一电压 U , 都是由单独的变压器绕组产生的。如果采用曲折接法(Z 接法)绕组,则容量将相应地增大。在式(2.7)中,阀绕组总容量仅取决于换相数 q 。

* 原文为 $180^\circ \pm \frac{\pi}{q}$, 应为 $\pi \pm \frac{\pi}{q}$ 。——译者注

为了求得最佳值,可假定 q 为一连续变量,这样就可对式(2.7)求导.在此情况下得 $q_{opt.} = 2.7$,且与希望采用的脉冲数无关.针对选自表 2.1 的电路 3 和 5,表 2.2 列出了按式(2.7)求得的阀绕组容量.由于电路 3 的 $q = 3$,更接近于最佳值,所以它的 S_{iv} 值小于电路 5 的 S_{iv} 值.差别并不大,但它表明了大传输容量时对电路 3 有利的一个重要之点.

表 2.2 变压器容量

电 路	阀绕组相数	$\frac{S_{iv}}{D_{i0}I}$	$\frac{S_{iN}}{D_{i0}I}$
3	6	$\frac{\pi}{3}\sqrt{2} = 1.48$	$\frac{\pi}{3} = 1.05$
5	6	$\frac{\pi}{2} = 1.57$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$
3a	3	$\frac{\pi}{3} = 1.05$	$\frac{\pi}{3} = 1.05$
5a	3	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$

基本电路 5 的接线图见图 2.3,图中用箭头标出了直流电流流路径之一.图中还示出了变压器的网络侧绕组,并标出相应的电流方向.从图上可以清楚地看出,由于三个网络电流绕组电流的总和不可能为零,因而在此情况下绕组必须是 Δ 接法,或者要附加一个 Δ 接法的第三绕组.

图 2.4 示出了基本电路 3 的接线图.此处网络侧的电流之和为零,因此网络侧绕组可以任意选用 Y 或 Δ 接法.从这一点来看,电路 3 也比电路 5 有利.如果电路 5 需要额外的第三绕组时,则更加强了这一有利点.如表 2.2 所示,上述两种电路的网络绕组容量 S_{iN} 均为 $S_{iv}/\sqrt{2}$.

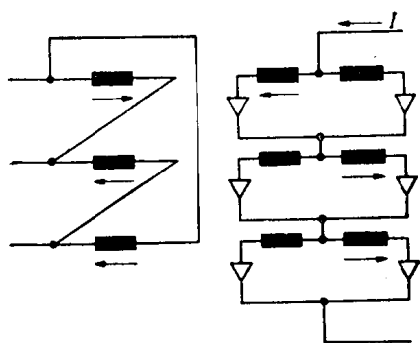


图 2.3 基本电路 5
($p = 6, q = 2, s_0 = 3, r = 1$)

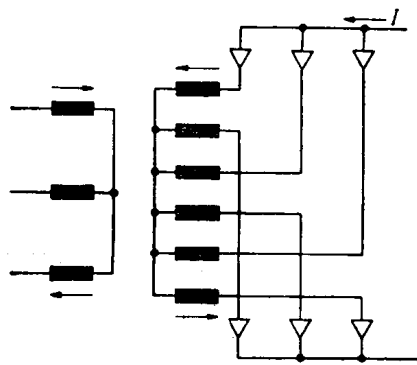


图 2.4 基本电路 3
($p = 6, q = 3, s_0 = 2, r = 1$)

桥型回路

在局部电流路径内,当然容许改变阀及绕组的顺序.图 2.4 就利用了这一点,加到上面三个局部电流路径的次序和加到下面的三个不同,结果使变压器的各绕组具有一公共的中性点.每一相的两个绕组在中性点处接在一起.由于每对绕组的阀侧端子取得同一电压,可以将两点接在一起,并将两个绕组合成一个.图 2.5 就是这么办的,我们可以看

