

直流输电用 可控硅换流器

熊开伟

水利电力出版社

内 容 提 要

本书介绍直流输电用可控硅换流器的整流、逆变原理，动态特性，控制特性，热特性，谐波特性及换流器的基本组成单元——可控硅元件的特性，可控硅换流器的结构和试验。

本书可供从事直流输电的科研、设计、运行专业人员及从事大功率可控硅装置的科研、设计、生产、运行维护人员参考，亦可作为高等学校有关专业的教学参考书。

直流输电用可控硅换流器

熊 开 纬

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 14印张 310千字 插页1张

1979年9月第一版 1979年9月北京第一次印刷

印数 00001—24190册 每册 1.15元

书号 15143·3456

前 言

直流输电是一门年青的科学，近二十多年来，人们才真正把它用于工业。随着可控硅元件的出现、发展和完善，加速了直流输电的发展。它与交流输电比较，具有运行稳定、造价低、输电损耗小和适合于新型发电方式（磁流体发电和电气体发电）等优点。它作为交流输电的一种有力的补充，必将得到迅速发展。

直流输电在跨越海峡输电、长距离大容量输电、联系两个不同频率的交流电网、同频率两个相邻交流电网的非同期并列以及向大城市供电等五个方面，其优越性更加明显。

我国海岸线广阔，沿海岛屿星罗棋布，为加强国防建设，为发展丰富的渔业资源以及岛上的国民经济，采用直流输电是个很好的输电方式。

加速开发我国丰富的水电资源，以及在煤炭集中的产区建设坑口电厂，已成为我国电力发展的必然趋势，而它们一般都远离负荷中心，长距离输送电力选取直流输电方式，在经济上是合算的，在技术上也是合理的。

鉴于磁流体发电和电气体发电直接发出直流电能，因此采用直流输电是其唯一的传输方式。

交流输电已有成熟的经验可以借鉴。而直流输电是一门年青的科学，没有非常完整的经验可以引用。为了发展直流输电事业，还必须对直流输电用的一系列设备开展研究，特别要对换流器进行研究。换流器是直流输电的关键设备之一，其运行情况关系到全局，而且价格较贵，占较大的投资份额。本书专门介绍可控硅换流器在整流、逆变状况下的工作原理，换流器的动态特性、热特性、控制特性、谐波特

性，以及换流器的结构和试验。

本书内容特点：

一、剖析了三相桥式线路。目前，大功率换流器所使用的线路大体有两种，即三相桥式线路和双星形带平衡电抗器的线路。在可控硅换流器方面，三相桥式线路用得比较广泛，而在直流输电领域采用的可控硅换流器都是三相桥式线路。所以，对三相桥式线路的各种性能进行深入地研究，对直流输电及其它领域使用的三相桥式线路的可控硅换流器都有普遍意义。

二、强调基础理论。因为搞清了基础理论，就能作到举一反三、触类旁通。因此本书特别注意物理过程的描绘，适当地给以数学推导，便于具有微积分初步知识的读者阅读。

三、认真贯彻向外国学习的精神。近年来，国外直流输电事业发展很快，用直流输电方式传输的电功率正在以每年1500兆瓦的速度递增。为了加快我国直流输电事业的发展，我们要尽快掌握世界上最先进的科学技术成就，作为我们前进的新起点。本书力求认真体现这一精神。

四、内容选择力求精炼。其它书上有详细介绍的内容，本书将尽量从简；分析问题力求突出重点，便于读者掌握要领。

由于作者水平较低，有不当之处，欢迎读者批评指正。

陕西省电管局中心试验所潘梦华同志、水电部电力科学研究院单进同志、赵婉君同志、西安高压电器研究所付增祐同志、浙江大学戴熙杰同志和华东电力设计院林永生同志为本书的编写提供资料并在百忙中审阅书稿，在此致以诚挚地感谢。

