

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.026

# 基于 TCAD 的脉冲作用下晶闸管反向恢复特性仿真研究

陈炫宇<sup>1</sup>, 陶风波<sup>2</sup>, 徐阳<sup>2</sup>, 庞磊<sup>1</sup>, 张乔根<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**研究暂态脉冲电压作用下高压晶闸管反向恢复特性对换流阀参数设计、故障保护以及试验检测等具有重要意义。首先参照晶闸管实际结构,建立了晶闸管二维半导体仿真模型,基于载流子漂移扩散模型求解,仿真获得了晶闸管静态击穿特性和反向恢复电流特性,实验结果验证了仿真模型的有效性。在上述基础上,建立了半导体器件-电路仿真混合模型,并分析了正常导通和误触发导通时晶闸管内部电流密度变化的异同。仿真表明,反向恢复期间电压脉冲易导致晶闸管误触发,误触发电压随脉冲施加时刻后移而升高。

**关键词:**高压晶闸管;电压脉冲;反向恢复;暂态特性;半导体器件模拟工具(TCAD)

中图分类号:TM461.4

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0185-06

## 0 引言

高压晶闸管是直流输电换流阀、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)等高压大容量电力电子装备中的关键器件<sup>[1-3]</sup>,其工作特性对系统运行有重要影响。在换流阀开断过程中,晶闸管器件内部存在过剩载流子,容易因遭受暂态电压脉冲、雷电冲击等扰动导致晶闸管发生误触发导通,或者因电流突增造成局部过热而损坏,最终引起换流阀换相失败,威胁直流输电系统的安全<sup>[4-6]</sup>。因此,研究暂态脉冲电压对高压晶闸管反向恢复过程的影响具有重要意义。

国内外研究人员利用晶闸管模型对反向恢复过程进行了大量研究。文献[7-9]均通过建立经典的晶闸管宏模型对电力电子电路暂态问题进行分析,但等效宏模型电路元件较多,需要对不同的晶闸管重新计算。为此,文献[10-13]建立指数模型和双曲正切模型,用分段函数对反向恢复电流曲线进行模拟,或者采用 Logistic 曲线建立的非线性电阻模型描述反向恢复过程,利用电荷模型和恢复曲线模型对串联晶闸管反向恢复特性进行了研究。上述方法只能描述特定的暂态过程,不能解决复杂的电路问题,更不能反映其中电流密度、载流子等微观物理量的分布。然而,当晶闸管反向恢复期遭受高压脉冲威胁时,往往需要从其内部局部电流密度等分布情况来评估器件的应力分布,进而进行有效的防护设计。尽管有些文献基于器件物理模型,

通过数值方法求解半导体基本方程来获取器件内部载流子生成复合过程、电流密度、电场强度分布特性等,但研究主要集中于小功率的电子电路器件或器件设计<sup>[14-16]</sup>,而高压晶闸管压接式结构与小功率器件相比有较大差异,因此,有必要开展进一步的研究工作。

为了研究暂态电压脉冲作用对高压晶闸管反向恢复过程的影响,文中基于半导体器件模拟工具(technology computer aided design, TCAD)仿真软件建立高压晶闸管二维物理模型,对其静态击穿、反向恢复电流等静、暂态特性进行了仿真,并与实验结果进行了对比。在此基础上,通过在反向恢复期施加脉冲电压的方式,仿真分析了暂态脉冲对反向恢复过程的影响。

## 1 晶闸管模型

文中以 1.8 kV/500 A 晶闸管尺寸为参考,沿径向切面建立二维模型。晶闸管结构为 PNP 4 层,如图 1 所示,截面高 400  $\mu\text{m}$ ,宽 16 000  $\mu\text{m}$ , $J_1$ — $J_3$ 为 PN 结。N 基区采用均匀掺杂,掺杂浓度为  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,宽 1 560  $\mu\text{m}$ ,其余区域掺杂采用高斯分布。重掺杂  $N^+$ 基区峰值掺杂浓度为  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,结深 20  $\mu\text{m}$ ;P 基区峰值掺杂浓度为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,结深 70  $\mu\text{m}$ ;重掺杂  $P^+$ 阳极区峰值掺杂浓度为  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,结深 70  $\mu\text{m}$ 。

