

第 3 章

直流高电压试验装置

3.1 概 述

电力设备常需进行直流高压下的绝缘试验,例如测量它的泄漏电流,而一些电容量较大的交流设备,例如电力电缆,需进行直流耐压试验来代替交流耐压试验。至于超高压直流输电所用的电力设备则更需进行直流高压试验。此外,一些高电压试验装置,例如冲击试验装置,需用直流高压作电源。因此直流高压试验装置也是进行高电压试验的一项基本设备。

中国国家标准 GB/T 16927—1^[1]指出,一般普遍使用变压器整流电路得到直流试验电压。图 3-1(a)所示是半波整流电路,它基本上和电子技术中常用的低电压半波整流电路是一样的,只是增加了一个保护电阻 R ,这是为了限制试品(或电容器 C)发生击穿或闪络时以及电源向电容器 C 突然充电时通过高压硅堆和变压器的电流,以免损坏高压硅堆和变压器。当然对于在试验中因瞬态过程引起的过电压, R 和 C 也起抑制作用。 R 阻值的选择应保证流过硅堆的事故电流(峰值)不超过允许的瞬间过载电流(峰值) I_{SM} (见 3.2 节)。由图 3-1(b)可看出,整流电路的输出电压 u 不是严格的直流电压,而是随时间有不大的周期性变化。

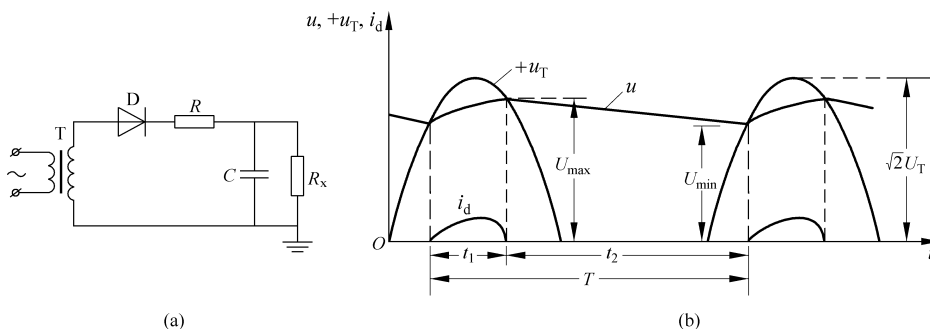


图 3-1 半波整流电路和输出电压波形图

(a) 半波整流电路; (b) 输出电压波形

T—工频试验变压器; C—滤波电容器; D—整流元件(高压硅堆); R—保护电阻; R_x —试品; u —输出直流电压的波形; $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ —输出直流电压的最大值、最小值; U_T —试验变压器 T 的输出电压(有效值); i_d —D 导通时的电流波形

直流高压试验装置的基本技术参数有三个,即输出的额定直流电压(算术平均值,以下简称平均值) U_d ,相应的额定直流电流(平均值) I_d 以及电压纹波因数 S 。

额定直流电压 U_d 是指一个周期内输出电压 $u(t)$ 的平均值,即

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

若定义 $U_a = 0.5(U_{\max} + U_{\min})$,则 $U_d \approx U_a = 0.5(U_{\max} + U_{\min})$ 。

额定直流电流 I_d 是指一个周期内输出电流的平均值, $I_d = U_d / R_x$ 。

输出电压 $u(t)$ 随时间的周期性变化被称为纹波,定义纹波幅值 δU 为

$$\delta U = 0.5(U_{\max} - U_{\min})$$

而电压纹波因数 S 可表示为

$$S = \delta U / U_d \quad (3-1)$$

和电子技术中低压直流设备相比,直流高压试验装置的主要特点是电压高(从数万伏到数百万伏)、电流小(通常为数毫安至数十毫安,个别情况,例如绝缘子的湿闪试验约需数十毫安,污闪试验约需数百毫安)和持续运行时间较短。我国国家标准 GB/T 16927.1 规定,直流高压试验装置的纹波因数 $S \leq 3\%$,直流电压试验的持续时间不超过 60 s,其试验电压(算术平均值)在 60 s 内应保持在规定值的 $\pm 1\%$ 以内^[1]。

图 3-1(b)中, t_1 是整流元件 D 导通时间,在时间 t_1 内变压器 T 通过 D 向 C 充电,同时向试品 R_x 放电。设在 t_1 时间内电源向 R_x 送出电荷 ΔQ ,同时向 C 送出电荷 Q_2 ,即总共送出电荷 $Q_1 = Q_2 + \Delta Q$ 。

图 3-1(b)中, t_2 是 D 的截止时间,在时间 t_2 内电容器 C 向试品 R_x 放电,在 t_2 时间内 C 向 R_x 送出的电荷应由在 t_1 时间内由 T 向 C 送出的电荷来补偿,即等于 Q_2 ,因为这样才能保证输出电压 U_d 和电流 I_d 的数值和波形是稳定不变的。

