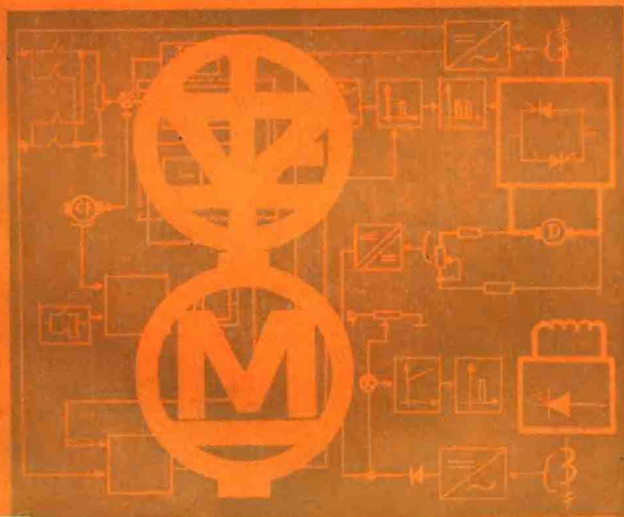


47114 2

可控硅整流调速系统



42

《重型机床》编辑部

可控硅整流调速系统

(内部刊物)

1980年11月出版

编者:《重型机床》编辑部

出版者:武汉重型机床研究所

印刷者:湖南临湘印刷厂

目 录

一九八〇年十二月出版

可控硅整流调速系统

襄樊电气控制设备厂 周才广(编著)
武汉重型机床研究所 董福泰(校校)

| | |
|---|--------------|
| 引 言 | (1) |
| 第一章 它激直流电动机的运行特性 | (2) |
| 第二章 可控硅(晶闸管)及可控整流 | (8) |
| 第三章 运算放大器 | (20) |
| 第四章 自动调节原理初步 | (27) |
| 第五章 不可逆系统 | (49) |
| 第六章 可逆系统 | (69) |
| | |
| KBK—II 可控硅供电调速的无环流电枢可逆 系统在龙门刨床上应用的改进 武汉重型机床厂科研科 李泰昌(94) | |
| | |
| KBS—III 可控硅调速电柜调整说明书 武汉重型机床厂科研科 李泰昌(105) | |
| | |
| 维修实例 | 杨和金 蔡刚青(127) |
| | |
| 附图(插页1~3) | |

可控硅整流调速系统

引言

众所周知，现代机器或机床的启动、制动、反向、调速通常是由电气控制实现的。有些生产机械对电气系统有着很高的要求，如大型机床往往要求很宽的调速范围（1：10000以上），很高的可靠性，并能满足多种工艺的复杂要求，过渡过程既要快，又要使机械撞击足够小等等。

在目前，对调速等要求较高的生产机械多采用直流电动机驱动（高水平的交流传动技术尚未达到成熟推广阶段）；电网一般都是采用交流电，所以从交流电网到直流电动机之间须经整流、调节控制。

本世纪来发展了交流电动机——直流发电机（电机放大机）机组系统、水银整流器、电子管、磁放大器整流控制元件。其中，机组系统要配上两台象负载电动机那样大的旋转电机，从成本、效率、快速性、占地、噪音等许多方面来看，都是不利的。水银整流器存在着体积很大，价格昂贵，水银蒸气有毒，制造工艺复杂，容易破损，维护困难的缺点。电子管也有许多类似水银整流器的缺点。磁放大器则存在着时间常数较大，快速性差，体积大的缺点。由于这些元件存在的弱点，人们在实践中不断地进行了探讨、研究，以达到改进的目的。1957年，一种具有体积小、增益高、惯性小、效率高、无噪音、维护简单等特性的元件——可控硅（晶闸管）出现了。

可控硅的出现，使电气传动系统得到很大的改进。六十年代以来，世界上的一些工业发达国家应用了这项先进技术，出现了一个

“可控硅化热”。美、日、西德等国家的一些机床厂家，以可控硅传动调速系统配以宽调速永磁电机（力矩电机）达到了很高的技术指标，调速范围可达1：10000以上；最高速时反转只需0.2秒；最低速时转速波动1.5~3%；空载下突加额定负载调节时间仅40毫秒左右；工作稳定可靠。由于具有了上述技术特性，因而可取消齿轮箱，用电动机直接驱动丝杠或负载，这显然是有很大好处的。

近几年，我国在可控硅供电调速方面也有了很大的发展，技术上已日臻完善。以机床应用为例，可控硅供电调速系统已经历了联合设计、研制试验、试用改进和三化（系列化、标准化、通用化）定型阶段，目前已批量生产。如武汉重型机床厂和襄樊机床电气传动设备厂共同研制的K B系列可控硅供电调速装置已达到了实用水平。该系列根据不同机床的要求分为三种类型（详见表）。它们是由若干种典型单元按不同的组合构成的，这种“积木式”结构，使设备的装配、调整和维修都很方便。

为了便于大家较全面地掌握可控硅整流调速系统方面的知识，本文拟介绍可控硅（晶闸管）、直流电动机、运算放大器等元件的结构和工作原理；主要参数和线路方案的计算和选择；系统常用的一些典型单元（如速度调节器、电流调节器、脉冲形成和移相触发器、逻辑切换、稳压电源和保护环节等等）的工作状况以及可逆系统和不可逆系统的构成。另外，对系统的静动态特性指标的分析、系统的调试和怎样实现最佳调节等等问题也进行一些讨论。



