

对可控硅调压整流电路若干问题的分析

朱 厚 荣

摘 要

本文比较了两种可控硅整流电路,在这两种电路中把反并联可控硅接入阳极变压器。文章介绍了电路的过压和过流的保护方法并给出了电路的计算公式和经验数据。

【关键词】 可控硅整流;反并联;同步

引 言

从50年代到70年代,我国高频大功率加热设备主要采用以闸流管为高压可控整流元件的整流电路,利用改变闸流管栅极电位以调整导通角,使输出直流高压能在50~100%范围内均匀改变(电压范围为6.7~13.5 kV)。其原理电路如图1所示:

闸流管可控整流电路,优点是设备成本低,输出直流高压能在一定范围内自动稳定(采用闭环控制)。缺点是工作寿命短,对工作环境温度要求苛刻,一般为+15~+35℃,温度过高,闸流管易于逆弧,温度过低,管内的水银不能充分蒸发,管压降大,阴极容易损坏,闸流管工作前灯丝需要预热,工作过程中灯丝还要消耗功率。因此,闸流管的应用受到很大限制。

近几年来,随着我国半导体工业的迅速发展,已广泛采用可控硅交流调压整流电路,即在阳极变压器一次侧绕组中,把三对反并联可控硅与负载串联后接到交流电源上,通过控制可控硅的导通角,实现电压调节的目的,二次侧则使用高压硅整流元件取代闸流管整流。这种电路输出直流高压能从0~100%之间均匀改变(调压范围为0~13.5 kV)。其原理电路如图2所示:

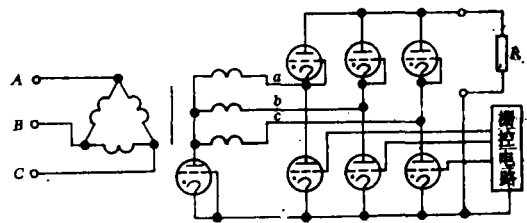
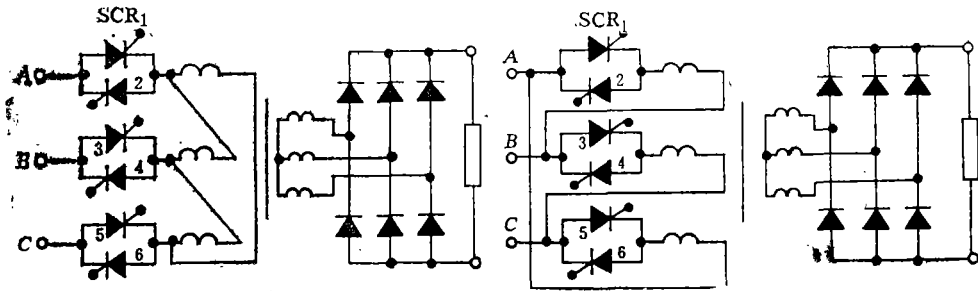


图1 闸流管可控整流电路



(a) 外三角形线路

(b) 内三角形线路

图 2 可控硅调压整流电路

这种电路优点很多：既可调压又可稳压，易于组成各种参数（温度、电压、电流……）的自动控制系统；工作寿命长（约为 10^4 小时），体积小，重量轻，工作环境温度要求较宽（ $-10 \sim +55^\circ\text{C}$ ），节约电能显著；整流效率高，使用维护方便，故障率低。缺点是：线路比较复杂，当控制角 α 较大时，线路功率因素较低。承受过载能力较差。

