

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.017

反向恢复期脉冲作用下高压晶闸管失效分析

叶明天¹, 庞磊¹, 张乔根¹, 陶风波², 许建刚³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:为提取高压晶闸管反向恢复期内脉冲过程中表征器件状态的特征参量,明确器件失效机理,文中搭建了高压晶闸管反向恢复期脉冲作用实验平台与特性参数测试平台,利用实验平台研究了高压晶闸管在反向恢复期内不同阶段遭受脉冲冲击过程中的特性参数变化规律,并对退化和失效晶闸管进行拆片分析。结果表明:反向恢复期内脉冲作用下,高压晶闸管退化或失效表现为阻断能力的退化或丧失,由此引起晶闸管漏电流剧增,漏电流可作为表征晶闸管状态变化的特征参量;在反向恢复期初期和中期遭受冲击而失效的器件芯片上可见明显击穿点;在反向恢复期中期遭受冲击且阻断能力退化的器件芯片上可见热应力作用形成的圆斑;在反向恢复期末期遭受冲击而失效的器件芯片边缘与绝缘橡胶相接处可见雪崩击穿闪痕。

关键词:高压晶闸管;电压脉冲;反向恢复期;失效分析;特性参数;性能退化

中图分类号:TM461.4

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)04-0135-08

0 引言

高压直流输电因其在远距离大容量输电与电力系统互联等方面的优势,在我国西电东送和全国联网工程中发挥了重要作用^[1-3]。换流阀是高压直流输电系统的核心设备,当前大容量高压直流输电工程中的换流阀仍以晶闸管阀为主,晶闸管作为换流阀的核心元件,其电气特性的稳定对于换流阀的安全可靠运行至关重要。实际运行中换流阀晶闸管容易遭受暂态电应力冲击,尤其是发生在晶闸管反向恢复期内的冲击,可能会使器件受损,特性出现不可逆变化,甚至器件彻底损坏,最终威胁换流阀系统的安全、稳定运行^[4-6]。因此,为确保高压晶闸管器件的安全,国内外换流阀设备厂家须设计晶闸管反向恢复期保护单元^[7-10],国内外直流系统设备运维单位也须依据相关标准制定换流阀晶闸管级的状态检测试验项目^[11-14]。在此背景下进行反向恢复期脉冲作用下高压晶闸管的失效分析,提取失效过程中表征器件状态的特征参量,对于换流阀晶闸管反向恢复期保护的优化以及相应状态检测试验参数的确定具有重要意义。

为校核晶闸管的反向恢复期保护功能,电网设备运维单位须对晶闸管进行反向恢复期保护触发试验,试验中对晶闸管级施加高压脉冲以考核晶闸管控制单元(thyristor control unit, TCU)能否进行保

护性触发^[7-8]。由于对反向恢复期脉冲作用下高压晶闸管的失效机理缺乏深入认识,试验中所施加脉冲波形参数、反向恢复期内脉冲施加时刻,以及TCU反向恢复期保护阈值的设定均不够明确,制约了换流阀晶闸管级的现场试验工作。

近年来随着直流工程投运年限的增加,高压晶闸管器件特性的改变与性能的退化引起了研究人员的重视^[15-19],不同的晶闸管寿命评估模型也相应提出^[20-21]。文献[15, 17-18]认为晶闸管特性的变化主要表现在通态压降增大、反向恢复电荷减小以及单向或双向电压阻断能力下降。文献[16]随机选取了8只在直流工程中运行时长达16 a的高压大功率晶闸管,发现其在运行前后触发特性和耐压特性均未发生改变,通态压降平均增长4%,反向恢复电荷平均下降30%。文献[20-21]的实验结果表明在反向恢复期多次脉冲的冲击下,晶闸管反向恢复时间缩短,反向恢复电荷减少,通态电压略微增大。

可见目前文献关注的晶闸管特性主要包含其触发特性、通态特性、反向恢复特性以及耐压特性,但针对长期服役晶闸管特性的变化尚未得到一致性结论,至于有关晶闸管在反向恢复期脉冲作用下的性能退化与失效方面的研究更是匮乏。

文中搭建了高压晶闸管反向恢复期脉冲作用实验平台与特性参数测试平台,研究了高压晶闸管在反向恢复期内不同阶段遭受脉冲冲击过程中的特性参数变化情况,并对性能退化和失效的晶闸管进行了拆片分析。

收稿日期:2022-01-09;修回日期:2022-03-16

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGJSDK00KJJS180-0292, SGJSDK00ZPJS1900278)

1 实验平台和测试平台搭建

1.1 反向恢复期脉冲作用实验平台

图1为反向恢复期脉冲作用实验平台主电路原理图。其中冲击电源采用双指数冲击电压发生回路,为满足耐压要求,将4只晶闸管开关(PERIKP086Y6500)串联使用,并在每只晶闸管两端配置阻容吸收回路进行保护。为保证输出电压波形稳定性,在高压晶闸管试品前并联电容负载 C_L 。通过调节波头电阻 R_f 与负载电容 C_L 的取值对输出电压波形的陡度进行调节,通过调节主电容 C_1 上的充电电压对输出脉冲电压峰值进行调节。图中电阻 R_1 用于控制波尾时间;电阻 R_s 起保护作用,用于泄放主电容 C_1 上多余电荷; R_d 为防止回路振荡的阻尼电阻;工频电源通过市电供电, R_3 为限流保护电阻。实验采用高压大功率晶闸管作为试品,平台可以实现输出脉冲电压幅值在100~12 000 V变化,陡度在150~1 500 V/ μ s变化。

