



·脉冲功率技术·

晶闸管反向并联二极管组件的关断特性研究^{*}

李 涛¹, 张星汝², 何孟兵², 刘 俊², 冯冰洋²

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 晶闸管具有控制特性好, 寿命长、体积小、噪声小等优点, 是高功率脉冲电源的重要器件。但晶闸管在高电压、大电流、重频工作条件下使用时, 会出现晶闸管无法在特定时间内关断的情况, 导致脉冲电源出现故障。为提高晶闸管在重频下的工作能力, 本文对脉冲功率晶闸管组件的关断过程进行研究。基于晶闸管的关断原理和实验分析, 在相同 di/dt 下, 增大电流峰值 I_p 对晶闸管反向恢复特性影响较小, 并得到了晶闸管的反向恢复时间、反向恢复电荷和 di/dt 的关系。根据实验数据拟合晶闸管反向恢复电流波形, 修改了电流指数函数模型, 可以更好地拟合反向恢复电流。

关键词: 脉冲功率开关; 晶闸管; 反向恢复; 动态均压; 静态均压

中图分类号: TM832 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200239

Research on shutdown characteristics of thyristor reverse parallel diodes

Li Tao¹, Zhang Xingru², He Mengbing², Liu Jun², Feng Bingyang²

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and New Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Thyristor has the advantages of good control characteristics, long life time, small size, low noise, etc., and it is an important device for high-power pulsed power supplies. However, when a thyristor is used under high voltage, high current, and repetitive frequency working conditions, the thyristor may not be turned off within a certain time, causing the pulse power supply to fail. To improve the working ability of the thyristor under repetitive frequency, this paper studies the turn-off process of the pulse power thyristor component. Based on the turn-off principle and experimental analysis of the thyristor, it is found that under the same conditions, increasing the current peak value has little effect on the reverse recovery characteristics of the thyristor, and the relationship is got between reverse recovery time, reverse recovery charge and di/dt of the thyristor. The reverse recovery current waveform of the thyristor is fitted according to the experimental data, and the current exponential function model is modified to better fit the reverse recovery current.

Key words: pulse power switch; thyristor; reverse recovery; dynamic voltage equalization; static voltage equalization

晶闸管从导通向关断状态转换时, 需要经过反向恢复过程, 即过剩的基区载流子耗尽的过程^[1]。脉冲功率电源电压高、电流大, 晶闸管的尺寸也随之增大, 反向恢复过程更为显著。如果在晶闸管关断过程中施加电压, 晶闸管会因为上升的电压重新导通, 无法正常关断。在高压情况下, 晶闸管串联使用, 如果串联组件的反向恢复特性不一致, 先关断的晶闸管承受电压高, 可能会出现过电压现象^[2-4]。所以晶闸管的反向恢复过程在晶闸管的应用中极为重要。晶闸管的关断过程由外部电路和内部物理设计参数所决定^[5-6], 内部参数主要由晶闸管内少数载流子寿命决定^[7-8]。国内外已经有一些学者对晶闸管的反向恢复过程进行了研究, 文献 [9] 论述了计算晶闸管关断模型反向恢复电流参数的一种方法, 文献 [10] 建立了具有反向恢复过程的脉冲晶闸管模型, 文献 [11-13] 介绍了晶闸管的均压电路设计。本文的脉冲功率发生装置的晶闸管开关反向并联了续流二极管, 由于换向电压低, 关断时间明显增长,

* 收稿日期: 2020-08-15; 修订日期: 2021-02-18

作者简介: 李 涛 (1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事特种电源技术研究; litao6831@caep.cn。