熊 开 伟

1978年12月于西安

符 号 说 明

α	滞后角
α_p	固有滞后角
β	超前角
u	换相重叠角
ν	双双换相重叠角
γ	换相裕度角 (余裕角)
δ	换相终结角
U_d	直流电压
U_{d0}	空载直流电压
u_d	平波电抗器阀侧电压
E_{da}	来自整流器的反电势
$E_{d\beta}$	来自逆变器的反电势
e_a, e_b, e_c	变压器阀侧相电压
E_m	变压器阀侧相电压幅值
E_2	变压器阀侧相电压有效值
e_{ab}, e_{bc}	……变压器阀侧线电压
E_{2Lm}	变压器阀侧线电压幅值
E_{2L}	变压器阀侧线电压有效值
U_a	阀端电压的泛称
U_i	阀 i 的两端电压 ($i = 1, \dots, 6$, 阀的编号)
i_a	通过阀的电流的泛称
i_i	通过阀 i 的电流 ($i = 1, \dots, 6$, 阀的编号)
I_d	直流电流
I_{Km}	换相过程中, 交流系统所提供的短路电流幅值
X_T	变压器阀侧电抗
X_d	平波电抗器电抗
R_L	直流输电线路的电阻

脚注 r, n 分别表示整流侧、逆变侧。如 U_{dr} 表示整流器侧直流电压
 脚注 AV 表示平均值, 如 I_{AV} 表示电流平均值
 符号 “/” 表示标么值, 如 I'_d 表示直流电流的标么值

目 录

前 言

符号说明

第一章 换流器整流工作状况的分析	1
第一节 整流器的等值电路	1
第二节 整流器理想工作状况的分析	6
第三节 整流器正常工作状况的分析	19
第四节 固有滞后角和双双换相重叠角	35
第五节 整流器的全部外特性曲线	40
第二章 换流器逆变工作状况的分析	51
第一节 逆变的基本概念	51
第二节 逆变器的等值电路	56
第三节 换流过程	58
第四节 换相裕度	64
第五节 逆变器的全部外特性曲线	72
第三章 可控硅元件	81
第一节 概述	81
第二节 可控硅元件的动态特性	86
第三节 可控硅元件的门极特性	97
第四节 可控硅元件的热特性	105
第五节 可控硅元件的发展趋势	120
第四章 换流器的动态特性及其相关系统的设计	127
第一节 问题的提出	127
第二节 通过阀的电流	128
第三节 阀端电压	135

第四节	阀开通时出现的过电压	142
第五节	阀关断时出现的过电压	156
第六节	外因过电压	169
第七节	阀内暂态电压的分布	173
第八节	阀的绝缘裕度	185
第九节	阀的均压回路	191
第十节	高频振荡电压的阻尼回路	205
第五章	换流器的故障状态	219
第一节	概述	219
第二节	研究换流器短路电流特性时涉及的共同性问题	220
第三节	整流器的内部短路	231
第四节	整流器的外部短路	248
第五节	逆变器的颠覆	260
第六章	换流器工作状况的控制	274
第一节	直流输电系统的基本工作状况	274
第二节	对门极控制电路的要求	283
第三节	阀的门极控制电路	290
第四节	电流互感器式脉冲传递系统的工况分析	302
第七章	换流器的谐波特性	317
第一节	换流器的谐波特性	317
第二节	阀侧线电流谐波的简捷算法	339
第三节	直流电压谐波的简捷算法	344
第八章	换流器的结构	351
第一节	决定结构的关键问题	351
第二节	风冷式结构	353
第三节	油冷式结构	359
第四节	水冷式结构	368
第九章	换流器的试验	378
第一节	概述	378

第二节	可控硅元件的试验	380
第三节	阀的组件试验	383
第四节	动态特性试验	388
第五节	绝缘强度试验	396
第六节	使用条件下阀的全功率试验	407
附录 I	计算交流电流谐波用表	413
附录 II	计算直流电压恒定分量和谐波分量用表	420
附录 III	国外直流输电线路及其换流器技术参数	424
参考文献		427

第一章 换流器整流工作状况的分析

在高压直流输电用换流器中，广泛采用的是三相桥式线路。由于三相桥式线路具有阀端承受的反向峰值电压低、变压器的利用系数高、脉动系数小以及功率因数高等一系列优点，所以在电压较高（一般高于 250 伏）、功率较大的换流装置中也广为采用。因此深入地研究、分析具有三相桥式线路的换流器的工作状态是非常必要的。在整流状态下工作的换流器通常称为整流器，在逆变状态下工作的换流器通常称为逆变器。本章专门分析换流器的整流工作状况。