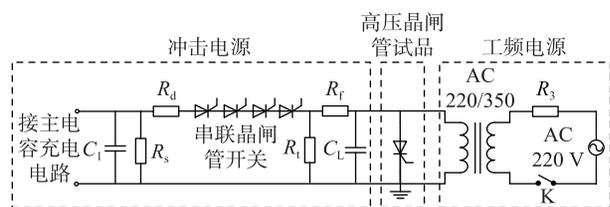


图1 实验平台主电路原理

Fig.1 The principle of the main circuit of experimental platform

图2为利用上述实验平台对高压晶闸管试品在反向恢复期内施加电压脉冲后,晶闸管两端电压与流过晶闸管的电流波形。

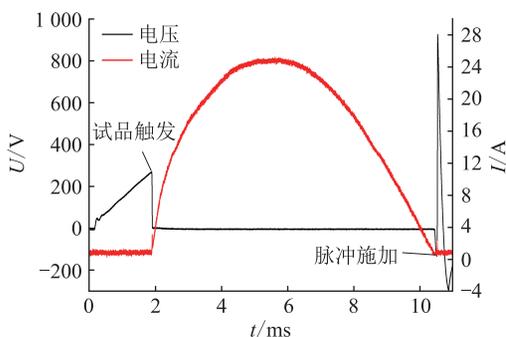


图2 晶闸管两端电压与流过晶闸管的电流

Fig.2 The voltage across the thyristor and current flowing through the thyristor

实验过程为:首先将主电容 C_1 充电至期望电压,随后闭合开关K投入工频电源,正弦激励被加至试品两端;在高压晶闸管试品两端电压进入正弦电压正半周波2 ms(此时高压晶闸管试品两端电压约300 V)后,控制芯片给高压晶闸管试品门极发送

触发信号使其导通;约半个工频周期后,正弦电压波形由正转负,流过晶闸管的电流随即过零;当监测到晶闸管试品两端电压小于-17 V(将阈值设定为-17 V而非0 V是为了防止电压扰动的误判)时,认为晶闸管级单元进入反向恢复期,以此作为反向恢复期的起始时刻 t_0 ;在 $t=t_0+\Delta t$ 时,同步触发4个串联晶闸管开关开通,即可在进入反向恢复期后 Δt 时刻对高压晶闸管试品施加电压脉冲。图3为在反向恢复期内的不同时刻对高压晶闸管试品施加高压脉冲后,试品两端的电压波形。

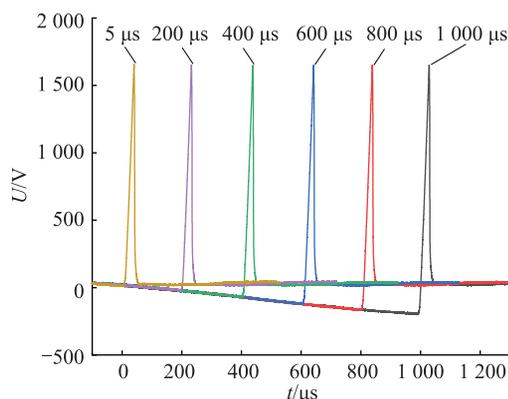


图3 反向恢复期内晶闸管两端电压

Fig.3 Voltage across the thyristor during the reverse recovery period

1.2 晶闸管特性参数测试平台

为保证晶闸管特性参数测量准确、可靠,文中参考国家标准推荐电路搭建了高压晶闸管特性参数测试平台^[22],并制定相应测量方案。图4为晶闸管反向恢复电流通态压降、漏电流(以正向漏电流为例,反向漏电流与正向漏电流波形相同)、触发电压、触发电流的测量波形。

反向恢复电荷 Q_{rr} 的计算取从反向恢复电流 i_T 过零时刻($t = t_0$)开始至反向恢复电流衰减至零时刻($t = t_0 + t_{rr}$)时间段内电流对时间的积分值,如式(1)所示。

$$Q_{rr} = \int_{t_0}^{t_0+t_{rr}} i_T dt \quad (1)$$

为保证晶闸管处于完全开通的状态,在电流脉冲下降沿处取峰值电流 I_{av} 的90%所对应的晶闸管压降为通态压降 V_T ,如图4(b)所示。

测量试品正向漏电流 I_{Lr} 时只输出2个工频正弦半波,在读取漏电流数值时取第一个正弦半波电压下电流的峰值 I_{peak} ,如图4(c)所示,测量试品反向漏电流 I_{Lr} 的方法与测量 I_{Lr} 时相同。

