

晶闸管在电机软启动领域中的选择与应用

一、晶闸管产品特点简介：

从本世纪 50 年代我国生产晶闸管器件问世以来，经历了 50 多年的历史，刚开始时，由于制造工艺水平不成熟，性能很不稳定，那时有人称之为‘可怕硅’。现在随着制造水平的提高，各种性能相当稳定，已朝着大电流（3000A 以上）高电压（6000V 以上）方向发展。

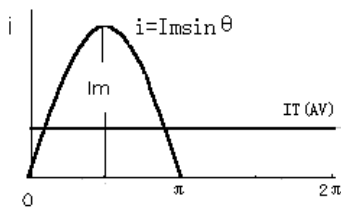
英文为 Thyristor, 也称为可控硅 (Silicon Controlled Rectifier)。它是一种具有 P-N-P-N 四层三个 PN 结的功率半导体器件。它有三个电极：阳极 (A)、阴极 (K)、控制门极 (G)，是一种电流控制型器件。要使其导通必须具备两个条件：一是阳极电位高于阴极电位，即正偏置；二是控制门极施加足够功率和宽度的触发脉冲信号。晶闸管具有如下特点：导通后即使控制门极触发信号撤去，只要流过器件的正向电流大于维持电流（一般几十个毫安）它还能导通，也就是说通过关断触发信号来关断晶闸管是不行的（这点与 IGBT、GTR、MOSFET 不同）。要想关断它，必须将维持导通的电流减小至维持电流以下。因此有时需要进行强迫关断，即在需关断时，对它施加反偏置电压（即反压），直至其关断。

相对其他功率器件，晶闸管因其具有低的导通压降，过流能力强；耐冲击；耐高压。所以在各种不同类型的电力电子变换装置中被广泛使用，交流电机软启动就是一个典型的应用。

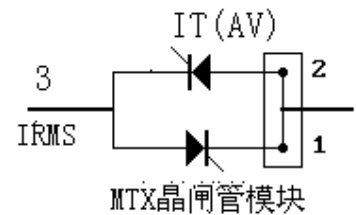
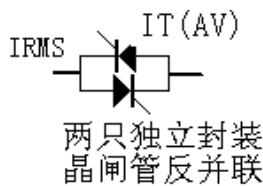
二、晶闸管参数说明：

作为使用者来说，要正确使用晶闸管，首先就要对晶闸管的各项电气参数有一个详细的了解。这样就可以正确地选型。但往往在实际工作中，大多数人并不完全了解。如晶闸管额定电流标称的是平均值概念，实际工作中负载标称的额定电流是有效值。两者之间是有根本区别的。因此有必要对几个主要参数作出一些说明：

- 晶闸管额定电流平均值： $I_{T(AV)}$ $I_{F(AV)}$:



(图 a)



(图 b)

(图 c)

从图 a 中可以计算出额定通态电流平均值 $I_{T(AV)}$ 和正弦半波电流峰值 I_m 之间数学表达式为：

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \theta d\theta = \frac{1}{2\pi} \times I_m \times (-\cos \theta) \Big|_0^{\pi} = \frac{1}{2\pi} \times I_m \times 2 = \frac{I_m}{\pi} \text{-----(1)}$$

其中 θ 为导通角

- 1、单只晶闸管额定通态电流方均根值(即有效值)： I_{RMS}

$$I_{RMS}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m^2 \sin^2 \theta d\theta = \pi^2 \times I_{T(AV)}^2 / 4$$

$$I_{RMS} = 1.57 \times I_{T(AV)} \text{-----} (2)$$

2、两只单独封装的晶闸管反并联交流有效值:IRMS

如图 b, 两只独立封装可控硅反并联后形成一个双向可控硅, 因双向可控硅晶闸管额定电流不能用平均值标称 (因流过的电流为交流电, 平均值为零), 所以只能用交流有效值 IRMS 标称。

由公式 (1), 每个晶闸管通过的半波峰值均为 $I_m = \pi \times I_{T(AV)}$, 正负两个半波刚好组成一个完整的正弦波, 该正弦波峰值为 $\pi \times I_{T(AV)}$, 所以流过 MTX 模块的额定有效值 (方均根值):

$$I_{RMS} = \frac{\pi \times I_{T(AV)}}{\sqrt{2}} = 2.22 \times I_{T(AV)} \text{-----} (3)$$

3、MTX 型号模块交流有效值 I_{RMS}

如图 c, MTC 型号模块从外部将电极 1 和 2 联接在一起后, 就是 MTX 型号模块, 反并联形成一个双向可控硅晶闸管, 所以也只能用交流有效值 I_{RMS} 标称。公式 (3) 同样适用。

