

# 考虑机械式直流断路器实际工况的IGCT器件温度分布仿真研究

黄诗洋<sup>1</sup>, 彭兆伟<sup>1</sup>, 康子章<sup>2</sup>, 李亚美<sup>1</sup>, 孙浩<sup>2</sup>, 徐党国<sup>1</sup>, 王伟丞<sup>2</sup>, 宁琳如<sup>1</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

**摘要:** 机械式直流断路器是柔性直流电网直流故障清除的重要手段, 集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)是机械式直流断路器的核心元件之一。在机械式直流断路器开断过程中, IGCT器件承受振荡衰减的浪涌电流。针对IGCT器件在机械式直流断路器开断过程中的温度分布, 文中首先建立机械式直流断路器电路仿真模型, 获取开断过程中IGCT器件承受的电流波形, 然后建立IGCT电热耦合模型, 研究了实际工况下的IGCT器件温度分布特性。研究结果表明在断路器开断过程中IGCT芯片阴极电极边沿处区域具有最高的温度和电流密度, 为机械式直流断路器可靠性评估奠定了基础。

**关键词:** 机械式直流断路器; 集成门极换流晶闸管; 电热耦合模型; 温度分布

## Temperature Distribution Simulation of IGCT Considering the Actual Operating Conditions of Mechanical DC Circuit Breakers

HUANG Shiyang<sup>1</sup>, PENG Zhaowei<sup>1</sup>, KANG Zizhang<sup>2</sup>, LI Yamei<sup>1</sup>, SUN Hao<sup>2</sup>, XU Dangguo<sup>1</sup>, WANG Weicheng<sup>2</sup>, NING Linru<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Electric power Company Limited, Beijing 100045, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Mechanical DC circuit breaker is a key technology of DC fault removal in flexible DC power grid, and integrated gate commutated thyristor (IGCT) is one of the core components of mechanical DC circuit breaker. During the switching of a mechanical DC circuit breaker, the IGCT device is subjected to an oscillation-attenuated surge current. In view of the temperature distribution of IGCT devices during the breaking process of mechanical DC circuit breakers, this paper first establishes a circuit simulation model of mechanical DC circuit breakers to obtain the current waveform of IGCT devices during the breaking process, and then establishes an IGCT electro-thermal coupling model to study the temperature distribution characteristics of IGCT devices under actual working conditions. The results show that the edge area of the cathode in IGCT chip has the highest temperature and current density, which lays a foundation for the reliability evaluation of mechanical DC circuit breakers.

**Key words:** mechanical DC circuit breaker; IGCT; electro-thermal coupling model; temperature distribution

## 0 引言

随着新能源的大规模应用, 柔性直流电网的发展对直流故障的清除能力提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)可以有效的开断直流电流, 从而快速清除直流故障<sup>[4-6]</sup>。常见的直流断路器可以分为3类: 固态式直流断路器<sup>[7]</sup>、机械式直流断路器<sup>[8]</sup>、混合式直流断路器<sup>[9]</sup>。其中机械式直流断路器具有结构简单、导通损耗小、制造成本低的优势, 具有广泛地应用前景<sup>[10]</sup>。机械式直流断路器由主支路、转移支路、缓冲支路构成, 集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)具有通流能力强、可靠性高、制造成本低的特点<sup>[11-12]</sup>, 是转移支路的核心器件之一。在实际开关过程中, IGCT器件耐受振荡衰减的浪涌电流, 其峰值可达数十kA, 其可靠性直接影响机械式直流断路器的开断能力。因此, 需要研究IGCT器件在机械式直流断路器开断过程中的电热应力, 分析其可能出现的薄弱点。

近年来, 国内外学者针对IGCT在不同工况下的电热应力展开的大量研究。针对串联IGCT器件在直流断路器中的电压分布问题, ABB的研究人员通过实验分析了两个串联IGCT的静态和动态行为<sup>[13]</sup>, 详细考虑了

基金项目: 国网冀北电力有限公司资助项目(阜康站中车IGCT老化程度实验检测技术提升)。

Project Supported by State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Project(Improvement of CRRC IGCT Aging Experimental Detection Technology at Fukang Station).