测量触发特性时取晶闸管试品开通前瞬间的电压值 U_T 、电流值 I_T 为其触发电压和触发电流,如图4(d)所示。

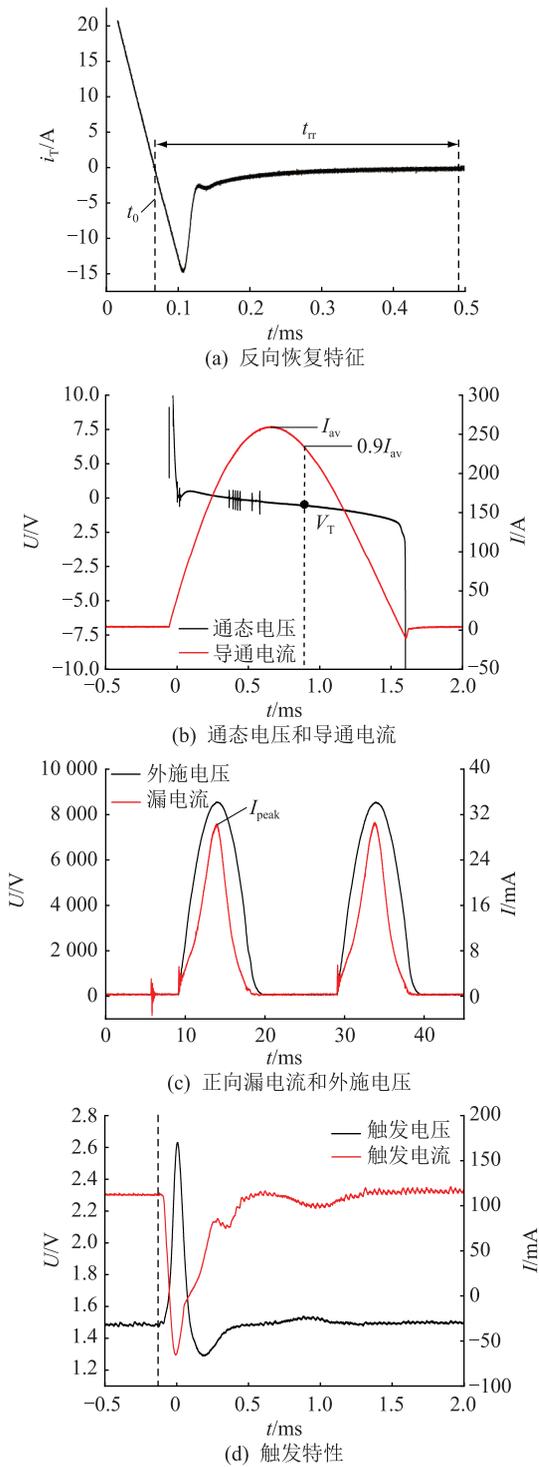


图4 晶闸管特性参数测量波形

Fig.4 Waveforms of thyristor characteristic parameters measurement results

2 反向恢复期不同阶段的脉冲冲击实验

对于文中实验回路,测得室温下晶闸管试品的反向恢复时间在 200 μs 内,据此在整个反向恢复期时间窗口内选取了 $t = 25 \mu\text{s}$ (晶闸管刚进入反向恢复期,称为反向恢复期初期), $t = 110 \mu\text{s}$ (晶闸管已进入反向恢复期一段时间,称为反向恢复期中期),

$t = 150 \mu\text{s}$ (晶闸管已基本恢复电压阻断能力,称为反向恢复期末期)进行脉冲冲击实验。

2.1 反向恢复期初期的脉冲冲击实验

试品 G_1 的实验条件为: 室温下在 $t = 25 \mu\text{s}$ 遭受电压冲击,冲击次数最高 10 000 次(若发生性能退化或器件损坏则停止冲击,下文亦同),相邻 2 次脉冲冲击间隔时间 5 s,试品遭受单次脉冲冲击的电压、电流波形如图 5 所示。此时晶闸管刚进入反向恢复期,其基区还残留有大量非平衡载流子,因此在重加正向电压时晶闸管极易发生二次导通,且导通电压仅不到 600 V,远低于晶闸管额定工作电压。

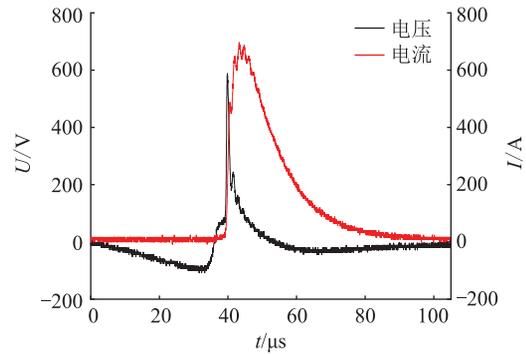


图5 G_1 遭受单次脉冲冲击后的电压和电流

Fig.5 Voltage and current of G_1 after single pulse impact

表 1 为 G_1 在上述冲击过程中的特性参数。可见 G_1 在反向恢复期初期遭受冲击过程时特性参数无明显变化,其原因为高压晶闸管在反向恢复期初期的二次导通电压远低于其工作额定电压,使晶闸管免于承受过高电压冲击,故此时二次导通后电流应力为致使晶闸管受损的主要因素。尽管对 G_1 的冲击中二次导通电流峰值和上升率均超过了试品的通态平均电流与临界通态电流上升率,但此程度的冲击对试品的损伤较小,即使冲击次数 N 达到 10 000 次,试品的主要特性参数仍无变化。