表

KB系列可控硅整流调速装置一览表

| 型号 | 交流输入 | 直流输入 | 适用电机 功率(瓩) | 功率整流 电路结构 | 基本性能 | 外型尺寸 (宽·深·高) | 励磁供电能力 |
|----------|------------|------|---------------|--|---|---|----------------------------------|
| KBB-50 | 三相 380伏 | 400伏 | 4—22 | 三相桥 式全控 | 1)不可逆系 统可用接触器 反向 2)调速范围 1:100 3)快速性好, 点车反应快 | 组合式 800·600·1880 单装式 550·410·930 | 磁场供电不 可调节。 输出能力: 200伏5安 |
| KBKI-200 | 三相 380伏 | 400伏 | 40—75 | 主功率整 流电路:三 相桥式全控 励磁整流电 路:单相桥 式全控反并 联 | 1)可逆系统 2)调压调速 范围在1:20 以上 3)可进行弱 磁调速。调磁、 调压转换区 ≤35伏 | 800·600·1880 | 励磁整流电路 输出能力: ±180伏 |
| KBKI-300 | | | 110,120 | | | | ±10安 |
| KBKI-200 | 三相 380伏 | 400伏 | 55(60); 75 | 主功率整 流电路:三 相桥式全控 反并联 励磁整流 电路:单相 桥式全控 | 1)可逆系统 2)调压调速 范围在1:20 以上 3)可进行弱 磁调速。调磁、 调压转换区 ≤35伏 | 800·600·1880 | 励磁整流电 路输出能力 180伏 |
| KBKI-300 | | | 110,120 | | | | 10安 |

第一章 它激直流电动机的运行特性

第一节 它激直流电动机的 结构和工作原理

它激直流电动机是一种把电能变为机械能的设备。其工作原理如图1—1所示。电动机的电刷A、B接在电压为U的直流电源上，在两个固定的磁极N与S之间放有线圈abcd。线圈的开口端分别与互相绝缘的半圆形换向片相

接触，电刷A、B的位置是固定的，它与换向片滑动配合。电刷A接到直流电源的U的正极，B接到负极，因而在N极范围内的导体ab中的电流 I_D 是从a流向b；在S极范围内的导体cd中的电流 I_D 是从c流向d。根据N指向S的磁力线方向和载流导体中电流的方向，应用安培定律，由右螺旋法则可以判断ab边受力的方向是向左，cd边则是向右。因为磁场是均匀

的，导体中流过的都是电流 I_D ，所以 ab 边和 cd 边都受电磁力 F_{dc} 的作用，这一对大小相等，方向相反的力偶，使线圈逆时针旋转（图 1-1）。当从初始位置逆时针旋转 90° 时，可以认为线圈与电刷瞬时脱离，线圈中的电流为零，电磁力也为零，但是由于惯性的作用，线圈继续转动。当线圈逆时针转过半周时（图 1-1 b）， ab 与 cd 的位置调换了，由于换向片和电刷的作用， ab 与 cd 里的电流方向也跟着改变，但处在 N 、 S 极下相应位置的导体中的电流方向和受力方向却是不变的，因而线圈就可以按照受力的方向不停地旋转。

在实际的电动机里，并非象上述那样只有一个线圈，而是有许多线圈嵌装在转子铁芯槽中。当导体中通过电流在磁场中产生力矩而转动时，就带动整个转子旋转。直流电动机的基本工作原理即如此。

当外电源电压 U 的极性如图 1-1 a 所示时，电枢导体中的电流方向是从电刷 A 流入，沿 $a-b-c-d$ 方向从电刷 B 流出。如前所述，根据安培定律右螺旋法判断，这时电枢将按逆时针方向旋转，另一方面，由法拉第电磁感应定律判断电枢绕组中也要产生感应电动势 E ，这个电动势 E 的方向与电枢导体中电流的方向相反（参见图 1-2），所以叫做反电（动）势。电源 U 要向电枢输入电流 I_D ，就必须克服反电势 E 的作用，这个反电势 E 的表达式为：

$$E = C_e \phi n \dots \dots \dots (1-1)$$

式中 E —— 电枢反电势（伏）；

$$C_e = \frac{P N}{60 a} \text{ —— 电机的电动势常数，}$$

是一个仅与电机结构有关的常数；

ϕ —— 电机每个磁极下的气隙磁通（韦伯）；

n —— 电机转速（转/分）。

电动势常数 C_e 又叫结构常数，其大小决

定于磁极对数 P ，并联支路对数 a 和电枢导体总数 N 。对于一台做好的直流电动机来说， P 、 a 、 N 都已固定，所以 C_e 是一个常数。这样，反电势 E 就和磁通 ϕ 、电机转速 n 成正比。

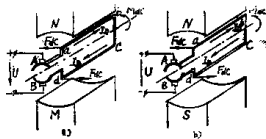


图 1-1 直流电动机的工作原理

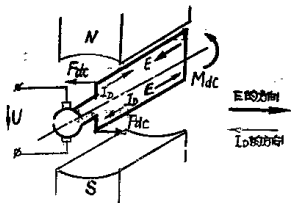


图 1-2 电动机 E 和 U 方向相反

下面讨论直流电动机的电磁转矩：

电枢通以电流时，它在磁场中受到电磁力 F_{dc} 的作用而产生电磁转矩，使电机旋转。即在直流电动机里，电枢绕组中产生的电磁转矩是驱动转矩。电磁转矩 M_{dc} 的大小为：

$$M_{dc} = C_M \phi I_D \dots \dots \dots (1-2)$$

式中

$$C_M = \frac{P N}{2 \pi a} \text{ 电机的转矩常数，和电势}$$

常数 C_e 一样，也是一个仅与电机结构有关的常数；

ϕ —— 每个磁极下的气隙磁通（韦伯）；

I_D —— 电枢电流（安）。

根据安培定律右螺旋法判断，图 1-2 所示的电枢绕组将按逆时针方向旋转；电动机的驱动转矩克服负载的反作用转矩，拖动负载一起

转动。

值得指出的是：实际上直流电机可以作发电机用，也可以作为电动机用。究竟如何，应视具体情况而定。

图 1-3 a 是直流电动机的电动状态。与图 1-2 相比较，反电势 E 和电枢电流 I_D 是反向的，电磁转矩 M_{dc} 的方向由电磁力 F_{dc} 决定，电磁转矩 M_{dc} 驱动电枢旋转，即转速 n 与电磁转矩的方向是一致的。