这样在整个周期 T 内 R_x 总共得到电荷 $Q_1 = Q_2 + \Delta Q$,因此通过 R_x 的直流电流(平均值)为

$$I_d = Q_1 / T \quad (3-2)$$

而电压的纹波幅值 δU 应为

$$\delta U = Q_2 / (2C)$$

由于纹波因数 S 一般在 3% 以下,时间常数 $R_x C$ 应较大,则 $t_1 \ll t_2$, $\Delta Q \ll Q_2$,所以 $Q_1 = Q_2 + \Delta Q \approx Q_2$, δU 即可近似表示为

$$\delta U \approx Q_1 / (2C) = I_d T / (2C) = I_d / (2fC) \quad (3-3)$$

当然这样算出来的 δU 值是略为偏大的。纹波因数

$$S = \delta U / U_d = I_d / (2fC U_d) \quad \text{或} \quad S = T / (2R_x C) \quad (3-4)$$

由式(3-4)可算得 $S = 3\%$ 时,时间常数 $R_x C \approx 16.6T$ 。当电源电压为 50 Hz 时, $R_x C \approx 0.33$ s。试品的试验电压和电流决定了 R_x ,即可算出所需滤波电容器的电容量 C 。

起限流作用的保护电阻 R 可按式确定:

$$R = \sqrt{2} U_T / I_{SM} \quad (3-5)$$

式中, U_T ——工频试验变压器 T 的输出电压(有效值);

I_{SM} ——根据硅堆的过载特性曲线(图 3-5)所确定的短时允许的过电流峰值。

对有自动跳闸装置的直流高压试验装置一般取过载时间为 0.5 s 下的过电流值即可,否则需取较长的过载时间(例如 1 s~2 s)下的过电流值,当然此时选取的 R 值要稍大(参见 3.2 节)。通常 R 在数十千欧至数百千欧之间。

变压器 T 向电容器 C 的充电电流以及向负载 R_x 的放电电流都会在保护电阻 R、变压器内阻和硅堆内阻上(主要在 R 上)产生压降。当无负载($R_x \rightarrow \infty$)时,最后充电电流趋向零,压降消失,电容器上的电压可达变压器充电电压的峰值 $\sqrt{2}U_T$ 。当有负载时,每个周期内都有充电电流流过,都产生压降,即使在硅堆导通时间内,输出电压的最大值 $U_{\max}$ 也必小于 $\sqrt{2}U_T$ 。其差值称为压降 ΔU ,即

$$\Delta U = \sqrt{2}U_T - U_{\max} \quad (3-6)$$

若以 ΔU_a 代表电路无负荷时电压($\sqrt{2}U_T$)与有负荷时输出电压平均值 U_d 之差,并称为平均压降,则

$$\Delta U_a = \sqrt{2}U_T - U_d = \Delta U + \delta U \quad (3-7)$$

ΔU_a 常按电子技术中所用的近似计算方法来求得。图 3-2 为由试验得到的半波整流电路 $U_d/(\sqrt{2}U_T)$ 与电路参数的关系曲线,可由此图中横坐标上 ωCR_x 的值及相应的 R/R_x 来确定 $U_d/(\sqrt{2}U_T)$ (见图中曲线 1~8),由此可求得 ΔU_a ,从 δU 即可求得 ΔU 。

由图 3-2 可知当 $\omega CR_x > 60 \sim 100$ 时, $U_d/(\sqrt{2}U_T)$ 的比值基本不变,此时只需根据横坐标上的 R/R_x 值来确定 $U_d/(\sqrt{2}U_T)$ (见图中曲线 9)和 ΔU_a 即可。

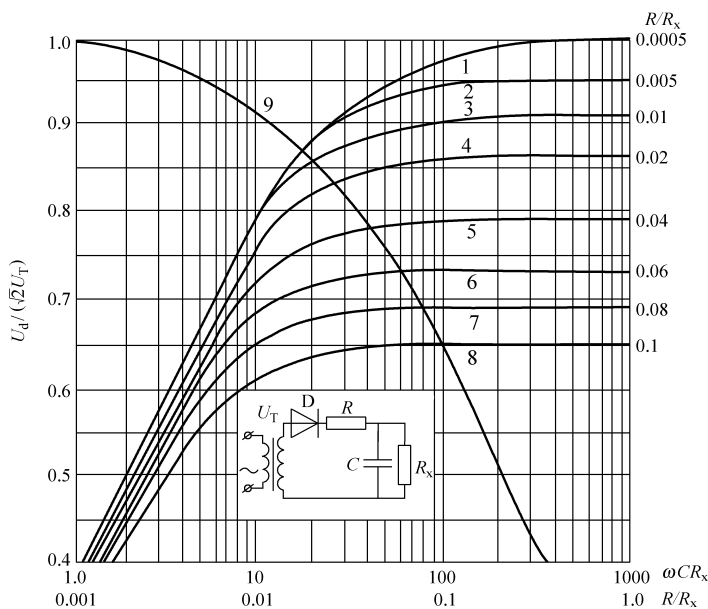


图 3-2 半波整流电路 $U_d/(\sqrt{2}U_T)$ 和电路参数关系曲线

曲线 1~8: $U_d/(\sqrt{2}U_T)$ 与 ωCR_x 的关系曲线(分别对应 8 个不同的 R/R_x 值);