表 1 G_1 遭受冲击过程中的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of G_1 during pulse impact

特性参数	$N=0$	$N=5\ 000$	$N=10\ 000$
$Q_{rr}/\mu\text{C}$	1 017.4	1 023.2	1 005.8
V_T/V	1.88	1.88	1.88
U_T/V	1.42	1.42	1.41
$I_T/m\text{A}$	111.6	109.9	110.5
$I_{Ur}/m\text{A}$	24.6	25.2	23.7
$I_{Ur}/m\text{A}$	11.2	11.1	11.7

在此基础上,通过减小回路电阻 R_d 和 R_f 、增大主电容 C_1 来增大反向恢复期初期二次导通的电流

应力。设置试品 G_2 的实验条件为:室温下在 $t = 30 \mu\text{s}$ 遭受电压脉冲,冲击总次数最高 10 000 次,相邻 2 次脉冲冲击间隔时间 5 s,试品遭受单次脉冲冲击后的电压、电流波形如图 6 所示。

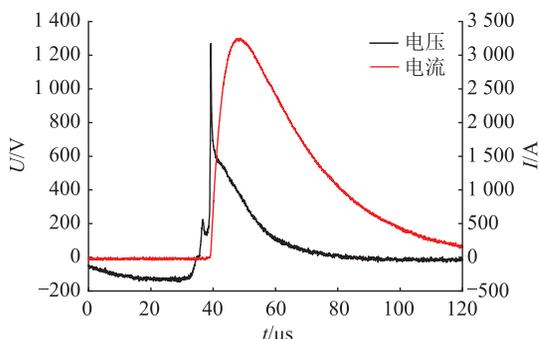


图 6 G_2 遭受单次脉冲冲击后的电压和电流
Fig.6 Voltage and current of G_2 after single pulse impact

G_2 在遭受冲击 150 次后,其正反向阻断能力明显降低,测得器件阴阳极间阻值降至约 50 k Ω (正常试品测量值为 M Ω 级)。继续对 G_2 进行冲击,试品的阻断性能迅速下降, $N = 158$ 时,试品已完全丧失阻断能力而失效。表 2 为 G_2 在上述冲击过程中的特性参数,由表可见 G_2 在遭受冲击前后的反向恢复特性、通态压降、触发电压、触发电流均无明显变化。且由于阻断特性的剧烈退化,试品的漏电流激增,触发了特性参数测试平台保护功能,致使电压波形被截断,测试电压与对应的漏电流波形见图 7。

表 2 G_2 遭受电压冲击过程中的特性参数
Table 2 Characteristic parameters of G_2 during pulse impact

特性参数	$N=0$	$N=150$
$Q_n/\mu\text{C}$	908.5	901.2
V_T/V	1.96	1.96
U_T/V	1.44	1.43
I_T/mA	109.8	108.9
I_{U1}/mA	17.6	波形截断
I_{U2}/mA	17.3	波形截断

2.2 反向恢复期中期的脉冲冲击实验

试品 G_3 的实验条件为:室温下在 $t = 110 \mu\text{s}$ 遭受电压脉冲,冲击总次数最高 10 000 次,相邻 2 次脉冲冲击间隔时间 5 s,试品遭受单次脉冲冲击后的电压、电流波形如图 8 所示。由图可见此时试品仍能在脉冲电压下二次导通,但随着反向恢复过程的推进,晶闸管基区的过剩载流子在反向恢复电流的抽出作用和其自身的复合作用下已大大减少,使得二次导通时的电压相比图 6 显著增大。

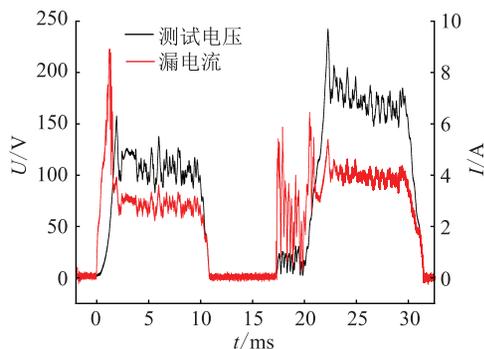


图 7 G_2 遭受脉冲冲击后的测试电压与漏电流
Fig.7 Leakage current and test voltage of G_2 after pulse impact

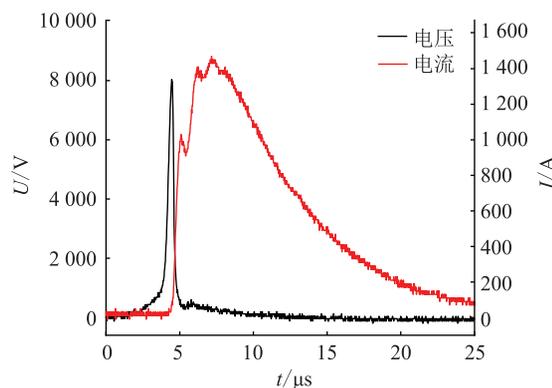


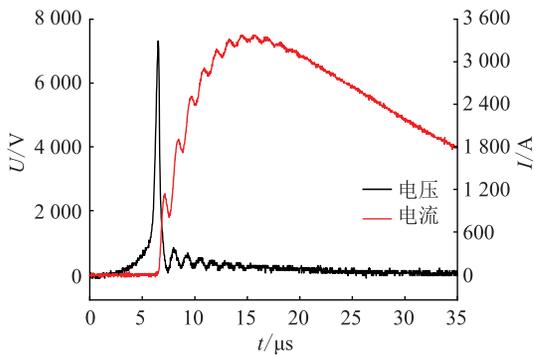
图 8 G_3 遭受单次脉冲冲击后的电压和电流
Fig.8 Voltage and current of G_3 after single pulse impact