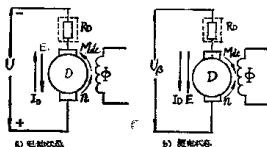


图 1-3 电动机两种状态

电动机拖动机械负载工作，向外输出机械功率，这是由于输入电功率 $U \cdot I_D$ 的结果。直流电动机的机械功率量值与反电势 E 和电枢电流 I_D 的乘积相等。实际上它正是从电源吸取的电功率。输入电功率没有全部转为机械功率，因为电动机内部有损耗。设电动机内部的总电阻为 R_D ，则这个内阻损耗为 $I_D^2 R_D$ ，根据能量守恒原理，电动机内部的能量转换关系如下式：

$$U \cdot I_D = E \cdot I_D + I_D^2 R_D = (E + I_D R_D) I_D \quad \dots\dots (1-3)$$

上式的左边即输入电功率，从中减去内阻损耗 $I_D^2 R_D$ ，则 $E I_D$ 等于电动机的输出机械功率。

严格说来，电磁转矩中还有一部分需用以克服电动机的空载摩擦和铁损产生的制动转矩，其余部分才是电动机轴上输出的机械转矩，用以驱动工作机械。

电动机作为发电机状态运行是有条件的，这里仅以能量转换关系来作些说明：电动机运

行在发电（机）状态时，已不是从外部电网输入电能，而是将它所获得的机械能变为电能，向电网馈送。这时它输出的电功率 $U_D \cdot I_D$ 等于它发出的电功率 $E_D \cdot I_D$ 减去其内阻损耗，即：

$$U_D I_D = E_D I_D - I_D^2 R_D \\ = (E - I_D R_D) I_D \quad \dots\dots (1-4)$$

第二节 它激直流电动机的机械特性

电动机输出转矩和转速 n 之间的函数关系叫做电动机的机械特性。由于电机输出的机械转矩不易测量，一般就以电磁转矩 M_{dc} 来代替，它们之间只差一个空载转矩（电动机的空载摩擦和铁损耗产生的制动转矩），这个空载转矩值很小。

下面分析它激直流电动机的机械特性：

首先将式（1-3）两边除以 I_D 得到直流电动机外加电压 U 、电枢反电势 E 和电枢回路总电阻 R_D 的关系式：

$$U = E + I_D R_D \quad \dots\dots (1-5)$$

将式（1-1）变为：

$$n = \frac{E}{C_e \phi} \quad \dots\dots (1-6)$$

将式（1-2）变为：

$$I_D = \frac{M_{dc}}{C_M \phi} \quad \dots\dots (1-7)$$

将上述公式代换后得到：

$$n = \frac{U - I_D R_D}{C_e \phi} \\ = \frac{U}{C_e \phi} - I_D \frac{R_D}{C_e \phi} \quad \dots\dots (1-8)$$

$$= \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_D}{C_e C_M \phi^2} M_{dc} \quad \dots\dots (1-9)$$

式（1-9）就是它激直流电动机的机械特性方程。

在 $M_{dc} = 0$ 的情况下，式（1-9）变为

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} \dots\dots\dots (1-10)$$

因为只要电枢转动就会有空载损耗，就要有电磁转矩去克服它，所以 $M_{dc} = 0$ 是一种理想情况， n_0 叫做理想空载转速。

由 (1-9) 式可知，在电动机的电枢电压 U ，励磁主磁通 Φ ，和电枢回路总电阻 R_D 不变时：

$$n = n_0 - KM_{dc} = n_0 - \Delta n \dots (1-11)$$

式中： $K = \frac{R_D}{C_e \Phi C_M \Phi}$ 为机械特性曲线的斜率；

$\Delta n = KM_{dc}$ 为转速降。

式 (1-11) 表明 $n = f(M_{dc})$ 是一条直线方程式，其机械特性曲线如图 1-4 所示。

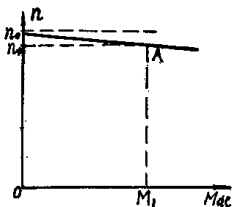


图1-4 它激直流电动机的机械特性曲线

从 $K = \frac{R_D}{C_e \Phi C_M \Phi}$ 可知，电枢回路的总电阻 R_D 愈大，特性曲线愈倾斜（越软）。当负载加重时，将引起转速的下降。一般，电枢绕组的电阻比较小，当电枢回路不接外加电阻时，斜率 K 也不大，因此在电动机转矩增大时，转速 n 的下降并不大。这样的机械特性较平，称之为特性硬。这种特性适用于机床电气传动负载波动时要求转速变化不大的场合。

第三节 它激直流电动机的调速

由直流电动机的机械特性方程 (1-8) 式可知，当转矩 M_{dc} 不变时，电枢回路总电阻 R_D 、主磁通 Φ 、外加直流电流电压 U 等三个因素决定电动机转速高低，改变其中任一个因素，都可以使电动机变速。下面介绍用改变上述三个不同因素进行调速的方法。