不同门极延迟引起的电压不对称性。此外，陈振宇等人分析了缓冲电容器、缓冲电阻器和杂散电感对 IGCT 串联分压均匀性的影响<sup>[14]</sup>。屈鲁等人基于电路仿真分析了缓冲器和门极延迟的影响<sup>[1]</sup>。针对 IGCT 器件的电流分布问题，研究人员利用 Ansys Q3D 提取并联 IGCT 器件间的杂散电感，从而研究并联 IGCT 器件的均流特性，通过优化接线方式、开关时序，可以优化并联 IGCT 器件的关断能力<sup>[15]</sup>。由于 IGCT 芯片采取同心环形的元胞排列方式，各环间由于杂散电感差异导致电流分布不均，通过建立考虑各环间杂散电感的全晶圆模型，可以得到各环的电流分布，杂散电感参数可以，各环间电流分布特性与各环元胞数<sup>[16]</sup>、门极环位置等<sup>[17]</sup>因素有关。对于 IGCT 器件在短路故障下的电流分布，Wenpeng Zhou 等人利用磁场传感器阵列和温度传感器阵列对短路过程中的电流分布变化进行检测，结合对短路后芯片的显微观测，分析得到 IGCT 模块的失效机理和短路特性<sup>[18]</sup>。但是，现有研究大多针对 IGCT 器件的开关过程，而机械式直流断路器开断过程中 IGCT 主要耐受浪涌电流，因此需要针对机械式直流断路器实际工况，对 IGCT 器件的电热应力展开研究。

针对上述问题，文中首先根据机械式直流断路器电路拓扑及开关时序，利用电路仿真得到实际开断过程中 IGCT 器件上的电流波形，然后建立 IGCT 器件电热耦合有限元仿真模型，最后结合上述电流仿真结果，获得 IGCT 器件中的电流、温度分布，从而分析得到 IGCT 器件在机械式直流断路器开断过程中的电流密度、温度分布特性。

## 1 机械式直流断路器开断工况仿真分析

本章根据张北 500 kV 直流断路器电路拓扑和开关时序，建立机械式直流断路器电路仿真模型，并对实际短路电流开断工况进行仿真，得到 IGCT 器件在实际工况的电流波形。

### 1.1 机械式直流断路器电路拓扑与开关时序

机械式直流断路器内部主要由 4 部分组成，缓冲支路、耗能支路、主断口支路与转移支路。缓冲支路主要用来限制断路器开断后的断口恢复电压上升率，其主要由缓冲电容、缓冲电容并联电阻及缓冲电容限流电阻组成；耗能支路由多个避雷器组串、并联构成，用于抑制开断过电压和吸收线路及平抗储存能量。避雷器为多组串联，每一组与快速断路器断口并联，同时起到断口均压的作用；主断口支路由多断口快速断路器串联构成，用于开断直流系统电流。快速断路器能够切断高压直流电路，实现隔离电路的功能。与传统的交流断路器不同，快速断路器开关在判断到电路故障或者需要切断电路时，通过机械运动来切断电路，同时还可以完成对电路的定位和跳闸操作，具有快速响应、可靠性高等优点；转移支路由振荡电感、储能电容、储能电容并联电阻、IGCT 模块等组成，储能电容、振荡电感及 IGCT 模块串联，构成转移支路主回路。张北 500 kV 机械式直流断路器结构见图 1。图 1 中： $U_{DC}$  为直流母线电压； $R_L$  为负载电阻； $L_1$ 、 $L_2$  为输电线路的等效分布电感； $C_2$  为缓冲电容；电阻  $R_2$  和  $R_3$  共同组成了缓冲支路；CB 为直流断路器中主断口支路的机械开关；MOV 为多组串联的避雷器，设置起始动作电压为 800 kV； $C_1$  为储能电容； $L$  为振荡电感； $R_1$  为储能电容并联电阻。根据张北 500 kV