到：著名的桥型电路是怎样从基本电路 3 变化而得的。虽然这种变化后的电路只有三个变压器绕组而不是六个，每个绕组与两个局部电流路径相连接，但与基本电路具有同样性质。因此网络侧的对应额定值完全相同（表 2.2 内回路 3a）。此外，由于中性点不接任何接线，如图 2.5 所示，阀侧绕组可以随便采用星形或三角形接线。

也可以将基本电路 5 中每相的各阀绕组合在一起，从而降低阀绕组的容量到网络侧绕组的容量（表 2.2 内回路 5a）。但如我们在图 2.6 中注解的那样，这需要双倍数目的阀。在此情况下，每个局部路径中有两只阀，因此在整流器中只需要一只能够受控。

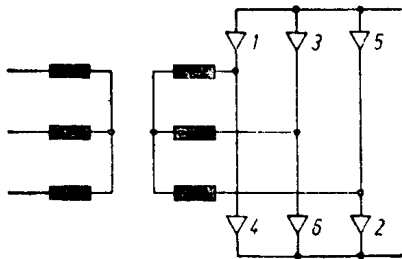


图 2.5 2×3 相桥型回路
($p = 6, q = 3, s_0 = 2, r = 1$)

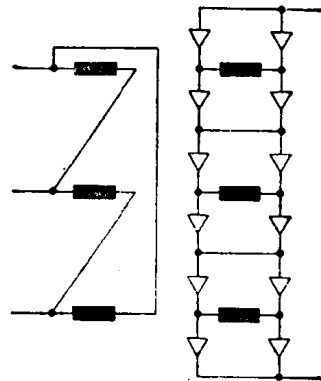


图 2.6 3×2 相桥型回路
($p = 6, q = 2, s_0 = 3, r = 1$)

巧的是 q_{opr} 值与交流系统的相数非常接近。由此而产生的后果，是优先选择网络相数倍数的脉冲数，特别是偶数倍数的脉冲数。这也是为什么在表 2.1 中取最小优先脉冲数 $p = 6$ 的原因。对应于 $p = 12$ 的一张表中，包括了能够分解成整数因子的所有可能方案。其中 $q = 3$ 取得优先地位，即 $p = 12, q = 3, s_0 = 4, r = 1$ （如图 2.7，为两桥串联），及 $p = 12, q = 3, s_0 = 2, r = 2$ （如图 2.8，为两桥并联）。

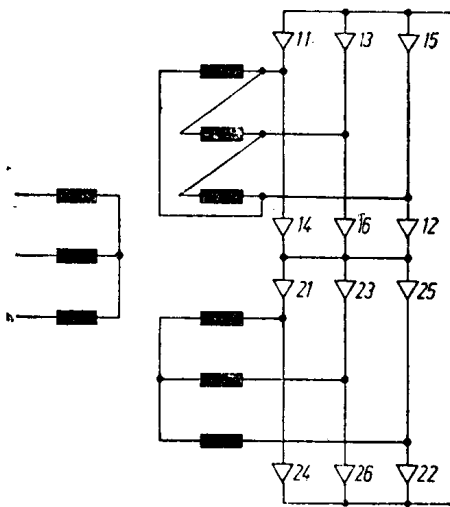


图 2.7 两组相位不同的阀桥串联
($p = 12, q = 3, s_0 = 4, r = 1, s = 2$)

在低压换流器情况下，将两台相位不同的换流器并联时，正常的惯例是用一台直流电抗器和一台相间变压器，而不用如图 2.8 所示的两台电抗器。但在适于作输电之用的那些电压中，要使相间变压器的两半之间的漏感足够地小就很困难，因而用两台电抗器将更好些。从运行上的灵活性和备品的观点来看，必须努力使组间公用设备装置愈少愈好。

到目前为止，阀组并联还未被采用，阀组串联仍然被唯一地用于实际，在本书的其余部分中，这种方法仍处于优先地位。但可以想象，由于可控硅阀的引用，这种情况也许会改变。因此，在讨论到与串联有联系的特殊问题的地方，需要想到同样存在采用并联的可能性。