一、改变电枢回路电阻：在电枢回路中串入附加电阻，用这种方法得到的机械特性称为人工机械特性（无外加电阻时称自然机械特性）。

在图1-5中，曲线1为无外加电阻 ($R=0$) 的自然机械特性曲线；曲线2、3为外加电阻 R_1 、 R_2 ($R_2 > R_1$) 的两条人工机械特性曲线。从 (1-8) 式可知，电枢中串入外加电阻后，特性斜率即变大，即当负载（电流）有变动时，会引起较大的转速波动，这谓之“机械特性软”。这种调速方法，所需调速范围越宽，则电枢所串电阻越大，机械特性越软。这通常是不希望的。此外，用这种方法调速，只能使转速在理想空载转速 n_0 以下变化，同时在外串电阻内还要耗能发热。因此在电气传动中，一般不用这种方法进行调速。

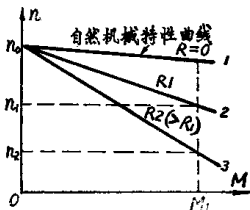


图1-5 改变电枢回路电阻的机械特性

二、改变磁场回路电流：改变磁场回路励磁电流，实质上是改变励磁磁通 Φ 。从 (1-8)

式可知，当激磁磁通 Φ 减小（相当于励磁电流减小）时，理想空载转速 n_0 要上升，而特性曲线的斜率 K 也增大，参见图1—6。

这种调速方法，只能使转速在相应于自然特性曲线的理想空载转速 n_0 以上变化，但具有调速平滑、充分利用了电机功率、机械特性较硬的特点。在机床精车、快移等速度虽高但负载力矩不大的场合，用这种恒功率调速方法进行调速很合适。由于转速的上限受到电机结构牢固程度的限制，调速范围一般在3~4以下。

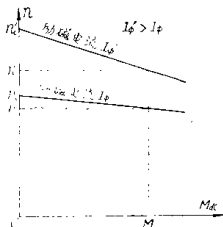


图1—6 改变励磁电流大小的机械特性

三、改变电枢端电压 U ：从(1—8)式可知，当电动机端电压 U 改变时，电动机的理想空载转速随之改变，但机械特性的斜率不会改变。斜率 K 与 U 无关。随着 U 的变化，相应的机械特性曲线是一组平行线，见图1—7。

从图中可见，随着 U 的变化，不但理想空载转速作线性变化，相应的工作速度 n_1 、 n_2 、 n_3 ……也是线性变化的。从理论上讲，可以通过对电枢电压从零到额定电压的调节来进行匀速调节；实际上，负载电流（转矩）变化时电动机的转速也将发生变化，空载转速越低时，转速降与空载转速的比值愈大，乃至超过允许值。这对扩大调速范围是不利的，但调速系统采取某些措施后，可以减小电动机的机械特性曲线斜率，使调速范围增大。

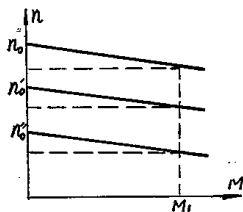


图1—7 改变电枢端电压 U 的机械特性曲线

它激直流电动机以上三种调速方法，在机床电气传动中一般采用后两种方法。

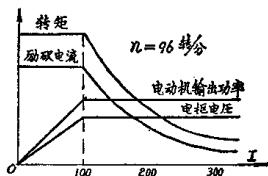


图1—8 理想特性曲线

图1—8示出了直流电动机的综合特性。图中横轴表示电动机速度的百分比；纵轴表示电枢电压 U 、励磁电流 I 、转矩 M_{ac} 、电动机输出功率 P 。它表明在一定电枢电压情况下，先调节电枢电压 U ，使电动机速度上升到额定转速。若欲使转速继续上升，再减小励磁电流 I 。图1—8中的虚线以左是恒转矩调速区。在额定转速以下，励磁电流（磁通 Φ ）恒定，电动机的转矩也是恒定的，电动机输出功率和转速成比例增加。

图1—8中的虚线以右是恒功率调速区。在高于额定转速时，电枢电压恒定，电动机输出功率一定，转矩与励磁电流成比例减小，转速成比例增高。恒转矩调速和恒功率调速是大

型机床电气传动中常用的两种调速方式。

图 1—8 所示的综合特性曲线是一理想曲线，事实上电动机的调速比不可能无穷大，电动机的最高速和最低速都要受到种种限制。另外，在实际中，恒转矩调速区和恒功率调速区的转换也并不是在一个“点”上进行的，这两者的转换是在一个既调压又调磁的所谓“双调区”进行。恒功率调速区与恒转矩调速区之间存在一个过渡区。

第四节 它激直流电动机的反向

它激直流电动机的电枢电流和磁场的方向确定了电机的电磁转矩，它的转向可按右螺旋法确定，只要改变外加电枢电压的极性（从而去改变电枢电流方向）或改变磁场方向，均能改变电机的转向（图 1—9）。

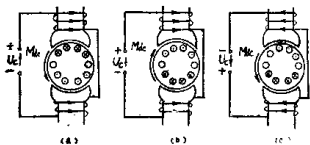


图 1—9 它激直流电动机的反向

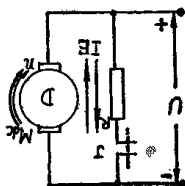
图中： U_c 为电动机励磁电源，符号 \otimes 表示电枢电流的方向是由读者向纸内流入；符号 \odot 表示电枢电流方向是由纸内向外流出。

用右螺旋法判据，电动机在图 1—9 a 的情况下，按逆时针方向旋转，在图 1—9 b 的情况下磁场方向没有改变，电枢电流却改变了，电动机按顺时针方向旋转（若电枢电流方向不变，只改变磁场方向，电动机也反向），图 1—9 (c)与 (a)相比，既改变了磁场的极性，同时又改变了电枢电流的方向，电动机转向不变，仍是按逆时针方向旋转。这些就是电动机的转向随磁场方向和电枢电流方向变化的规律。