机械式直流断路器工程实际，各元件参数取值见表 1。

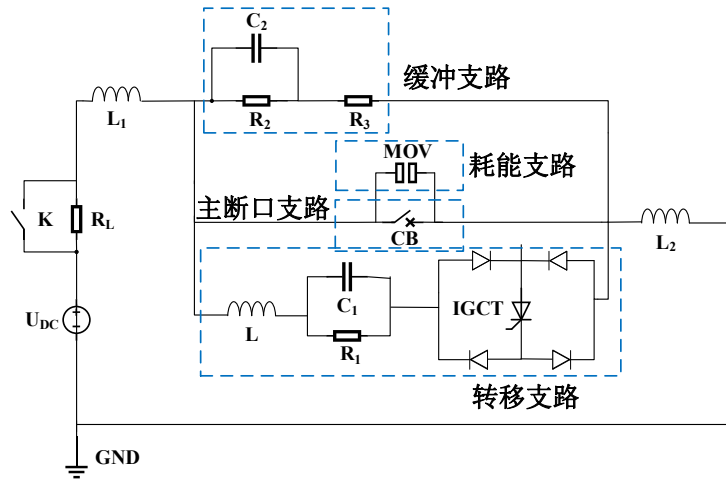


图 1 机械式直流断路器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical DC circuit breaker

表 1 机械式直流断路器元件参数

Table 1 Mechanical DC circuit breaker component parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$U_{DC}/kV$	500	$R_L/\Omega$	166.7
$L_1、L_2/mH$	89.2	$C_2/\mu F$	0.1
$R_2、R_3/\Omega$	80	$C_1/\mu F$	5.8
$L/mH$	0.3	$R_1/M\Omega$	18

机械式直流断路器的原理简述如下：系统正常运行时，电流流过机械断口开关 CB，某时刻系统发生短路故障，流过 CB 的故障电流上升；经过一段时间的延迟后，断路器收到系统发出的保护指令开始分断，同时 IGCT 导通，电容  $C_1$  通过电感  $L$  与 IGCT 阀组放电，形成高频振荡电流；当转移支路上的高频振荡电流与故障电流叠加产生电流过零点时，故障电流转移至转移支路，一段时间后 IGCT 关断；耗能支路在端口电压达到避雷器起始动作电压时开始吸能，IGCT 关断后避雷器持续吸能至电流为 0，直流断路器完成故障电流的分断。仿真时序见图 2，仿真开始时，电容  $C_1$  充电完成； $t=0.05\text{ s}$  时，线路发生短路故障； $t=0.0575\text{ s}$  时，机械开关断开，IGCT 导通； $t=0.06\text{ s}$  时，IGCT 关断； $t=0.09\text{ s}$  时，避雷器 MOV 吸能完毕，仿真结束。

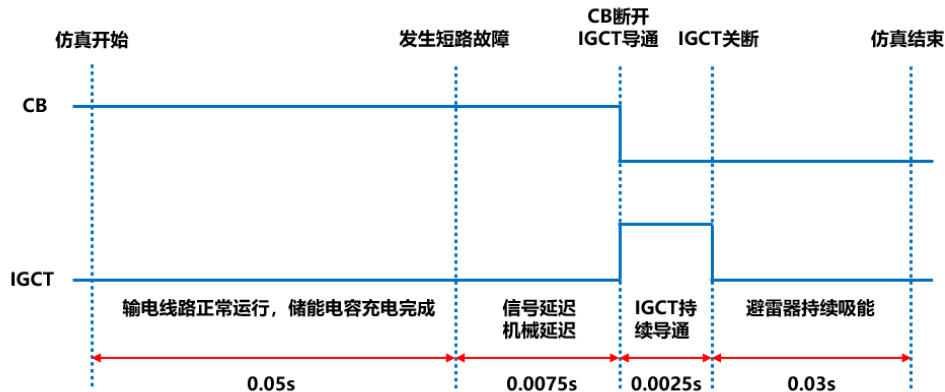


图 2 仿真时序图

Fig. 2 Simulation time sequence diagram

## 1.2 机械式直流断路器工况分析

根据机械式直流断路器的工作原理与仿真时序，建立其仿真电路，并对短路工况进行仿真研究。由于各回路中流过的电流大小主要由电力系统运行状态决定，因此本仿真中使用理想开关器件来替代多个 IGCT 阀组串联(转移支路的 IGCT 阀组为 420 个 IGCT 器件串联)而不影响仿真的正确性。仿真得到断路器转移支路的电流波形见图 3。

