

特高压直流输电换流阀用晶闸管 反向恢复特性研究与分析

刘隆晨¹ 张星海¹ 李亚伟¹ 张禹² 岳珂³ 庞磊³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610042;

3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了掌握直流输电换流阀现场检测关键技术, 搭建了晶闸管反向恢复特性实验电路, 实验研究了正向电流幅值、换向电流变化率等参数对特高压换流阀用晶闸管反向恢复特性的影响。基于工频条件下晶闸管单元反向恢复特性研究结果, 并结合特高压直流输电工程实际, 从晶闸管器件物理特性的角度对上述影响的机制进行了分析。结果表明: 反向恢复电荷随着正向电流、换向电流变化率的增大而增多, 导致反向恢复时间增长、恢复电流峰值增大, 从而引起反向恢复特性的改变; 当换向电流变化率较小时, 正向电流对反向恢复电荷量影响不大, 反之亦然; 反向恢复时间在某一正向电流幅值下发生跃变, 而后随着正向电流的增大而缓慢增长。该研究可为换流阀晶闸管级单元现场检测试验提供可靠的理论依据。

关键词: 换流阀; 大功率晶闸管; 反向恢复; 正向电流

Abstract: In order to grasp the in-situ test technology of converter valve, the test circuit for reverse recovery characteristics of high-power thyristor is built. The effects of forward current amplitude and change rate of commutating current on reverse recovery characteristics of high-power thyristors are studied experimentally. Based on the research results of reverse recovery characteristics of thyristor under power frequency condition, the mechanism of these effects is also analyzed as viewed from the physical characteristics of thyristor. The results show that the reverse recovery charge increases with the rise of peak current or commutating di/dt , which results in the increase of reverse recovery time and recovery current peak, and it would change the reverse recovery characteristics. And when the commutating di/dt becomes lower, the forward current has little effect on the reverse recovery charge, and vice versa. With the increase of forward current, the reverse recovery time changes sharply at a certain current, and then grows slowly. The research can provide a reliable theoretical support for the in-situ test of thyristor level of the converter valve.

Key words: converter valve; high-power thyristor; reverse recovery; forward current

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)01-0051-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.011

0 引言

大功率晶闸管作为直流输电系统换流阀的核心器件, 其暂态特性是晶闸管应用基础研究的核心问题。当晶闸管尺寸较小且承受电压较低时, 其内部载流子的扩散效应不明显, 在早期的应用中往往被忽略。随着特高压直流输电技术的发展, 晶闸管功率容量显著提高, 晶闸管结构尺寸增大。此时, 器件内部载流子的扩散效应以及电导调制效应也随之增强, 反向恢复过程的影响无法忽视。

晶闸管反向恢复过程是指在晶闸管关断过程

中, 由于基区过剩的载流子无法立即消失, 残留在基区的电荷需通过迁移、扩散以及复合等方式进行释放, 导致晶闸管中出现负向电流^[1-2]。受外电路电感效应的影响, 晶闸管两端会出现反向尖峰电压。

在晶闸管反向恢复过程中, 由于基区存在大量非平衡载流子, 其正、反向阻断能力尚未恢复, 此时换流阀遭受直流系统暂态脉冲的冲击极易发生晶闸管损坏; 另外, 反向恢复过程的特征参量(反向恢复电荷、反向恢复时间等), 对晶闸管级单元阻尼回路和控制单元的参数设计具有重要意义。因此, 研究正向电流参数对晶闸管反向恢复特性的影响有助于降低晶闸管发生失效的概率, 也可作为换流阀设计、运

行和检测提供理论基础。

目前针对换流阀用晶闸管的暂态过程研究并不多见。文献[3-5]对晶闸管换流阀关断暂态过电压及电压分布进行了分析,部分研究内容涉及晶闸管的反向恢复特性;但该研究以换流电路中的阀组件为主要研究对象,采用电路解析或仿真的方法,将晶闸管的关断过程用等效电路模型替代,这忽略了器件本身的反向恢复特性。蓝元良等采用反向恢复电流模型,分析串联晶闸管的反向恢复暂态过程^[6];邹刚等使用宏模型研究晶闸管反向恢复特性^[7],但上述研究与器件真实的恢复过程不符。

搭建了晶闸管反向恢复特性实验平台,在近似真实工况的实验条件下,通过反向电流电压波形测量与分析,研究正向电流幅值、换向电流变化率等参数对大功率晶闸管反向恢复特性的影响规律。结合直流输电系统中晶闸管的运行工况,重点关注工频条件下的反向恢复特性,并从器件内部物理特性的角度分析正向电流参数对晶闸管反向恢复特性影响的作用机制。