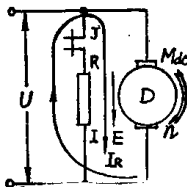
第五节 它激直流电动机的制动

为了缩短减速、停车和反向过程，不允许电机断电自由滑行，这就须对电机转子施加一个与原转向相反的制动力矩。制动力矩可以是制动“抱闸”的机械力矩，也可以是电气制动的电磁力矩。电气制动产生的力矩较大，操纵方便。它可分为发电（再生）制动、能耗制动和反接制动三种方式。反接制动很强烈，当机械间隙较大时，有较大的机械冲撞，电枢电流很大，易产生“环火”。这种制动方式应用不广泛。

图 1—10 a 示出了电动机电动状态（ U 为电枢电压； J 为直流接触器的常闭触头），常闭触头 J 断开，能耗制动电阻 R 与电动机电枢未构成回路，不起作用。当需制动电动机时，直流



a、电动状态



b、能耗制动状态

图 1—10 电动机的能耗制动原理

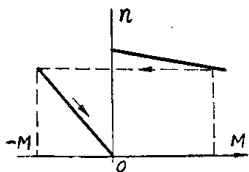


图 1-11 电动机的能耗制动机械特性

电源切断，触头J闭合，使能耗制动电阻R与电机电枢构成回路。

由于电机仍在旋转，在磁场作用下具有反电势，它产生的电流 I_D 与原来的电枢电流I相反，电磁转矩也相反，变为制动转矩，使电机转速下降直至停止。

从能量转换来看，能耗制动的实质就是：电动机运行在发电机状态，机械能转变为电能，消耗在电动机内阻和能耗制动电阻上。这种制动方式的制动强度随着转速的下降（即反电势的下降）而减弱，其转子的机械能不能得到利用。

关于发电制动将在可逆系统一节中详述。

第二章 可控硅（晶闸管）及可控整流

“可控硅整流器”简称“可控硅”，英文缩写SCR（Silicon Controlled Rectifier）。最近我国有关部门将其改名为“晶体闸流管”，简称“晶闸管”。这种新型的半导体器件能把交流电变为直流电，并能在整流过程中控制其输出电压、电流的大小。由于它具有开关、相（位）控（制）、整流、逆变等电能变换和控制功能，使半导体电子技术突破了弱电领域，进入了强电领域，在弱电控制和强电驱动之间架起了桥梁。

兹将可控硅在应用中的主要优、缺点分述如下：

优点：

- 1、体积小、功率大、维护简便、使用寿命长，因是静止元件，故无磨损和噪音。
- 2、时滞小，响应快。其时间常数以毫秒计。从控制极上加信号到阳极电流建立只需几个微秒，从阳极电流降为零到控制极恢复控

制功能只需数十微秒。

3、可控硅导通时，管压降很低，所以损耗小、效率高。与“机组”相比，效率高20~25%左右。这在负载功率较大时，对节能具有很大意义。

4、放大倍数大，灵敏度高。其输出功率可达到触发控制功率的数千倍至数万倍。

5、节省金属材料。与“机组”相比，每1万千瓦容量要省钢材258吨、铜材10吨。

缺点：

- 1、过电流、过电压能力比机组差。
- 2、因为没有旋转部分，故无惯性蓄能作用，当负载突变时，这种变化会立即传到交流电网，当交流电网容量与可控硅系统相比不是很大时这种影响尤其明显；反之，当电网突变时，又会立即影响到直流负载侧扰动电机的正常运行。

3、当一电网所接可控硅装置的总容量可

与电网容量相比时，则可控硅的工作将导致电网波形发生严重畸变，并将反过来影响可控硅触发装置的同步电源和发电机的调压性能以及其它负载的正常工作；整流装置的高次谐波将产生高频损耗及高频干扰等。尤其是可控硅工作在 α 开放角的低电压大电流时，这种情况更为严重。不过，当电网容量接近或大于所接可控硅装置总容量的十倍时，电网波形畸变等问题并不显著，这时，只要注意电网电压的波动问题就可以了。当然，最好的办法是对电网采取提高功率因数的补偿措施，滤掉高次谐波，上述问题即可获得满意的解决。

第一节 可控硅的结构 和工作原理

可控硅是一种四层（PNPN）三端硅半导体器件，其结构示意图和代表符号如图 2—1 所示。

图 2—1 所示的三个出线端是阳极A；阴极K；控制极G。G的位置往往不居中而稍偏。G的出线明显地要比A、K的出线为细。

图 2—2 是可控硅外观图。可控硅常见的结构有三种：

1、螺旋式：其阳极与风冷散热器相连。一根较粗的编织线为阴极，另一根较细的硬引出线为控制极。

2、平板式：这种形式散热性较好。200安以上的大功率管多采用这种结构，细长的编织线（套在套管内）是控制极，与阴极的距离较阳极近。

3、水冷式：一般功率较大，散热性最好，但需用循环水系统散热，使用不便。

图 2—3 是可控硅元件工作原理图。可以把可控硅元件看作一对互补晶体三级管；一个是PNP型（ BG_1 ）；一个是NPN型（ BG_2 ）。

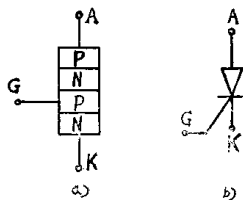


图 2—1 可控硅示意图

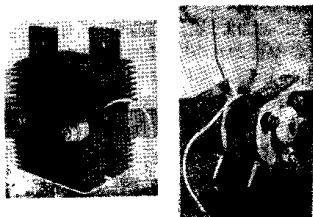


图 2—2 可控硅外观

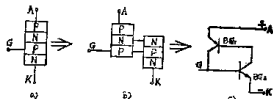


图 2—3 可控硅工作原理

第二节 可控硅的伏安特性和主要参数

若把可控硅控制极断开，在阳极和阴极间加以正向或反向直流电压，可以测得如图 2—4 所示的阳极——阴极的电压与电流之间的关系曲线。我们把整个曲线称为可控硅的基本伏安特性曲线。