通信作者: 张星汝 (1996—), 女, 硕士, 从事脉冲功率技术研究; zhangxingru@hust.edu.cn。

会出现晶闸管无法在特定时间内关断的情况,导致脉冲电源出现故障。为提高晶闸管在重频下的工作能力,本文对晶闸管反向并联续流二极管的开关的关断特性进行研究。

1 关断理论

晶闸管在正向导通情况下,自由载流子流入晶闸管的基区,关断时,需要将过剩的载流子耗尽,会出现由存储电荷导致的反向恢复电流,如图 1 所示,反向恢复电流达到最大值时,晶闸管开始承受反向电压。反向电流在达到最大值之后,开始下降,在重新加载正向电压到晶闸管之前,存储电荷必须被减小到最少电荷量,反向恢复电荷 Q_{rr} 是在从导通状态切换到反向截止状态之后流出半导体的总电荷量。晶闸管关断时间 t_q 是电流过零和重新施加正向电压晶闸管不导通之间的时间间隔,电流过零时的电流变化率为 di/dt ,反向电流最大值为 I_{RM} ,施加在晶闸管上的反向电压为 V_R ,反向恢复过程中的最大反向电压为 V_{RM} ,反向电流为 $90\%I_{RM}$ 和反向电流为 $10\%I_{RM}$ 的点的连线在横坐标的交点对应的时间为反向恢复时间 t_{rr} 。

晶闸管反向恢复电流的暂态计算模型主要有指数函数恢复电流模型^[1]和正切函数恢复电流模型^[4],在指数函数模型下,电流曲线如图 2 所示,导通时的电流为 I_F , t_1 时电流为 0, t_2 时反向恢复电流达到最大值 I_{RM} , t_3 时反向恢复电流为 $0.1I_{RM}$ 。

式(1)为晶闸管关断的电流函数, τ 为时间常数。

$$i_r(t) = \begin{cases} t di/dt & t < t_2 \\ -I_{RM} \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau}\right) & t \geq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

晶闸管处于稳定开通状态时,大多数电荷存储于基区,由基区过剩的少数载流子组成,其中主要是空穴载流子。随着晶闸管电流的减小,载流子浓度减小,在 $t = t_1$ 时,晶闸管电流为零,但依然存在大量的非平衡载流子,非平衡载流子浓度通过迁移、扩散、复合等方式减小,当 $t = t_2$ 时,即晶闸管反向电流达到最大值。存储时间 $t_s = t_2 - t_1$,在存储时间内,电流变化率 di/dt 为常数。 $t > t_2$ 为晶闸管的反向恢复特性,非平衡载流子以复合形式降低浓度,电流以时间常数 τ 按指数规律变化。当 $t = t_3$ 时, $i = 10\%I_{RM}$ 时间间隔 $t_f = t_3 - t_2$,晶闸管的反向恢复时间为 $t_{rr} = t_s + t_f$ 。

由指数函数恢复电流模型公式,可以计算晶闸管的反向恢复电荷, Q_d 为 $t_1 - t_2$ 时间段内流出晶闸管的电荷量, Q_j 为 $t_2 - t_3$ 时间段内流出晶闸管的电荷量。

$$Q_d = \frac{1}{2} I_{RM} t_s \quad (t_s = t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$Q_j = \int_0^{\infty} I_{RM} e^{-t/\tau} dt = \tau I_{RM} \quad (3)$$