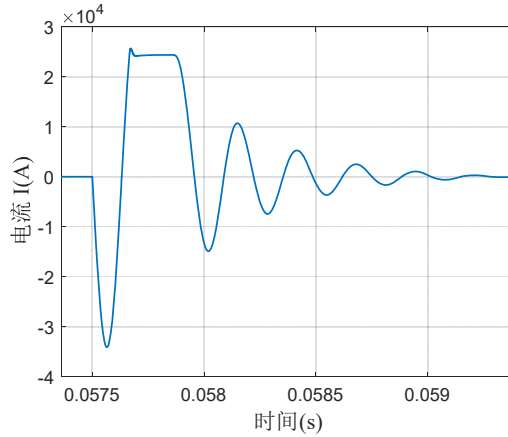


图 3 断路器转移支路电流波形

Fig. 3 Current waveform of circuit breaker transfer branch

IGCT 在系统正常运转时断开状态，即在 0.057 5 s 之前流过 IGCT 的电流为 0，且不存在波动。由于 IGCT 阀组由一个 IGCT 与 4 个二极管组成 H 桥结构，这使得流过 IGCT 的电流始终为正向电流，将流经 IGCT 的振荡电流在 0.057 5 ~ 0.06 s 区间内放大，得到的振荡冲击电流波形见图 4。

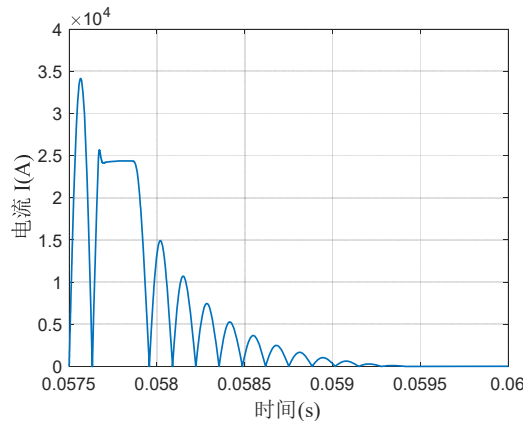


图 4 流经 IGCT 的振荡冲击电流

Fig. 4 Oscillating impulse current flowing through IGCT

流过 IGCT 阀组的电流为不断衰减的振荡电流，电流最大值为 34.14 kA，电流持续时间为 2.5 ms，共 15 个周波。图 4 中在第二个周波处电流出现平台期，其原因是该时刻机械开关 CB 两端电压达到避雷器 MOV 的起始动作电压，MOV 开始动作吸能，故在转移支路流过一个持续时间约为 210  $\mu$ s 的平台电流，当 MOV 动作之后，电路中流过周期较为规律、幅值逐渐衰减至 0 的振荡电流，随后 IGCT 阀组关断，故障电流切除成功。

## 2 IGCT 器件有限元仿真模型

本章主要介绍了 IGCT 的基本结构，并对机械式直流断路器中使用的 CAc4000-45-02 型 IGCT 器件进行了电热耦合有限元仿真，计算得到了 IGCT 芯片内部的电流与温度分布，对芯片内部的电流与温度分布特性进行了分析。

### 2.1 IGCT 结构

集成门极换流晶闸管是基于 GCT 衍生发展而来的全控型功率器件，包括集成门极驱动器、外壳封装和门极换向晶闸管芯片，其本质上是快速关断的 GCT。IGCT 的封装结构分为 3 类：分立式、焊接式和压接式，本研究所使用的 CAc4000-45-02 型 IGCT 为非对称压接式器件，其基本结构见图 5。

