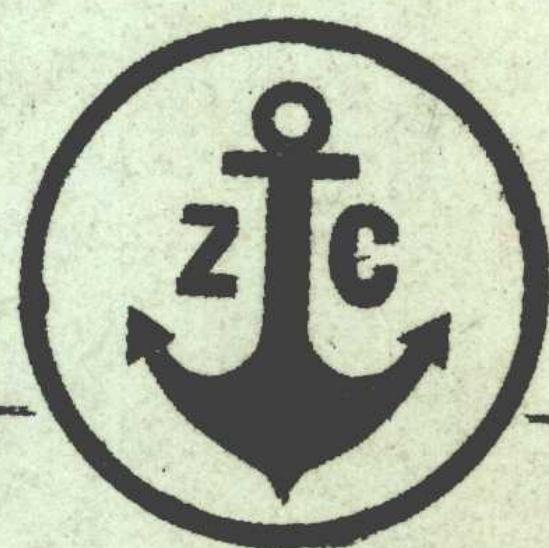
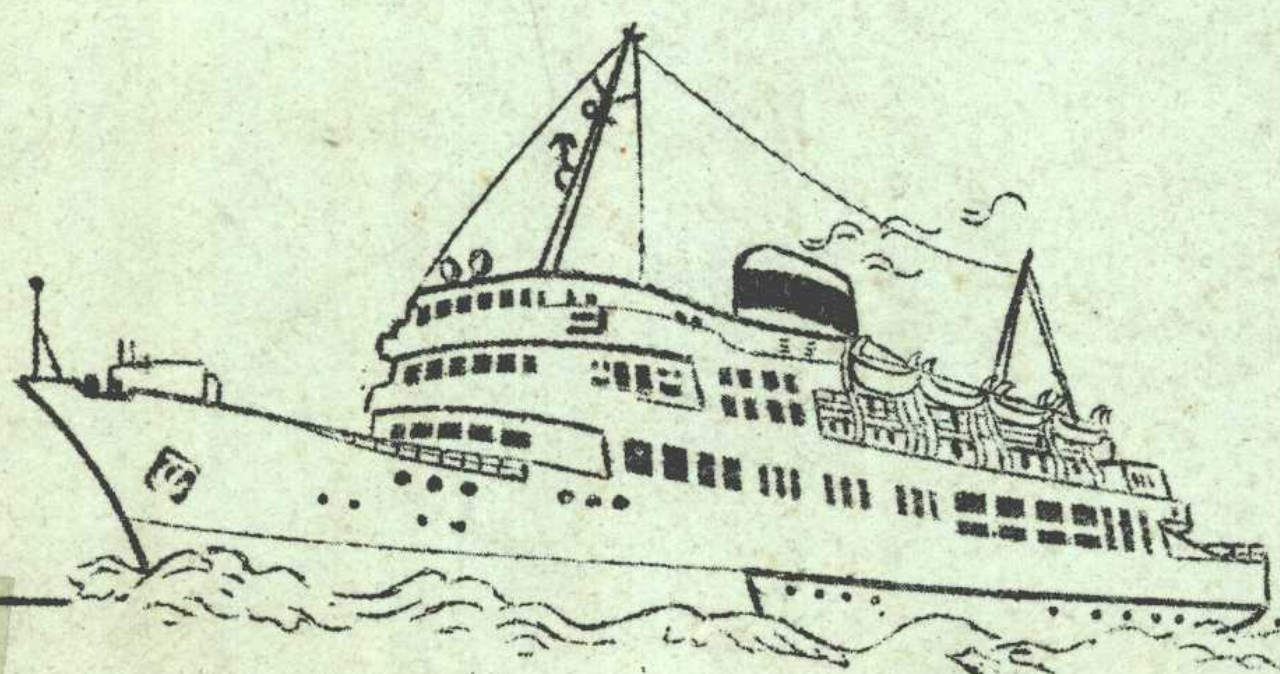


验船参考资料

可控硅在船舶励磁系统中的应用



1975

船舶检验局上海办事处

汇 编 说 明

随着造船工业的迅速发展，船舶交流电站的单机容量越来越大，其发电机的励磁系统也发生了一系列的变革，从带励磁机的YBK型和炭阻式调压器到不带励磁机的不可控相复励自励恒压系统和可控相复励自励恒压系统。随着大功率新型半导体元件——可控硅的发展，又出现了可控硅自励恒压系统，从技术经济指标来看也越来越优越。

可控硅自励恒压系统具有体积小，重量轻，制造方便，调压精度高，反应速度快等一系列优点，所以发展较快，系统的类型也较多，从调节原理角度来讲，可分为有电流复励系统和无电流复励系统。从主电路的形式来看，又大致可分为：单相半波，单相全波半控，三相桥式半控，三相半波励磁系统。从控制系统角度来讲，种类更加繁多。另外有相复励系统加可控硅调节，进行直流分流或交流分流来提高调压精度，消除空载起励电压低的缺陷，提高并联运行时无功分配的均匀度。即使可控硅调节环节失去作用，相复励系统仍能保证发电机在一定的电压精度范围内正常运行。

可控硅在励磁系统中的应用也存在一些问题，其原因大致是由于个别元件的质量尚不够稳定，经一定时间参数会发生变化，系统设计中必要的保护措施不够完善，元件的选择不够恰当，以及缺乏使用经验等。如由于元件耐压选得不够恰当，电网中出现瞬时过电压时，就会造成元件击穿，由于没有低速保护装置，发电机组低速运行超过一定时间，可控硅就有可能过热而烧毁，由于防干扰措施不完善，发电机的端电压会受外界干扰而发生波动……我们认为这些问题，在生产实践过程中都是不难解决的。