第一节 整流器的等值电路

对于同一个三相桥式整流线路来说，不同性质的线路参数，将会出现不同的特性。为便于分析问题，我们忽略一些影响不大的因素，得到如图 1-1 所示的等值电路图。图中

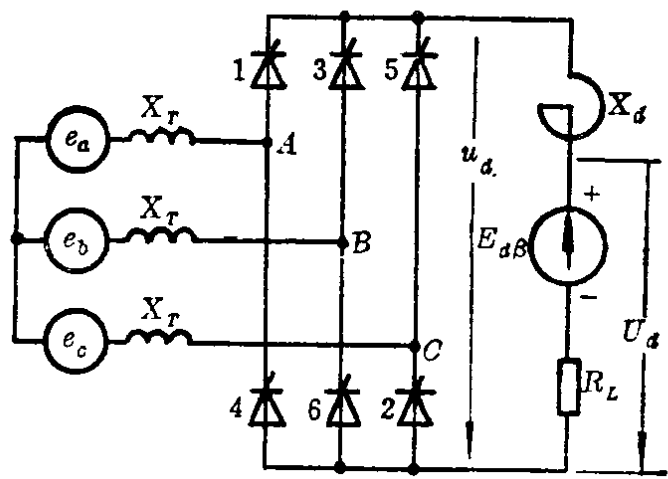


图 1-1 整流器的等值电路

e_a 、 e_b 、 e_c 表示交流电源的瞬时相电压， X_T 表示换算到变压器阀侧的变压器电抗，数字 1 至 6 表示轮流开通的换流阀的编号， u_d 表示未经平波的直流电压（即平波电抗器阀侧电压）， X_d 表示平波电抗器和线路的感抗， R_L 表示直流输电线路的电阻、平波电抗器的电阻和逆变器的若干电阻， U_d 表示经过平波的直流电压（即平波电抗器线路侧电压）， E_{ds} 表示来自逆变器的反电势。

我们在分析线路工作状况时，首先认为电源是由恒定电压、恒定频率的对称的正弦电压 e_a 、 e_b 、 e_c 和与之相串联的变压器的等值电抗 X_T ($X_T = \omega L_T$) 所组成。

在变压器的全部参数中，只考虑由于存在漏磁通而产生的绕组电抗 X_K （即短路试验电抗），这是造成换相重叠的根源，它对换流器工作于何种状况，影响极大。它们的关系如下式所示：

$$X_T = X_K + \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 X_c$$

$$\text{即： } X_T = \frac{x_K \%}{100} \times \frac{E_2}{S} + \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 \times \left(\frac{\sqrt{3} E_2}{S_K} \right)^2 \quad (1-1)$$

式中 $x_K \%$ —— 以百分值表示的短路阻抗（由变压器产品说明书中查找）；

E_2 —— 空载时，变压器阀侧相电压有效值；

S —— 变压器一相的视在容量 ($S = E_2 I_2$)；

X_K —— 短路阻抗；

$\frac{W_2}{W_1}$ —— 变压器阀侧与网侧绕组的匝数比；

S_K —— 变压器三相短路容量；

X_c —— 每相的系统等值电抗。

式(1-1)中 X_K 和 X_c 按下式计算:

$$X_K = \frac{x_K \%}{100} \cdot \frac{E_2}{S} \quad (1-2)$$

$$X_c = \frac{(\sqrt{3} E_2)^2}{S_K} \quad (1-3)$$

在图1-1等值电路上,我们忽略了系统和变压器的电阻,并且假定变压器的空载电流为零。在高压直流输电中,变压器的电阻与感抗相比是相当小的,因此,在分析整流器工作状况和计算短路电流时忽略变压器电阻是完全允许的。

此外,我们在分析换流器工作时,认为阀是理想的和可控的。它在导通期间,正向电阻为零;在承受反向电压期间,其反向电阻为无穷大,反向电流为零。阀开通的必要而且充分的条件是:阀的阳极电位高于阴极电位;在阀的门极上施加有足以使阀触发的控制脉冲。