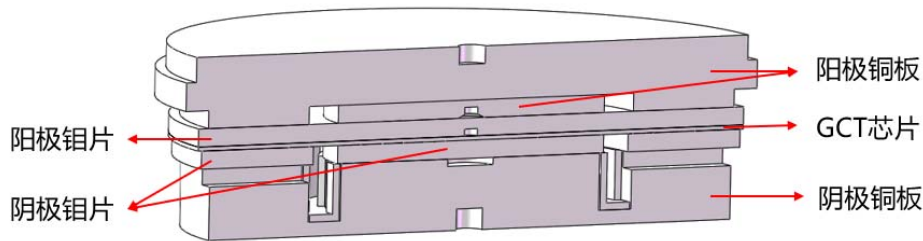


图 5 CAc4000-45-02 型压接式 IGCT 基本结构

Fig. 5 Basic structure of CAc4000-45-02 crimping IGCT

在芯片元胞的横向结构设计上，IGCT 芯片元胞的结构尺寸为百微米级别，设计上一般采用工作特性优良且较易实现的条形元胞设计方式，这使得 IGCT 的元胞结构简单，芯片成品率高。在 IGCT 芯片中采用同心环形排列的条形元胞设计，芯片阴极侧由 10 个同心环的条形元胞组成，门极接触环位于第五阴极环与第六阴极环之间，芯片与阴极铝片通过铝电极连接，除了芯片阴极单元与阴极铝片接触区域外，其余区域均由钝化层覆盖，用于电绝缘和防止芯片污染，在 GCT 芯片的最外侧边缘使用绝缘橡胶包裹对芯片进行保护。

### 2.2 有限元建模与仿真

#### 2.2.1 模型参数

由于 IGCT 芯片阴极单元的同心环形分布，在芯片的工作过程中，不同元胞的阻抗参数存在不对称的情况，为了研究直流断路器用 IGCT 器件在实际工况中的电流分布与温度分布，对其进行有限元建模仿真。由于 IGCT 器件各组件均为圆环或圆盘状，具有高度的旋转对称性，因此利用二维轴对称模型代替三维模型进行仿真，减少仿真计算维度，提高仿真效率。在芯片导通时，门极配件、芯片边缘的绝缘橡胶等结构对于电流和热传导并无较大影响，因此可以忽略，模型从上到下依次为：阴极铜板、阴极铝片、铝电极、GCT 芯片、阳极铝片、阳极铜板。建模所需的几何尺寸由 CAc4000-45-02 型 IGCT 器件解剖测量得到，见表 2。最终建立的二维轴对称模型见图 6，IGCT 器件的材料参数见表 3。

表 2 IGCT 模型几何参数

Table 2 IGCT model geometric parameters

部件	材料	其他参数/mm	厚度/mm
阴极侧管盖	铜	直径 128	0.50
阳极侧管盖	铜	直径 150	0.50
GCT 芯片	硅	直径 83	0.48
铝电极	铝	宽度 2.97	0.02
阴极环形钼片	钼	外直径 83、内直径 50	2.30
阴极环形钼片	钼	直径 40	2.30
阳极环形钼片	钼	直径 83	2.30