但是采用可控硅直接励磁方式时，也存在着两个缺点：(1)由于可控

硅直接取发电机的电压励磁因此在可控硅导通瞬间，出现电流突变，而造成很大的 di/dt 它在发电机电枢的内阻抗上产生一个瞬时压降 $\Delta u = L \frac{di}{dt} + iR$ ，因而使发电机的电压波形出现一个很深的缺口，造成电网波形的畸变，对通信也有干扰。

(2) 直接启动异步电动机时，其启动容量有一定限止。

目前国内运行的船舶上，可控硅这一新技术在交流发电机励磁系统中的应用已有一定的数量，线路形式很多，结构原理大致相同。为便于介绍可控硅在船舶电站励磁系统中的应用情况，有利于经验结合，更好地推广可控硅在造船工业中的应用。将收集到的几个系统线路图加以汇总，并按主电路，测量比较电路，控制电路及保护电路分别加以叙述，并有应用线路实例及简单的原理说明，以供参考。

由于我们水平有限，又没有进行深入细致的调查研究，所以该资料的汇编是比较粗糙的肯定有不少错误之处，切望同志们批评指正。

一九七四年十二月

一、可控硅元件一般介绍:	1
§ 1. 概述	1
§ 2. 可控硅元件的主要参数	2
§ 3. 可控硅元件的使用说明	4
§ 4. 可控硅元件的选择	7
二、可控硅自励恒压系统	9
§ 1. 概述	9
§ 2. 可控硅励磁系统的主回路	1 1
§ 3. 可控硅励磁系统的测量比较电路	1 4
§ 4. 可控硅的控制线路	1 9
(一)阻容桥式移相电路	1 9
(二)由单结晶体管组成的触发电路	2 3
(三)同步波形为正弦波的晶体管触发电路	2 6
(四)锯齿波控制移相的晶体管触发电路	2 9
(五)带单稳态触发器的晶体管触发电路	3 1
(六)带阻塞式振荡器的触发电路	3 4
(七)采用小可控硅的触发电路	3 7
§ 5. 可控硅自励恒压系统中的几种保护电路	3 8
1. 过电流保护	3 8
2. 低速过电流保护	3 9
3. 过电压保护	4 4
4. 发电机端过电压保护	4 5
5. 起励保护电路	4 6

三、可控硅在励磁系统中的应用实例:.....	4 7
§ 1. T K L可控硅自励恒压装置.....	4 7
§ 2 某工程船所用可控硅自励恒压系统.....	6 0
§ 3. 5 0 0 K W 同步发电机可控硅自励恒压系统.....	6 5
§ 4. 2 5 0 K W 同步发电机用可控硅自励恒压系统	7 2
§ 5. 三相桥式半控可控硅自励恒压系统.....	8 1
§ 6. 400KW同步发电机可控硅谐波励磁系统.....	8 8
§ 7. " 丰城 " 轮同步发电机用可控硅自励恒压系统.....	9 5
§ 8. SMUJ—75 型可控硅自励恒压系统 (望亭)	1 0 3
§ 9. 6 3 0 K W 带可控硅分流的自励恒压系统.....	1 1 1
§ 10. C R B 型自激励磁和自动电压调节器 (大城)	1 1 4
附录: 变压器几种典型接法的电压向量关系	1 2 4

一、可控硅元件的一般介绍

§ 1. 概述：可控硅是六十年代出现的一种新型半导体元件，全名叫可控的硅整流元件，它在线路中的符号如图 1 所示。图中 A · G · C 分别代表可控硅的阳极，控制极和阴极。

它在线路中的作用实际上就是一个开关。要使可控硅导通必须同时满足两个条件：(1) 可控硅阳极相对阴极为正电压；(2) 控制极加入正信号电压。要使可控硅关断，必须使阳极电流小于