1 晶闸管反向恢复物理过程分析

晶闸管是功率半导体器件,由4个交替掺杂层形成的3个PN结组成,也可将晶闸管等效为2个晶体管。晶闸管的结构中P型掺杂的阳极层位于底端,接着是N⁻基区,P基区,最后是N⁺阴极层,其中N⁻基区轻度掺杂,并有足够宽度。

图1为晶闸管反向恢复过程典型波形。图中,虚线为电流波形,实线为电压波形。反向电流从0增大到峰值 I_{rm} 所用的时间 $t_1 \sim t_5$ 称为存储时间 t_s ,从峰值 I_{rm} 回落到 $0.1I_{rm}$ 所用的时间称为下降时间 t_f ,存储时间 t_s 和下降时间 t_f 之和为反向恢复时间 t_{rr} 。一般而言,当反向电流下降至静态漏电流时,晶闸管反向恢复过程结束。

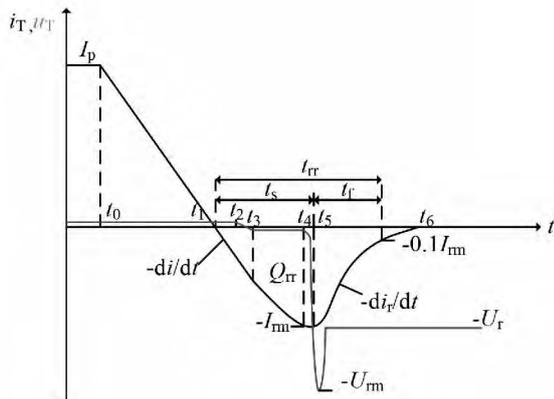


图1 晶闸管反向恢复过程典型波形

在感性负载条件下,晶闸管换向之前(t_0 时刻前)晶闸管处于稳定开通状态,大多数电荷存储于基区,这些电荷由基区过剩的少数载流子组成,其中主要是空穴载流子,此时器件中存储的电荷近似为^[8]

$$Q_F = \alpha_{npn} \tau_p I_F \quad (1)$$

式中: α_{npn} 为晶闸管中等效NPN晶体管的电流增益; τ_p 为n基区少数载流子寿命; I_F 为正向电流。 t_0 时刻阳极施加反向电压, $t_0 \sim t_1$ 阶段晶闸管完全导通,导通压降可忽略。反向电压 U_r 由回路电感 L 承担,回路电流以恒定的电流变化率 di/dt 衰减,即

$$\frac{di}{dt} = -\frac{U_r}{L} \quad (2)$$

此时存储电荷从 Q_F 减小到 Q_{U1} ^[9],即

$$Q_{U1} = Q_F \frac{\tau_p}{t_1 - t_0} [1 - \exp(-\frac{t_1 - t_0}{\tau_p})] \quad (3)$$

故电流过零点时器件中仍有大量的非平衡载流子。

$t_1 \sim t_2$ 阶段,电流反向,非平衡载流子从基区中移除,空穴穿过 J_1 被抽出,电子在 J_3 被移除,载流子被扫出导致2个发射极内非平衡载流子浓度骤减。由于P基极比N基极掺杂重,且N发射极的初始载流子浓度比P发射极低, J_3 的非平衡载流子浓度衰减到0所需时间比 J_1 少得多。在 t_2 时刻, J_3 的载流子被抽空,故 J_3 开始承受电压,此时电流变化率很小,为

$$\frac{di}{dt} = -\frac{U_r - U_T}{L} \quad (4)$$

式中, U_T 近似为 J_3 压降,故 di/dt 下降。 t_3 时刻, U_T 到达 J_3 的雪崩击穿电压。在 t_4 时刻, J_1 的非平衡载流子浓度降为0, J_1 开始承受电压,不断上升的 U_T 使得电流变化率进一步减少。在 t_5 时刻, $U_T = U_r$,电流变化率 di/dt 为0,电流达到反向峰值电流 I_{rm} , t_5 时刻之后晶闸管开始恢复反向阻断能力。