用这种桥串联或并联，基本上能够得到大于 12 的脉冲数。但这需要合成式的变压器

用这种桥串联或并联，基本上能够得到大于 12 的脉冲数。但这需要合成式的变压器

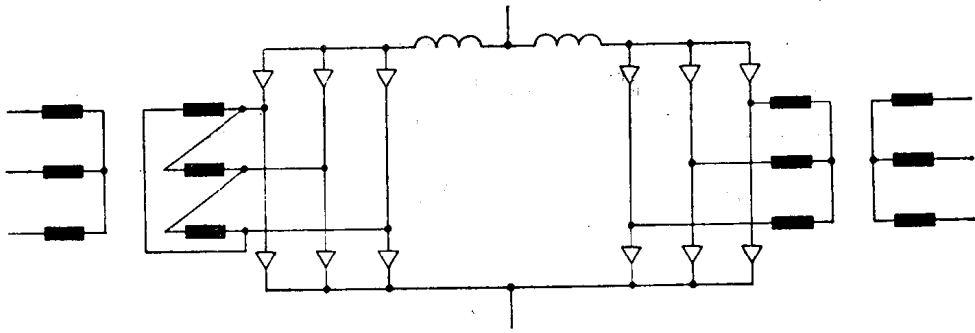


图 2.8 两组相位不同的阀桥并联
($p = 12, q = 3, s_0 = 2, r = 2, s = 1$)

绕组,以延长的三角形接法绕组(图 2.9)为基础的变压器代表了最经济的解决方案。但对于大容量和高电压的变压器来说,如我们现在此处所考虑的那样,要实际制造这种绕组并不是一件容易的事,所以目前的实际应用满足于 $p = 12$,而当采用两个以上的阀组时,仅将相位角作简单的重复。这种决定还显著地受到下述事实的影响,即网络电压的不对称性,和栅极控制妨碍了充分利用从高脉冲数得到的优点,同时还必须记住,个别阀组有短暂地不工作的可能性。

上面扼要地提出的各种考虑,包括关于阀上的电压和所需的变压器额定容量等,都证实了 6 脉冲桥型回路具备非常接近于最佳化的条件,从而不能再获得更为有利的回路。此外,这种回路能在(变压器的)网络侧及阀侧任意选用星形或三角形接线。因此在本书的以后部分完全限于这种桥型回路方面。由于这种回路的阀侧为一正常三相系统,通常用阀侧

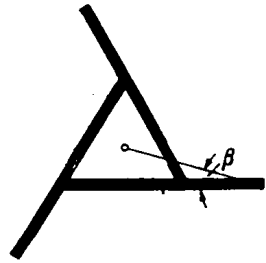


图 2.9 延长的三角形接法绕组

线电压 U_v 来表达式 (2.3)。当 $s_0 = 2, q = 3$, 及 $U = U_v/\sqrt{3}$ 时,阀组的空载电压为

$$D_{i0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_v = 1.35U_v \quad (2.8)$$

假想发电电压

如果换流器由 s 组这种串联阀组所组成,则换流器的直流电压为 sD_{i0} 。在后面我们用 D_{i0} 表示一组的电压,并用 sD_{i0} 表示全部电压。 s 组中的每一组由 6 脉冲桥组成。整个换流器的脉冲数 p 可以被增加到 6 的倍数,可由串联不同相位角的阀组而得,其重要性将在以后(第 3.3 节)详细讨论。因此将有 $p/6$ 个不同相位角,不同相位角数与

$$b = \frac{6s}{p} \quad (2.9)$$

组桥数有关。本文假设具有同一相位角的阀桥数与采用的不同相位角数相同,即 b 为整数。通常这是如此,但并非绝对地总是如此。因此,如果一换流站有两个不同相位角而装了三个阀组,则按我们上面的定义,就不能用任何脉冲来包括这种情况。如果将这种特殊情况包括在内,就将使进一步的讨论严重复杂化,为了这个原因,才介绍了前面所述的假设。这就是说,所有的叙述对单个阀桥总是对的,但只有按照式(2.9)的 b 值为整数时,才能应用于串联阀桥的总体。