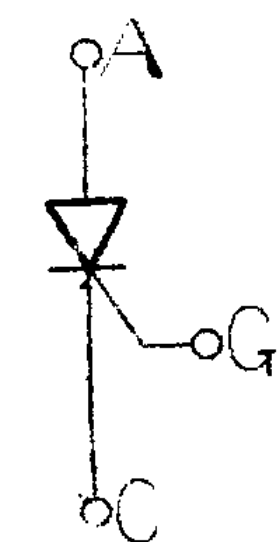


图 1

一定值（维持电流），这可使电压为负或加上反向电压来实现。

可控硅的阳极与阴极间的电压——电流特性（又叫伏安特性）如图

2 所示。元件加上反向电压，也就是阳极为负，阴极为正时，它的特性和普通的二极管特性一样。

也就是说当反向电压没有超过 V_{RB} （称反向峰值电压）时，只有很小的漏泄电流（几毫安到十几毫

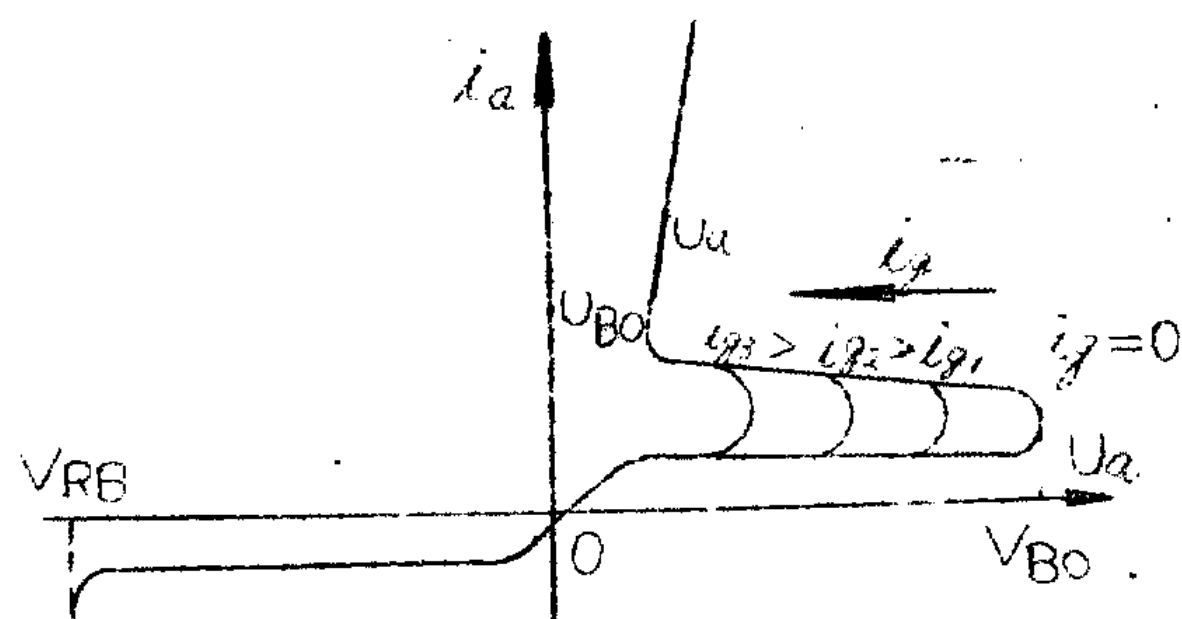


图 2

安）通过元件，当反向电压超过 V_{RB} 时，元件就击穿损坏。

当元件加上正向电压（阳极为正，阴极为负）时，若正向电压未超过正向转折电压 U_{BO} 控制极没有加上电压即控制极电流 $i_g = 0$ ，那么正向流过元件的电流也很小（几毫安到十几毫安）。这时可控硅处在正向阻断状态，即元件不导通。但是当控制极加上一定的电压使控制极——阴极间流过足够大的电流（几十毫安到一百多毫安）时，阳极和阴极间内电阻立刻变得很小流过很大的电流，我们说这时元件导通了。加到控制极的电压，电流通常叫做控制信号或触发信号。

现以简单的可控硅调光线路为例如图 3 所示说明其应用原理。图 3 中 A、B 点的电位是交变的，一会儿 A 点比 B 点正，一会儿 B 点比 A 点正。如果在 A 点电位为正时，在控制极