对可控硅调压整流电路存在的不足之处，只要在线路上采取适当措施和加强过载保护，问题便能得到妥善解决。这种电路获得了广泛的应用，并在实践中取得了良好的经济效益。

1 反并联可控硅接入变压器绕组中的两种方案的分析

图 2 (a) 为外三角形线路，可控硅串接在三角形绕组外面。这里由于线电流对称，因而只有奇次谐波，其中三次谐波被抵消，所以这种电路输出谐波分量低，对邻近通讯电路的干扰小，减轻了电路滤波的要求，这是它的优点。但是这种电路中各相不能单独工作，因为三相交流电路中每一瞬间一相流进的电流须从其它相流出，因此必须保证至少有二相可控硅同时导通，负载上才有电流流过。这就是说仅一相可控硅导通不能构成电流回路，任何一相可控硅的工作都受另外二相可控硅工作的影响。例如在某一瞬间当 A 相可控硅 SCR_1 触发导通时，必须让 SCR_4 或 SCR_6 也同时触发导通，否则电流不成回路。因此在外三角形线路中要求三相触发脉冲必须保证严格的同步、对称、平衡。即每相触发脉冲不仅幅度相同，且必须要在同一时刻到达，保证反并联可控硅工作在相同的导通角情况下，正负两个半周电流相等，也即回路中没有直流分量通过（否则将引起变压器直流磁化，使激磁电流大为增加，造成可控硅过载损坏）。这样的要求将给调试和使用带来相当大的困难。

图 2 (b) 为内三角形线路，可控硅串接在三角形绕组内。这种电路实质上是由三个单相可控调压器所组成，所不同的是这里可控硅耐压比单相调压时要高，应按线电压选用。这种线路任何一相可控硅的工作基本上是独立的，不受其它二相可控硅工作的影响，避免了各相可控硅工作的互相牵制，因而对三相触发脉冲的同步、对称、平衡条件的要求比起外三角形电路就放宽得多。这给调试和使用带来很大的方便。其次这里反并联可控硅是接在相绕组内，因此流过可控硅电流的有效值是外三角形电路中电流有效值的 $1/\sqrt{3}$ ，这是它的又一优点。不足之处是它遭受浪涌电压的袭击较外三角形电路严重，因可控硅接在三角形绕组

内，阻挡了三次谐波电流通路，但只要采取有效防护措施，该问题可以解决。

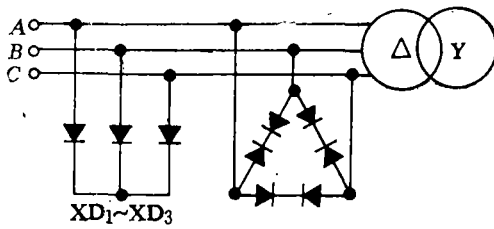
综上所述：内三角形线路具有许多优越性，而不足之处又能妥善解决，因而内三角形线路已得到广泛应用。

2 可控硅调压整流电路的过电压保护

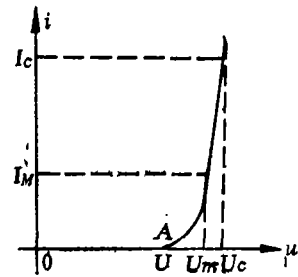
可控硅调压整流电路产生过电压的途径很多：经电网涌入的由雷电产生的过电压，阳极变压器初级拉闸、合闸产生过电压，熔断器熔断时产生过电压，负载开路或轻负载时产生过电压，硅元件关断时产生过电压等。虽然过电压持续时间很短（几微秒~几毫秒），但其瞬变电压幅值很大，可能达到正常工作电压值的几倍，甚至几十倍。这样会造成电路误动作，还可能损坏设备。可控硅调压整流电路承受过载能力较差，因此对过电压必须采取有效防护措施。

2.1 硒堆保护

硒堆保护电路常用于阳极变压器低压侧，用来作为电网过电压的吸收装置，其连接方式如图 3 (a) 所示：



(a) 硒堆保护电路



(b) 硒堆反向特性

图 3 硒堆反向特性和保护电路

硒堆的反向具有较陡的非线性特性，如图 3 (b) 所示。

图中： U 为额定运行电压峰值； U_m 、 I_m 为极限电压，电流； U_c 、 I_c 为击穿电压，电流。

平常情况，硒堆所加反向电压在 $0 \sim A$ 范围以内时，硒堆反向电阻很大，反向漏电流很小。当硒堆所加外电压大于极限电压 U_m 时，硒堆反向电阻显著减小，接近击穿状态，这时反向电流急剧上升，从而把过电压能量通过大电流转化为热能消耗在硒堆上。当硒堆外加电压达到击穿电压 U_c 时，硒堆发生击穿，出现火花，硒堆能够吸收更多的过电压能量，从而阻止了过电压的危害。当过电压消失后，硒堆利用本身火花击穿后所具有的绝缘自恢复能力，又很快恢复正常功能。