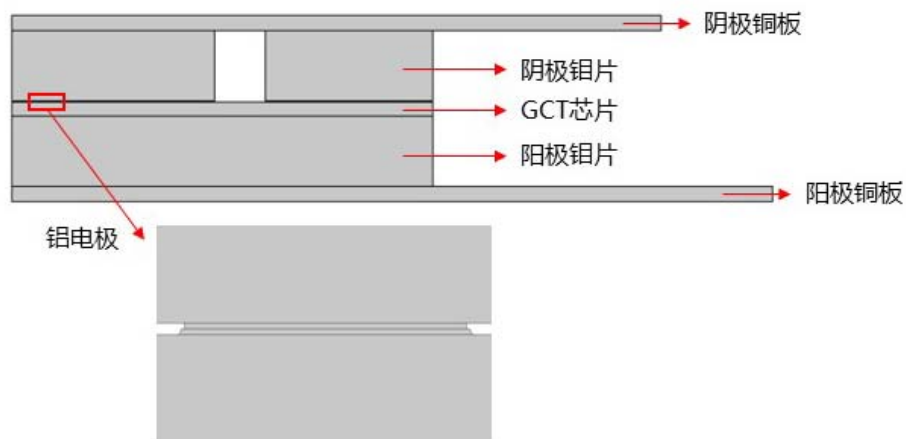


图 6 IGCT 二维轴对称模型

Fig. 6 IGCT two-dimensional axisymmetric model

表 3 IGCT 模型材料参数

Table 3 IGCT model material parameters

参数名称	铜	铝	硅	钼
电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	5.998×10 <sup>7</sup>	3.774×10 <sup>7</sup>	仿真拟合	2.000×10 <sup>7</sup>
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	8 960	2 700	2 329	10 200
恒压热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	385	900	700	250
导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	400	238	130	138

IGCT 为大功率半导体器件，其电阻是关于温度和电流的函数，仿真中 GCT 芯片所使用材料硅的电导率设置是实现“电—热”耦合的关键。本研究根据如图 7 所示 IGCT 器件数据手册提供的 25 °C 和 125 °C 下的伏安特性曲线，分别使用四次多项式拟合得到在 25 °C 和 125 °C 下硅电导率随电流变化的函数，再将多项式系数近似为随温度线性变化，得到随电流和温度变化的硅电导率见式(1)，式(1)中各项参数见表 4。

$$\gamma = (a_4 T + b_4) I^4 + (a_3 T + b_3) I^3 + (a_2 T + b_2) I^2 + (a_1 T + b_1) I + a_0 T + b_0 \quad (1)$$

式(1)中： $\gamma$  为电导率； $T$  为温度； $I$  为流经芯片的电流。

表 4 硅电导率多项式参数

Table 4 Polynomial parameters of silicon conductivity

参数名称	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
------	-------	-------	-------	-------	-------

数值	$-7.750 \times 10^{-18}$	$4.065 \times 10^{-13}$	$-5.720 \times 10^{-9}$	$-4.080 \times 10^{-5}$	$7.410 \times 10^{-2}$
参数名称	$b_4$	$b_3$	$b_2$	$b_1$	$b_0$
数值	$-1.025 \times 10^{-15}$	$8.375 \times 10^{-11}$	$-2.703 \times 10^{-6}$	$4.692 \times 10^{-2}$	12.620

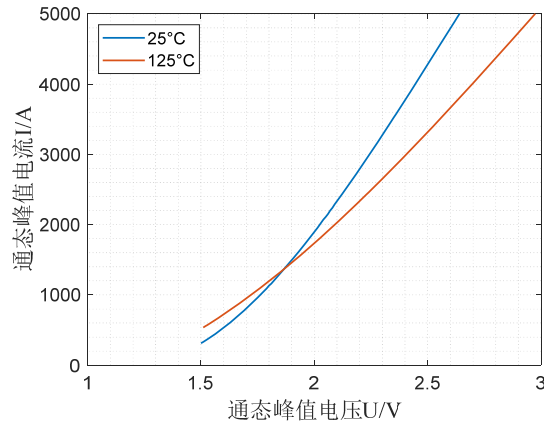


图 7 伏安特性曲线

Fig. 7 Volt-ampere characteristic

### 2.2.2 网格剖分

使用自由三角形网格对模型进行网格剖分，对于 GCT 芯片部分采用较细的网格剖分，对于其他部分则采用较粗的网格剖分以提高仿真计算速度。完整网格共包含 82 354 个域单元和 7 909 个边界单元，生成的网格见图 8。

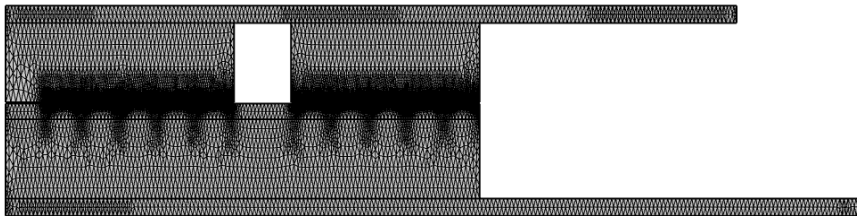


图 8 仿真模型网格剖分

Fig. 8 Mesh generation of simulation models

### 2.2.3 物理场控制方程

阳极铜板通入冲击电流，可以忽略芯片内部感生磁场，电场的控制方程为电准静态方程，根据安培环路定理得到电流控制方程

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式(2)中： $J$ 为电流密度； $\rho$ 为电荷密度。