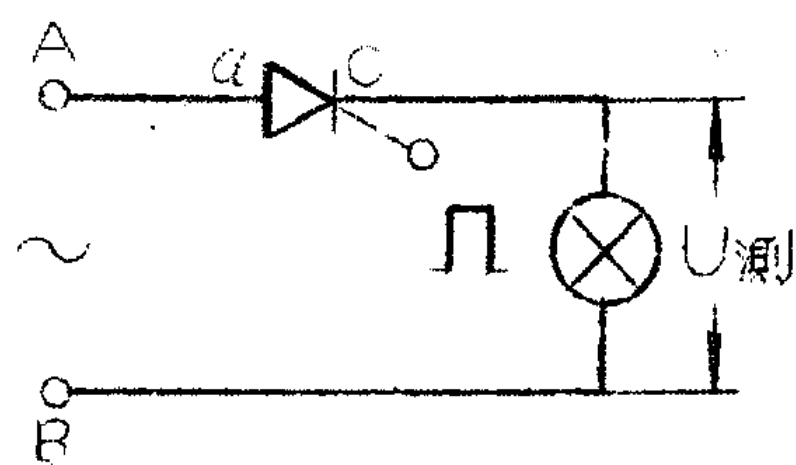


图 3

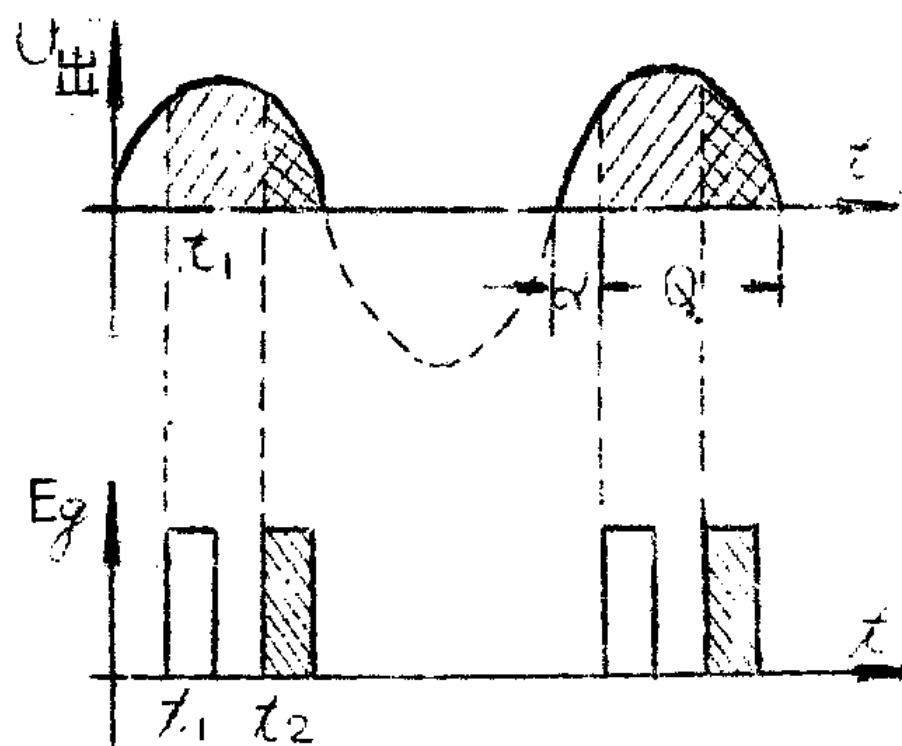


图 4

与阴极间加入一个正信号（图中的脉冲信号），此时可控硅就满足了导通的二个条件，可控硅导通，但很快 A 点又转为负了，可控硅导通条件被破坏，此时可控硅就处于阻断状态，当下一周波时 A 点又为正，如果再在此时加入控制信号，那么可控硅再次导通，这样就有一个恒定的直流通通过灯泡，其波形如图 4 的 $U_{出}$ 所示。

如果控制信号来得较早，可控硅导通时间较长，输出电压就高，图中 θ 为导通角 α 为控制角，因此改变控制信号出现的迟早，即改变控制信号的相位就能调节输出电压的大小，改变灯光的亮度。

可控硅元件可以用很小的控制极电流去控制很大的阳极电流，同时又是静止的固体元件，开通和关断时间很短本身的损耗也很小，因而它的推广使用为我国强电工业的电子化，自动化提供了一条良好的途径。在造船工业中随着可控硅质量的不断完善，其应用越来越广泛。

§ 2 可控硅元件的主要参数：

(1) 正向转折电压：元件正向从阻断状态转向导通状态的电压如图 2 中的 V_{BO} 所示。

(2) 正向阻断峰值电压 P_{FV} ：控制极断路，在额定结温的条件下可以重复加在元件的正向峰值电压，此电压规定为小于正向转折电压 100

伏。平常我们所说的多大电压的元件就是指它的正向阻断峰值电压而言。

(3)额定正向平均电流 I_F : 指在规定环境温度, 标准散热和元件导通情况下, 阳极和阴极间可连续通过的工频正弦半波 (180度导通角) 电流的平均值。平常我们所说的几安倍可控硅元件, 就是指它的额定正向平均电流。

(4)正向平均电压降 V_F : 在规定环境温度, 标准散热和元件导通条件下通以工频正弦半波额定正向平均电流时阳极和阴极间的平均电压降。此电压降一般在1伏左右。

(5)正向电压上升率 $\frac{dv}{dt}$: 在控制极断路, 额定结温和阻断条件下元件在单位时间内所能允许上升的正向电压 (电压从零加到正向阻断峰值电压) 通常用伏/微秒来表示。

(6)正向电流上升率 $\frac{di}{dt}$: 在规定环境温度, 标准散热条件下, 元件在单位时间内所能允许上升的正向电流 (电流从零到额定值) 用安/微秒来表示。

(7)维持电流 I_H : 在规定环境温度控制极断路, 元件处于导通状态条件下, 要保持元件处于导通状态时所必须的最小正向电流。

(8)反向阻断峰值电压 PRV : 控制极断路, 在额定结温的条件下可以重复加在元件上的反向峰值电压。此电压规定为元件的反向漏电流急速增加, 反向特性曲线开始弯曲时电压 V_{RB} 减去100伏。

(9)控制极触发电压 V_g : 在规定环境温度及阳极和阴极间加以一定的电压条件下, 触发可控硅元件, 使其从阻断状态转变为导通状态, 所需要的最小控制极直流电压。

控制极最大触发电压 V_{gm} 是指某种规格的可控硅, 其控制极触发电压大于此数值时, 所有的可控硅均可能触发导通。

控制极不触发电压 V_{gn} 是指某种规格的可控硅, 其控制极触发电压

小于此数值时，所有的可控硅均不能触发导通。

(10) 控制极触发电流 I_g : 在规定环境及阳极与阴极间加以一定电压时触发元件使其从阻断状态转变为导通状态所需要的最小控制极直流电流。

控制极最大触发电流 I_{gm} 是指某种规格的可控硅，其控制极触发电流大于此数值时，所有可控硅均可触发导通。

控制极不触发电流 I_{gn} 是指某种规格的可控硅，其控制极触发电流小于此数值时，所有可控硅均不能触发导通。

(11) 控制极最大允许反向电压 V_{GR} : 在额定结温条件下控制极和阴极间所能加的最大反向峰值电压。

(12) 开通时间: 在规定的环境温度下通以一定的正向电流，元件自加以控制信号至进入导通状态所需的时间。它是由上升时间和延迟时间两部分组成。

(13) 关断时间: 在额定结温条件下元件从切断正向电流使元件重新处于阻断状态，直到控制极恢复控制能力为止所需的时间。所谓恢复控制能力，就是当控制极未加信号时阳极——阴极间重新加上正向电压元件不会导通。