在换流器的正、负母线之间假想接有一个串联电路(由 X_d 、 E_{ds} 和 R_L 组成)。有时为简化分析,往往将 R_L 忽略不计,并且不考虑线路电容。当平波电抗器的感抗很大时,线路电容实际上对换流器的稳态工作状况没有什么影响。

在等值线路上,我们取 $X_d = \infty$ 。直流电流 I_d 不仅包含直流分量,而且也有谐波分量, X_d 愈大,谐波分量的幅值则愈小。然而,为了便于说明换流器的基本性能,先假定直流电流不包含谐波分量,计算结果与实际很接近。至于谐波问题我们将另作说明。

基于上述假设,图1-1的等值电路包括一个三相电压源和一个直流电流源。我们在分析这个电路时,把两个电源的作用叠加,在一个线性电路上这样作是适宜的。带阀的电路是一种特殊的线性电路,当某一个阀导通时,它是某一个线

性电路；当另一个阀导通时，它又是另一个不同的线性电路。在任何一个阀开通或关断的瞬间，电路就从某一个线性电路转变成另一个线性电路。把这两个连续的电路的求解在改变的瞬间结合起来，就可以符合连续性的条件。这里所讲的连续，既是直流电源中电流的连续（因为有平波电抗器 X_d ）；也是交流电源中电流的连续（因为每一相中都串联有电抗 X_T ）。

我们知道，在同一个时间间隔内，只有在阳极阀组（阀 2、4、6）和阴极阀组（阀 1、3、5）中，都各有一个或两个阀处于导通状态，才能构成电流的通道，才能保证换流器的工作。在阳极阀组和阴极阀组中，每时每刻都各有一个阀处于导通状态的情况下，电流在一个阀组内的换相只能是瞬时完成的，在此情况下，不存在什么换相重叠现象。但是，在换相回路存在电感的情况下，通过阀的电流不能瞬时突变，而要按照一定的速率增大和减小，于是出现在同一时间间隔内，一个阀组（阳极阀组或阴极阀组）中有两个阀同时导通的现象，也就是通常所说的换相重叠现象。从物理概念来说，它表示电流从一相向另一相的换相需要一定的时间，这一时间间隔的大小通常以电角度来表示，称之为换相重叠角（简称重叠角），国际电工委员会（IEC）规定换相重叠角以 μ 表之。换流器电路参数不同，换相重叠角的大小也随之不同，其结果在换流器上同时导通的阀数也因此而不同。我们在图 1-2 上引出了换相重叠角的大小对同时导通的阀数的影响。从这个角度出发，可将换流器的工作状况分成以下四个部分来分析：①轮流导通两个阀，换相重叠角 μ 为零，称为状况 2；②轮流导通两个和三个阀，换相重叠角 $\mu < 60^\circ$ ，称为状况 2—3；③轮流导通三个阀，换相重叠角 μ