但由于考虑到 MTX 内部每个晶闸管额定平均电流 $I_{T(AV)}$ 值是在单独测试情况测得的, 双管芯同时工作时 (严格说相差 10ms 交替导通), 管芯之间热量相互会有一些影响, 故按 $I_{RMS} = (1.6-2.0) \times I_{T(AV)}$ 考虑平均值和方均根 (即有效值) 为宜。

● 晶闸管耐压的参数: VDRM;VRRM; VDSM;VRSM

晶闸管电压指标有: 断态正向不重复峰值电压 (VDSM); 断态正向重复峰值电压 (VDRM); 断态反向不重复峰值电压 (VRSM); 断态反向重复峰值电压 (VRRM)。以上概念中重复意味着晶闸管阴阳极承受的电压在一定的漏电流范围内是可以重复施加的。不重复意味着晶闸管阴阳极承受电压的最大峰值, 超过此最大值漏电流变大, 超过额定值 (室温和结温时漏电流额定值不一样)。所以讲耐压指标时, 不能脱离漏电流, 漏电流指标生产商在产品说明书中或合格证中都给出了明确的范围。一般地说, 室温漏电流在 2mA 以下; 结温漏电流在 20mA 以下。

对重复峰值电压和不重复峰值电压, 国外一般按: $VDRM = VDSM - 100V$; $VRSM = VRSM - 100V$ 标称。国内一般按: $VDRM = VDSM - 200V$; $VRRM = VRSM - 200V$ 或 $VDRM = VDSM \times (80-90) \%$; $VRRM = VRSM \times (80-90) \%$ 标称。

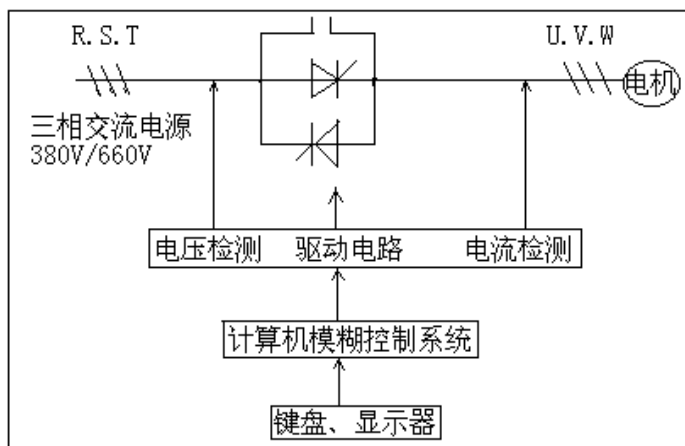
三、晶闸管在电机软起动中的应用:

电机起动时起动电流一般为额定电流 (I_e) 的 6-7 倍, 因此在起动瞬间对电网冲击很大。对变压器的容量要求更高。同时也对其它的用电设备造成很大的影响。

因此, 实际工作中容量超过 7.5KW 的电机都要求降压启动。传统的降压启动方式有: 磁控降压启动器、自耦降压启动、 Δ/Y 变换降压启动等。不管那种方式对电网还是存在一或两次的大电流冲击。采用晶闸管数字控制软启动器, 具有比上面介绍的启动器更加优越的好处。主要表现在降低电机的起动电流、降低配电容量, 避免增容投资; 降低起动机机械应力, 延长电机及相关设备的使用寿命; 起动参数可视负载调整, 易于改善工艺、保护设备。

1、晶闸管电机软启动器工作原理:

晶闸管在电机软起动器中的应用是一种利用晶闸管进行交流调压的应用，利用晶闸管可以相控（改变晶闸管导通的相位角）调压的特点。我们知道电机转子上的力矩是与加在定子上电压的平方成正比的，因此改变加在电机定子绕组上的电压，可改变电机转子上的转矩。从而可根据电机负载的具体情况，设定电机的起动电流。电机的起动电流按与额定电流（ I_e ）的比例，可设定电机起动电流为： $0.5 I_e$ ； I_e ； $2 I_e$ ； $3 I_e$ ； $4 I_e$ 。即限电流起动方式。其工作原理如下图：