§ 3. 可控硅元件的使用说明:

(1) 使用环境和冷却方式: 可控硅元件只适用于海拔高度不大于 1000 米，温度不高于 $+40^{\circ}\text{C}$ 不低于 -40°C ，相对湿度不大于 95% (相当于 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 时)，空气中无爆炸危险和腐蚀性气体以及无破坏绝缘及导电的尘埃。冷却方式要严格按照各类型各规格的硅元件规定的冷却方式。

(2) 工作电压: 技术规格中给出的正向阻断峰值电压，非常接近正向转折电压和反向击穿电压。为了保证安全可靠地运行，在实际使用时。

除按供电电压峰值选择外，还应考虑足够的安全系数。通常安全系数取 $2-3$ 。对 100 伏以下的元件，安全系数可选得适当高些。

可控硅元件的过电压特性很差，极短时间的过电压（几微秒）就会导致元件的电压特性恶化。对低电压的可控硅元件而言，正向过电压一般不会损坏元件，但会导致误导通，因此使用时必须根据线路情况考虑到这一点。可控硅元件的反向电压是不允许超过规定值的，一旦击穿即为不可逆损坏。同时还应充分考虑电源电压的波动和线路上可能产生的瞬时过电压，使瞬时电压不超过正向阻断峰值电压和反向峰值电压。

为了防止过电压，可选择电压高的元件或在线路上采取相应措施如接稳压管，非线性电阻，硒堆，电阻—电容支路等。

(3)额定正向电流：技术规格中给出的电流是指正弦半波平均电流，导通角为 180° 。导通角小于 180° 时额定平均电流必须降低，导通角越小，使用电流也应降得越低。另外当使用频率超过 400 赫时，元件的“开”“关”损耗增加使结温增加。因此在高频下运用时，亦应降低电流额定值。

由于可控硅承受过载和瞬时过电流能力较差，所以必须避免过载和短时间的瞬时冲击电流。为保护元件免受过电流的冲击通常采用快速动作的保护电器，如快速熔断器，快速开关，快速过流继电器、快速短路器等。

(4)控制极特性：同一型号的各个可控硅元件控制极的触发特性，差别很大，而且同一个元件的控制极触发电流、电压，也随温度的变化而改变。温度变化时触发电流，电压会有显著改变。通常可以这样估计： $+100^{\circ}\text{C}$ 高温时需要的触发电流（或电压）比室温下低 $2-3$ 倍，而 -40°C 低温下需要的触发电流（或电压）则比室温下要高 $2-3$ 倍。

另外值得注意的是技术规格中给出的触发电流值为直流值，然而实

实际应用时，多采用脉冲触发。一般脉冲的持续时间应足以使阳极电流上升到维持电流以上。如果采用持续时间很短的脉冲则必须增加控制极电流的幅值，时间越短则幅值越大，幅值增加的倍数，远大于持续时间减少的倍数。但是控制极也不能加上过大的电压和电流。一般正向控制极电压不要超过10伏，反向不要超过5伏控制极电流过大会使控制极烧坏或把焊锡烧熔。

(5)电压上升率：当可控硅元件迅速地加上正向电压时，即使所加电压值没有超过元件的转折电压，只要电压上升速度超过一定值，元件也会导通，即产生误导通。这种情况是不希望有的。

电压上升速度太快引起元件导通的原因主要在于可控硅元件内部的PN结上加上反向电压时，有电容存在。所以加上正向电压时有一个电容引起的电流（位移电流）流过控制极和阴极起了控制极电流的作用。因电容而引起的电流同所加电压的上升速度成正比。元件愈大，内部电容愈大，由它引起的位移电流也愈大。另外元件的控制极触发电流随温度升高而减小，所以温度越高，较小的位移电流（即正向电压上升速度较低时）就能使元件导通，引起误触发。

采用并联电容的方法，可以防止元件误导通，其线路如图5所示。图中采用电阻R和二极管SR是为了防止电容C放电时，元件流过过电流而烧坏。

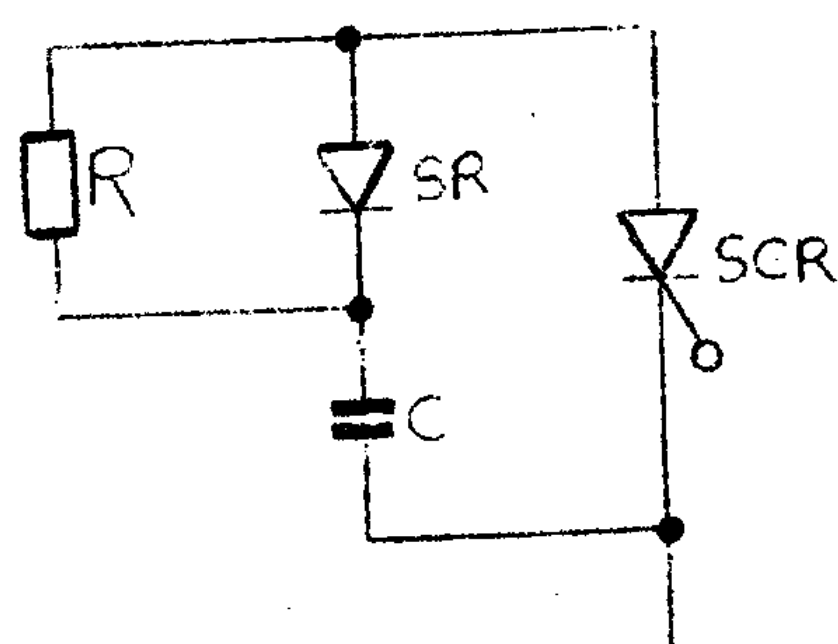


图5 防止误导通的线路

(6)正向电流上升率：可控硅元件加上控制信号后，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，然后慢慢扩展到整个PN结上完成元件的导通，若电流上升速度太快，则开通过程开始时，很大的电流流过控制极附近的PN结区域，使

