

硅整流器的过电压保护*

樊元武

(上海电车供电所)

提 要

硅整流器过电压损坏事故常有发生,因此本文介绍的过电压保护对国民经济有一定的价值。本文叙述了硅整流器过电压的起因和防止方法。本文还介绍了新型浪涌吸收器用压敏电阻的选择方法。本文所介绍的保护措施也适用于其他半导体装置。

一、交流侧过电压

当发生大气放电现象时,过电压的电磁波将沿着输电线从发生地点传往变压器。部分电磁波将被变压器反射回去;另一部分电磁波将传到变压器的初、次级侧,亦即传到硅整流元件上,这是由于变压器初、次级侧间存在着电容的缘故。因为过电压电磁波首先传到变压器初级侧,所以保护装置必须装在初级侧。保护装置一般采用避雷器或放电器(也有采用压敏电阻浪涌吸收器的)。

当整流器空载时,若切断变压器的初级侧电路(在这种情况下,变压器仅通过激磁电流,此项电流为纯感性电流),则所产生的操作过电压为最大。这是所有产生过电压情况中最恶劣的情况,现在就研讨这种情况。

二、硅整流器的等效电路

硅整流器的等效电路如图1所示,在此等效电路中,假定:(1)硅整流器处于空载状态下;(2)变压器的有效电阻很小;(3)硅整流元件的反向电阻等于无穷大;(4)硅整流元件的电容很小;(5)变压器铁损等效电阻可忽略不计;(6)变压比不随频率而变化。

现在论述三相桥式整流电路空载状况下切断其变压器时的过电压计算方法。

假定初级侧的开关是在瞬间 A 切断的(图2)。在此瞬间,通过变压器的电流为 i_A ,其内所储存的电磁能量 W_L 为:

$$W_L = \frac{1}{2} L_{os} i_A^2, \quad (1)$$

式中, L_{os} ——空载时的总电感。

当初级侧的开关切断时,此项能量将充入变压器的并联电容内,而转变为电场能 W_C :

* 1980年12月20日收到。

$$W_c = \frac{1}{2} C U_c^2, \quad (2)$$

式中, C ——变压器的电容; U_c ——变压器电容处的电压。

由于 $W_L = W_c$, 所以,

$$\frac{1}{2} L_{os} i_A^2 = \frac{1}{2} C U_c^2; \quad (3)$$

亦即, 变压器电容处的电压或变压器上的电压 U_c 等于:

$$U_c = i_A \sqrt{\frac{L_{os}}{C}}. \quad (4)$$

在最不利的情况下, 亦即当 $i_A = I_u \sqrt{2}$ (I_u ——变压器的激磁电流) 时, U_c 等于:

$$U_c = I_u \sqrt{2 \frac{L_{os}}{C}}. \quad (5)$$

从(5)式可见, 变压器电容对过电压数值具有决定性的影响。当电容值增大时, 过电压值将会降低。反之, 当变压器激磁电流 I_u 增大时, 过电压值将会升高。

因此, 为了降低过电压值, 整流电路的参数必须符合: (1) 变压器激磁电流应尽可能小; (2) 变压器线圈应并联电容器, 以增加变压器的电容。

根据硅整流元件的容许过电压值

$$U_{最大} = k_u E_p \sqrt{2}, \quad (6)$$

(式中, k_u ——容许过电压系数) 可求出变压器并联电容器的容量^[3,5,9]:

$$C = 1590 \frac{I_u^* I_p}{k_u^2 f E_p} (\mu F), \quad (7)$$

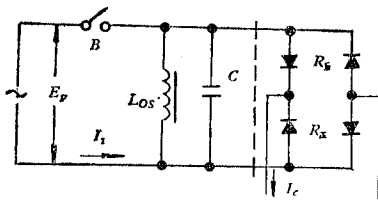


图1 整流装置的等效电路

E_p ——交流电源电压; B ——开关; L_{os} ——空载时的总电感; C ——变压器电容; $R_{反}$ ——硅整流元件的反向电阻; $R_{正}$ ——硅整流元件的正向电阻

Fig. 1 The equivalent circuit of the silicon rectifier
 E_p ——AC supply voltage, B ——switch, L_{os} ——equivalent inductance under no-load condition, C ——the capacitance of the transformer, $R_{反}$ ——the reverse resistance of the diode, $R_{正}$ ——the forward resistance of the diode.