电势方程为

$$-\nabla V = E \quad (3)$$

式(3)中： $V$ 为电势； $E$ 为电场强度。根据高斯定理和材料本构方程：

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (5)$$

$$J = \gamma E \quad (6)$$

式(4)-(5)中： $D$ 为电位移矢量； $\varepsilon_0$ 为真空介电常数， $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m； $\varepsilon_r$ 为材料的相对介电常数； $\gamma$ 为材料电导率。

联立上述方程，可以得到

$$-\nabla \cdot (\gamma \nabla V + \frac{\partial(\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V)}{\partial t}) = 0 \quad (7)$$

式(3)-(8)即为时域瞬态下IGCT芯片电场控制方程。

根据焦耳定律

$$P = I^2 R \quad (8)$$

式(7)中： $P$ 为芯片功率； $I$ 为流过芯片电流； $R$ 为电阻。

瞬态传热方程见式(9)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (9)$$

式(9)中： $\rho$ 为材料密度； $c$ 表示材料比热容； $T$ 表示温度； $k$ 表示材料热导率； $Q$ 表示电流产生的焦耳热。

#### 2.2.4 边界条件

在电场设置中，阳极铜板上表面通入机械式直流断路器仿真得到的高频振荡电流，将阴极铜板下表面设置为接地，其他与空气接触的边界在仿真中设置为电绝缘，整个模型的电势初始值设置为0 V。在热场设置中，由于阳极铜板和阴极铜板在实际使用中冷却方式为水冷，在仿真中设置传热方式为对流热通量，传热系数 $h=8000$  W/(m<sup>2</sup>·K)，外界温度与模型初始温度均设置为20 °C，器件其余与空气接触的边界设置为热绝缘。

### 3 仿真结果分析

当 $t=0.26$  ms时，IGCT芯片流过的最大电流为34.14 kA，计算得到芯片电阻为0.255 mΩ；当 $t=3.1$  ms时，流过芯片的电流为0，芯片电势接近于0，计算结果收敛。 $t=0.26$  ms时芯片电流密度分布见图9。