P N 结局部过热而烧坏。

当线路中电流上升率很高时，应采取办法限制。通常用串一个空芯电感的办法来保护。

(7)开关时间：实际使用时，许多条件都会影响开关时间，如温度升高开通时间减小，但关断时间增大，导通前的正向电压提高开通时间减小，导通后的正向电流愈大开通时间会长一些。同样关断前的正向电流越大，关断时间越长；控制极脉冲的前沿越陡，脉冲幅值越高开通时间就越短，感性负载的开通时间较长关断时间亦较长。使元件关断的反向电压愈大，反向电流上升率愈高则关断时间越短。所以元件使用时，开关时间必须根据给出的典型值和具体使用条件综合起来加以考虑。

§ 4 可控硅元件的选择：

作为整流用的可控硅元件的选择，主要是电流等级和电压等级的选择问题。电压等级的选择在可控硅自励恒压装置中，没有特殊问题，可象一般整流装置中用的可控硅一样进行计算选择，只是裕量系数应取大一些，建议取 2—3 倍较为安全可靠。

在自励恒压装置中，可控硅电流等级不能按额定励磁电流进行计算选择。因为可控硅工作最严重的情况不是在额定励磁情况下，而是在强励状态下，且考虑到可控硅电流过载能力很小，故自励恒压装置中的可控硅应按强励状态来计算选择其电流等级，并适当考虑其工作的实际环境温度，以及散热条件是否符合产品规定的要求等因素，留有一定裕量。建议可控硅电流等级按下式进行选择，即：

$$I_F \geq (1.5 - 2) \frac{K_{I\alpha 0} K_{I\alpha 0} K_Q}{1.57} I_{Le}$$

式中：

I_F —— 可控硅额定正向平均电流；

I_{Le} —— 发电机额定励磁电流；

$K_{f\alpha 0}$ —— 控制角 $\alpha = 0^\circ$ 时（强励状态时，我们认为可控硅工作于全开通状态）流过可控硅的电流的波形因数它与整流电路型式有关见表 1。

$K_{I\alpha 0}$ —— $\alpha = 0^\circ$ 时整流电路的系数，它与一个周期中轮换导电的可控硅数目及整流电路型式有关见表 1；

$(1.5-2)$ —— 裕量系数；

K_Q —— 最大瞬时强励倍数。

表 1

整流电流	单相半波	单相 半控桥	三相零式	三相 半控桥
$K_{f\alpha 0}$	1.41	1.41	1.73	1.73
$K_{I\alpha 0}$	0.5	0.5	0.33	0.33

二、可控硅自励恒压系统

§ 1. 概述:

随着可控硅整流元件的发展,从六十年代初国外开始采用可控硅励磁系统的电机。随着我国硅整流器制造技术的飞速发展,于六十年代中期也广泛开展了可控硅励磁的研制工作,现在我国T₂H船用小型同步发电机系列也已采用可控硅励磁。在很多中型船用同步发电机上也陆续采用了可控硅励磁系统。

可控硅励磁系统从自动调节原则来看,可分为有电流复励系统和无电流复励系统二种,比较起来前者因有电流复励分量所以动态反应快,在短路故障切除之后能自起励,而后者线路简单,体积小,从实际使用情况来看可控硅励磁系统反应速度快,当具有一定剩磁时采用第二种可控硅励磁方案也可得到很好的短路故障切除后的自起励特性,从目前收集到的系统来看采用后者的方案居多。自励恒压装置在发电机自励建压阶段是正反馈特性,在发电机恒压阶段是负反馈特性。无电流复励和有电流复励的可控硅励磁系统原理方框图如图5及图6所示。