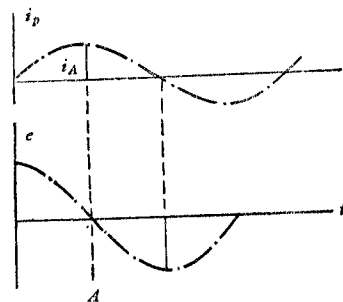


图2 变压器在空载状态下开断时的电压曲线和电流曲线

Fig. 2 The voltage and current curves of the transformer under open-circuited no-load conditions.

式中, I_u^* ——激磁电流相对值(%); I_p ——初级电流有效值(A); E_p ——初级电压有效值(V); f ——电源频率(Hz).

由于在推算(7)式时,忽略了许多因素,但是实际上这些因素对过电压值有所影响,因此,实际上,(7)式应具有下列形式^[3]:

$$C = (200-700) \frac{I_u^* I_p}{k_u^2 f E_p} (\mu F); \quad (8)$$

容许过电压系数 k_u 根据整流元件反向电压储备量来选择.

现在再来研究忽略了哪些因素. 根据分析和实验结果,这些因素是: (1) 前述假定条件; (2) 当过电压振荡频率为 10^3-10^4 Hz 时, 变压器空载时的电感值会降低一个数量级; (3) 变压器初级侧不一定在激磁电流等于最大值时切断; (4) 部分能量将在开关电弧中逸出. 因此, 并联电容器容量 C 的计算值往往与实验数据有所差别.

正确地选择开关具有特别重要的意义. 众所周知, 当采用桶形油开关时, 所发生的过电压是较小的. 相反地, 当采用具有灭弧介质的开关时, 则会发生很高的过电压, 例如当采用空气开关时, 就会发生很高的过电压. 这是由于过强的灭弧作用将使电弧在电流经过零值之前就被切断.

为了防止变压器电感与保护电容器之间发生谐振现象, 电容器应串接一无感电阻器 R .

在 $\omega L = 1/\omega C$ 时, 会发生谐振现象, 式中, $\omega = 2\pi f_r$. 据此, 可求出谐振频率 f_r :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (9)$$

电阻器 R 的阻值可由实验确定. 实验结果表明: 此项串联电阻对过电压值也有影响. 为使过电压为最小值, 电阻值 R 必须符合^[3,6]

$$R < R_v, \quad (10)$$

式中, R_v ——所谓的波冲阻抗, 其值等于:

$$R_v = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (11)$$

根据实际经验以及(8)、(10)与(11)式可求出 R 值:

$$R = \frac{k_R E_p}{I_u^* I_p}, (k_R \text{ 值见表 1 及表 2}). \quad (12a)$$

电阻器 R 的额定功率为^[8]:

$$P_R = (0.25 I_u^* I_p)^2 R (\text{W}); \quad (12b)$$

或者为北京变压器厂的经验式:

$$P_R = (2-3)(2\pi f E C \times 10^{-6})^2 R, \quad (12c)$$

式中, I_s ——次级电流有效值; E ——次级电压有效值.

三、防止操作过电压的保护迴路

RC 保护迴路在整流电路中的接法有好几种. 各种接法均有其优缺点. 下面介绍这

些接法:

(1) RC 保护回路通常接在变压器的输入端。这种接法与 RC 保护回路接在变压器次级侧的作用一样(当 RC 保护回路接在变压器次级侧时,工作电压较低,电容量较大)。

(2) RC 保护回路接在变压器次级侧时, RC 保护回路就可装在整流器柜内,它们能防止操作过电压,也能防止换相过电压。

(3) 将 RC 保护回路接在整流器直流侧时,则可采用电解电容器,此种电容器比金属-纸质电容器体积小、价格低。

各种整流电路交流侧的过电压保护回路示于图 3 和图 4。当过电压保护回路接在直流侧时,其接法示于图 5。保护回路的计算公式则列于表 1—3^[3,5,9]。

表 1 RC 回路接在变压器初级侧时, R 和 C 的计算公式

Tab. 1 The condenser and the resistor parameters of the suppression circuits on the primary side