$$Q_{rr} = Q_d + Q_j = I_{RM} \left(\frac{t_s}{2} + \tau \right) \quad (4)$$

代入 t_3 时的电流

$$I_{RM} e^{-t_f/\tau} = 0.1 I_{RM} \quad (t_f = t_3 - t_2) \quad (5)$$

可以得到

$$\tau = t_f / \ln 10 \quad (6)$$

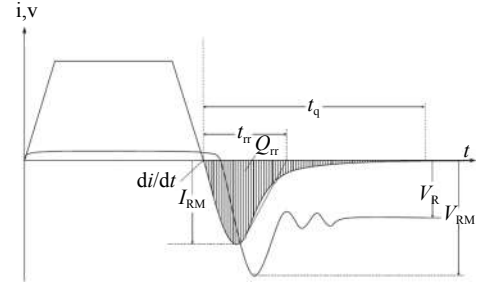


Fig. 1 Thyristor shutdown voltage and current waveforms
图 1 晶闸管关断电压电流波形

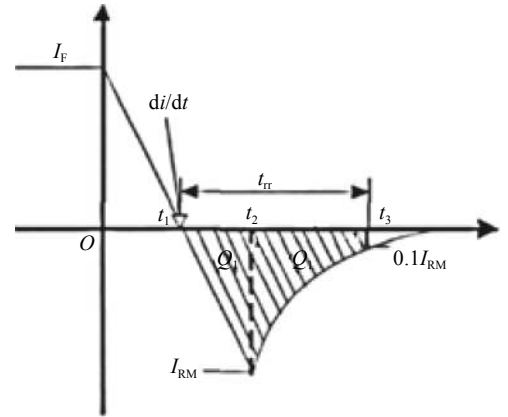


Fig. 2 Thyristor current exponential function model
图 2 晶闸管电流指数函数模型

2 晶闸管反向恢复特性与电流的关系

对晶闸管的反向恢复过程进行研究,需要设计电路测量晶闸管在关断过程中的电流电压波形。实验电路如图3所示,实验电路由直流电源 U_S 、电容 C 和电感 L 组成,晶闸管SCR两端反向并联二极管 D 作为开关并联在电源两端。论文中用的晶闸管是台基半导体公司的Y50KPJ,断态不重复峰值电压和反向不重复峰值电压 $U_{DRM}/U_{RRM}=3\text{ kV}$,通态平均电流 $I_{T(AV)}=800\text{ A}$,二极管为台基半导体公司的Y50ZPE,反向不重复峰值电压 $U_{RRM}=3\text{ kV}$,通态平均电流 $I_{T(AV)}=800\text{ A}$ 。在晶闸管导通之前,电源给电容充电,晶闸管导通时,电容 R 和电感 L 组成串联谐振电路,谐振电流为负时,电流从反向并联二极管流过,晶闸管开始关断,晶闸管关断之后,电流为0。

晶闸管的关断特性与晶闸管的电流有关,如果按照图3连接实验电路,只改变电压幅值,不改变电路参数,电流峰值 I_p 和电流过零点的电流变化率 di/dt 是成比例变化的,无法确定是晶闸管的反向恢复特性是受电流峰值 I_p 还是 di/dt 影响。所以设计实验分别测量在不同电流峰值 I_p 和不同 di/dt 下的晶闸管反向恢复电流特性,得到晶闸管反向恢复特性与电流的关系。

调节充电电源电压和电容大小,保持流过晶闸管的电流峰值 I_p 不变,测量晶闸管在不同 di/dt 下的反向恢复电流波形如图4所示。在电流峰值 I_p 不变的情况下,晶闸管的反向恢复电流峰值 I_{RM} 随着 di/dt 增大而增大。

调节充电电源电压和电感的大小,保持晶闸管过零时的电流变化率 di/dt 不变,测量晶闸管在不同的峰值电流 I_p 下的反向恢复电流波形如图5所示,可以得出结论:在本实验条件下,保持电流变化率 di/dt 不变,只改变晶闸管的峰值电流 I_p ,晶闸管的反向恢复特性几乎无变化。