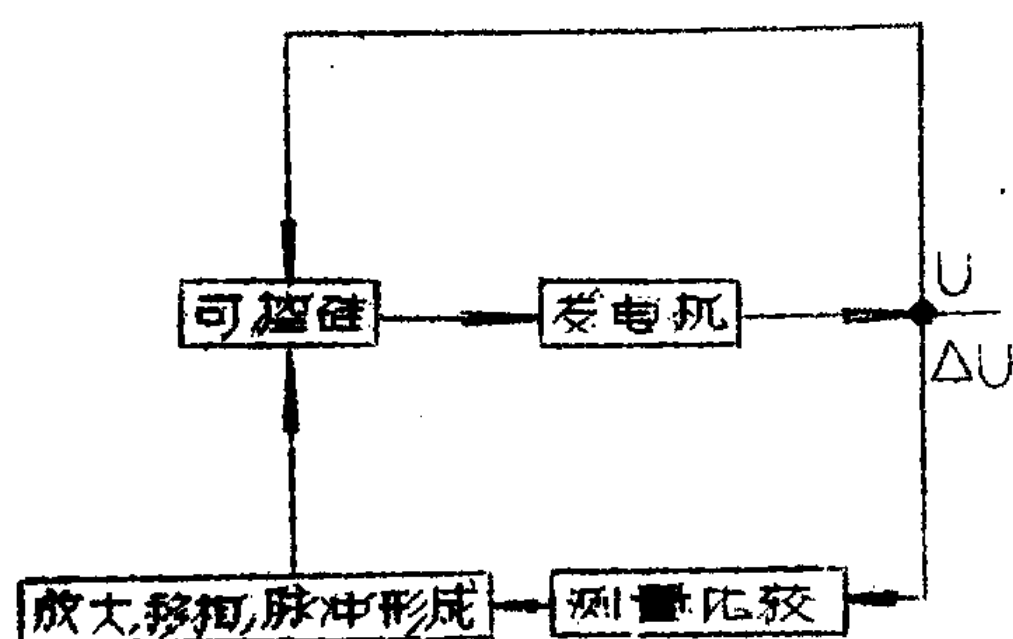


图6 无电流复励系统

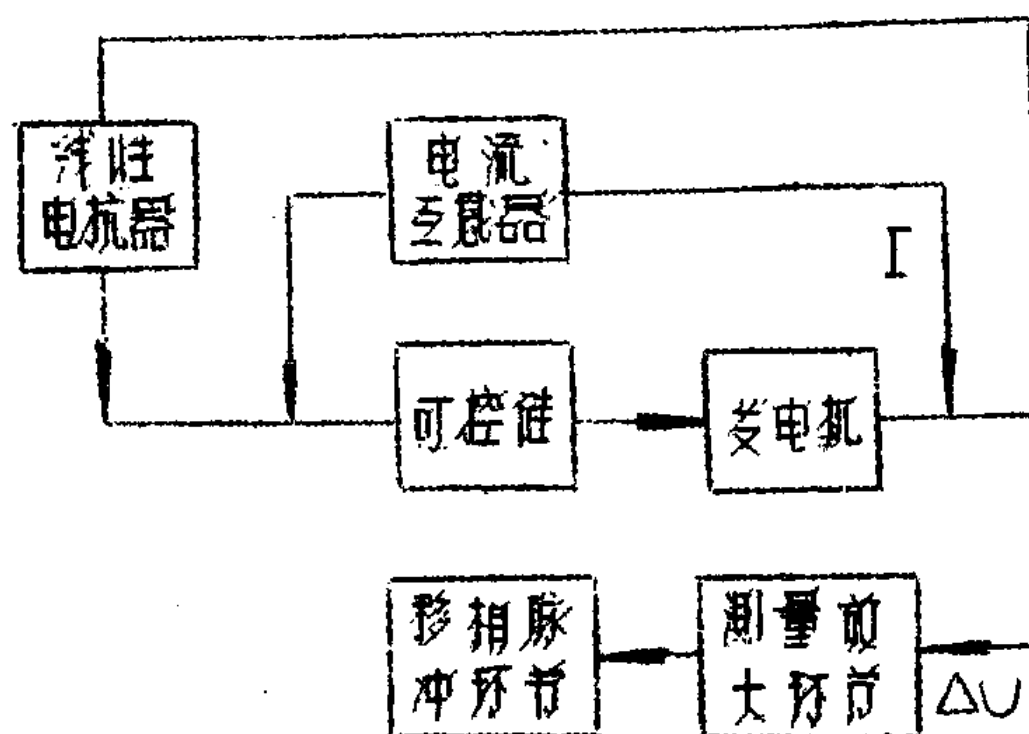


图7 有电流复励系统

可控硅励磁有很多优点：如静态电压调整率可达 $\pm 1\%U_H$ 以内。有良好的温度补偿和频率补偿特性，动态反应速度快，能起动较大容量的异步电动机。重量体积亦较小。现以100KW同步发电机为例，分别采用四种不同的励磁系统时，把相应的电气性能和经济指标比较之，列于表2中，从表2可以充分说明可控硅励磁系统的优点。

表 2

励磁型式	重 量	体 积	静态电压调整率	电压整定范围	频率补偿	温度补偿
励磁机调压系统	>200kg	很大	$\pm 1-2\%U_H$	$\pm 5\%U_H$	一般	一般
可控相复励系统	>130kg	较大	$\pm 0.5-2\%U_H$	$\pm 5\%U_H$	较好	一般
不可控相复励系统	约100kg	400× 500× 800mm ³	$\pm 2.5-5\%U_H$	不整定	较差	较差或一般
可控硅励磁系统	7.5kg	150× 330× 420mm ³	$\pm 1\%U_H$	$\pm 5\%U_H$ 或以上	完全补偿	良好

通过几年的使用，采用可控硅励磁的同步发电机也暴露出一些问题，如可控硅元件容易损坏，其主要原因是可控硅元件质量不好，性能不稳定。再者就是可控硅使用过程中各种保护措施未跟上，故在各种故障及操作时引起的过电压和过电流要损坏硅元件。还有一个问题，采用可控硅励磁系统，无线电干扰比较大，因为可控硅元件工作在跃变状态，可控硅开放瞬间出现电流突变，而造成很大的 $\frac{di}{dt}$ ，它在发电机电枢的内阻抗上产生一个瞬时压降 $\Delta U = L \frac{di}{dt} + iR$ ，使电压波形出现一个很深的凹陷，造成电网波形的严重畸变。经过可控硅整流后带有凹陷的直流波，交流成分多，把它送入励磁绕组作励磁用，这将使电枢反应的磁场畸变