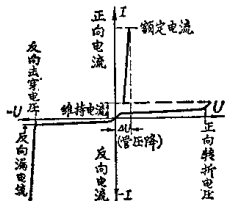


图 2—4 可控硅基本伏安特性

当可控硅所加正向电压在一定范围内时，可控硅中只有很小的电流流过（称为正向漏电流），可控硅处于阻断状态。当正向电压增大到某一数值时，可控硅即由阻断状态突转为导通状态。开始向导通状态转化时的电压称为正向转折电压。元件在导通时可以通过很大的电流，而元件本身的管压降甚小（约 1 伏）。当减小正向电压时，相当于正向电流逐渐减小，小到低于维持电流时，可控硅就关断。

由图可见，可控硅的正向伏安特性与晶体管二极管一样。

可控硅的主要性能指标如下：

1、额定正向平均电流：此电流系指环境温度不大于 40℃，在规定的散热条件下，元件全开通时允许通过工频半波平均电流（即在半个周期里流过的电流按一个周期平均）。例如我们所说的 50 安、200 安、300 安可控硅，就是指在上述条件下允许通过的最大平均电流为 50 安、200 安、300 安。

从图 2—3 (c) 可知，这是一个正反馈电路。BG₂ 的集电极也即 BG₁ 的基极；BG₁ 的集电极也即 BG₂ 的基极。设 BG₁、BG₂ 的电流放大系数分别为 β_1 、 β_2 ，则这个正反馈回路的放大系数为 $\beta_1 \cdot \beta_2$ 。而当一个小的负电压信号加到 G 时，BG₂ 管为反向偏置而截止，BG₁ 也截止，回路的电流放大系数 $\beta_1 \cdot \beta_2 < 1$ ，电路不能处于再生状态。此时可控硅的阳极 A 和阴极 K 之间的电流相当于两个晶体管截止的集电极电流，可控硅处于关断状态，呈现高阻抗。即使两只三极管处于放大状态，但在 G 端不加信号时，没有输入信号被放大，可控硅也不能导通。

如果 A 加负电压，则控制极 G 加正电压也不能使可控硅导通。这相当于 BG₁、BG₂ 反方向应用，电流放大倍数 $\beta_1 \cdot \beta_2 < 1$ ，不能形成再生状态，BG₁ 和 BG₂ 也均截止。

当可控硅阳极加上正向电压时 (BG₁、BG₂ 都承受正向电压)，如果在控制极 G 上加正向电压，则相当于在 BG₁ 的基极有正向偏置电流 I_g ，经放大后，BG₁ 集电极上便流过近似等于 $\beta_1 I_g$ 的电流，这个电流正好是 BG₂ 的基极正向偏置电流，经 BG₂ 放大，在 BG₂ 的集电极上流过 $\beta_1 \beta_2 I_g$ 的电流，此电流注入 BG₁ 的基极，再次得到放大。如此互相反复加强，两个晶体管处于再生状态，迅即完全饱和导通（即可控硅导通）。导通后其管压降很小，电源电压几乎全部加在负载上，可控硅中流过由负载大小决定的负载电流。

当回路达到再生状态后，G 极即使去掉触发信号，再生状态仍能维持下去，可控硅呈完全导通。如果这时想关断可控硅，可采用下述两个方法：

1、降低阳极正电压，使阳极电流一直减小到小于维持再生状态所需要的电流时。

2、阳极和阴极间加反向电压。

2. 维持电流: 此电流系指环境温度不大于40℃, 控制极开路 and 元件导通时, 要保持元件处于导通状态所必须的最小正向电流。如果通过的正向电流小于此值, 可控硅就不能继续保持导通而自行关断。

维持电流的大小与可控硅的结温有关, 结温越高, 维持电流就越小。

3、正向转折电压与正向阻断峰值电压: 正向转折电压是指可控硅在额定结温(100℃)、控制极开路的情况下, 给元件加上正弦半波正向电压, 使元件从阻断状态转向导通状态时对应的电压峰值,

正向阻断峰值电压按老标准是把正向转折电压减去100伏。新标准是取正向转折电压的80%。新标准比老标准提高了指标。

4、反向击穿电压与反向峰值电压: 反向击穿电压系指可控硅在额定结温条件下, 控制极开路, 给元件加以正弦半波反向电压, 当反向漏电流开始急剧上升时对应的电压峰值称为反向击穿电压。反向击穿电压随结温的升高而降低。

反向峰值电压按老标准是把反向击穿电压减去100伏。新标准是取反向击穿电压的80%。和正向阻断峰值电压一样, 新标准提高了可控硅的性能指标。

5、正向平均电压降: 系指通以额定正向平均电流时, 阳极与阴极间的电压平均值。一般在0.6—1.2伏左右。

正向压降与正向电流的乘积就是其正向损耗, 它是造成元件发热的主要原因。因此压降小的元件, 温升也小。

6、控制极触发电压、电流: 在元件阳极与阴极之间加上6伏直流电压(阳极为正)的条件下, 能使可控硅触发导通的最小控制电压、电流, 称为控制极触发电压、电流。

同一型号的可控硅元件之间的触发电压、触发电压往往相差很大, 这是因为控制极伏安特性相差颇大所致。控制极的触发电压、电流

不可太大, 也不能太小。太大了不灵敏, 触发电路设计也困难; 太小了元件抗干扰能力差, 容易误触发。温度对控制极触发电压、电流的影响是很大的, 高温时触发电压、电流会显著下降; 低温时, 触发电压、电流会增大, 在设计脉冲变压器时应予考虑。