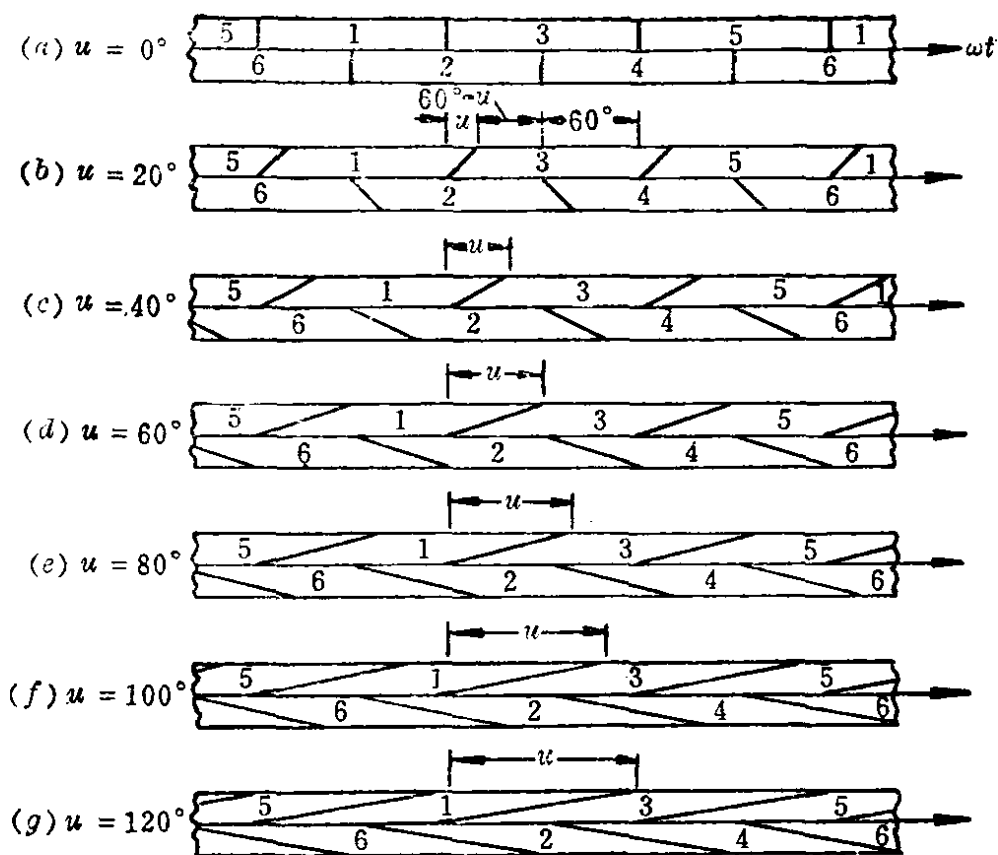


图 1-2 换相重叠角 u 对同时导通的阀数的影响

$\cong 60^\circ$ ，称为状况3；④轮流导通三个和四个阀，换相重叠角 $u > 60^\circ$ ，称为状况3—4。

状况2是整流器的理想工作状况。通过对它的讨论，可以认清在忽略变压器电抗的情况下，关于整流器工作的物理概念，并得出一些基本的数量关系。状况2—3是整流器的正常工作状况，要重点研究在考虑换相重叠作用的情况下所发生的物理现象，以及由此而导致的电量关系的变动。状况3和状况3—4，本章只介绍它们共同涉及到的固有滞后角和双双换相重叠角的物理概念。状况3—4的物理过程的详细讨论拟放在“换流器的故障状态”中介绍。

第二节 整流器理想工作状况的分析

不论哪一种换流线路，阀是该线路的基本组成单元，它只能在阳极电位高于阴极电位时才能开通。对可控阀来说，在其阳极电位高于阴极电位的同时，必须在阀的门极上施加触发脉冲，阀才能开通。因此，在图 1-1 等值电路中，在直流回路上反电势值大于变压器阀侧线电压幅值时（即 $E_{a\beta} > \sqrt{3} E_m$ ），线路上不可能流有电流，而只是在 $E_{a\beta} < \sqrt{3} E_m$ 的情况下，线路才有可能流有电流。

整流器的理想工作状况（状况 2）与正常工作状况的本质差别在于：前者没有考虑变压器的电抗（即图 1-1 中的 $X_T = 0$ ），因而一个阀到另一个阀的电流换流是瞬时发生的，并不存在换相重叠现象。由图 1-2a 可见，每时每刻总有两个阀同时导通，其导通的顺序是 1, 2; 2, 3; 3, 4; 4, 5; 5, 6; 6, 1 等。

严格地说，整流器的理想工作状况只有在交流电源没有一点电感的情况下才能实现。但是如果换算到变压器阀侧的感抗与电流的乘积非常小，也就接近于这种极限状况。通过对整流器的理想工作状况的分析，可以得到一些关于换流器工作的基本概念，并在此基础上得出一些最基本的电量关系。它是整个电路设计计算的出发点，也是绘制整流器全部外特性的起点。

三相桥式线路是在三相半波线路的基础上发展起来的，它实质上是两组三相半波线路的合成线路。其中一组阀的阴极连接在一起（通称为共阴极阀组）；另一组阀的阳极连接在一起（通称为共阳极阀组）。我们先简略地介绍一下三相