硒堆片数 N 由下式计算：

$$N = (1.3 \sim 1.5) \frac{\text{硒堆两端电压(有效值)}}{\text{每片反向击穿电压(有效值)}}$$

国产硒片，其反向击穿电压（有效值）分别为 20V，25V，30V 几种规格。一般采用面积为 $60 \times 60 \text{mm}^2$ 的方形硒片。

2.2 阻容保护

常用阻容保护电路如图 4 所示。这种电路用于阳极变压器一次侧和二次侧。

阻容保护电路是利用电容两端电压不能突变的特性。为防止电容与变压器电感产生谐振，这里串入了阻尼电阻。

电容，电阻的计算公式如下：

$$C_1 = K_G \cdot \frac{I_{01}}{f \cdot U_{1L}} \quad (\mu\text{f}), \quad C_2 = K_G \cdot \frac{I_{02}}{f \cdot U_{2L}} \quad (\mu\text{f}),$$

$$\text{取 } C_1 \text{ 耐压} \geq 2U_{1L}, \quad C_2 \text{ 耐压} \geq 2U_{2L}。$$

$$R_1 = K_R \frac{U_{1L}}{I_{01}} \quad (\Omega), \quad R_2 = K_R \frac{U_{2L}}{I_{02}} \quad (\Omega)。$$

$$P_{R1} = 3 \left[\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_1} \right)^2} \right]^2 R_1 \quad (\text{W}), \quad P_{R2} = 3 \left[\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_2} \right)^2} \right]^2 R_2 \quad (\text{W})。$$

式中： I_{01} 为一次绕组空载相电流 (A)； I_{02} 为一次折合到二次的相电流 (A)； U_{1L} 为一次线电压有效值 (V)； U_{2L} 为二次线电压有效值 (V)； f 为电源频率； K_G 为取 10 000 (整流电路为三相桥式时)； K_R 为取 0.3 (整流电路为三相桥式时)； P_{R1} 为电阻 R_1 的功率数； P_{R2} 为电阻 R_2 的功率数。

2.3 压敏电阻保护

常用压敏电阻保护电路如图 5 所示。低压侧的 3 支压敏电阻 MYL 作电网雷击过电压保护，高压侧 4 支压敏电阻 MYG 作操作过电压保护。

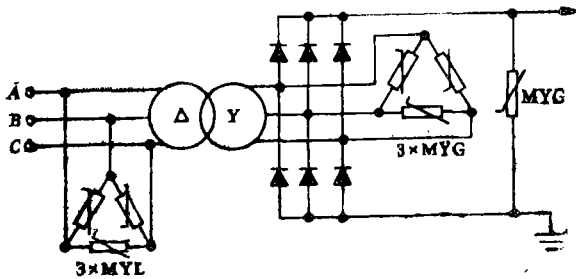


图 5 压敏电阻保护电路

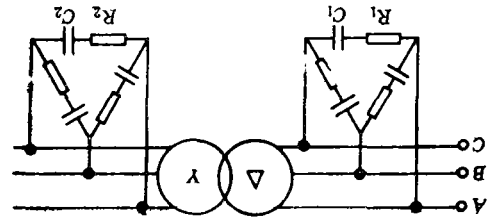


图 4 阻容保护

压敏电阻具有优异的电涌吸收能力，在正常电压下，它呈高阻抗状态，电流很小；当遇上过电压后，阻抗显著减小，电流猛增，把过电压能量通过大电流转化为热能消耗在压敏电阻上，从而阻止过电压的发生。与硒堆一样，过电压结束后，压敏电阻又很快恢复正常功能。压敏电阻对于急速的过电压响应极快 ($< 50 \text{ns}$)，是目前国内外广泛采用的一种过电压保护元件。