整流电路类型	保 护 回 路			
	图 号	k_u	$C(\mu F)$	$R(\Omega)$
单相桥式 整流电路	3(a)	1.25	$400 \frac{I_u^* I_p}{f E_p}$	—
		1.5	$300 \frac{I_u^* I_p}{f E_p}$	—
	3(b)	1.25		$30 \frac{E_p}{I_u^* I_p}$
		1.5	$200 \frac{I_u^* I_p}{f E_p}$	$36 \frac{E_p}{I_u^* I_p}$
三相桥式整流 电路, 三相半波 整流电路, 双丫, 中性点联有平衡 电抗器的整流电 路	3(c)	1.25	$250 \frac{I_u^* I_p}{f E_p}$	—
		1.5	$200 \frac{I_u^* I_p}{f E_p}$	—
	3(d)	1.25		$20 \frac{E_p}{I_u^* I_p}$
		1.5	$150 \frac{I_u^* I_p}{f E_p}$	$25 \frac{E_p}{I_u^* I_p}$

表 2 RC 回路接在变压器次级侧时, R 和 C 的计算公式

Tab. 2 The condenser and the resistor parameters of the suppression circuits on the secondary side

整流电路类型	保 护 回 路			
	图 号	k_u	$C(\mu F)$	$R(\Omega)$
单相桥式 整流电路	3(a)	1.25	$400 \frac{I_u^* I_s}{f E}$	—
		1.5	$300 \frac{I_u^* I_s}{f E}$	—
	3(b)	1.25		$30 \frac{E}{I_u^* I_s}$
		1.5	$200 \frac{I_u^* I_s}{f E}$	$36 \frac{E}{I_u^* I_s}$

续表 2

整流电路类型	保 护 迴 路			
	图 号	k_u	$C(\mu F)$	$R(\Omega)$
三相桥式 整流电路	3(c)	1.25	$250 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	—
		1.5	$200 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	—
	3(d)	1.25		$20 \frac{E}{I_u^* I_s}$
		1.5	$25 \frac{E}{I_u^* I_s}$	
三相星形整流 电路, 双 Y、中性 点联有平衡电抗 器的整流电路	3(c)	1.25	$200 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	—
		1.5	$150 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	—
	3(d)	1.25		$25 \frac{E}{I_u^* I_s}$
		1.5	$30 \frac{E}{I_u^* I_s}$	

表 3 RC 迴路接在直流侧时, R 和 C 的计算公式

Tab. 3 The condenser and the resistor parameters of the suppression circuits on the DC side

整流电路类型	保 护 迴 路			
	图 号	k_u	$C(\mu F)$	$R(\Omega)$
单相桥式 整流电路	5	1.25	$1200 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	$250 \frac{E}{I_u^* I_s}$
		1.5	$900 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	$300 \frac{E}{I_u^* I_s}$
三相桥式整流电 路, 三相星形整流 电路, 双 Y、中性 点联有平衡电抗 器的整流电路	5	1.25	$700 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	$100 \frac{E}{I_u^* I_s}$
		1.5	$500 \frac{I_u^* I_s}{fE}$	$170 \frac{E}{I_u^* I_s}$

根据理论和经验, 也可用下式计算 C 值^[6,11]:

$$C = \frac{12P}{E^2} \mu F; \quad (13)$$

式中, P ——变压器的额定 VA 值; E ——变压器次级电压的有效值 (v); C ——接于交流侧或直流侧的保护电容器(频率不是 50Hz 时, 电容量应乘以 50/频率)。

由 (13) 式所求得的 C 值可使瞬变过电压降低到正常反向电压峰值的一半以下, 因此可使硅整流器得到可靠的保护。其串联电阻的阻值不大于负载电阻值的 10 倍是合适的, 而大 5 倍是有代表性的。串联电阻的额定功率的计算方法同前。