基于上述结构模型,利用 TCAD 进行仿真计算。仿真采用通用的半导体器件数学模型,由一组基本方程组成:泊松方程(式(1))、连续性方程(式(2)和式(3))和载流子输运方程(式(4)和式(5))。泊松方程将静电电位的变化与局部电荷密度相关联。

收稿日期:2020-03-23;修回日期:2020-05-04

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

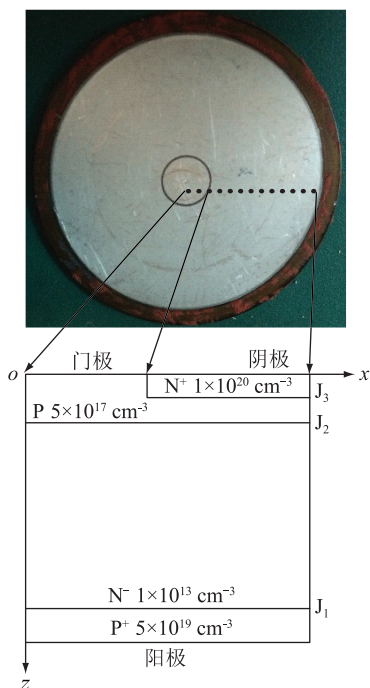


图 1 晶闸管结构

Fig.1 Structure of thyristor

连续性和运输方程描述了电子和空穴浓度在运输过程、生成过程和重组过程中的变化规律<sup>[17]</sup>。

$$\varepsilon \nabla^2 \varphi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_n + G - R \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_p + G - R \quad (3)$$

$$J_n = q\mu_n n E + qD_n \nabla n \quad (4)$$

$$J_p = q\mu_p p E + qD_p \nabla p \quad (5)$$

式中： $\varepsilon$  为介电常数； $\varphi$  为电势； $p, n$  分别为空穴浓度和电子浓度； $J_n, J_p$  分别为电子电流密度和空穴电流密度； $N_D^+, N_A^-$  分别为施主和受主掺杂浓度； $D_n, D_p$  分别为电子和空穴的扩散系数； $G$  为空穴或电子的产生率； $R$  为空穴或电子的复合率； $\mu_n, \mu_p$  为电子或空穴的迁移率； $q$  为电子电荷常数。

计算采用的迁移率模型为浓度依赖迁移率模型和平行电场依赖模型，复合模型为 Shockley-Read-Hall 复合模型和俄歇复合模型，载流子生成模型为 Selberherr 模型，载流子统计模型为能带变窄模型。数值计算方法采用牛顿迭代法。

## 2 模型验证

为验证该模型的可靠性，文中将其代入外电路中，对不同特性进行仿真研究。

### 2.1 阻断特性

晶闸管的阻断电压主要由 N 漂移区的厚度和

掺杂浓度来决定。晶闸管内有 3 个 PN 结，当阳极施加正电压时， $J_1$  和  $J_3$  结正偏， $J_2$  结反偏，电压主要由  $J_2$  承担；当阳极施加负电压时， $J_1$  和  $J_3$  结反偏， $J_2$  结正偏，而  $J_3$  结两侧掺杂浓度高，能承担的电压很低，因此电压主要由  $J_1$  承担，晶闸管正反向阻断能力几乎是一致的。随着电压升高，晶闸管内最大场强增加，N 漂移区耗尽层扩大，当达到击穿场强或耗尽层发生击穿时晶闸管丧失阻断能力。