我们可将总脉冲数为 p 的换流器直流电压，看成是换相数 $q = p$ 的单台换流器在每条电流路径上以电压 U 运行的结果。产生直流电压的这个假想电压 U ，不能在任何地点测得，因为它仅存在于 p 个短局部路径里，只有合在一起时，才构成这个直流电压。但这个电压在必要的场合下有用，因此用式(2.3)，(2.8)及(2.9)予以推导。从下式

$$sD_{i0} = s \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_v = \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \sqrt{2} U \quad (2.10)$$

得

$$\frac{U}{U_v} = \frac{b}{2 \sin \frac{\pi}{p}} \quad (2.11)$$

当 $p = 6, 12, 18, 24$ 时，分别得 $U/(bU_v) = 1.0, 1.932, 2.879$ ，及 3.821 。这样，虽然整个换流器的直流电压是由假想电压 U 的各个部分推导而来，但各单个阀组的直流电压则由电压 U_v 的各个部分所组成。图 2.1 表示出图 2.7 中两组阀桥的电压状况。

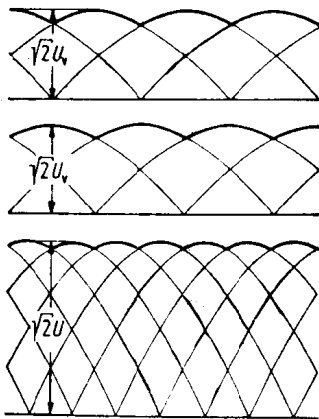


图 2.10 图 2.7 中两组阀桥的直流电压，其阀桥电压为 U_v ，而合成直流电压则由假想直流电压 U 所构成

最后，需要指出：图 2.5 中的各阀，同时也是局部电流路径，是按它们起动的顺序编号的。而在图 2.7 中 $p = 12$ 的情况下，则将阀桥组号放在编号的首位，其运行顺序在后，依次按照序列 11-21-12-22-13-23 等等进行。每个阀桥的两个换相组用双号及单号予以区分。顺序一般并不重要，可以略去。如果需要的话，可以这两个图作为参考。

3. 电压及电流波形

3.1 直流电压波形

图 3.1 左侧为一组换流桥所产生的直流电压。最上面的图 ($\alpha = 0$) 是未受控制的整流器的电压，也就是图 2.10 的情况，即在任一已知瞬间，具有最高电压的阀所组成的电流路径通过电流，由此并使其其他任一电流路径不能通过电流。这意味着在直流电压端子之间只有一条特定的电流路径，如果在此瞬间其他电流路径具有较高电压时，都被人为地阻止电流通过。这可由栅极控制来完成，栅极控制能使任一特定电流路径导通周期的开始时刻，比其自然开始时刻 ($\alpha = 0$) 推迟一固定的时间间隔 (用点弧滞后角 α 计量)。图 3.1 中的 α 角是一相的角度，也就是电流路径中电压开始时刻被推迟的角度，其有关电压图形中从正常开始点到实际开始点的一段用虚线显示。可以看出用栅极控制时，降低了电压的总面积，因而降低了直流电压的平均值。当 $\alpha = 90^\circ$ 时，直流电压为零，因为在零线以上及以下的电压面积相等。当 $\alpha > 90^\circ$ 时，电压为负值。由于流过阀的电流方向不变，就相当于改变了电力潮流的方向。电力由直流侧流向交流侧，变成逆变器运行。

假设电压为正弦电压，所有各电流路径的 α 角相同，则空载电压为

$$D_{i\alpha} = D_{i0} \cos \alpha \quad (3.1)$$

如图上可以看出那样，直流电压含有谐波。与交流电压频率有关的各种谐波次数