$t_5 \sim t_6$ 阶段,由于耗尽层无法继续扫出载流子,故耗尽层不能进一步拓展,剩余的非平衡载流子只能靠内部复合而消失。非平衡载流子浓度下降导致能扩散至耗尽层边缘的载流子减少,反向电流近似于按照时间常数 τ 呈指数函数衰减,回路电感会感应出一个电压使得晶闸管承受反向过电压 U_m ,即

$$U_m = U_r + L \left. \frac{di_r}{dt} \right|_{MAX} \quad (5)$$

此电压往往远大于所施加的反向电压 U_r 。

在 t_6 时刻, P 基区存储电荷已被完全清除, N 基区中还剩余少量存储电荷, 剩余存储电荷为

$$Q_{i6} = Q_{i1} - Q_{rr} \quad (6)$$

式中, Q_{i6} 一般通过载流子复合的方式消去, 故可近似认为 $Q_{rr} = Q_{i1}$ 。需要说明: 器件恢复电荷 Q_{rr} 不等于存储电荷减小的总量 Q_{RR} 。这是因为在恢复阶段, 载流子仍继续向基区注入, 故电荷减少量 Q_{RR} 仅为恢复电荷 Q_{rr} 的一部分。当外施反向电压很高时, 恢复电荷很快被抽走, 故 Q_{RR} 占据 Q_{rr} 的绝大部分。

2 实验平台

采用正弦电流波形研究晶闸管的反向恢复特性, 实验电路如图 2 所示^[10]。图中, R_1 为充电限流电阻, C 为充电电容, L 为放电回路电感, R_2 为无感电阻, DUT 为特高压换流阀用大功率晶闸管试品。采用泰克公司高压探头 P6015A 测量晶闸管两端的电压, 流过晶闸管的电流由 Pearson 公司罗氏线圈测量, 采用 Tektronix 公司 DPO4054 型数字示波器记录电流电压波形。

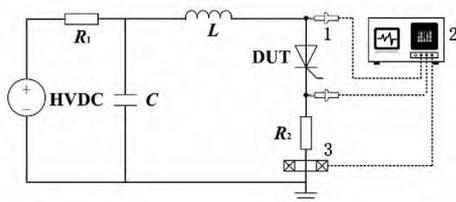


图 2 实验平台

晶闸管触发导通后, 电容 C 通过 L 和 R_2 衰减振荡放电, 当电路满足

$$R_2 < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

R_2LC 回路为欠阻尼振荡, 测量反向恢复电压、电流波形, 分析计算反向恢复特征量。

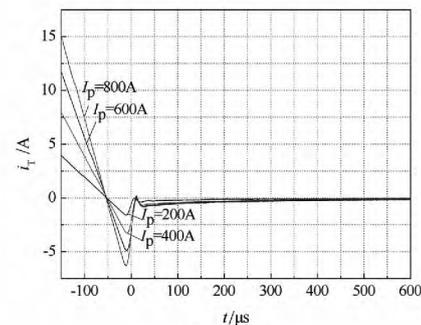
实验研究正向电流幅值 I_p 、换向电流变化率 di/dt 对晶闸管反向恢复特征量(反向恢复电压、反向恢复时间、反向恢复电荷、恢复软度)的影响。改变电容 C 充电电压, 研究不同正向电流幅值下晶闸管的反向恢复特性; 调节电容 C 的电容值, 改变通态脉冲宽度, 即

$$PW = \pi\sqrt{LC} \quad (8)$$

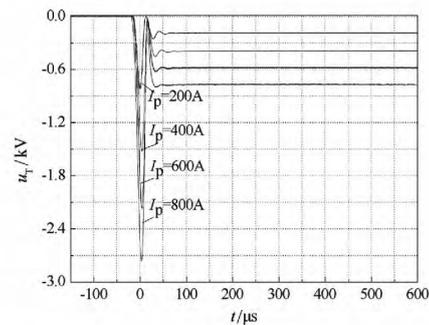
在同一正向电流幅值下, 改变换向电流变化率, 研究换向电流变化率对晶闸管反向恢复过程的影响。

3 实验结果与分析

大功率半导体器件的动态特性与其导通时间相关, 并且该类器件具有电导调制效应, 导通持续时间必须足够长, 才能保证载流子达到平衡。直流输电系统中大功率晶闸管工作于工频条件下, 因此需研究工频条件下晶闸管的反向恢复特性。调节测试回路的 LC 参数, 保证通态脉冲宽度为 10 ms, 改变正向电流幅值。不同正向电流下反向恢复电流、电压波形如图 3 所示。



(a) 电流波形



(b) 电压波形

图 3 不同正向电流下反向恢复电流、电压波形

反向恢复时间 t_{rr} 随正向电流幅值 I_p 的变化曲线如图 4 所示, 反向恢复时间 t_{rr} 同正向电流幅值 I_p 呈正相关, 当 I_p 等于 200 A 时, t_{rr} 迅速增大到 200 μs , 之后 t_{rr} 缓慢增长到约 300 μs 。