得更厉害，电机中电磁场变得更为复杂。

今后，随着可控硅元件质量的不断提高，以及系统设计时各种保护与抑制措施逐步完善，可控硅在励磁系统中必将得到更为广泛的应用。

目前，国内运行船舶上所采用的交流同步发电机可控硅自励恒压装置的具体电路是多种多样的。为便于我们掌握和了解各种系统的性能和原理，按其主要组成部分叙述之。

§ 2 可控硅励磁系统的主回路：

可控硅励磁系统主回路，从整流器接线方式来看，通常采用下列四种线路。第一种是单相半波励磁系统（图8(a)），第二种是单相全波半控励磁系统（图8(b)），第三种是三相半波励磁系统（图8(c)），第四种是三相全波半控励磁系统（图8(d)）。

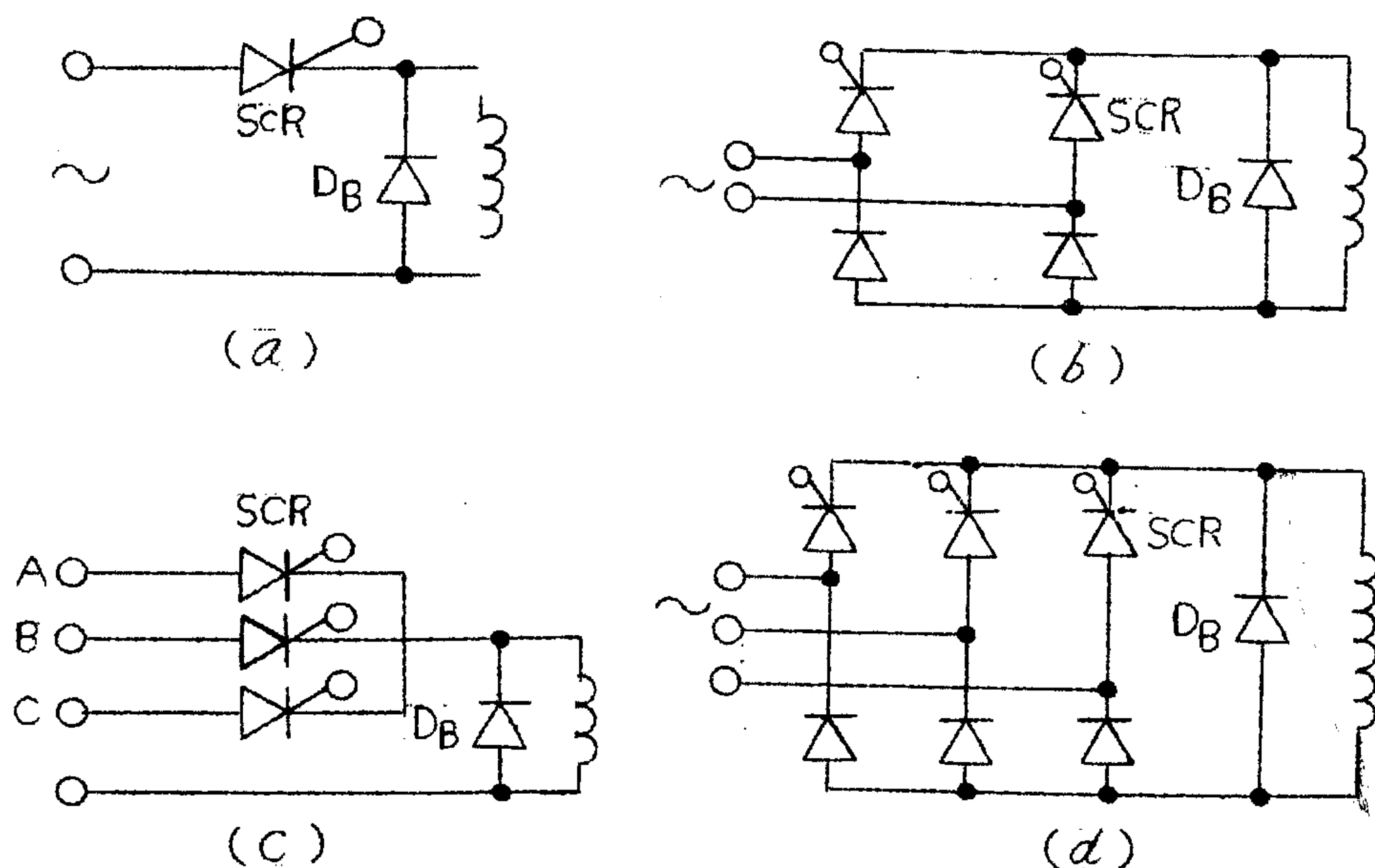


图8 可控硅励磁系统主回路接线图

其中单相半波线路简单，可控硅二极管用量最少，价格低，维护方便，适用于小容量的发电机励磁，这方案在T₂H系列船用同步发电机励磁中采用，由于单相半波励磁功率由一相供给容易造成三相负载不平衡，而三相全波半控励磁系统的励磁功率由三相平均负担，所以不会引起三相不平衡现象，但三相全波半控线路复杂，维修调整麻烦，故一般在大容量的电机上或要求高的场合下才采用这种励磁系统，500KW交流同步发电机可控硅励磁系统就是采用这种方式。

四种可控整流电路的参数见表3。