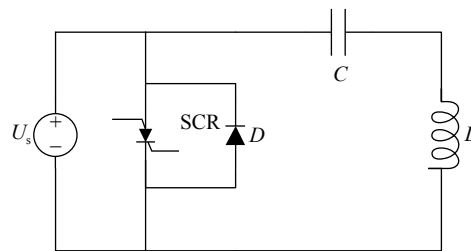


Fig. 3 Shutdown experiment circuit diagram

图3 关断实验电路图

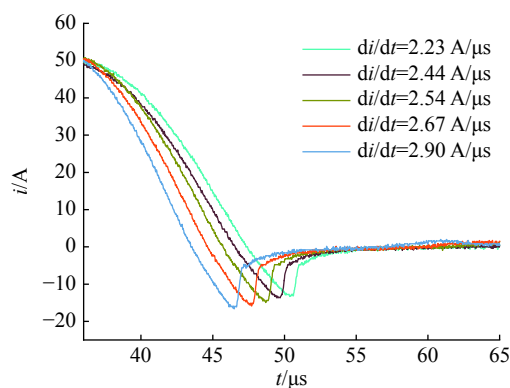


Fig. 4 Reverse recovery current of thyristor under different di/dt

图4 不同 di/dt 下晶闸管反向恢复电流

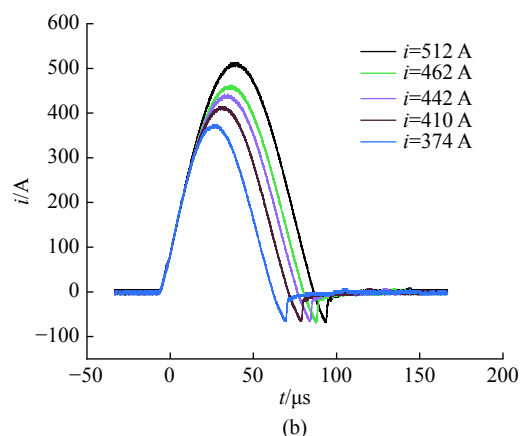
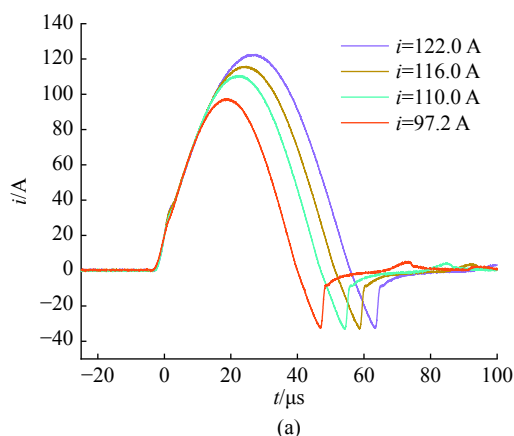


Fig. 5 Reverse recovery current of thyristor under different current peaks I_p

图5 不同电流峰值 I_p 下晶闸管的反向恢复电流

根据以上实验,可以得出结论:在本实验条件下,晶闸管电流过零点时的电流变化率 di/dt 对晶闸管关断特性影响大,在相同 di/dt 下,增大电流峰值 I_p 对晶闸管反向恢复特性无影响。

从晶闸管的关断机理分析,当晶闸管处于导通状态时,大多数电荷储存在基区,由基区过剩的少数载流子组成,电荷连续性方程可得

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau_1} \quad (7)$$

式中: $I(t)$ 为流过器件的电流; Q 为基区存储电荷; τ_1 为基区少子寿命。代入本文电路中的正弦电流,在晶闸管电流过零点 $t = t_1$ 时的基区存储电荷为

$$Q(t_1) = \frac{k\tau_1^2 di/dt}{1 + \omega^2\tau_1^2} (1 + e^{\frac{-\pi}{\omega\tau_1}}) \quad (8)$$

式中: k 为比例系数; ω 为电流角频率。虽然在反向恢复阶段,也有在载流子向基区注入,基区存储电荷只占反向恢复电荷的一部分,但是可以看出基区存储电荷随着 di/dt 增大而增大,即反向恢复电荷 Q_{rr} 随着 di/dt 增大而增大,不受电流影响。所以在电流不变的情况下,增大 di/dt 会增大反向恢复电流峰值。

3 晶闸管反向恢复特性建模

基于以上实验分析,可以得到晶闸管的关断特性主要由电流过零点的电流变化率 di/dt 决定,在如图 3 所示的电路中,充电电源电压 U_s 、电流峰值 I_p 、电流过零点的 di/dt 是线性关系,改变其中一项,其他两项也会随着变化。要研究晶闸管反向并联续流二极管的关断特性,需要测量多组数据进行分析,保持电路模型不变,仅改变电压的大小,多次测量不同电压下的晶闸管关断的电压电流波形。

在高压大电流情况下,晶闸管需要串联使用,晶闸管和二极管的连接电路如图 6 所示,在晶闸管和二极管两端分别并联 RC 动态均压电路和静态均压电路,静态均压电阻 R_1 取漏电阻的 1/10,本文根据晶闸管参数,设计静态均压电阻 1 M Ω 。动态均压电路的电容越大,动态均压效果越好,根据晶闸管参数,动态均压电容 C 取 0.2 μ F,动态均压电阻 R_s 的阻值应该在临界阻尼附近,增大阻值有利于抑制过冲电压的不均匀性,但是会增大关断时的电压变化率。根据实验电路参数,动态均压电阻 $R_s = 20 \Omega$ 。

电压为 1500 V 时,测量的晶闸管和二极管的电压电流的波形如图 7 所示,可以看到晶闸管在关断时,有一段反向电流,二极管关断时有尖峰电压出现,晶闸管在第一个周期关断。