表 3 为 G_3 在上述冲击过程中的特性参数。可见 G_3 在反向恢复期中期遭受冲击过程中各项特性参数无明显变化,表明尽管此时的二次导通电压已达 8 000 V,但电压应力不是造成器件受损的主因,电流应力仍然是反向恢复期中期致使晶闸管受损的主要因素。

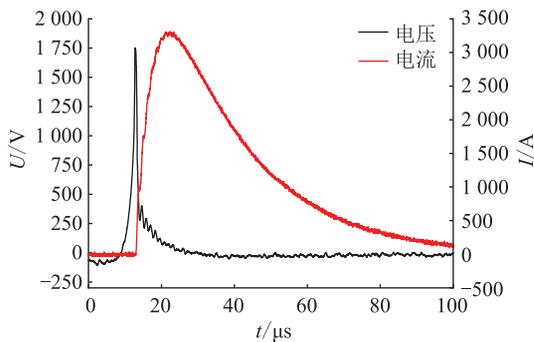
表 3 G_3 遭受电压冲击过程中的特性参数
Table 3 Characteristic parameters of G_3 during pulse impact

特性参数	$N=0$	$N=5\ 000$	$N=10\ 000$
$Q_n/\mu\text{C}$	893.4	897.7	885.6
V_T/V	1.92	1.93	1.92
U_T/V	1.26	1.25	1.25
I_T/mA	114.5	113.7	112.8
I_{U1}/mA	17.9	18.2	16.3
I_{U2}/mA	6.8	7.1	6.4

增大反向恢复期中期二次导通的电流应力,试品 G_4 的实验条件为:室温下在 $t = 110 \mu\text{s}$ 遭受脉冲,冲击总次数最高 10 000 次,相邻 2 次脉冲冲击间隔时间 5 s,试品遭受单次脉冲冲击后的电压、电流波形如图 9 所示。

图9 G_4 遭受单次脉冲冲击后的电压和电流Fig.9 Voltage and current of G_4 after single pulse impact

试品 G_4 在遭受冲击 163 次后阻断能力出现明显退化,此时在同样条件下对其进行冲击后的电压、电流波形见图 10。与图 9 相比,可知 G_4 已无法耐受高压,在约 1 750 V 的电压下试品即导通,导通后的电流波形与阻断能力退化前基本一致。用万用表测得 G_4 阴阳极之间阻值降至约 140 k Ω 。表 4 为遭受冲击过程中 G_4 的特性参数,由表可见 G_4 在遭受冲击前后反向恢复特性、通态压降、触发电压、触发电流均无明显变化,仅有阻断特性大幅度退化。

图 10 G_4 阻断能力退化下遭受脉冲冲击后的电压和电流波形Fig.10 Voltage and current of G_4 under block ability degradation after pulse impact表 4 G_4 遭受电压冲击过程中的特性参数
Table 4 Characteristic parameters of G_4 during pulse impact

特性参数	$N=0$	$N=163$
$Q_n/\mu\text{C}$	928.4	927.7
V_T/V	1.90	1.90
U_T/V	1.53	1.52
I_T/mA	142.8	138.9
I_{Uf}/mA	15.8	波形截断
I_{Ur}/mA	14.2	波形截断

2.3 反向恢复期末期的脉冲冲击实验

试品 G_5 的实验条件为:室温下在 $t=150 \mu\text{s}$ 遭

受电压脉冲,冲击总次数最高 10 000 次,相邻 2 次脉冲冲击间隔时间 5 s,试品遭受单次脉冲冲击后电压、电流波形如图 11 所示。由图可见此时晶闸管基区内的大部分过剩载流子已消耗殆尽,晶闸管已基本恢复对外电压的阻断能力,在外施电压脉冲峰值达到 $1.05U_{\text{DRM}}=8\ 925 \text{ V}$ 时(U_{DRM} 为晶闸管断态重复峰值电压),晶闸管未出现二次导通,此时流过晶闸管的电流很小,仅为数百毫安。此电流由两部分组成,其一为关断末期残留在晶闸管基区的少量积累载流子形成的电流;其二为外施脉冲电压 dv/dt 引起的位移电流。

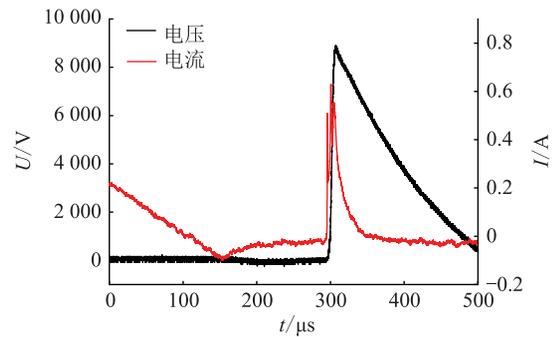
图 11 G_5 遭受单次脉冲冲击后的电压和电流Fig.11 Voltage and current of G_5 after single pulse impact