7、控制极反向电压: 控制极与阴极之间是一个很理想的P—N结, 当加上反向电压时, 控制极也不是完全阻断状态的, 而是有较大的反向电流流过, 按规定反向电压不得超过10伏。

8、开通时间: 当可控制极上加以能使可控硅导通的信号后, 可控硅并不是立即开通, 而要经过一段时间, 这个延迟导通的时间称为开通时间, 一般可控硅的开通时间在6微秒以下, KS系列的快速可控硅开通时间可降至1微秒以下。

关断时间: 在关断条件下, 一般的可控硅关断时间在20微秒以下, 快速可控硅可减至6微秒以下。

9、电流上升率 $\frac{di}{dt}$: 可控硅元件加上控制极信号后, 从断开状态到导通状态有一个电流扩展过程。刚开始时, 主电流集中在控制极附近的PN结中流过, 然后逐步扩展到整个PN结上, 完成元件的导通。若电流上升速度太快, 则导通过程开始时, 很大的电流流过控制极附近的PN结区域, 使PN结局部因过热而烧坏。一般电流上升率限制在20安/微秒以下, 在整流桥臂上串电抗器可以限制电流上升率。

10、电压上升率 $\frac{dv}{dt}$: 当元件迅速加上正向电压时, 即使控制极未加控制信号, 所加电压值也没超过元件的转折电压, 但只要电压上升速度超过一定值, 元件也会导通(误导通)。其原因是: 元件的结面在阻断状态时, 相当于一个电容, 若突加一个正向电压, 便会有一个充电电流(位移电流)经过结面, 该电流流经靠近阴极的PN结时相当于触发电流的

作用。若所加正向电压上升很快，也即频率很高，容抗很小，使位移电流过大，元件容易误导通。所以元件还有电压上升率的限制，一般应不大于20伏/微秒。

较完整的可控硅性能指标参见附录一。

第三节 单相可控整流

可控整流与其它电路形式的整流（如二极管整流、硒堆整流等）都能将交流电变成直流电，但在输入交流电压为定值的条件下，输出的直流电压值用可控硅整流是可控的，用硅二极管整流是不可控的。

单相可控硅整流的电路有：单相半波整流电路；单相全波整流电路；单相半控整流电路；单相全控桥式整流电路。

下面主要介绍单相半波整流电路和单相全控桥式整流电路。

单相半波整流电路：

因可控硅具有相位控制的功能，从而能实现可控整流。在可控整流电路中常用的一个表

征量是控制角，通常用符号 α 表示。可控硅在全开放时 α 角为零。 α 角系从可控硅阳极电位开始变正时的一点算起。对于单相单路来说， α 的起算点如图2-5(a)所示。对于三相电路来说， α 的起算点是自然换流点，如图2-5(b)所示。当 $\alpha=0$ 时，直流整流电压最高，即相当于二极管整流的情况。当 α 从零往后增大，直流整流电压则变小。对于直流整流电流连续的情况， $\alpha=90^\circ$ 时整流电压为零。 α 再往后移，整流装置就处于逆变区了。 $\alpha>90^\circ$ 的控制角习惯上不用 α 表示，而用逆变角 β 来表示。

对同一个可控硅的控制角，在任一周期内只有一个，其关系式如下：

$$\alpha + \beta = 180^\circ \quad (2-1)$$

单相半波整流电路如图2-6所示。图2-7示出了该电路的波形。

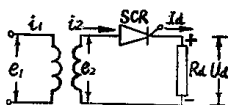


图2-6 单相半波整流电路

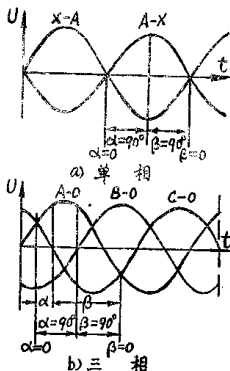


图2-5 α 、 β 角示意

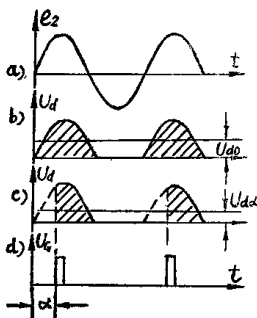


图2-7 单相半波可控整流波形

可控硅的控制极不给触发信号是不能导通的。这时变压器次级电压 e_2 完全加在可控硅的阴极、阳极上。设 e_2 的有效值为 E_2 ，则可控硅必须能承受 e_2 的正向、反向峰值电压。峰值电压为 $\sqrt{2} E_2$ 。假定 e_2 由负半波进入正半波过零点时，立刻就给可控硅以正脉冲触发信号，这时控制角 $\alpha = 0$ （相当于二极管整流），可控硅在正半周一直导通，直到 e_2 由正向负过零时才关断。这时在负载 R_d 上的电压、电流波形如图2-7(b)所示，其平均电压 U_{d0} 是斜线所示部分在整个周期内的平均值。 e_2 为正弦波：

$$e_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t \quad (2-2)$$

平均电压值为：

$$\begin{aligned} U_{d0} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin \omega t d\omega t \\ &= -\frac{1}{2\pi} \sqrt{2} E_2 \cos \omega t \Big|_0^{\pi} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 \\ &= 0.45 E_2 \end{aligned}$$