曲线 9: $U_d/(\sqrt{2}U_T)$ 与 R/R_x 的关系曲线($\omega CR_x \gg 1$ 时)

整流电路的输出功率为 $U_d I_d$,显然电源变压器的容量应大于此值。流过试品的电流 I_d 是由变压器 T 通过整流元件 D 来供给的。D 导通的时间很短,通过 D 的电流也即变压器的输出电流是脉冲状的,其脉冲幅值显然应比平均电流 I_d 大得多。因此变压器输出电流的有效值 I_T 也大于 I_d ,而变压器绕组的导线是按有效值设计的,因此考虑变压器容量时不能按 I_d 来选择,而需较大的容量。 I_T 的大小也可由试验得到的图表来确定。考虑到一般高压硅堆 0.5 s 过载电流峰值 I_{SM} 为其额定电流平均值 I_f 的 20~50 倍,显然 $I_f \geq I_d$,则 $R/R_x \approx$

0.05~0.02,而当 $S \leq 3\%$ 时可算得工频下的 $\omega CR_x \geq 104$ 。在上述情况下,由试验可知 I_T/I_d 之比为2~2.5,故工频试验变压器的容量 S_T 可近似按下式估计:

$$S_T = (2 \sim 2.5)U_d I_d \quad (3-8)$$

电容器 C 的额定电压 U_C 由下式确定:

$$U_C = \sqrt{2}U_T = U_d + \Delta U_a \quad (3-9)$$

在进行直流高压试验时常在 C 和 R_x 间再串一电阻 R' ,这是为了防止 R_x 发生闪络或击穿时, C 被完全短路放电而损坏,且试验结束时可用接地杆通过 R' 将 C 上残余电荷泄放掉, R' 选数千欧即可。

3.2 高压硅堆

高压硅堆是由数个至数十个硅整流二极管串联封装而成的高压整流器,具有体积小、重量轻、机械强度高、使用简便和无辐射等优点,普遍用于直流高压装置中作为基本的整流元件。高压硅堆的型号和技术参数见附录A表A4。作为高压硅堆基本组成单元的硅二极管具有单向导电性,其正、反向伏安特性如图3-3所示。

由图可知,当二极管上外加正向电压 u_f 很小时,正向电流 i_f 很小,但当 u_f 大于某一值 U_F 后 i_f 则随 u_f 的增大而迅速增大。通常称 U_F 为“死电压”,对于高压硅整流二极管 U_F 为0.4V~0.6V。又当外加反向电压 u_r 于二极管时则二极管呈现很大阻抗,其反向电流 i_r 很小(约几微安),并随 u_r 增加而稍有增长,但当 u_r 超过某一值 U_R 后, i_r 则急剧增大。 U_R 称为击穿电压,目前高压硅整流二极管的 U_R 可达数千伏至上万伏。

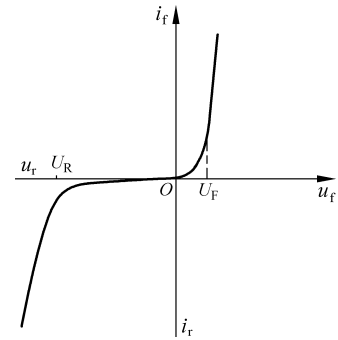


图 3-3 硅二极管正、反向伏安特性

u_f, i_f —正向电压、电流;
 u_r, i_r —反向电压、电流;
 U_F —死电压; U_R —击穿电压

硅二极管和硅堆的基本技术参数如下:

(1) 额定整流电流 I_f ,指的是通过二极管的正向电流在一个周期内的平均值。在选择整流元件时显然应使其 $I_f \geq I_d$,即运行中通过二极管的电流不应大于 I_d 。

(2) 正向压降 U_f ,当二极管通过的正向电流为额定值 I_f 时在管子两端的压降。

(3) 额定反峰电压值 U_r ,即二极管截止时在管子两端允许出现的最高反向工作电压峰值。从图3-1可知它是电容器上电压和变压器输出电压之差,它的波形基本上相当于一个带直流分量的正弦波。在选择整流元件时应使 U_r 满足下式:

$$U_r > \sqrt{2}U_T + (1+S)U_d \quad (3-10)$$

否则管子可能出现反向击穿。一般 U_r 选为它的击穿电压 U_R 的 $1/2 \sim 2/3$,即 $U_r = (1/2 \sim 2/3)U_R$ 。

(4) 反向平均电流 I_r ,在最高反向工作电压作用下流过管子的反向电流平均值。

使用硅堆时还应掌握它的过载特性,一般硅堆的正向损坏是由于二极管PN结的热击穿造成的,根据大功率硅整流元件技术标准规定,PN结的最高允许工作温度为 140°C ,因此在正常工作时结温必须低于 140°C ,不然会引起硅堆特性变坏和加速封装硅堆的绝缘介质的老化,从而影响硅堆使用寿命。为了在正常工作状态下保证PN结的温度不超过允许温度,必须注意以下几点:

(1) 所用硅堆的额定正向整流电流峰值,应不小于其在正常实际工作状态中的电流最大值。特别是对一些正常工作状态下负载侧经常发生闪络或击穿的直流高压装置(例如静电除尘器)中的硅堆, I_f 值应适当选大一些。此外所规定的额定整流电流值 I_f 一般是指在自然对流冷却下的允许使用值,如果采用油冷,则整流电流大约可提高一倍。

(2) 根据高压硅堆的频率特性可分工频高压硅堆(用2DL表示)和高压硅堆(用2DGL表示)。工频高压硅堆所整流的电流频率应在3 kHz以下,高压硅堆所整流的电流频率可在3 kHz以上。对于高频电压的整流应使用相应的高频高压硅堆。

(3) 高压硅堆所标称的额定整流电流值是指在使用环境温度为室温时的平均整流电流值。如在较高的环境温度下工作时,所允许的整流电流值应适当地减小。图3-4为环境温度与被允许的平均整流电流百分比的关系曲线。

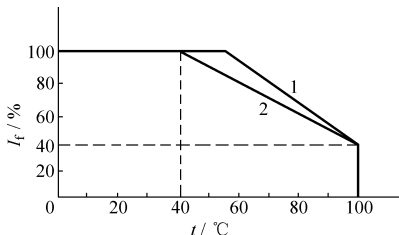


图 3-4 硅堆的温度负载特性曲线

1—适用于 200 mA 以下硅堆；

2—适用于 0.5 A、1 A 硅堆；

t —环境温度(°C)

(4) 高压硅堆的结温是由于 PN 结的功率损耗对结部加热所致,而结功率损耗还与整流电流的波形和施加的反向电压有关。例如,当波形不是正弦波而是矩形波时,硅堆的整流电流值应减小。当反向电压较高时尚需考虑反向功率损耗(一般情况下可忽略),务必使其不要超过元件允许值。

但是在事故状态下,例如试品发生击穿或闪络,则硅堆有可能流过很大的正向电流,此时结温允许在一短时间内超过额定最高允许结温,时间很短则尚不致造成损坏。但若在某一给定的时间间隔内,电流值超过了相应的某一限度,则 PN 结可能因过流而烧毁。另外,即使电流值不超过这个限度,这种过电流的冲击次数在硅堆的整个使用寿命期间也不能太多(大约几百次)。表示硅堆在多大的时间间隔内、允许流过多大的故障电流的特性,称为过载特性(此时结温不能超过 160 °C),而该允许的电流值称为过载电流额定值。图 3-5 分别为额定整流电流为 150 mA 和 0.5 A 硅堆的过载特性曲线。

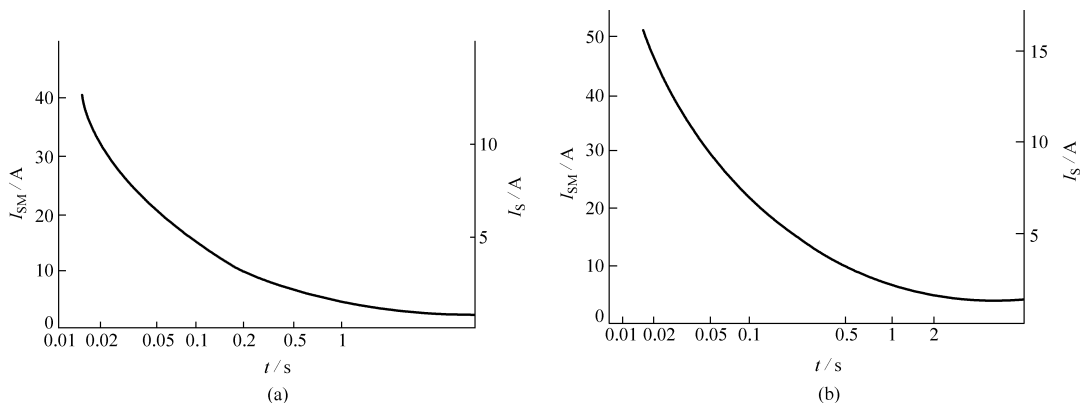


图 3-5 150 mA 硅堆和 0.5 A 硅堆的过载特性

(a) 150 mA 硅堆特性；(b) 0.5 A 硅堆过载特性

I_{SM} 、 I_S —正向允许过载电流峰值、平均值； t —过载时间间隔

为了保护硅堆必须保证流过硅堆的事故电流(峰值)不超过允许的过载电流(峰值),一般只需在高压回路选用合适的限流电阻 R (图 3-1)即可。但在一些额定电流较大、持续运行时间较长的直流高压装置中,为了避免电阻会增加装置在正常工作状态下的功率损耗,常不采用 R 而选用晶闸管、过流继电器和快速熔断器等元件作为过电流保护。

3.3 硅堆的电压分布和均压措施

目前硅整流二极管(以下简称单管)的额定反峰值电压可达数千伏至一万伏,因此需将许多单管串联起来,加以封装组成硅堆,作为高压整流元件来使用。但是当在硅堆上外加反向电压时,每个单管所实际承受的电压不一定等于按均匀分配时该单管所能承受的电压,因为在硅堆上的电压分布是不均匀的。硅堆中承受反压最大的单管有可能首先击穿,从而导致发生一系列击穿,致使硅堆完全损坏,这是硅堆实际使用中的一个重要问题。显然当硅堆的反峰值电压不够而需将多个硅堆串联使用时,硅堆与硅堆之间也有电压分布不均匀的问题。通过理论分析和实验研究可以确认造成电压分布不均的主要原因是存在二极管对地及对高压端的寄生电容。