压敏电阻的选用，可由下式确定：

$$U_{1mA} \geq 1.48U_{pe}$$

式中, U_{1mA} 为压敏电阻的端电压, 即压敏电压; U_{pe} 为电路额定电压峰值 (指压敏电阻器连接端子间的额定电压峰值)。

根据实践经验, 压敏电阻作为防护操作过电压时, 通流量选用 $1 \sim 5 \text{ kA}$; 作为防护雷击过电压时, 通流量选为 $5 \sim 20 \text{ kA}$ 。

2.4 硅元件的过电压保护

硅元件由导通转为截止时, 在反向电压作用下产生反向电流, 使残存的载流子恢复, 此反向电流将在元件两端产生过电压, 对可控硅而言, 即是关断过电压; 对硅整流元件而言, 即是换相过电压。

2.4.1 可控硅过电压的保护

常采用阻容保护和压敏电阻保护两种形式, 其电路连接如图 6 所示:

阻容保护电路的工作原理前文已讨论过。

这里串一电阻 R 有两个作用: 其一是阻尼电容与线路电感产生谐振; 其二是限制电容放电电流的上升率。在可控硅尚未导通时, 电容是充电的, 一旦可控硅触发导通, 电容立即经可控硅形成短路的放电回路, 如果没有电阻 R 限流, 那么放电电流瞬时值可能很大, 而可控硅本身电流上升率是有限制的, 超过允许值有可能烧坏元件, 故必须串入电阻以限制电容放电电流。

可控硅阻容保护电路其电阻电容的选用一般采用附表经验数据:

附表

| 可控硅额定电流 (A) | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 |
|-----------------------|------|-----|------|-----|------|-----|
| C (μf) | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | 0.5 |
| R (Ω) | 110 | 100 | 80 | 40 | 20 | 10 |

(电容耐压和电阻功率的选取与前文相同)

可控硅压敏电阻保护原理、压敏电阻的选用也与前文方法相同。

2.4.2 硅整流元件的过电压保护

与可控硅相似, 硅整流元件通常采用阻容保护和压敏电阻保护两种形式, 电路连接如图 7 所示:

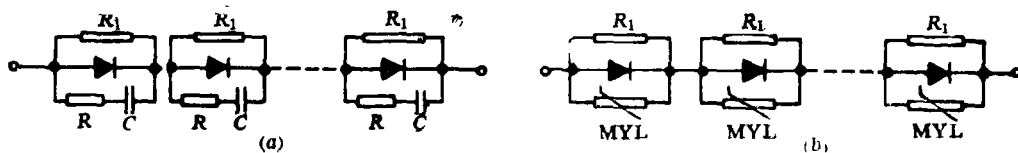


图 7 硅整流元件的过电压保护

在可控硅调压整流电路中，高压侧的硅整流元件通常由若干数量硅二极管串联组成一组，用以代替一支闸流管。为消除过电压，在每个串联的硅二极管上并联一个阻容保护电路，如图 7 (a) 所示，或并联一个压敏电阻，如图 7 (b) 所示。

在阻容保护电路中，电阻电容可按下述经验数据范围选用：

$C = 0.1 \sim 1 \mu\text{f}$, $R = 0 \sim 30 \Omega$, 电容耐压 $= (1.4 \sim 2)U_{PR}$, 电阻功率：

$$P_R = 3 \left[\frac{U_{PR}}{\sqrt{R^2 + (1/2\pi fC)^2}} \right]^2 R \text{ (W)}。$$

式中 U_{PR} 为每片芯片所承受的反向峰值电压。

在硅整流元件上并联电容保护电路后只保证了硅元件在换相时过电压能够均匀分配，但还不能解决各串联硅元件直流电压的均匀分配问题，因为各硅元件反向漏电流特性不一致，导致各元件承受的反向电压不相同，这也可能造成元件的击穿损坏。为了解决这一问题，通常在每个串联的硅元件上再并联一个均压电阻 R_1 ，采用电阻均压后，各串联硅元件的反向电压将趋于均匀分配。