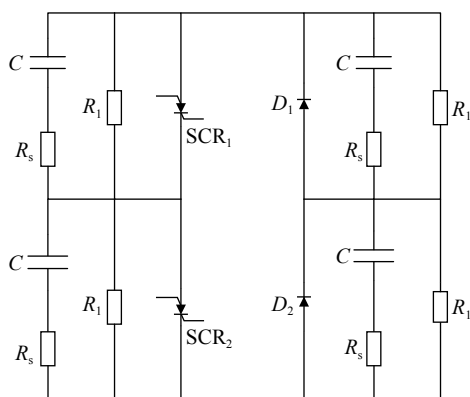


Fig. 6 Switch connection diagram
图 6 开关连接图

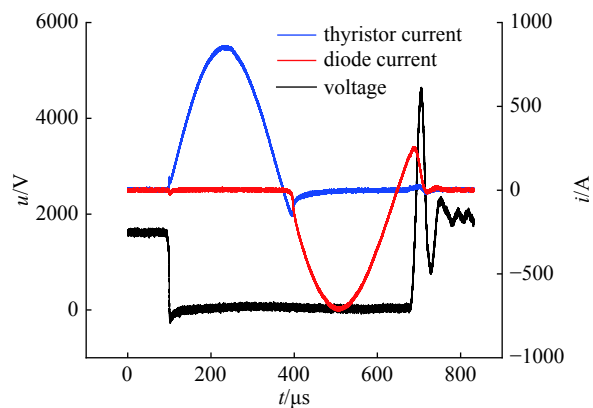


Fig. 7 Thyristor shutdown voltage and current waveform at 1500 V
图 7 1500 V 晶闸管关断电压电流波形

假设晶闸管反向恢复电流符合指数函数模型,对得到的波形数据进行整理,得到实验数据如表 1 所示。

表 1 不同电压下晶闸管关断数据

Table 1 Thyristor shutdown data at different voltages

U/V	I_p/A	I_{RM}/A	$t_s/\mu s$	$t_f/\mu s$	$di/dt/(A \cdot \mu s^{-1})$	$t_{rr}/\mu s$	$Q_{rr}/\mu C$
350	183.5	42.35	22.3	42	1.90	64.3	1245.6
400	200.8	50.2	25.4	43.3	1.98	68.7	1582.6
450	247.8	53.33	21.1	54.7	2.53	75.8	1831.0
550	313.7	69.02	20.8	57.5	3.32	78.3	2443.3
650	363.9	78.43	21	50.5	3.73	71.5	2545.6
800	461.2	90.98	22.4	65.3	4.06	87.7	3602.0
1000	571	109.8	21.6	65.3	5.08	86.9	4303.2
1200	683.9	125.5	23.1	62	5.43	85.1	4832.6
1050	577.3	119.2	19.8	74.6	6.02	94.4	5046.3
1550	859.6	156.9	21.9	77.1	7.16	99	6977.6

由实验结果可以得到反向恢复电流特性参数与 di/dt 的关系。随着 di/dt 增大,反向电流最大值 I_{RM} 、反向恢复时间 t_{rr} 和反向恢复电荷 Q_{rr} 增大。 di/dt 和反向恢复电荷 Q_{rr} 的关系如图8所示,反向恢复电荷 Q_{rr} 随着 di/dt 线性增大,拟合曲线

$$Q_{rr} = 1012 \frac{di}{dt} - 736.5 \quad (9)$$

反向电流最大值 I_{RM} 和反向恢复电荷 Q_{rr} 和电流变化率 di/dt 有关, I_{RM} 和 $\sqrt{|di/dt|Q_{rr}}$ 可以较好线性拟合,得到的曲线如图9所示, I_{RM} 可以表示为