硅堆中每个单管在反向运行时可以看成是一个电阻 R_r (二极管反向内阻)与电容 C_r (PN 结反向势垒电容)并联而成的等效电路(如图 3-6 所示)。此外,每个单管和大地形成对地杂散电容 C_e ,与高压端间也存在杂散电容 C_h ,因此由二极管串联而成的硅堆在反向运行时其等效电路如图 3-6 所示。通常串联链的右端应接入滤波电容 C (图 3-1),由于 C 的电容量相对较大,故对交流而言可看作是短路的,因此图 3-6 中串联链的右端是直接接地的。这里结电容 C_r 一般决定于制造工艺,通常约为 pF 数量级,而 C_e 和 C_h 则和二极管的安放位置有关,通常 C_e 低于 pF 数量级且 $C_e > C_h$ 。 R_r 则与管子反向电流有关,各个管子不尽相同,约数百兆欧至数千兆欧。 R_r 的不同也会影响各单管的电压分布,但和杂散电容相比,它的影响还是很小的。为简化起见,在图中 R_r 、 C_r 、 C_h 、 C_e 均取同一数值。

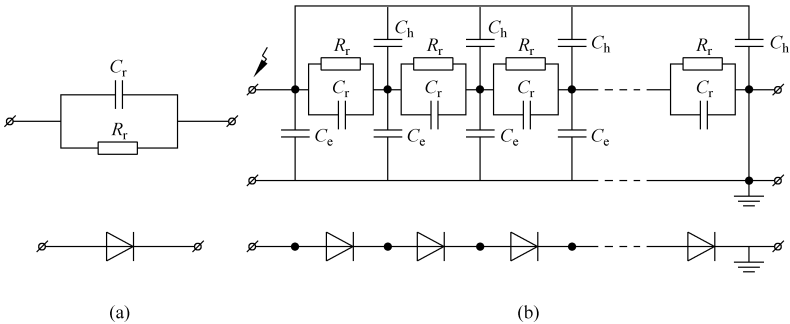


图 3-6 硅二极管和硅堆的反向运行等效电路图
(a) 硅二极管; (b) 硅堆

从图 3-6 易知,流过对地电容 C_e 的电流都将在二极管串联链的不同部位上造成压降,越靠近高压端的单管上的压降越大,其结果使得硅堆反向运行时电压分布不均,而越靠近高压端的单管承受的反压越大。同理,流过 C_h 的电流也会造成硅堆的电压分布不均,但其情况和 C_e 相反,即越接近接地端的单管承受的反压越大。综合 C_e 和 C_h 的作用,硅堆上电压

分布将是两端大、中间小,又由于 $C_e > C_h$,故 C_e 的作用比 C_h 更大,因此承受反压较大的单管还是在高压端附近,而以高压端的第一个单管承受电压最大。显然 C_e 、 C_h 的数值越大,流过的电流越大,使硅堆的电压分布更不均匀。另外若单管的 C_r 大或 R_r 小,则 C_e 、 C_h 所起的影响相对要减小,而电压分布可更均匀些。

运用第2章中计算电容分压器高压臂等效电容的方法可对该链形电路进行分析,即可算出串联链上每个单管所承受的反压和硅堆的电压分布。但 C_e 、 C_h 都无法准确知道,因此计算也只能是粗略的。

为使硅堆中电压分布均匀,可尽量减少串联的管数 n ,这就要求单管的额定反峰值电压做得尽可能高,故 n 的减少受制造单管的生产水平的限制。另一途径就是在单管两端并联大电容(相对于结电容 C_r 而言)或小电阻(相对于反向内阻而言),使得 C_r 和 R_r 组成的阻抗减小来达到强迫均压的目的。但此法会增大输出的交流分量,也会受到一定限制。此外,还可以选用高压雪崩型整流元件,由于它击穿时动态电阻很小且能承受相当大的反向浪涌功率,因此硅堆中某单管接近击穿时,由于内阻的减小,而使它所分配到的电压减小,从而起到自动均压的作用。

应当指出,目前生产的硅堆一般内部均未采取强迫均压的措施,元件亦无雪崩特性。但工作也不错,其原因一方面是由于加大了安全系数,即硅堆中每个单管在反向时的平均压降远比它的额定反峰值电压为低,这样即使电压分布不均,承受反压最大的那个单管也可能尚未超过额定反峰值电压或超过不多;另一方面则是因为在临近击穿时,反向电流增大,动态内阻减小,有一定的自动均压能力。但非雪崩型元件的这种能力是有限的,若无均压措施,元件易于损坏,寿命也要显著降低。因此在使用硅堆时,内部电压分布不均的问题还是应当重视,特别是额定反峰值电压较高的硅堆。为此,有时宁可选用额定反峰值电压较低的硅堆若干个串联运行,并对硅堆串采取均压措施。