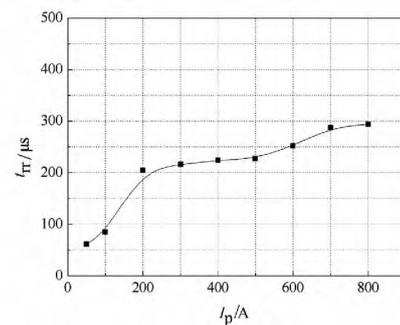


图 4 反向恢复时间 t_{rr} 随正向电流 I_p 的变化曲线

反向恢复电荷 Q_{rr} 随正向电流幅值 I_p 的变化曲线如图5所示, Q_{rr} 随 I_p 增加而近似线性增大。由图可看出, 反向恢复时间不大于 $300 \mu s$, 关断足够快, 器件内部载流子复合消散不显著; 此时 Q_{rr} 为存储在晶闸管中全部电荷量, 约等于 Q_F , 因此 Q_{rr} 同 I_p 近似呈现出线性的关系, 可以用式(1)描述。

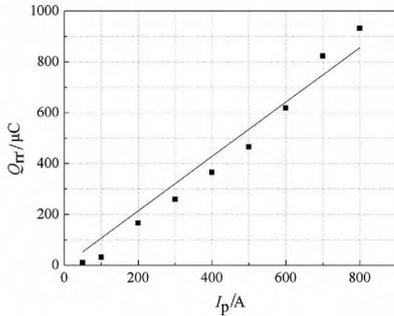


图5 反向恢复电荷 Q_{rr} 随正向电流 I_p 的变化曲线

反向恢复电流峰值 I_{rm} 随正向电流幅值 I_p 的变化曲线如图6所示, I_{rm} 随 I_p 的增大而增大。反向电流达到 I_{rm} 之前, 晶闸管扫出电荷量与 I_p 呈近似线性正比关系; 此外, 由图3(a)可见存储时间 t_s 基本不受 I_p 影响, 故 I_p 越大, 扫出电荷量越多, I_{rm} 与 I_p 具有良好的线性度。

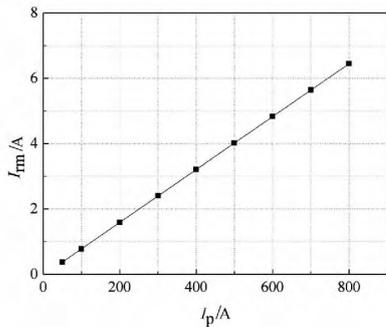


图6 反向恢复电流峰值 I_{rm} 随正向电流 I_p 的变化曲线

反向恢复电压峰值 U_{rm} 随正向电流幅值 I_p 的变化曲线如图7所示, I_p 增大, U_{rm} 也随之增大, 线性度良好。

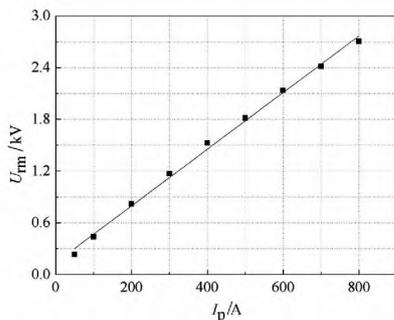


图7 反向恢复电压峰值 U_{rm} 随正向电流 I_p 的变化曲线

图8为比值 U_{rm}/U_r 随正向电流幅值 I_p 的变化曲线。 U_{rm}/U_r 表征器件的急变特性, I_p 越大, U_{rm}/U_r

减小, 反向特性越软, 但 U_{rm}/U_r 比值仍大于3。在大电流下非平衡载流子具有更多能量, 复合难度加剧, 载流子寿命增长, 存储电荷增加, 因此晶闸管在大电流条件下恢复特性更软。

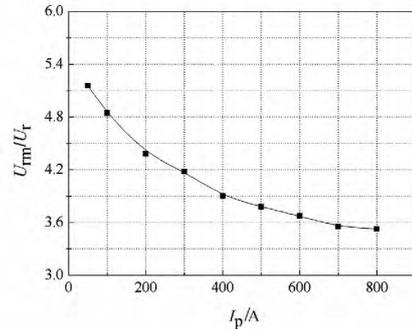


图8 比值 U_{rm}/U_r 随正向电流 I_p 的变化曲线

4 结论

分析了大功率晶闸管的反向恢复物理过程, 通过实验的方法研究了正向电流对晶闸管反向恢复特性的影响, 重点关注了工况条件下晶闸管的反向恢复特性, 得到了如下结论:

1) 晶闸管反向恢复特性主要取决于正向电流和换向电流变化率。提高换向电流变化率, 将加快晶闸管内部载流子扫出速率, 载流子发生复合的几率变小, 故反向恢复电荷增多, 反向恢复时间变短, 反向恢复电压峰值也随之增大。增大正向电流, 会增多晶闸管内部存储电荷, 故反向恢复时间和反向恢复电流峰值也随之增加, 进而导致了更大的反向恢复电压峰值。

2) 反向恢复时间与正向电流幅值正相关, 当正向电流达到某一幅值时, 反向恢复时间发生跃变, 之后随正向电流幅值的增大而缓慢增长。当换向电流变化率较高时, 反向恢复电荷量与正向电流密切相关。

综上所述, 对于换流阀晶闸管级单元的现场测试, 试验脉冲的时间参数需要依据晶闸管正向导通电流幅值而设定。

参考文献

[1] Revankar GN, Srivastava PK. Turn off Model of an SCR [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 1975(4): 507-510.
[2] Assalit HB, Studtmann GH. Description of a Technique for the Reduction of Thyristor Turn-off Time [J]. IEEE Transaction on Electron Device, 1974, 21(7): 416-420.

(下转第70页)

for HVDC Transmission Lines Considering Frequency-dependent Parameters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (3): 723 - 732.

[30] Xiaodong Zheng, Nengling Tai, Zhongyu Wu, et al. Harmonic Current Protection Scheme for Voltage Source Converter-based High-voltage Direct Current Transmission System [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2014, 8(9): 1509 - 1515.

[31] Ramesh M, Laxmi AJ. Fault Identification in HVDC Using Artificial Intelligence——Recent Trends and Perspectives [C]. Proceedings of international Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 2012: 1 - 6.

[32] W. Leterme, S. P. Azad, D. V. Hertem. A Local Backup Protection Algorithm for HVDC Grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1767 - 1775.

[33] S. P. Azad, W. Leterme, D. V. Hertem. Fast Breaker Failure Backup Protection for HVDC Grids [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 138: 99 - 105.

[34] Tang L X, Ooi B T. Locating and Isolating DC Faults in Multi-terminal DC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877 - 1884.

[35] 赵成勇, 许建中, 李探. 全桥型 MMC - MTDC 直流故障穿越能力分析 [J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(1): 106 - 114.

[36] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 多端柔性直流输电系统直流故障保护策略 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(12): 1 - 6.

[37] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4627 - 4636.

[38] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726 - 3733.

[39] 李斌, 李晔, 何佳伟. 基于模块化多电平换流器的直流系统故障处理方案 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1944 - 1950.

[40] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC - HVDC 直流故障穿越控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343 - 5351.

[41] 吴婧, 姚良忠, 王志冰, 等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2681 - 2694.

[42] 王俊生, 傅闯, 胡铭, 等. 并联型多端直流输电系统保护相关问题探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4923 - 4931.

[43] 时伯年, 赵宇明, 孙刚. 柔性直流配电网保护方案研究及实现 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 11 - 16.

[44] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133 - 139.

[45] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169 - 175.

[46] 滕予非, 汤勇, 汪晓华, 等. 特高压直流输电工程直流分压器动态特性及其引起的误闭锁机理研究 [J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2646 - 2653.

(收稿日期: 2016 - 10 - 06)

(上接第 54 页)

[3] 解婷, 汤广福, 郑健超, 等. 高压直流晶闸管阀故障电流下反向电压特性的分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 140 - 145.

[4] Karady G, Gilsing T. The Calculation of Transient Voltage Distribution in a High Voltage DC Thyristor Valve [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1973, 92(3): 893 - 899.

[5] 郭焕, 温家良, 汤广福, 等. 高压直流输电晶闸管阀关断的电压应力分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 1 - 6.

[6] Karady G, Gilsing T. The Calculation of Turn-off Over Voltages in a High Voltage DC Thyristor Valve [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1972, 91(2): 565 - 574.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Shammam NY, Rahimo MT, Hoban PT. Effects of External Operating Conditions on the Reverse Recovery Behaviour of Fast Power Diodes [J]. European Power Electronics and Drives Journal, 1999, 8(2): 11 - 18.

[10] Frederick MM, Harold JR. The Recovered Charge Characteristics of High Power Thyristors [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1976, 12(3): 305 - 311.

作者简介:

刘隆晨(1987), 博士, 主要从事高压直流输电技术和放电等离子体应用的研究。

(收稿日期: 2016 - 09 - 21)