半波线路在理想工作状况下的工作特性。

阀按共阴极方式连接的三相半波线路如图 1-3 所示。变压器的阀侧电压 e_a 、 e_b 和 e_c 是一组三相对称电压，它们施加在阀的阳极和变压器中性点 0 之间，而共阴极点与中性点 0

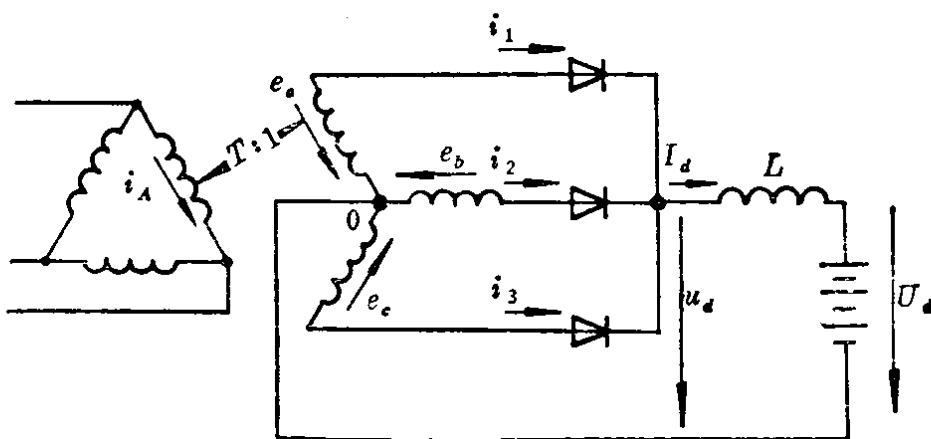


图 1-3 三相半波整流电路

间的瞬时电压 u_d 在图 1-4a 上用粗线表示。

由三相半波电路的波形图（图 1-4）可见，在一个周期的三分之一时间里，一相的电压高于其他两相，电流只能在阳极电位最高一相的阀中通过。因此，直流电压的平均值可将瞬时电压在 $\frac{2\pi}{3}$ 范围内积分，乘以一个周期内轮流导通的阀数，并在一个周期内加以平均（即除以 2π ）来求得：

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} E_m \cos \omega t \, d\omega t \\
 &= \frac{E_m \sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}} = 0.828 E_m \quad (1-4)
 \end{aligned}$$