和单管串联运行一样,硅堆与硅堆串联运行时,由于对地与对高压端的杂散电容的影响,在反向时也存在电压分布不均匀的问题。对由10只2DL-10 kV/1 A(即额定反峰值电压为10 kV,平均整流电流为1 A)串联组成的硅堆串,可用小球法($\phi 6$ mm钢珠,球隙小于6 mm)测量其每个硅堆上的电压分布。实验的原理接线图见图3-7(a),硅堆串垂直挂在空中,高压端离天花板2 m,接地端离地30 cm。实验测得的硅堆串反向电压分布如图3-7(b)、(c)所示(由西安高压电器研究所胡凤昌高工提供)。硅堆串的电压分布形状和单管的电压分布是一样的,其不均匀程度也是非常严重的。由图3-7中曲线1和曲线2可知,串联硅堆数 n 越多则电压分布越不均匀。由曲线2可知,当 $n=10$ 时,高压端第一只硅堆所承受的反压最大,达整个硅堆串的32.8%,而承受电压最低的第七只硅堆上相对压降仅为0.7%,二者之比即不均匀系数 $F(F=\Delta U_{\max}/\Delta U_{\min})$ 高达47。为了强迫均压可在每个硅堆上并上电阻和电容,从强迫均压后的电压分布可知,当均压元件的阻抗值为硅堆最小反向内阻 $R_{\min}$ ($R_{\min} \approx 10 \text{ kV}/10 \mu\text{A}=1000 \text{ M}\Omega$) 的1/10时,电压分布尚略有不均的现象,见图3-7中曲线3和曲线5, F 分别为1.45、2.44;而当均压元件的阻抗值为 $R_{\min}$ 的1/100时,则硅堆串的电压分布已相当均匀,见图3-7中曲线4和曲线6, F 分别为1.02、1.11。

当需选用均压元件时,阻抗值可参考以上这些试验结果。但由于各厂硅堆参数(R_r 、 C_r)和结构不尽相同,硅堆串使用场所的条件也各异,因此均压元件的阻抗值最好通过试验确定。均压元件的阻抗值还和串联的硅堆数有关,串联数少时阻抗值可适当选大些。还要注

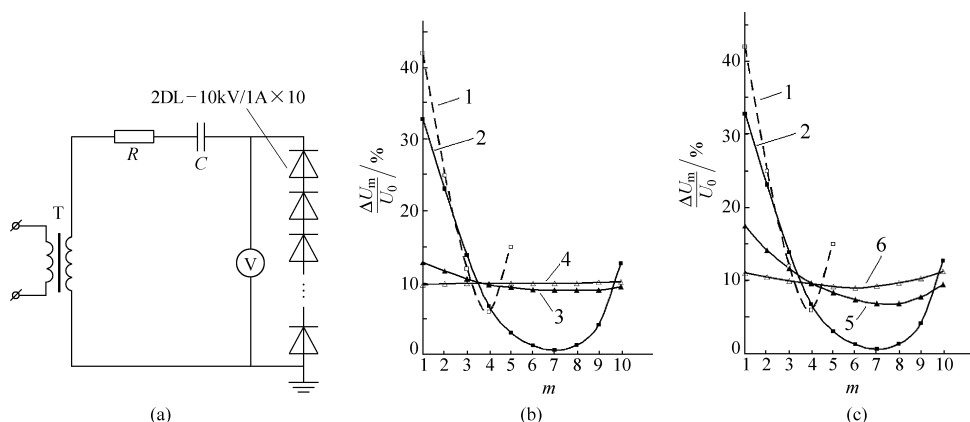


图 3-7 硅堆串电压分布的实验结果

(a) 实验原理接线图; (b) 采用电阻均压; (c) 采用电容均压

T—220 V/66 kV 试验变压器; R—800 kΩ; C—0.0322 μF; V—静电电压表

 ΔU_m —硅堆的电压降; U_0 —硅堆串的总压降; m —从上到下的硅堆顺序号;曲线 1,2: 无均压元件, 串接的硅堆总数 n 分别为 5、10;曲线 3,4: $n=10$, 并联均压电阻, 其阻值分别为 $R_{\min}$ 的 1/10、1/100;曲线 5,6: $n=10$, 并联均压电容, 其阻抗值分别为 $R_{\min}$ 的 1/10、1/100

意并联均压元件后会使反流增加, 从而会造成对纹波的影响, 用电阻均压时若均压电阻 R_0 选得太小还会使发热增加。

此外当硅堆串使用于中频电源(例如 10 kHz)或有频率较高的过电压(如冲击电压)作用时, 由于结电容 C_r 的容抗值可能接近反向内阻值甚至更小, 此时就要考虑 C_r 的容抗作用, 选用均压元件的阻抗值应更低, 显然采取电容元件均压(或阻容均压)更为合理。