均压电阻 R_1 的阻值应比元件漏电阻值小 3 ~ 5 倍，一般 R_1 按下式决定：

$$R_1 = (0.03 \sim 0.06) \frac{U_{PR1}}{I_0} \text{ (k}\Omega\text{)}$$

$$P_{R1} \geq K \frac{(U_{PR1}/1.6)^2}{R_1} \text{ (W)}$$

式中： U_{PR1} 为硅元件额定反向峰值电压 (V)； I_0 为硅元件的最大反向漏电流 (mA)； K 为系数，单相时取 0.25，三相时取 0.4。

硅整流元件在采用压敏电阻 MYL 保护时，其压敏电压 U_{1mA} 的选用与前文相同。

上面对几种常用过电压保护电路进行了讨论。在电路设计中，应针对具体电路产生过电压的原因，适当选用其中部分保护电路即可，不必将上述各种保护电路全部用上，这不仅造成浪费，还会给设备使用和维护带来困难。

3 可控硅调压整流电路的过电流保护

可控硅调压整流电路产生过电流主要原因：输出回路短路或过载产生过电流；阳极变压器合闸时产生很大激磁电流；电路不正常或受干扰使可控硅误触发产生过电流等。常用的过电流保护电路如图 8 所示：

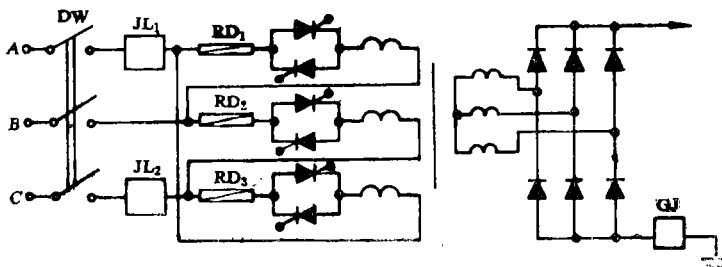


图 8 过电流保护电路

3.1 用快速熔断器作过电流保护

图8中 $RD_1 \sim RD_3$ 为快速熔断器。这里不能采用普通熔断器，因为可控硅耐受过流能力很小，普通熔断器熔断时间太长，用它来保护可控硅很可能在可控硅已烧坏而熔断器还未熔断，这就起不了保护作用。专为保护可控硅的快速熔断器，是将银质熔丝装于管内，充以石英砂，因此它具有导热性好，热容量小的特点。电路上一旦发生过流，它可以在可控硅损坏之前先行熔断，防止可控硅因过流而损坏。

快速熔断器按电流定额选用，它的电流定额应尽量接近电路实际工作电流的有效值。

3.2 用自动空气断路器作过电流保护

图8中DW为自动空气断路器，用它作电源开关对过电流能起保护作用。它有手动合闸和电动合闸两种方式，本身带有过电流脱扣和失压脱扣装置。遇到电路上发生过电流时，自动空气断路器能迅速拉闸，切断输入电源，消除过电流造成的危害。

我国高频大功率加热设备的自动空气断路器常采用DW10系列万能式自动开关，它按电流大小分成不同规格，如DW10—200A；DW10—400A；DW10—600A等。选用时按电路实际电流有效值来选用。

3.3 用过流继电器保护

图8中 JL_1 和 JL_2 为交流过流继电器，GJ为直流过流继电器。当电路过载时，过流继电器立即产生动作，从而切断相应电源。

这种保护措施对过载是有效的，但对于短路故障则因继电器的动作及自动开关跳闸都需要一定时间，故只在短路电流不大的情况下才能起保护作用。为此，必须设法限制短路电流。

过流继电器也是按电路实际电流有效值选用。

参 考 文 献

- [1] 王其英. 可控硅稳压电源. 人民邮电出版社, 1984.
- [2] 天津师范学院. 高压硅堆技术. 国防工业出版社, 1977.
- [3] 刘有正. 电子设备电源保护技术. 科学技术出版社, 1983.
- [4] 陈新谋, 刘悟日. 高频介质加热技术. 科学出版社, 1979.

Analysis to Some Problems in the Silicon-controlled Voltage Regulating Rectifier Circuit

Zhu Hourong

Abstract

This paper compares two silicon-controlled rectifier circuits. An inverse parallel controlled silicon is connected with the anode transformer in these circuits.

The protective methods of the over voltage and over current of the circuit are introduced and some calculated formulae and experimental data for the rectifier are provided.

[Key words] silicon-controlled rectifier; inverse parallel; synchronism