在阳极施加电压，可获得晶闸管的阻断特性，如图 2 所示。可以看出，晶闸管模型的正反阻断电压均在 1.8 kV 左右，与器件标称额定参数基本相符。

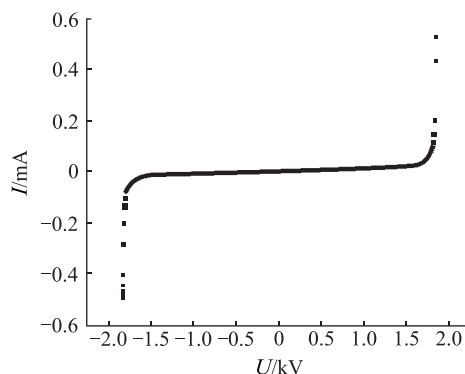


图 2 阻断特性

Fig.2 Blocking characteristics

### 2.2 反向恢复特性

晶闸管关断过程中，载流子消散需要时间，会出现反向恢复过程，因此文中对此阶段特性进行仿真验证。

反向恢复仿真电路见图 3，仿真电路首先对电容充电，之后通过 LC 串联回路产生正弦波，为模拟实际工作环境，频率为 50 Hz。电路中  $R_{w1}, R_{w2}, R_{w3}$  为 3 个可变电阻模拟开关，晶闸管采用上文建立的半导体物理模型。图 4 为正弦峰值电流 400 A 时反向恢复阶段电流波形，可以看出仿真波形与实验波形较为吻合。在电流下降阶段，由于电路中阻尼不同，导致斜率稍有偏差。

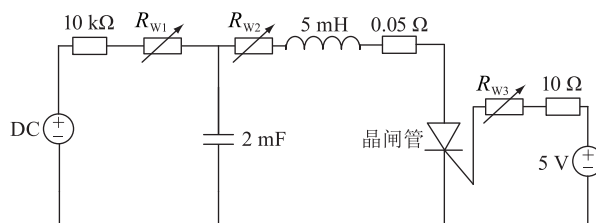


图 3 反向恢复仿真电路

Fig.3 Reverse recovery simulation circuit

反向恢复阶段较为关注的参数是反向电流和时间，图 5 和图 6 分别统计了不同导通电流下反向

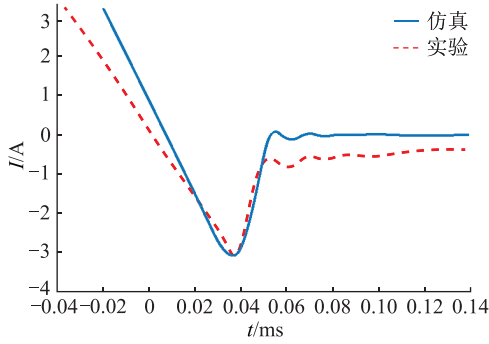


图 4 反向恢复电流波形

Fig.4 Reverse recovery current

恢复峰值电流和存储时间,反向恢复存储时间是电流过零至反向电流峰值时间。可以看出,仿真结果与实验结果匹配度较高,存储时间的差异主要由外电路阻尼不同导致,对之后的晶闸管仿真并无影响。

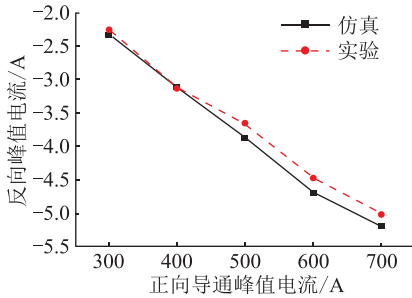


图 5 反向恢复峰值电流

Fig.5 Reverse recovery peak current

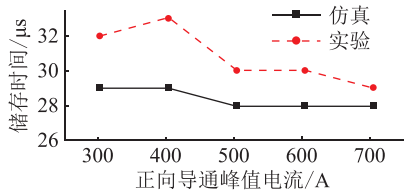


图 6 反向恢复存储时间

Fig.6 Storage time of reverse recovery

### 3 结果与分析

#### 3.1 门极触发导通过程

晶闸管是一种开关元件,在其阻断状态下可通过施加门极触发使晶闸管导通。图 7 为导通特性仿真电路,  $R_w$  为可变电阻,作为开关控制门极触发。直流电压源 1.2 kV,限流电阻  $4 \Omega$ 。