$$I_{RM} = 0.6638 \sqrt{|di/dt|Q_{rr}} + 11.28 \quad (10)$$

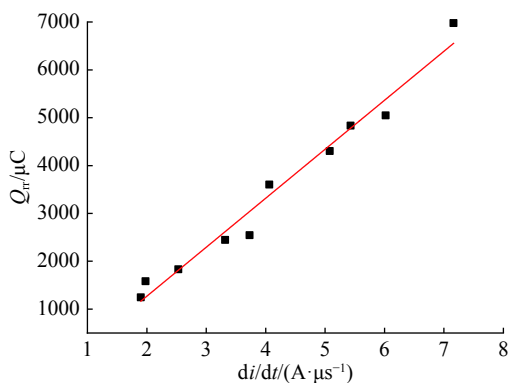


Fig. 8 Relationship between Q_{rr} and di/dt

图8 Q_{rr} 和 di/dt 的关系

Q_{rr} 的大小和 di/dt 有关,带入可以得到

$$I_{RM} = 0.6638 \sqrt{1012 \frac{di}{dt} - 736.5 \frac{di}{dt}} + 11.28 \quad (11)$$

反向恢复时间 t_{rr} 和反向恢复电荷 Q_{rr} 和反向电流的最大值 I_{RM} 有关,反向恢复时间 t_{rr} 和 Q_{rr}/I_{RM} 可以较好的线性拟合,如图10所示,得到反向恢复时间 t_{rr} 的表达式

$$t_{rr} = 2.316 \frac{Q_{rr}}{I_{RM}} - 3.9 \quad (12)$$

将式(9)(11)得到的 Q_{rr} 和 I_{RM} 的表达式代入式(12),可以得到 t_{rr} 和 di/dt 的关系。

利用得到的表达式可以求得对应的 di/dt 下的反向电流的曲线,以1500V充电电压为例,测量得到关断电流波形, di/dt 为6.81 A/ μ s,代入以上关系式,计算得到表2数据,计算数据和实验测量数据相差不大。

将计算数据代入指数函数模型中,可以得到1500V的实验测得曲线和计算曲线的对比如图11所示,可以看出计算的反向恢复电流和实验结果有一定区别。存储时间内实验电流和计算电流基本重合,反向恢复电流峰值 I_{RM} 相同。在指数函数阶段,实验波形和拟合波形没有完全重合。原因是测量晶闸管反向恢复特性时, t_3 时刻的电流 $i = 10\%I_{RM}$,电流比较小,测量存在一定误差;而且反向恢复电流和指数函数有差别,前半段实验电流波形变化比指数函数快,后半段的电流波形和拟合的指数函数相似。所以,如果将反向恢复过程等效为指数函数模型,那么时间常数 τ 不是固定的,时间常数 τ 在反向恢复过程中逐渐变大,恢复过程变慢,所以实验波形和拟合波形有差别。

表2 关断计算数据

Table 2 Shutdown calculation data

	$di/dt/(A/\mu s)$	$Q_{rr}/\mu C$	I_{RM}/A	$t_{rr}/\mu s$
calculated value	6.81	6155.22	147.18	92.96
experimental value	6.81	6071.8	150.6	89.4