（晶闸管电机软起动器工作原理示意图）

2、晶闸管的选择：

- 晶闸管是电机软起动器中最关键的功率器件，整机装置是否工作可靠与正确选择晶闸管额定电流、电压等参数有很大的关系。选型的原则应该首先考虑工作可靠性，即电流、电压余量倍数必须足够，其次应考虑经济性即性价比，最后应考虑安装美观、体积尽量减小等。对于低压电机（线电压为 380V），晶闸管的正反向重复额定电压（ V_{DRM} 、 V_{RSM} ）选择为 1200V 足够。对于高压 660V 的电机，则应至少选择电压为 2200V 以上的晶闸管；对于高压 1100V 的更高电压电机，晶闸管的耐压至少选择电压为 3500V 以上。
- 对晶闸管额定电流的选择，必须考虑电机的额定工作电流，一般来说，三相电机每相额定电流有效值（ I_e ）按： $I_e = (2.5-3) \times P_e$ （安培）（电机的额定功率 KW），即每一个千瓦（KW）相当于两个安培的电流。例如，一个 55KW 的三相交流电机，其每相额定电流有效值是 110A。考虑两倍以上放大余量，因此选择额定平均电流为 $275A / 2.22 \cong 125A$ 以上的平板式晶闸管，或选额定平均电流为 $275A / 1.8 \cong 150A$ 以上晶闸管模块（MTX 系列）。
- 各系列电机对晶闸管的选择列表如下，仅供参考，而且假设装置仅仅是用于电机软起动（即装置带旁路接触器），如果装置还用于电机节能经济运行，即装置不带旁路接触器，则对应的电流值应按 2 倍以上考虑，而且还必须保证足够的散热条件。

电机 (380V) 功率 (KW)	晶闸管额 定 电压 (V)	电机额定电流 I_e (A)	(软起装置) 推荐晶闸管 额定电流 I_T (A)	晶闸管封装形式
5.5	1200	11	MTX-40A	模块
7.5		15	MTX-40A	
11		22	MTX-55A	
15		30	MTX-55A	
17		34	MTX-70A	
22		44	MTX-90A	

30		60	MTX-110A		
37		74	MTX-135A		
45		90	MTX-160A		
55		110	MTX-182A		
75		150	MTX-200A		
90		180	MTX-250A		
110		220	MTX-350A		
135		270	MTX-400A		
150		300	MTX-500A		
200		400	KP600A		平板式晶闸管
250		500	KP800A		
280		560	KP1000A		
320		640	KP1000A		
400		800	KP1200A		
450		900	KP1500A		
500		1000	KP1500A		

- 在电机软起动装置中,由于多是采用两个独立晶闸管器件反并联组成的交流相控调压。正负半周各对应一个晶闸管工作,因此对两个反并联器件参数的一致性要求较高,包括晶闸管触发参数、维持电流参数等也都尽量要求挑选一致。尽量让正负半波对称,否则会有直流成分电流流过电机,由于电机为线圈绕组,负载为电感性,因此过高的直流份量会使得电机定子发热严重,甚至会烧毁电机线圈绕组,从而使电机报废。从这点来看,晶闸管模块由于管芯在装配之前已进行过严格挑选,因此其一致性还是有所保障的。另一方面,在触发线路设计中,尽量采用强触发的方式,以能兼容器件触发参数的差异。

四、晶闸管的保护

由于晶闸管的击穿电压接近工作电压;线路中产生的过电压易造成器件电压热击穿;同时其热容量小,工作时自身发热严重,如果不及时将这些热量排除,器件内PN结温(T_j)势必超过晶闸管的结温极限值(一般 $T_{jmax}=125^{\circ}$),造成晶闸管的永久性损坏.因此,在实际使用中除合理选择器件的额定电压和额定电流值以外,还必须采取足够的散热措施,保证器件长期可靠的工作。

● 过电压保护:

凡超过正常工作时晶闸管应承受的最大峰值电压称为过电压。电路产生过电压的外部原因主要是雷击、电网电压激烈波动或干扰,内部原因主要是电路状态发生变化时积累的电磁能量不能及时消散。根据产生的原因可分为两类:开关过电压和雷击干扰过电压。因此必须采取必要的措施,使晶闸管承受的过电压限制在正反向不重复峰值电压 V_{RSM} 、 V_{DSM} 值以下。

● 晶闸管关断过电压(换流过电压)保护:

当晶闸管关断、正向电流下降到零时,管芯内部会残留许多载流子,在反向电压的作用下会瞬间出现反向电流,使残存的载流子迅速消失,形成极大的 di/dt 。即使线路中串联的电感很小,由于反向电势 $V=-Ldi/dt$,所以也能产生很高的电压尖峰(或毛刺),如果这个尖峰电压超过晶闸管的最大峰值,就会损坏器件。

对于这种尖峰电压一般常用的方法是在器件两端并联阻容吸收回路,利用电容两端

电压不能突变的特性吸收尖峰电压，阻容吸收回路要尽可能靠近晶闸管，引线要尽可能短，最好采用无感电阻，千万不能借用门极中辅助阴极线（因辅助阴极线线径很细，回路中过大的电流会将该线烧断）。阻容元件的选取值按以下表格中经验值和公式选取：

晶闸管阻容吸收元件经验数据

晶闸管额定电流 (A)	26	50	70	100	160	200	300	500
电阻 R (Ω)	60~ 100	40~ 80	30~ 50	20~ 40	10~ 20	10~ 20	5~ 10	2
电容 C (μF)	0.15	0.2	0.5	0.5	1	1	1	1