仿真得到电流和电压波形如图 8 所示,施加门极触发,约  $2 \mu s$  后完成导通,晶闸管导通压降为 0.88 V,导通电流约为 300 A。

观察图 9 晶闸管导通过程中内部电流密度变化可以看出,施加门极触发后,首先在靠近门极和阴极处聚集较多的载流子。由于到阴极区存在较大

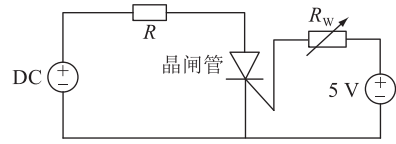


图 7 导通特性仿真电路

Fig.7 The simulation circuit of conduction characteristics

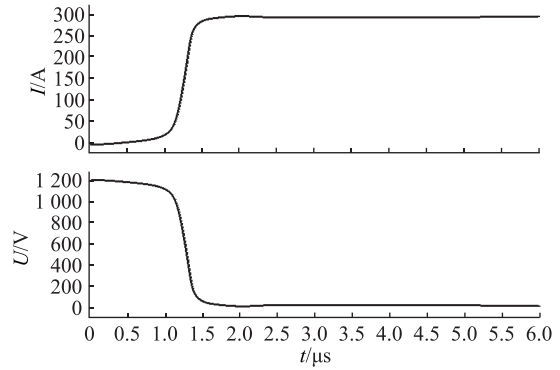


图 8 导通电流和电压波形

Fig.8 The voltage and current during conduction

的横向电阻,无法均匀导通,因此此处率先实现贯通,在开通瞬间,通道仅有几百微米宽。随后导通区域逐渐向阴极扩展,扩展电流首先出现在  $P/N^+$  结处,引起局部导通,一段时间后阴阳极间实现均匀导通。导通时最大电流密度出现在门极和阴极附近,约为  $1100 A/cm^2$ 。

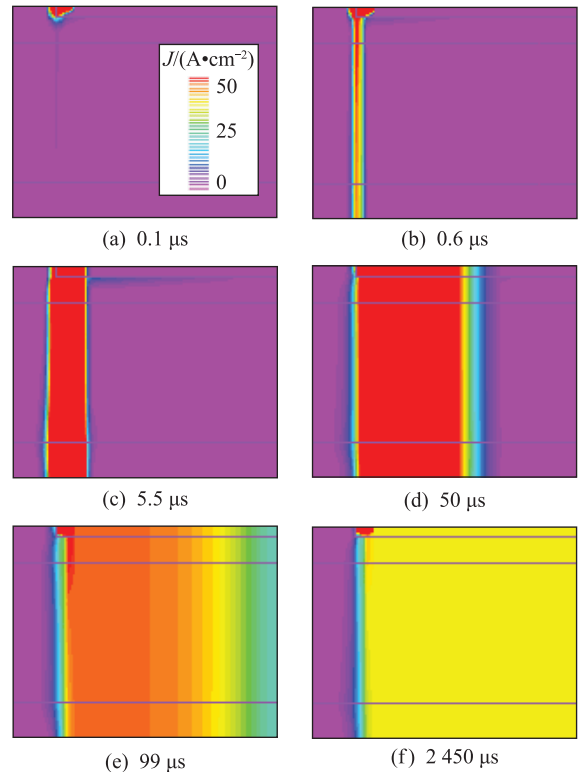


图 9 导通过程电流密度

Fig.9 Current density during conduction

### 3.2 暂态脉冲作用下反向恢复过程仿真

脉冲特性电压电流波形如图 10 所示,在反向恢复电路的基础上增加了虚线部分用于施加电压脉冲。 $V_s$ 为可编辑电压源,脉冲电压上升沿 2  $\mu\text{s}$ ,峰值 1 000 V 持续 1  $\mu\text{s}$ ,下降沿 12  $\mu\text{s}$ , $R_{w4}$ 模拟开关,晶闸管在反向恢复阶段受到电压脉冲。