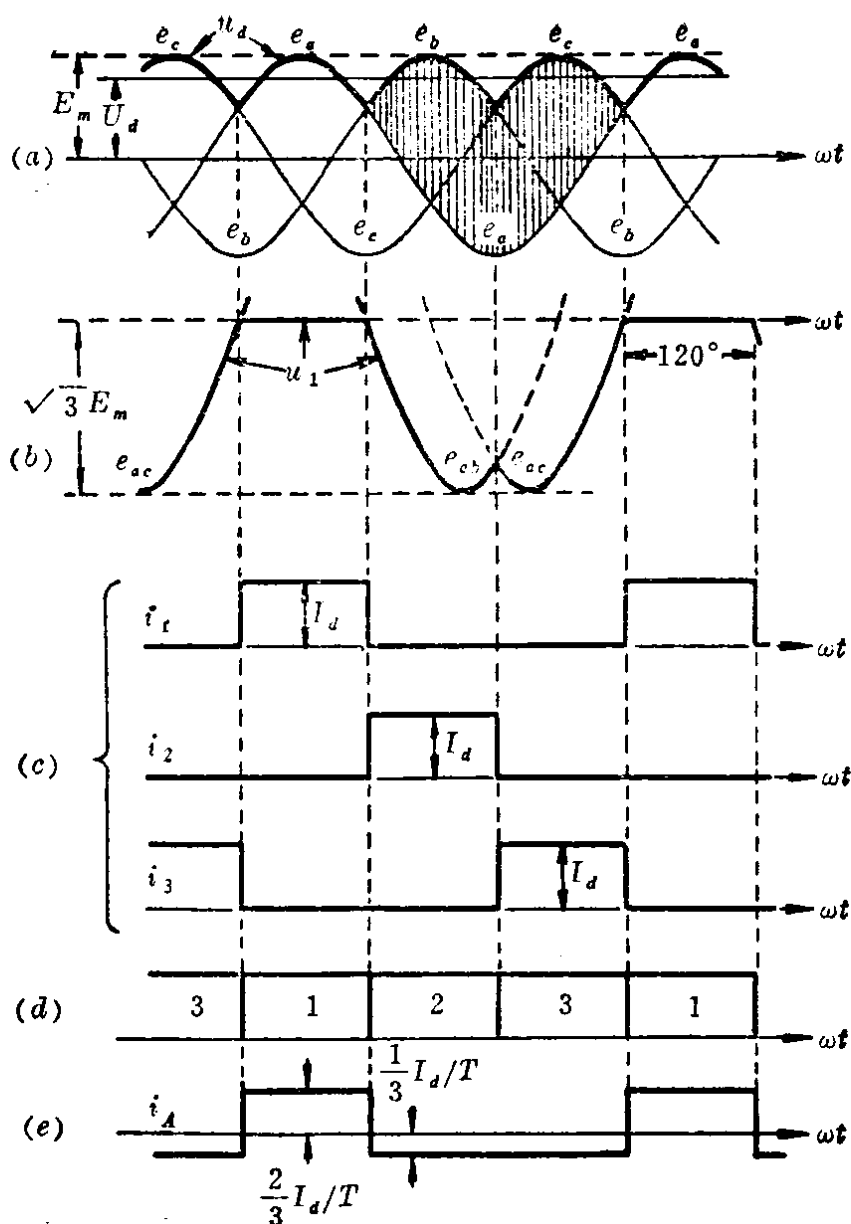


图 1-4 三相半波电路的波形图

(a)变压器阀侧相电压 e_a 、 e_b 、 e_c ，未经滤波的直流电压 u_d ，经过滤波的直流电压 U_d ；(b)阀1端电压 u_1 ；(c)通过阀的电流 i_1 、 i_2 、 i_3 （即变压器阀侧电流）；(d)阀电流的集中表示；(e)变压器一相网侧电流 i_A

所以

$$E_m = 1.209 U_d \quad (1-5)$$

式中 E_m ——阀侧电压的幅值。

纹波电压的峰峰值为:

$$E_m(1 - \cos 60^\circ) = \frac{E_m}{2} = 0.605 U_d \quad (1-6)$$

纹波的频率为电源电压频率的三倍。

由图 1-4a 及 b 可见, 阀 1 两端的电压 u_1 波形由三段组成, 每段持续时间均为 $\frac{1}{3}$ 周期。在阀导通的时间区段内, 跨阀电压为零; 在阀不导电的另外两个时间区段内, 阀端反向电压等于变压器阀侧线电压, 先是 e_{ab} , 然后是 e_{ac} 。在图 1-4a 中, 该反向电压用垂直阴影线的高度表示。阀端反向电压的峰值等于阀侧相电压的幅值, 即:

$$U_v = \sqrt{3} E_m = 2.094 U_d \quad (1-7)$$

阀侧电压的有效值 E_2 为:

$$E_2 = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.855 U_d \quad (1-8)$$

每一个阀仅在 $\frac{1}{3}$ 周期内导通, 在导通期间, 它比相邻阀的阳极电位高。通过阀的电流波形是高度为 I_d 、持续时间为 $\frac{2\pi}{3}$ 的矩形波 (图 1-4c), 它的平均值 I_{Av} 为:

$$I_{Av} = \frac{I_d}{3} \quad (1-9)$$

有效值 I 为:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times I_d^2 \times \frac{2\pi}{3}} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 0.577 I_d \quad (1-10)$$

网侧电流 (图 1-4e) 与阀侧电流不一样, 它没有直流分量, 它的平均值为零, 它的有效值 I_1 为:

$$I_1 = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{2}{3} I_d \right)^2 \times \frac{2\pi}{3} + \left(\frac{1}{3} I_d \right)^2 \times \frac{4\pi}{3} \right]}$$