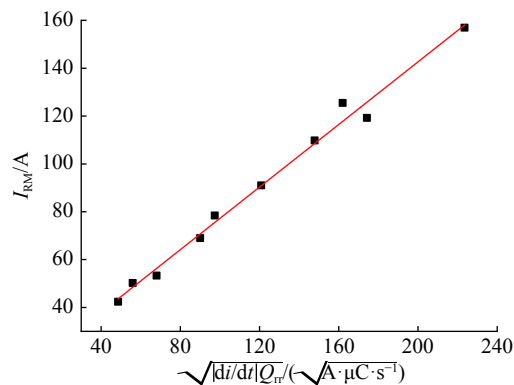


Fig. 9 Relationship between I_{RM} , Q_{rr} and di/dt

图9 I_{RM} 与 Q_{rr} 、 di/dt 的关系

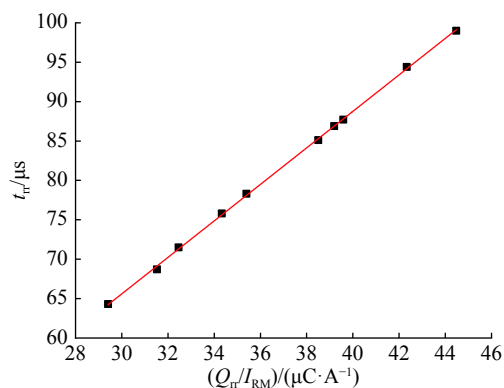


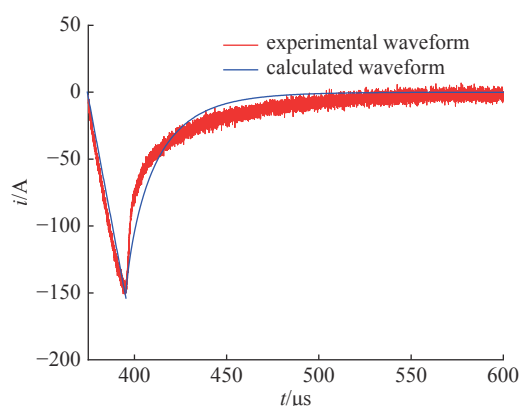
Fig. 10 Relationship between t_{rr} , I_{RM} and Q_{rr}

图10 t_{rr} 和 I_{RM} 、 Q_{rr} 的关系

根据实验波形,修正了反向恢复的指数函数电流模型,式(13)为修正后的电流模型,加入了系数 α ,在电路参数不变的情况下,时间常数 τ 和系数 α 都不变,可以更好地拟合晶闸管反向恢复的实验电流波形。

$$i_r(t) = \begin{cases} t di/dt, & t < t_2 \\ -I_R \exp\left(-\frac{(t-t_2)^\alpha}{\tau}\right), & t \geq t_2 \end{cases} \quad (13)$$

1500 V 和 1000 V 下实验波形带入以上模型拟合得到的结果如图 12 所示,实验波形和计算波形几乎重合,在本文的实验中, $\alpha=0.84$ 。在建立模型过程中可根据测得的 di/dt 值,计算出相应的反向电流最大值 I_{RM} 和反向恢复电荷 Q_{rr} ,并根据式(13)计算出 τ 值和对应的系数 α ,从而得到反向电流。



(a) 1500 V waveform

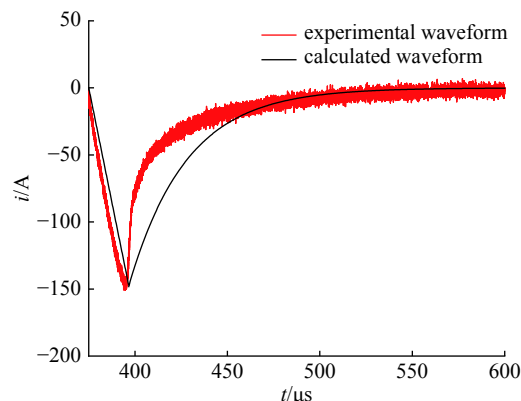
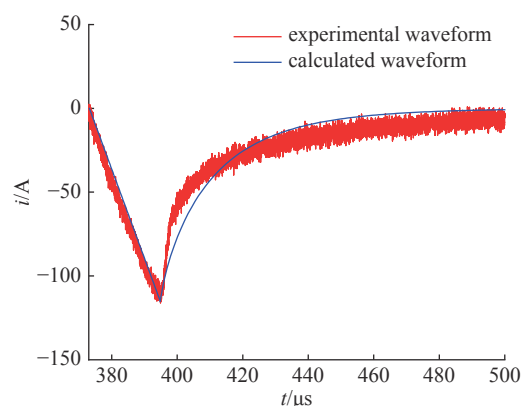


Fig. 11 Calculated waveform and experimental waveform comparison for 1500 V shutdown

图 11 1500 V 关断计算波形和实验波形对比



(b) 1000 V waveform

Fig. 12 Shutdown waveform comparison between modified calculation and experiment

图 12 修正模型关断计算波形和实验波形对比

4 结论

(1) 电流主要通过电流过零点的电流变化率 di/dt 影响晶闸管的反向恢复特性,在电流峰值 I_p 不变的情况下,晶闸管的反向恢复电流峰 I_{RM} 随着 di/dt 增大而增大,在相同 di/dt 下,增大电流峰值 I_p 对晶闸管反向恢复特性无影响。