若触发脉冲 U_G 不在 $\alpha = 0$ 的时刻触发，而是在过零点滞后 α 角时才触发，如图2-3(d)，则可控硅也就滞后 α 角导通，这时负载 R_d 上的电压波形如图2-7(c)所示，其平均电压值为 U_{da} ，显然 $U_{da} < U_{d0}$ ， U_{da} 是图2-7(c)中斜线所示部分在过周期 2π 弧度)内的平均值。其关系式：

$$\begin{aligned} U_{da} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin \omega t d\omega t \\ &= -\frac{\sqrt{2}}{2\pi} E_2 \cos \omega t \Big|_{\alpha}^{\pi} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 (1 + \cos \alpha) \\ &= \frac{1 + \cos \alpha}{2} U_{d0} \quad (2-4) \end{aligned}$$

从比较式(2-3)与(2-4)可知，若调节触发脉冲信号加到控制极上的时刻(改

变控制角 α 的大小)，就可实现控制输出直流电压 U_{da} 的大小。这就是可控硅整流电路的调压原理。其它形式的可控整流电路，其 U_{da} 与 α 之间的函数关系因电路不同而异。

单相全控桥式整流电路：

以电阻性负载为例如图2-8(a)所示。其波形如图2-8(b)~(e)所示。

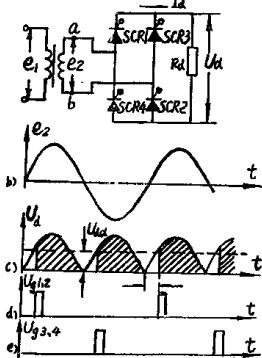


图2-8 单相全控桥式电路(电阻性负载)

图2-8(a)中a、b为变压器次级电压 e_2 的引出端。若a端为正，b端为负，并分别加到 SCR_1 的阳极、 SCR_2 的阴极上，此时若加触发脉冲于 SCR_1 和 SCR_2 的控制极，则 SCR_1 与 SCR_2 同时导通，电流从a端经过 SCR_1 负载电阻 R_d 和 SCR_2 ，回到b端。当 e_2 是负半波时，a端为负、b端为正。由于 SCR_1 的阳极变负， SCR_2 的阴极变正，致使 SCR_1 、 SCR_2 关断；同时为 SCR_3 、 SCR_4 的导通准备了基本条件。此时若加触发脉冲于 SCR_3 、 SCR_4 的控制极，则 SCR_3 与 SCR_4 同时导通，电流从b端经 SCR_3 、 R_d 和 SCR_4 回到a端。由于

SCR₁、SCR₂的触发脉冲相位相同，两者的触发可以合用一个脉冲变压器。SCR₃、SCR₄也可以合用一个脉冲变压器。

下面进行定量分析：

若 $\alpha = 0$ ，电阻性负载全控桥的平均输出电压为：

$$\begin{aligned} U_{d0} &= \frac{1}{2\pi} \int_a^{\pi} 2\sqrt{2}E_2 \sin\omega t d\omega t \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{2\pi} E_2 (-\cos\omega t) \Big|_0^{\pi} \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 \\ &= 0.9E_2 \quad (2-5) \end{aligned}$$

若 $\alpha \neq 0$ ，电阻性负载单相全控桥平均输出电压为：

$$\begin{aligned} U_{d\alpha} &= \frac{1}{2\pi} \int_a^{\pi} 2\sqrt{2}E_2 \sin\omega t d\omega t \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{2\pi} E_2 (-\cos\omega t) \Big|_a^{\pi} \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 \frac{1+\cos\alpha}{2} \\ &= U_{d0} \frac{1+\cos\alpha}{2} \quad (2-6) \end{aligned}$$

当可控硅的触发时刻滞后 α 电角度以后，

平均电压就要减小为 $\frac{1+\cos\alpha}{2}$ 倍。

单相桥式可控整流电路，通常用于机床上的它激直流电动机的励磁供电及调节。励磁线圈实际上主要是电感性负载。为了定性讨论的方便，人们往往把感性负载中的电感近似认为无穷大，这只是一种理想情况。实际上电感不可能无穷大，电流波形也不同于图2—9中所示的理想方波。

图2—9(a)示出了感性负载的单相全控桥式整流电路。若在 a 端正电平(即SCR₁、SCR₂阳极可以导通)的某时刻 t_1 ，在SCR₁、SCR₂的控制极施加触发信号，则SCR₁、SCR₂同时导通，在阳极A和阴极K间观察到

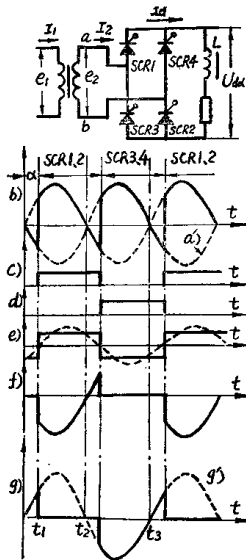


图2—9 单相全控桥式电路
(电感性负载)

的电压波形如图2—9(g)所示。随着可控硅的导通， I_d 电流的建立，在直流感应L中储有能量 $\frac{1}{2}I_d^2L$ 。当 e_2 在 t_2 时刻由正半波过零开始进入负半波时，因为电感L中的电流不能突变，在L中感生一个电动势阻止电流的减少，L两端感生的电压极性下正上负(参见图2—9电路图)，从而抵消负的交流电压，使电流沿原来方向继续流动——续流。这时，直流侧输出电压 $U_{d\alpha}$ 为负值，储存在电感L中的能量克服负半波电压的外加电能而反馈到交流电网。从 t_2 起，SCR₃、SCR₄为导通准备了基本条件。滞后 α 电角度时，在SCR₃、SCR₄的