表中电阻的功率由下式确定：

$$P_R = f C U_m^2 \times 10^{-6}; \quad \text{电容耐压一般为晶闸管电压 1.3 倍}$$

式中：f---频率 (50HZ)； P_R ---电阻功率 (W)； U_m ---晶闸管工作峰值电压 (V)；C---串联的电容 (μF)

● 交流侧过电压极其保护：

交流侧电路在接通、断开时会产生过电压，对于这类过电压保护，目前主要采用压敏电阻和瞬态电压抑制器 (Transient Voltage Suppressor)，简称 TVS。压敏电阻是一种非线性器件，它是以氧化锌为基体的金属氧化物，有两个电极，极间充填有氧化铋等晶粒。正常电压时晶粒呈高阻仅有 100uA 左右的漏电流，过电压时引起电子雪崩呈低阻使电流迅速增大吸收过电压。其接法与阻容吸收电路相同，在交、直流侧完全可以取代阻容吸收，但不能用作限制 dv/dt 的保护，故不宜接在晶闸管的两端。

TVS 类器件当其两端受到瞬时高压时，能以极高的速度 ($10^{-12}/S$) 从高阻变为低阻，吸收高达数千瓦的浪涌。TVS 的部分型号性能参数如下表：

型号	能量等级 P_m	击穿电压 V_{BR}	备注
P6KE8CA—440CA	600W	6.8--440V	双向二极管封装
VSC10P5—24	500—8250W	5--24V	SIP 封装 单向 TVS 阵列
SMDA03A—24C	300W	5--24V	4 对双向 SOIC8 管封装
90KS200C	90000W	200V	双向 (军工级) 模块结构
704-15K36T	15000W	28V	功率电源保护用 (军工级)

● 过电流保护：

◇ 串接交流进线或采用漏抗大的整流变压器，利用电抗限制短路电流，但此种方法在交流电流较大时存在交流压降。

◇ 电流检测和过流继电器

通过电流检测实际电流值并与设定值进行比较，当实际电流值超过设定值时，通过比较器输出电压值控制移相角度增大或拉逆变的方法减少电流。有时须停机。

◇ 快速熔断器

与普通熔断器比较，快速熔断器是专门用来保护半导体功率器件过电流的，它具有快速熔断的特性，在流过 6 倍额定电流时其熔断时间小于 50Hz 交流电的一个周期 (20 ms)

快速熔断器可接在交流侧、直流侧或与晶闸管桥臂串联，后者直接效果最好。一般说来快速熔断器额定电流值 (有效值) 应小于被保护晶闸管的额定有效值，同时要大于流过晶闸管的实际有效值。

- 电压及电流上升率的保护

- ◇ 电压上升率 (dv/dt)

晶闸管阻断时，其阴阳极之间相当于一个结电容，当突加阳极电压时会产生充电电容电流，此电流可能导致晶闸管误导通。因此，对管子的最大正向电压上升率必须加以限制。一般采用阻容吸收元件并联在晶闸管两端的办法加以限制。

- ◇ 电流上升率 (di/dt)

晶闸管开通时，电流是从靠近门极区的阴极开始导通然后逐渐扩展到整个阴极区直至全部导通，这个过程需要一定的时间。如阳极电流上升太快，使电流来不及扩展到整个管子的 PN 结面，造成门极附近的阴极因电流密度过大，发热过于集中，PN 结温会很快超过额定结温而烧毁，故必须限定晶闸管的电流上升临界值 (di/dt)。一般在桥臂中串入电感或铁淦氧磁环。

- 温度保护

模块产品与其它功率器件一样，在实际工作中，由于自身功耗，会引起管芯温度的升高；结温急剧上升，直至达到或超过额定结温 (T_{jm})。如果不采取措施将这种热量散发出去，就会致使管芯特性变软、漏电流增加，直至完全过热击穿损坏。晶闸管的损耗主要由导通损耗(导通平均电流与导通平均压降乘积)；开关损耗、门极损耗三部分组成，其中最主要的是正向导通损耗。

因此，晶闸管在实际使用中，必须加以冷却(自然冷却或强迫风冷)，有条件时采用热管或水冷方式。综上所述，考虑散热问题的总原则就是控制模块中管芯的结温 T_j 不超过手册中给定的额定结温 (T_{jm})。

在实际工作中，结温不容易直接测量到，因此不能用来作为是否超温的判断依据。通过控制散热器最高温度处(壳温 T_c)来控制结温是一个有效的方法。由于 PN 结温和壳温存在着温度梯度关系，通过温控开关可以很容易地测量出晶闸管与散热器接触处表面最高温度处的温度。用温控开关测量出的壳温是否超过额定值来保护晶闸管正常工作。在实际线路设计中增加一个或两个温度控制电路，分别控制风机的开启或主回路的断电(停机)，一般控制散热器最高处温度不超过 75°C 。这样就可以保护晶闸管在额定结温下正常工作。