3.4 倍压电路

为了得到更高的直流电压可采用倍压电路如图 3-8 所示, 它的参数计算也可参照半波电路的计算原则进行。这种电路对变压器 T 有些特殊要求, T 的次级电压仍为 U_T , 但其两个端头对地绝缘不同, A 点对地绝缘要求为 $2U_T$, 而 A' 点为 U_T 。硅堆反峰值电压约为 $2\sqrt{2}U_T$, 输出电压为变压器次级电压的 2 倍。这种电路的缺点是, 为了得到更高电压就需提高变压器、硅堆、电容器的工作电压。另一种倍压电路如图 3-9 所示, 变压器一端接地, 另一端为 U_T , 对绝缘无特殊要求, 硅堆反峰值电压仍为 $2\sqrt{2}U_T$, 电容器 C_1 工作电压为 $\sqrt{2}U_T$, 而 C_2 则为 $2\sqrt{2}U_T$, 输出电压亦为 $2\sqrt{2}U_T$ 。这种电路的优点是便于得到更高的直流电压, 只要增加串接的级数, 即可组成直流高压串级发生器(又称串级高压倍加器)。

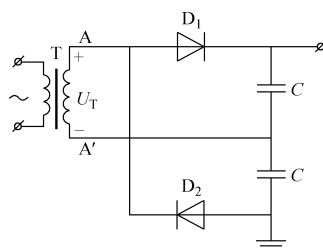


图 3-8 倍压电路

分析图 3-9(a)电路的工作原理时, 假定 $C_1 = C_2$ 并略去回路中的电阻及任何泄漏电流。若变压器电压为 u_{30} , 点 1 和点 2 的对地电位分别为 u_{10} 和 u_{20} , 则各点上电位变化如图 3-9(b)

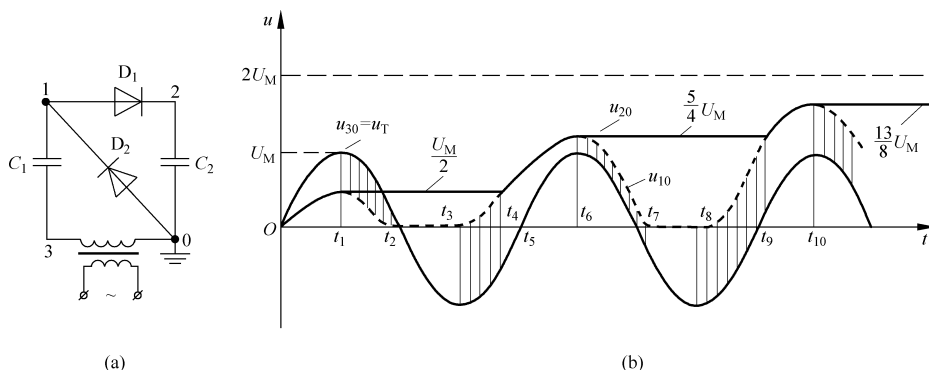


图 3-9 倍压电路及充电过程中各点电位的变化情况

(a) 倍压电路; (b) 电位变化

所示。充电过程的分析列于表 3-1, 表中第 2 列代表变压器输出电压 u_{30} 的变化情况, 第 3、4 列表示两个硅堆的动作情况, 第 5、6 列表示电容器 C_1 、 C_2 上的充电电压, 第 7、6 列表示点 1 及点 2 的对地电位。如表 3-1 所分析, 在电源电压的 $9/4$ 周期内, 点 2 对地电位由 0 上升到 $(13/8)U_M$, 这样继续下去, 点 2 对地电位 u_{20} 最后可到达 $2U_M$, 即 C_2 上充电到 $2U_M$ 。而点 1 对地电位 u_{10} 则在 $0 \sim 2U_M$ 之间变动, 即 $u_{10} = U_M(1 + \sin \omega t)$, C_1 上则充电到 U_M , 如图 3-10 所示。当然这个充电过程是很快的, 当完成这个充电过程之后 D_1 、 D_2 就完全处于截止状态。

表 3-1 倍压电路在充电过程中各点电位变化情况

t	u_{30}	D_1	D_2	u_{C_1} (上电极对下电极)	u_{C_2} (上电极对下电极) = u_{20}	u_{10}
$0 \rightarrow t_1$	$0 \rightarrow +U_M$	通	止	$0 \rightarrow -\frac{1}{2}U_M$	$0 \rightarrow +\frac{1}{2}U_M$	$0 \rightarrow +\frac{1}{2}U_M$
$t_1 \rightarrow t_2$	$+U_M \rightarrow +\frac{U_M}{2}$	止	止	$-\frac{1}{2}U_M$	$+\frac{1}{2}U_M$	$+\frac{1}{2}U_M \rightarrow 0$
$t_2 \rightarrow t_3$	$+\frac{U_M}{2} \rightarrow -U_M$	止	通	$-\frac{1}{2}U_M \rightarrow +U_M$	$+\frac{1}{2}U_M$	0
$t_3 \rightarrow t_4$	$-U_M \rightarrow -\frac{U_M}{2}$	止	止	$+U_M$	$+\frac{1}{2}U_M$	$0 \rightarrow +\frac{1}{2}U_M$
$t_4 \rightarrow t_5$	$-\frac{U_M}{2} \rightarrow 0$	通	止	$+U_M \rightarrow \frac{CU_M + \frac{1}{2}CU_M}{2C}$ $= +\frac{3}{4}U_M$	$+\frac{1}{2}U_M \rightarrow +\frac{3}{4}U_M$	$+\frac{1}{2}U_M \rightarrow +\frac{3}{4}U_M$
$t_5 \rightarrow t_6$	$0 \rightarrow +U_M$	通	止	$+\frac{3}{4}U_M \rightarrow +\frac{3}{4}U_M - \frac{1}{2}U_M$ $= +\frac{1}{4}U_M$	$+\frac{3}{4}U_M \rightarrow +\frac{3}{4}U_M + \frac{1}{2}U_M$ $= \frac{5}{4}U_M$	$+\frac{3}{4}U_M \rightarrow \left(1 + \frac{1}{4}\right)U_M$ $= +\frac{5}{4}U_M$
$t_6 \rightarrow t_7$	$+U_M \rightarrow -\frac{U_M}{4}$	止	止	$+\frac{1}{4}U_M$	$+\frac{5}{4}U_M$	$+\frac{5}{4}U_M \rightarrow 0$
$t_7 \rightarrow t_8$	$-\frac{U_M}{4} \rightarrow -U_M$	止	通	$+\frac{1}{4}U_M \rightarrow +U_M$	$+\frac{5}{4}U_M$	0