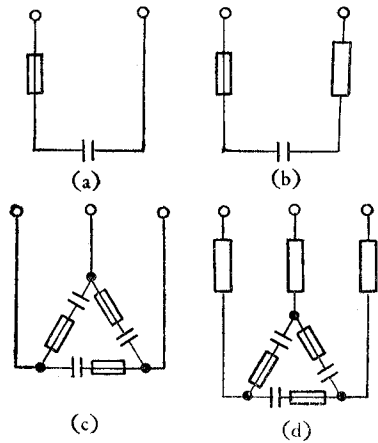


图3 各种整流电路交流侧的过电压保护迳路

- (a) 功率小于50kW的单相桥式整流电路;
- (b) 功率大于50kW的单相桥式整流电路;
- (c) 功率小于50kW的三相桥式整流电路;
- (d) 功率大于50kW的三相桥式整流电路

Fig. 3 The overvoltage suppression circuits of the rectifiers

- (a) Single-phase bridge rectifier with output power below 50kW
- (b) Single-phase bridge rectifier with output power above 50kW
- (c) Three-phase rectifier with output power below 50kW
- (d) Three-phase rectifier with output power above 50kW

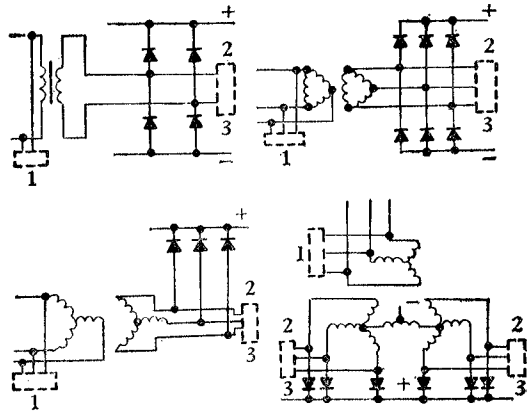


图4 防止交流侧过电压的保护迳路接法

- 1——接于主变压器初级侧的保护迳路;
- 2——接于主变压器次级侧的保护迳路;
- 3——接于主变压器次级侧的换相过电压保护迳路

Fig. 4 The overvoltage suppression circuits on the AC side.

- 1——suppression circuits on the primary side of the transformer
- 2——suppression circuits on the secondary side of the transformer
- 3——suppression circuits on the secondary side of the transformer

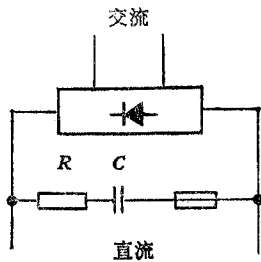


图5 接于整流器直流侧的过电压保护迳路

Fig. 5 The overvoltage suppression circuits on the DC side

注: 1. 对图3、图4、表1和表2的附图:

防止操作过电压的保护装置可不装在整流器柜内, 而装在开关柜或主变压器处。如果它被接在主变压器次级侧, 则它也可用来防止换相过电压。在这种情况下, 它应装在整流元件附近, 最好是直接装在整流器柜内。

当保护装置接在交流迳路内时, 建议采用金属-纸质电容器。

2. 对图5和表3的附图:

在电容器采用电解电容器的情况下, 选择保护电阻 R 时, 必须考虑电解电容器功率损失的等效串联电阻。测量结果指出, 当频率低于 10^4Hz 时, 此项等效串联电阻几乎恒定不变, 约等于 $50-100\Omega/\mu\text{F}$ 。金属-纸质电容器的等效串联电阻约为 $1\Omega/\mu\text{F}$ 。根据测量结果看出: 频率为 10^3Hz 时, 电解电容器的电容量将降低一个数量级, 因此当采用电解电容器时, 所选择的电容量应比计算值大。