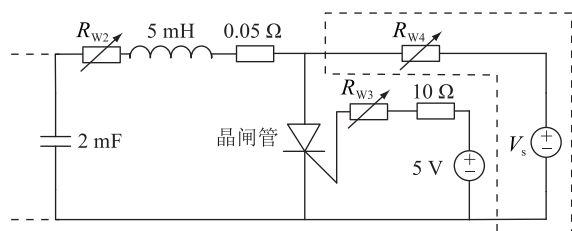


图 10 脉冲仿真电路

Fig.10 The simulation circuit for pulse characteristics

仿真得到晶闸管上电压电流波形如图 11 所示。在 42  $\mu\text{s}$  时通过  $V_s$  施加电压脉冲,约 2  $\mu\text{s}$  后,晶闸管电流正向增加,器件再次导通。为探究其变化过程,截取不同阶段晶闸管内部电流密度进行分析,如图 12 所示。

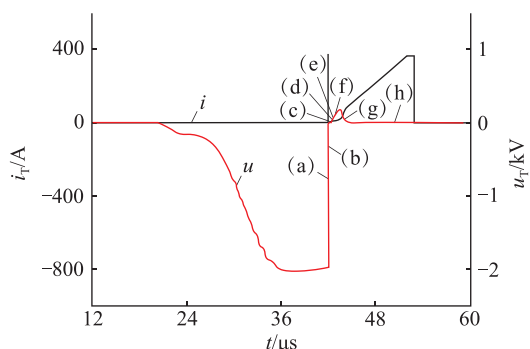


图 11 脉冲特性电压和电流波形

Fig.11 The voltage and current under voltage pulse

由于施加脉冲时刻晶闸管仍有反向恢复电流流过,因此图 12(a) 中晶闸管基区存在一定的电流密度。图 12(a) — (c) 为内部载流子的消散过程,即反向电流逐渐缩小趋于零。图 12(d) — (h) 为晶闸管误触发过程。与正常导通过程对比可以发现,误触发会导致门极与阳极的短暂导通,如图 12(d) 所示,此处电流密度消失的同时引发阴极边缘与阳极导通,出现较窄的电流通道,与正常导通相类似。不同的是,整个区域的导通并不是由此个通道横向扩散形成,而是在平行区域直接出现密度较低的电流通道。这是由于在前一阶段芯片基区仍有剩余载流子,该平行区域在扩散电流未到达时提前导通所致。升压结束,电流达到稳定时,电流密度分布仍处于不均匀状态。电流为 300 A 时最大电流密度位于门极和阴极附近,与正常触发相同,但由于分

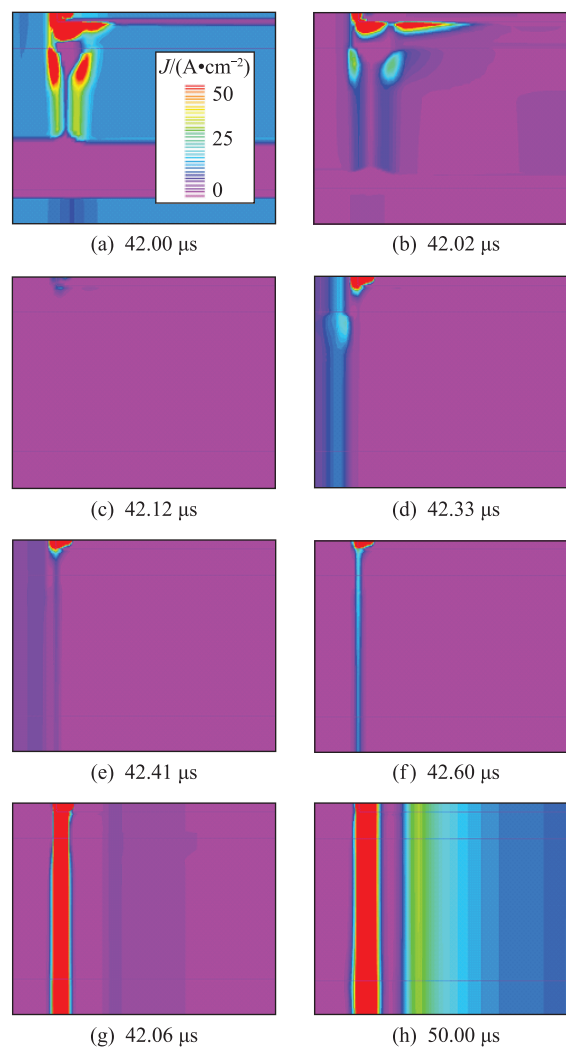


图 12 电压脉冲作用时电流密度

Fig.12 Current density during voltage pulse

布不均,此时最大电流密度约 5 000  $\text{A}/\text{cm}^2$ ,接近门极触发导通的 5 倍。由此可能引发局部过热而导致晶闸管永久性损坏。