表 5 为 G_5 在上述冲击过程中的特性参数。由表可见, G_5 在反向恢复期末期遭受 10 000 次脉冲冲击而不导通的过程中,各项特性参数无明显变化。其原因为此时流过晶闸管的电流主要为流过 PN 结的位移电流,位移电流从晶闸管的 J_2 结流过而不引起晶闸管的导通,难以对试品造成损害,因此电压应力是造成晶闸管损伤或特性退化的主要因素。

表 5 G_5 遭受电压冲击过程中的特性参数
Table 5 Characteristic parameters of G_5 during pulse impact

特性参数	$N=0$	$N=5\ 000$	$N=10\ 000$
$Q_n/\mu\text{C}$	898.4	895.4	888.6
V_T/V	1.93	1.92	1.92
U_T/V	1.25	1.25	1.25
I_T/mA	113.7	112.4	112.8
I_{Uf}/mA	14.4	15.8	13.9
I_{Ur}/mA	11.5	10.6	12.4

选取试品 G_6 进行反向恢复期末期遭受电压脉冲发生击穿而导通的冲击实验,测量了冲击过程中的特性参数。 G_6 的实验条件为:室温下在 $t=150 \mu\text{s}$ 遭受电压脉冲被击穿而导通,脉冲冲击总次数最高 10 000 次,相邻 2 次脉冲冲击间隔时间 5 s,试品遭受单次脉冲冲击后电压、电流波形如图 12 所示。由

图可见 G_6 在约 9 100 V 的电压冲击下被击穿而导通,此电压已超过器件的额定电压,晶闸管中的电流在器件被击穿后迅速上升。

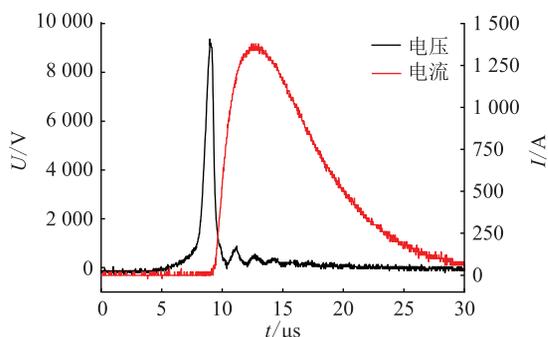


图 12 G_6 遭受单次脉冲冲击后的电压和电流

Fig.12 Voltage and current of G_6 after single pulse impact

试品 G_6 在上述条件下遭受脉冲冲击 4 620 次后阻断能力退化,用万用表测得 G_6 阴阳极之间阻值降至约 50 k Ω 。若在此条件下继续冲击,试品的阻断性能将迅速下降,在冲击次数 $N=4\ 648$ 次时,试品已完全短接而失效。 G_6 与 G_3 相比,两者承受的电流应力基本一致,而 G_6 的电压应力大于 G_3 ,因此 G_6 的冲击实验中电压应力为造成试品特性退化至失效的主要因素。但此情况下试品被冲击至性能退化的次数远远高于反向恢复初期与中期的冲击次数,可以预期,若在保证 G_6 受冲击的电压应力不变的情况下增大其电流应力,试品将会在冲击次数大大减少的情况下迅速退化至失效,因此反向恢复期末期试品被击穿而导通时为电压应力和电流应力共同对高压晶闸管试品造成损伤。

3 退化与失效器件拆片分析

将失效试品 G_2 拆装,取出芯片进行分析,图 13 为取出的晶闸管芯片。由图可见,在 G_2 的拆封芯片上可见明显击穿点,击穿点分布于阴极面上与门极线相距不远处,击穿点尺寸很小,表明试品在反向恢复期初期二次导通过程中电流仅能扩散至芯片较小区域内。二次导通区域小致使贯通的电流通道内有较高密度电流聚集,而硅的比热和热传导率都很小,致使该区域的温度急剧上升,器件可能发生热击穿而短路。

拆封阻断能力退化的 G_4 ,图 14(a)为取出的晶闸管芯片。由图可见,在 G_4 拆封芯片上有 2 处圆斑,对其形成的解释为试品在反向恢复期中期受到脉冲反复冲击时总是在某个或某几个薄弱处(可能由硅片制造过程中引入的缺陷等因素引起)二次导



图 13 G_2 芯片

Fig.13 Chip of G_2

通,二次导通区域内的温度因电流密度聚集而急剧上升,在导通区域与未导通区域温度梯度引起的热应力的反复作用下,圆斑形成。圆斑形成处硅片 PN 结可能在脉冲累积作用下由于反复的热冷循环以及单次冲击的过高温升而出现性能下降,对于高压晶闸管试品其正向耐压主要依赖于反偏的 J_2 结,反向耐压主要依赖于反偏的 J_1 结,PN 结的性能下降导致 G_4 阻断能力退化。由于圆斑处阻断能力的下降使得二次导通总是在圆斑处发生,因此若对阻断能力退化的试品继续冲击,试品将在圆斑处击穿并形成肉眼可见的明显击穿点,如图 14(b) 所示(试品 $G_{4.2}$ 与试品 G_4 的实验条件相同,在试品 $G_{4.2}$ 阻断能力下降后继续对其进行冲击至失效)。将失效试品 G_6 拆片分析,图 15 为取出的晶闸管芯片。