3. 表1—3中 E 、 I_p^* 、 f 、 I_p 和 I_s 等符号的意义同前。

四、换相过电压

换相终了时,整流元件的电流会降低到零值,但不会立刻终止。由于 $p-n$ 结中存在剩余载流子,它将改变方向,而只有在剩余载流子消失后,它才会迅速地从负值下降到零值。当它迅速地从负值下降到零值时,由于主变压器中存在漏感,因而将在整流元件两端引起过电压。此项过电压与反向电压迭加在一起,可能引起整流元件的损坏。加接 RC 保护回路后,换相过电压值的计算方法与操作过电压值的计算方法相似。

影响换相过电压的主要参数是反向电流脉冲内的电量(电流的时间积分)以及换相短路电流值。

反向电流脉冲内的电量决定于硅整流元件的特性以及它们的制造工艺。对同一硅整流元件而言,在一定的正向电流情况下,此项电量往往是相同的。这样,当反向电流脉冲值增大时,闭塞时间就会缩短(反之亦然)。所以,当换相短路电流的倾斜度较大时,亦即当主变压器的漏感较小时,反向电流脉冲值也就较大。

为了降低加于整流阀的电压,就必须对换相过电压和反向电压初始突升值加以限制。反向电压初始突升值可用减小主变压器漏感的方法来降低。但是在这种情况下,换相时间将会缩短,反向电流脉冲值将会增大,因此,换相过电压的振幅值增大。此外,当主变压器具有小的漏感时,整流器的短路电流将会增大。所以,用减小主变压器漏感的方法是行不通的,必须采用其它方法。

五、防止换相过电压的有效方法

防止换相过电压最有效的方法是将硅整流元件并联以 RC 保护回路 (RC 保护回路也可抑制电压上升率 $\frac{dU}{dt}$, 并可起动态均压作用)。

在三相桥式整流电路的情况下, R 和 C 值可按下式选择^[6,8,9,10]:

$$R \geq \sqrt{\frac{20L}{C}}, \quad (14)$$

$$C \approx 0.5-1\mu\text{F}, \quad (15)$$

式中, L ——主变压器的漏感。

在双 Y 、中性点联有平衡电抗器的整流电路情况下, R 和 C 值可按下式选择:

$$R \geq \sqrt{\frac{12L}{C}}, \quad (16)$$

当 $C = 0.3-0.6\mu\text{F}$ 时, $R = 400-250\Omega$ 。

所选用电阻器的额定功率为:

$$P_R = (2-3)I_{RC}^2 R, \quad (17)$$

式中,

$$I_{RC} = \frac{0.35 \times \text{硅元件反向不重复峰值电压}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C \times 10^{-6}}\right)^2}}. \quad (18)$$

六、用压敏电阻浪涌吸收器作过电压保护

国产 MY31 型压敏电阻浪涌吸收器是一种性能良好的过电压保护器件,其电阻值随所加电压而变化。当所加电压很高时,其电阻急剧下降,使电压急剧降低。

压敏电阻浪涌吸收器的主要参数如下:

(1) 标称电压 (U_{1mA}) 它是指浪涌吸收器流过 1mA 直流(或脉冲峰值)电流时,浪涌吸收器两端的电压。

(2) 通流容量 它是以 8 或 20 μ s 波形冲击电流、每隔 5min 冲击 10 次、标称电压 U_{1mA} 变化小于 -10% 时的最大电流幅值。

(3) 漏电流 它是浪涌吸收器加 $U_{1mA}/2$ 直流电压时测得的、流过浪涌吸收器的电流。

(4) 残压 它是浪涌吸收器有放电电流流过时,两端的电压降。例如 U_{100A} 为放电电流达 100A 时浪涌吸收器两端的电压。

MY31 型压敏电阻吸收器可用于硅变流装置中吸收交、直流侧操作过电压和换相过电压。对于大功率硅整流器,前述阻容吸收装置的电力电容值不易选定,且浪费电能。采用 MY31 型浪涌吸收器可节省基建投资,节约电能。

MY31 型浪涌吸收器只能抑制过电压,不能抑制 $\frac{dU}{dt}$ 。在 $\frac{dU}{dt}$ 比较高的场合,可控硅整流元件应加装 RC 保护回路。

浪涌吸收器的选用方法如下^[6,11]:

(1) 选定 U_{1mA} 值 浪涌吸收器的 U_{1mA} 的下限由使用的回路电压决定,设计者应使得电网电压峰值波动到最大,浪涌吸收器的 U_{1mA} 值下降 10% 时,流过浪涌吸收器的漏泄电流仍在 1mA 以下,亦即 $90\%U_{1mA} \geq \sqrt{2} \times \text{回路电压有效值} \times (1 + \text{电网电压波动率})$ 。

根据上式可求出适用的标称电压 U_{1mA} 值,如表 4 所示。

(2) 选定通流容量 根据实际发生的浪涌能量来选定浪涌吸收器的通流容量,

表 4 适用标称电压值

Tab. 4 The suitable nominal voltages U_{1mA}

使用回路电压(交流有效值) (V)	电网电压波动+10%时的适用 标称电压 U_{1mA} (V)	电网电压波动 +20% 时的适用 标称电压 U_{1mA} (V)
~110	>190	>210
~220	>380	>420
~380	>660	>720
~750	>1300	>1400

应使吸收的浪涌小于浪涌吸收器的通流容量。另外,也要考虑到浪涌的复现率,使浪涌吸收器不致长时间过热(长时间工作时,浪涌吸收器表面温度不得高于环境温度 4°C)。

七、大气过电压保护和空载电压升高保护

为了防止大气过电压,可在整流变压器初级侧或次级侧设置避雷器或火花间隙(今后发展的趋势是压敏电阻浪涌吸收器代替避雷器和火花间隙)。避雷器一般根据电站、变电所的设计要求来选择,通常高压交流侧采用 FZ、FS 系列阀式避雷器或 FCZ 系列磁吹阀式避雷器。

在直流系统中,应在整流站各直流馈线的引出处装设避雷器(一般采用直流磁吹避雷器)或压敏电阻浪涌吸收器,以防止雷电波的侵入。

在电车供电系统中,压敏电阻浪涌吸收器完全可以代替直流避雷器,为此我们曾进行试验和试运行,试验和试运行证明压敏电阻浪涌吸收器体积小、响应快、工作可靠,较直流阀型避雷器优越,是直流系统避雷装置的方向。

硅整流器换相过电压保护电容器在运行过程中,因来不及放电,会使直流空载电压升高。为了防止电压升高,应在硅整流器直流侧接上负载电阻(例如 600 V、1500A 整流器应加接 600 Ω 左右的负载电阻)。负载电阻和电容一样,也能抑制过电压,只是由于一般电阻器均为线绕式(有微小电感),作用要差一些^[8]。

参 考 文 献

- [1] С. Д. Соколов И Др., *полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций, транспорт*, 1979.
- [2] В. А. Голованов И Др., *Эксплуатация силовых преобразователей электроподвижного состава, транспорт*, 1979.
- [3] S.koštera et al., *Polovodiče V silnoprovdé elektrotechnice, SNTL, Praha*, 1963.
- [4] R. M. Davis, *Power diode and thyristor circuits, Combridge university press*, 1971.
- [5] 整流器专门委员会, 半導体電力变换装置の過電流過電圧保護, 電気学会技術報告 II 部第 14 号, 1971, 9.
- [6] サイリスタ・エレクトロニクス編集委員会, サイリスタ装置, 丸善株式会社, 1974.
- [7] 樊元武, 水银整流器, 冶金工业出版社, 1961.
- [8] 上海市公共交通公司电车轨线所编. 大功率硅整流器, 冶金工业出版社, 1973 年出版.
- [9] Е. М. Глух и др., *Защита полупроводниковых преобразователей, глав. 6, энергия*, 1970.
- [10] 伊達正晃, 电气计算, 48(1980), 111.
- [11] G. E. CO., *SCR Manual*, 1972, p. 650.

THE OVERVOLTAGE PROTECTION OF SILICON RECTIFIERS

Fan Yuan-wu

(Shanghai Electrical Traction Supply Department)

In this paper, the causes and the suppression methods of the overvoltages in silicon rectifiers are described. The selection methods of the metal oxide varistors are described also. These suppression methods are also useful to other semiconductor devices.