续表

t	u_{30}	D_1	D_2	u_{C_1} (上电极对下电极)	u_{C_2} (上电极对下电极) = u_{20}	u_{10}
$t_8 \rightarrow t_9$	$-U_M \rightarrow +\frac{1}{4}U_M$	止	止	$+U_M$	$+\frac{5}{4}U_M$	$0 \rightarrow +\frac{5}{4}U_M$
$t_9 \rightarrow t_{10}$	$+\frac{1}{4}U_M \rightarrow +U_M$	通	止	$+U_M \rightarrow \frac{CU_M + \frac{5}{4}CU_M}{2C}$ $-\frac{1}{2}U_M = +\frac{5}{8}U_M$	$+\frac{5}{4}U_M \rightarrow \frac{CU_M + \frac{5}{4}CU_M}{2C}$ $+\frac{1}{2}U_M = +\frac{13}{8}U_M$	$+\frac{5}{4}U_M \rightarrow \left(1 + \frac{5}{8}\right)U_M$ $= +\frac{13}{8}U_M$

以此类推,最后 u_{20} 可达 $2U_M$ 。

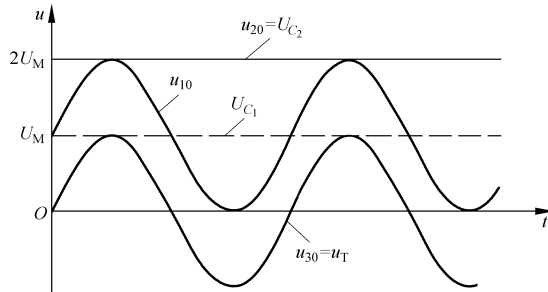


图 3-10 倍压电路在无负荷时充电稳定后的各点电位

以上分析中假定 C_2 两端没有跨接负荷。现在来分析 C_2 上跨接电阻 R_x 时的输出电压情况。如图 3-11 所示,若令每周期内流经 R_x 的电荷为 Q_1 ,则流经 R_x 的平均电流 $I_d = fQ_1 \approx u_{20}/R_x$ 。流经 R_x 的电荷 Q_1 分两部分,一部分为 C_2 放电时输出电荷 Q_2 ,另一部分为 C_1 向 C_2 充电同时也向负荷输出电荷 ΔQ 。但无论是 Q_2 还是 ΔQ 都是由 C_1 送出的,故 C_1 在每一周期内要输出电荷 Q_1 ,即

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q$$

在无负荷时点 1 电位最高能达 $2U_M$,但在有负荷时 C_1 每周期向 C_2 充电时要输出电荷 Q_1 ,故点 1 的电位不可能维持为 $2U_M$,而要降低 Q_1/C_1 ,所以 C_2 充电所能达到的最高电位为

$$U_{20M} = 2U_M - (Q_1/C_1) = 2U_M - I_d/(fC_1)$$

从上述分析可看出,有负荷时的输出电压的最大值比无负荷时为低,两者的差值即压降以 ΔU 表示,则

$$\Delta U = 2U_M - U_{20M} = Q_1/C_1 = I_d/(fC_1) \quad (3-11)$$

每周期内, C_1 只在很短时间 t_1 内向 C_2 充电,给 C_2 以电荷 Q_2 ,同时给负荷以电荷 ΔQ 。也只在此时间内 C_2 上的电压按指数函数上升,点 2 的最高电位为 U_{20M} 。过此时间后硅堆 D_1 不通, C_2 上的电荷要向 R_x 流出,点 2 电位按指数函数下降,到该周期末点 2 电位最低。在这个放电时间间隔 t_2 内放出的电荷为 Q_2 ,此时点 2 的最低电位 U_{20m} 为

$$\begin{aligned}
 U_{20m} &= U_{20M} \exp(-t_2/\tau_2) = [2U_M - I_d/(fC_1)] \exp(-t_2/\tau_2) \\
 &= 2U_M - I_d/(fC_1) - (Q_2/C_2)
 \end{aligned}$$

所以