(2) 随着 di/dt 增大,晶闸管反向恢复电流最大值 I_{RM} 、反向恢复时间 t_{rr} 和反向恢复电荷 Q_{rr} 增大,在已知 di/dt 情况下,根据得到的关系式和指数函数电流恢复模型可以拟合出晶闸管反向恢复电流。

(3) 实验波形和指数函数模型有差别,反向恢复过程的时间常数 τ 不是固定的,时间常数 τ 在反向恢复过程中逐渐变大,恢复过程变慢,提出了修正后的反向指数函数电流模型,可以更好地拟合反向恢复电流波形。

参考文献:

- [1] 卢茨 J, Schlangenotto H, Scheuermann U, 等. 功率半导体器件: 原理、特性和可靠性[M]. 卞抗, 杨莺, 刘静, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013. (Lutz J, Schlangenotto H, Scheuermann U, et al. Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability[M]. Bian Kang, Yang Ying, Liu Jing, trans. Beijing: China Machine Press, 2013)
- [2] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 串联晶闸管反向恢复暂态过程的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 15-19. (Lan Yuanliang, Tang Guangfu, Yin Yonghua, et al. Study on transient of reverse recovery of series thyristors[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 15-19)
- [3] 潘军. 一种高性能快速晶闸管串联使用保护技术及其应用[J]. 工业加热, 2005, 34(5): 48-50. (Pan Jun. A protection technique and application of high performance fast thyristors in serial[J]. Industrial Heating, 2005, 34(5): 48-50)
- [4] 王毅, 石新春, 李和明, 等. 基于统一离散时域建模法的晶闸管串联运行暂态仿真[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 41-44. (Wang Yi, Shi Xinchun, Li Heming, et al. Cascaded thyristors simulation based on unified discrete time-domain modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 41-44)
- [5] 邹刚, 陈祥训, 郑健超, 等. 用于电力电子系统暂态过程分析的晶闸管宏模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 1-5. (Zou Gang, Chen Xiangxun, Zheng Jianchao, et al. Macro-model of thyristor for transient analysis in power electronic system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 1-5)
- [6] Shamma N Y A, Rahimo M T, Hoban P T. Effects of external operating conditions on the reverse recovery behaviour of fast power diodes[J]. EPE Journal, 1999, 8(1/2): 11-18.

- [7] 岳珂, 孙玮, 刘隆晨, 等. 载流子寿命与高压晶闸管反向恢复特性的关系[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3944-3949. (Yue Ke, Sun Wei, Liu Longchen, et al. Correlations between carrier lifetime and reverse recovery characteristics of high power thyristors[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3944-3949)
- [8] Matteson F M, Ruhl H J, Shafer P O, et al. The recovered charge characteristics of high power thyristors[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1976, IA-12(3): 305-311.
- [9] 魏伟, 孙晓明. 晶闸管反向恢复电流参数的计算[J]. 武汉城市建设学院学报, 1992, 9(1/2): 91-97. (Wei Wei, Sun Xiaoming. Calculation of thyristor reverse recovery current parameters[J]. Journal of Wuhan Urban Construction Institute, 1992, 9(1/2): 91-97)
- [10] 戴玲, 田书耘, 金超亮, 等. 脉冲功率晶闸管反向恢复特性[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 115001. (Dai Ling, Tian Shuyun, Jin Chaoliang, et al. Reverse recovery characteristics of pulse power thyristor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 115001)
- [11] Lee C W, Park S B. Design of a thyristor snubber circuit by considering the reverse recovery process[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1988, 3(4): 440-446.
- [12] 刘杰, 张静, 曹均正, 等. 直流输电换流阀阻尼系统特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 16-22. (Liu Jie, Zhang Jing, Cao Junzheng, et al. Research of damping system characteristics for HVDC converter valves[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 16-22)
- [13] 仝玮, 李华, 傅鹏, 等. 一种脉冲电流工况下晶闸管缓冲电路的优化方法[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025015. (Tong Wei, Li Hua, Fu Peng, et al. A parameter optimization method of snubber circuit of thyristor under pulse current working condition[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025015)
- [14] Chokhawala R S, Carroll E I. A snubber design tool for P-N junction reverse recovery using a more accurate simulation of the reverse recovery waveform[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, 27(1): 74-84.