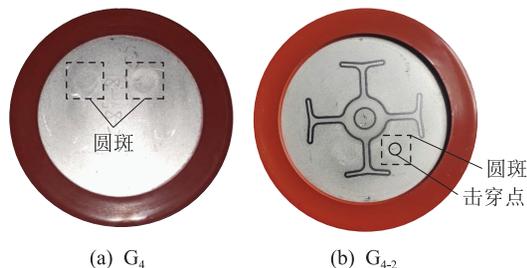


图 14 G_4 和 $G_{4.2}$ 芯片

Fig.14 Chip of G_4 and $G_{4.2}$



图 15 G_6 芯片

Fig.15 Chip of G_6

由图 15 可见, G_6 拆封芯片阳极面上有明显击穿痕迹,痕迹位于芯片边缘与绝缘橡胶相接处。此种击穿为 PN 结的雪崩击穿,势垒区载流子在强场作用下获得很高的漂移速度,这样的载流子在与晶格原子碰撞时发生原子电离,从而产生新的电子、空

穴对,上述碰撞过程多次进行,产生连锁反应,使流过PN结的电流急剧增大,导致晶闸管被击穿^[23]。

4 结论

文中搭建了高压晶闸管反向恢复期脉冲作用实验平台与特性参数测试平台,研究了高压晶闸管在反向恢复期内不同阶段遭受脉冲冲击过程中的特性参数,并对性能退化和失效的晶闸管进行拆片分析,结论如下:

(1) 反向恢复期初期和中期的冲击对高压晶闸管造成损伤的主要原因为二次导通后的电流应力。反向恢复期末期冲击晶闸管不导通时,电压应力为试品受损的主要原因,末期冲击晶闸管被击穿时,导通的电压应力与电流应力共同对试品造成损伤;

(2) 反向恢复期脉冲作用下高压晶闸管退化或失效表现为阻断能力的退化或丧失,由此引起晶闸管漏电流剧增,漏电流可作为表征晶闸管状态变化的特征参量;

(3) 反向恢复期初期和中期冲击失效器件芯片上可见由热击穿形成的击穿点,反向恢复期中期阻断能力退化芯片上可见热应力作用形成的圆斑,反向恢复期末期冲击器件发生雪崩击穿而失效,击穿痕迹位于芯片边缘与绝缘橡胶相接处。

参考文献:

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34):6007-6020.
- [2] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,36(4):1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4):1-9.
- [3] 马为民. 高压直流输电系统设计[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
MA Weimin. HVDC transmission system design[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [4] ALIZADEH B A M, KHEDERZADEH M, RAZZAGHI R. Fault detection during power swing in thyristor-controlled series capacitor-compensated transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187:106481.
- [5] 陈炫宇,陶风波,徐阳,等. 基于TCAD的脉冲作用下晶闸管反向恢复特性仿真研究[J]. 电力工程技术,2020,39(5):185-190.
CHEN Xuanyu, TAO Fengbo, XU Yang, et al. Reverse recovery characteristics of high voltage thyristor induced by voltage pulse based on TCAD[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5):185-190.
- [6] YUE K, PANG L, YOU H Y, et al. Reverse recovery characteristics of high power thyristors in HVDC converter valve[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4):2132-2140.
- [7] 苟锐锋,马振军. 高压晶闸管换流阀电控型和光控型晶闸管反向恢复期的不同保护策略[J]. 高电压技术,2016,42(12):3982-3988.
GOU Ruifeng, MA Zhenjun. Different protection tactics for electric triggered thyristor and light triggered thyristor valve about reverse recovery period[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12):3982-3988.
- [8] 叶明天,李戈琦,陈炫宇,等. 高压直流换流阀晶闸管控制单元保护特性与晶闸管级仿真建模[J]. 电网技术,2020,44(4):1445-1452.
YE Mingtian, LI Geqi, CHEN Xuanyu, et al. Protection characteristics of thyristor control unit and simulation model of thyristor-level for HVDC converter valve[J]. Power System Technology, 2020, 44(4):1445-1452.
- [9] 任小静,王潇,刘飞超,等. 两种特高压直流输电用晶闸管控制单元工作原理分析对比[J]. 高压电器,2015,51(7):74-77.
REN Xiaojing, WANG Xiao, LIU Feichao, et al. Comparative analysis on operating principles of the two thyristor control unit in UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7):74-77.
- [10] 陈亦汉,张刚琦. 晶闸管阻断恢复期保护定值的研究[J]. 电力电子技术,2021,55(4):94-98.
CHEN Chihan, ZHANG Gangqi. Reserch on the protection setting value of thyristor in blocking recovery period[J]. Power Electronics, 2021, 55(4):94-98.
- [11] Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission part 1-electrical testing; GB/T 20990.1-2007[S]. Beijing:Standards Press of China, 2007.
- [12] Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission part 1-electrical testing; IEC 60700-1-2008[S]. Geneva:International Electrotechnical Commission, 2008.
- [13] 刘隆晨,岳珂,庞磊,等. 高压直流输电换流阀晶闸管级单元综合测试系统设计与实现[J]. 电网技术,2016,40(3):756-761.
LIU Longchen, YUE Ke, PANG Lei, et al. Design and implementation of synthetic test system for thyristor level of HVDC converter valve[J]. Power System Technology, 2016, 40(3):756-761.
- [14] 刘隆晨,岳珂,庞磊,等. 基于反向恢复特性的换流阀晶闸管级控制单元保护功能测试研究[J]. 电网技术,2017,41(11):3727-3732.
LIU Longchen, YUE Ke, PANG Lei, et al. Study on protective function test of control unit of thyristor level in HVDC converter valve based on thyristor reverse recovery characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(11):3727-3732.