脉冲施加时间对误触发电压的影响如图 13 所示,采用 logistic 函数对数据进行拟合,以电流过零点为零时刻。

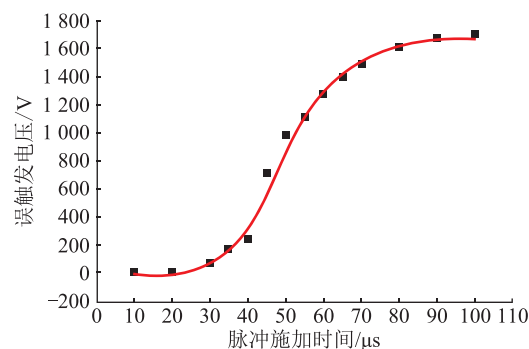


图 13 脉冲施加时间对误触发电压的影响

Fig.13 Effect of the moment of impulse on false triggering voltage

由图 13 可见,在同样的  $du/dt$  作用下,随着施加时间后移,晶闸管内部过剩载流子逐渐耗尽,阻断能力逐步恢复,可承受的误触发电压越来越高。且阻断能力恢复主要集中在  $35 \sim 70 \mu\text{s}$ ,与此对应的是反向电流下降过程,过剩载流子在此阶段内迅速消耗。此阶段后,晶闸管阻断能力虽然在较大程度上得到了恢复,但电场强度变弱,恢复速度减慢,因此还需要一段较长的时间来恢复完全阻断能力。

#### 4 结论

文中建立了二维晶闸管物理模型,搭建工频仿真电路验证其静态和暂态特性,并仿真分析了脉冲作用下的反向恢复过程,得到以下结论:

(1) 建立了晶闸管物理模型,仿真获得其静态特性和暂态特性,与实际器件参数和实验数据匹配度较高,可用于晶闸管器件-电路混合暂态仿真。

(2) 反向恢复阶段晶闸管阻断特性较为脆弱,受到脉冲冲击易发生误触发而导通,引起误触发的电压与施加脉冲时间的关系可以用 logistic 曲线来描述。

(3) 反向恢复阶段误触发导通与正常导通形成电流通道的过程有所差别,且误触发导通时,晶闸管内部电流密度处于极不均匀分布状态,容易因此局部过热而损坏。

#### 参考文献:

- [1] 周启文,丁峰峰,潘磊,等. 晶闸管旁路开关在 UPFC 中的应用[J]. 电力工程技术,2019,38(1):146-151.  
ZHOU Qiwen,DING Fengfeng,PAN Lei, et al. The application of thyristor bypass switch in UPFC [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 146-151.
- [2] 宋开胜,马宏忠,王华芳,等. 基于晶闸管的分段式快速调压模型的设计[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(7):135-141.  
SONG Kaisheng,MA Hongzhong,WANG Huafang, et al. Design of a segmented rapid voltage regulation model based on thyristors [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 135-141.
- [3] 杨光,李斌. 智能变电站 FACTS 组合装置的应用及其跳闸事件分析[J]. 电力工程技术,2018,37(1):130-135.  
YANG Guang,LI Bin. Application of FACTS combination device in intelligent substation and analysis of its trip event [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 130-135.
- [4] 刘涛,赵晓斌,李凌飞,等. 云广直流晶闸管失效原因分析与控制保护逻辑优化研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(2):93-96.  
LIU Tao,ZHAO Xiaobin,LI Lingfei, et al. Analysis of thyristor failure event and logic optimization controlling and protection in Yun-Guang project [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 93-96.
- [5] 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.
- [6] 马向南.  $\pm 800 \text{ kV}$  楚雄换流站光流触发晶闸管故障分析及措施[J]. 高压电器,2017,53(11):236-245.  
MA Xiangnan. Fault analysis and measures for light-triggered thyristor of  $\pm 800 \text{ kV}$  Chuxiong converter [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 236-245.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 杨俊,汤广福,曹均正,等. HVDC 阀晶闸管结温计算等效电路模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):156-163.  
YANG Jun,TANG Guangfu,CAO Junzheng, et al. Study on equivalent circuit model for HVDC valve thyristor junction temperature calculation [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(15): 156-163.
- [10] TANG Yingjie,ZHANG Zheren,XU Zheng. Analysis and design of damping circuit parameters for LCC valves based on broadband model [J]. Energies, 2020, 13(5): 1059.
- [11] 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(11):133-137.  
DAI Ling,TIAN Shuyun,JIN Chaoliang, et al. Reverse recovery characteristics of pulse power thyristor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(11): 133-137.
- [12] 张静,汤广福,温家良,等. 高压大功率晶闸管反向恢复特性动态模型[J]. 电力电子技术,2015,49(4):50-53.  
ZHANG Jing,TANG Guangfu,WEN Jialiang, et al. Dynamic modelling of the turn off performance of high voltage power thyristor [J]. Power Electronics, 2015, 49(4): 50-53.
- [13] 高冲,张静,周建辉,等. 基于晶闸管反向恢复电流分段拟合的直流换流阀换相过冲电压计算方法研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2):547-554.  
GAO Chong,ZHANG Jing,ZHOU Jianhui, et al. Study on the calculation of the commutation overshoot of HVDC valve based on the piecewise fitting reverse recovery current of thyristor [J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(2): 547-554.
- [14] 苏陶. 基于 TCAD 的晶闸管设计与模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.



SU Tao. Design and simulation of thyristor based on TCAD [D]. Hefei:Hefei University of Technology,2013.

[15] 雷海峰,金锐,温家良,等. 大功率 4H-SiC GTO 晶闸管研究[J]. 电力电子技术,2011,45(12):129-132.

LEI Haifeng,JIN Rui,WEN Jialiang, et al. Research on high power 4H-SiC GTO thyristor[J]. Power Electronics, 2011, 45(12):129-132.

[16] 雷海峰. 基于碳化硅新型换流阀设计研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.

LEI Haifeng. Research on the design of new converter valve based on silicon carbide[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2011.

[17] 王彩琳. 电力半导体新器件及其制造技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

WANG Cailin. New device for power semiconductor and its manufacturing technology [M]. Beijing: China Machine Press,2014.

作者简介:



陈炫宇

陈炫宇(1995),男,硕士在读,研究方向为大功率半导体器件特性及换流阀可靠性评估(E-mail:331923870@qq.com);

陶风波(1982),男,博士,教授级高级工程师,从事特高压交直流电力系统过电压、换流阀及脉冲功率研究工作;

徐阳(1987),男,博士,高级工程师,从事高压直流输电过电压、换流阀和柔性交流输电研究工作。

### Reverse recovery characteristics of high voltage thyristor induced by voltage pulse based on TCAD

CHEN Xuanyu<sup>1</sup>, TAO Fengbo<sup>2</sup>, XU Yang<sup>2</sup>, PANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Qiaogen<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** Research on reverse recovery characteristics of high voltage thyristor induced by voltage pulse has important significance in parameter design, fault protection and test detection of converter valve. The thyristor two-dimensional semiconductor simulation model is built according to the actual structure of the thyristor. The static breakdown characteristics and reverse recovery current characteristics are simulated based on the carrier drift diffusion model. The validity of the model is checked by comparing with the experimental results. On the basis of the above, the device-circuit simulation hybrid model is established and the similarities and differences of the current density in the thyristor are analyzed and compared. The results show that voltage pulse can lead to the false triggering of the thyristor during the reverse recovery. The false triggering voltage increases with the time at which voltage pulse is applied.

**Keywords:** high voltage thyristor; voltage pulse; reverse recovery; transient characteristics; technology computer aided design (TCAD)

(编辑 钱悦)