- [15] 凌云,郭焕. 葛洲坝换流站极 II 换流阀故障分析[J]. 华中电力, 2010,23(6):57-60.
LING Yun, GUO Huan. Fault analysis of pole II thyristor valves in Gezhouba converter station[J]. Central China Electric Power, 2010,23(6):57-60.
- [16] SAMPEI M, YAMADA T, TANABE S, et al. Secular change in characteristics of thyristors used in HVDC valve [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1159-1167.
- [17] LI X, SINTRA L, DHALIWAL N S. Nelson river pole 1 thyristor leakage problem [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2):800-809.
- [18] 李杰, 庞磊, 陈炫宇, 等. 稳态电压加速应力下晶闸管特征参数退化规律及失效机理分析[J]. 电网技术, 2021, 45(12):4941-4948.
LI Jie, PANG Lei, CHEN Xuanyu, et al. Degradation law and failure mechanism analyses of thyristor characteristic parameters under steady state voltage[J]. Power System Technology, 2021, 45(12):4941-4948.
- [19] 岳珂, 庞磊, 陈炫宇, 等. 脉冲电压作用下晶闸管反向恢复期损伤效应与机理分析[J]. 电网技术, 2020, 44(7):2794-2800.
YUE Ke, PANG Lei, CHEN Xuanyu, et al. Damage effect and mechanism analysis of thyristor induced by pulse voltage in reverse recovery period[J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2794-2800.
- [20] 梁宁, 张志刚, 刘翠翠, 等. 电磁脉冲环境下 HVDC 换流阀晶闸管的失效机理及寿命模型分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2):142-146.
LIANG Ning, ZHANG Zhigang, LIU Cuicui, et al. Failure mechanism and lifetime model analysis on thyristor in HVDC converter valve under EMP[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2):142-146.
- [21] LEI Zhaoyu, GUO Jianyi, TIAN Yingfu, et al. Thyristor aging-state-evaluation method based on state information and tensor domain theory[J]. Electronics, 2021, 10(21):2700.
- [22] 半导体分立器件——晶闸管: GB/T 15291—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Semiconductor devices part 6-thyristors: GB/T 15291-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [23] B. JayantBaliga. 先进的高压大功率器件: 原理、特性和应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
BALIGA B. Jayant. Advanced high voltage power device concepts[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.

作者简介:



叶明天

叶明天(1994),男,硕士,研究方向为高压电力电子技术、高压直流换流阀试验等(E-mail: ye1967mingtian99@stu.xjtu.edu.cn);

庞磊(1981),男,博士,副教授,研究方向为高压电力电子技术、换流阀试验及状态评估等;

张乔根(1965),男,博士,教授,研究方向为气体放电理论、脉冲功率技术等。

Failure analysis of high voltage thyristor under impulse during reverse recovery period

YE Mingtian¹, PANG Lei¹, ZHANG Qiaogen¹, TAO Fengbo², XU Jianguang³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: To acquire the characteristic parameters which demonstrate the state of high voltage thyristor for clarifying its failure mechanism, an experiment platform which can not only generate high voltage pulses to thyristor at different moments during reverse recovery period, but also accurately measure its key characteristics is established. The change of characteristic parameters during the pulse impact process is studied, and the disassembly of the degraded and failed thyristors is analyzed. The results show that the damage of the thyristor can be mainly manifested as the reduction or loss of its blocking ability undertake voltage pulses in the middle of the reverse recovery period. Leakage current can be used as a characteristic parameter to estimate the state of the thyristor. For thyristors undertake voltage pulses in the beginning and middle of the reverse recovery period, obvious breakdown spot can be seen on the silicon wafer surface. Obvious breakdown points can be seen on the device chips that have been impacted and failed in the early and middle reverse recovery period. Circular spots formed by thermal stress can be seen on the device chips that are impacted in the middle of the reverse recovery period and have degraded blocking ability. Reverse recovery avalanche breakdown flash marks can be seen at the junction between the edge of the device chip and the insulating rubber that have been impacted and failed at the end of the period.

Keywords: high power thyristor; voltage impulse; reverse recovery; failure analysis; characteristic parameters; performance degradation

(编辑 方晶)