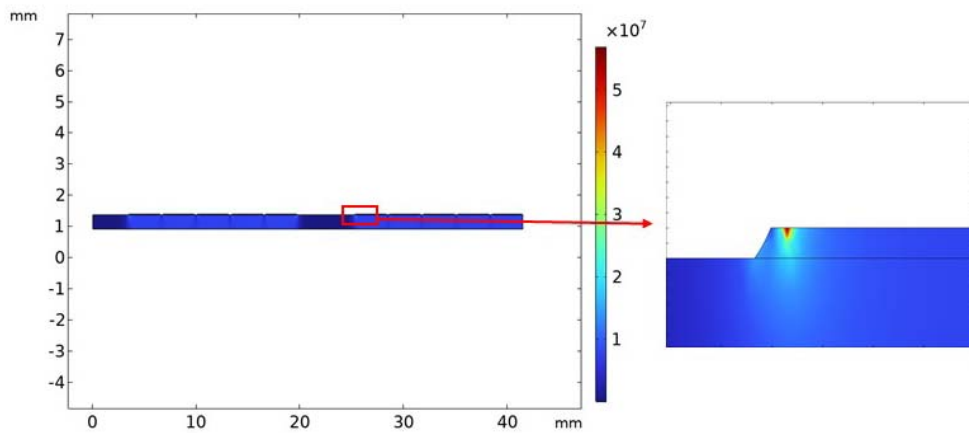


图9 IGCT 芯片电流密度分布

Fig. 9 Current density distribution of IGCT chip

从图 9 可以看出，芯片的整体电流分布较为均匀，电流密度最集中的点位于最靠近门极环的元胞与铝电极接触边缘处。由于芯片的有源面积略大于其与阴极铝片的接触面积，当电流从大面积流向小面积时，电流聚集在芯片和阴极铝片之间的接触边缘，而其中门极环与芯片接触区域为电绝缘，因此最靠近门极环的条形元胞边缘积聚电流最多。由于芯片中电流分布不均匀，故芯片不同区域的温升情况也不同，可能存在局部温度过高的区域， $t=0.59\text{ ms}$  时芯片的温度分布见图 10。

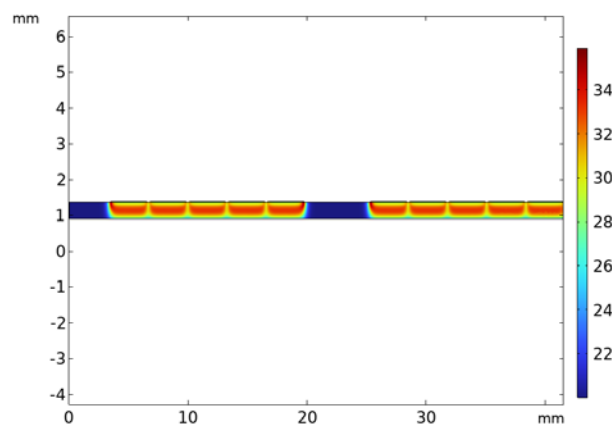


图 10 芯片温度分布

Fig. 10 Chip temperature distribution

从图 10 中可以看出，芯片整体温度分布较均匀，约为  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度最高点位于最靠近门极环的元胞与铝电极的接触边缘，这是由于该区域电流密度最大，产生的焦耳热最多。研究该区域温度随时间的变化情况，并与 IGCT 芯片所承受的功率(芯片电阻取  $0.25\text{ m}\Omega$ )随时间的变化曲线绘制在一起，见图 11。

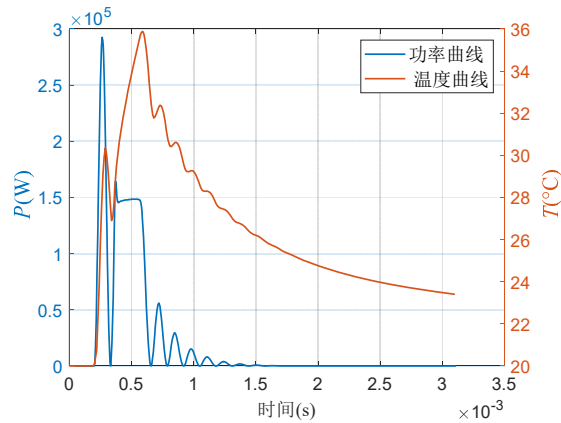


图 11 电流集中点在冲击电流下的温度变化和功率波形

Fig. 11 Temperature changes and power waveforms of current concentration points under impulse current

由图 11 可知该区域的温度变化主要分为 4 个阶段。第一个阶段为 0.2~0.26 ms，此阶段为振荡电流初始阶段，电流幅值较大，最大功率可达 292.5 kW，IGCT 在短时间内承受较大功率，温度迅速上升；第二个阶段为 0.26~0.34 ms，此阶段为电流第一个波峰结束阶段，功率迅速减小，芯片温度开始降低；第三个阶段为 0.34~0.59 ms，此阶段电流波形处于平台期，功率为 148.5 kW，芯片温度持续上升；第四个阶段为 0.59~3.1 ms，此阶段振荡电流逐渐衰减至 0 A，IGCT 承受的功率较小，温度逐渐下降，在 3.1 ms 末温度降至 23.41 °C。仿真结果表明，IGCT 芯片在靠近门极与阴极铝片区域具有最高的温度和电流密度，因此认为该区域为芯片的薄弱点和可能失效区域。在更加严峻的工况下，该区域更有可能先发生损坏故障。

#### 4 结论

文中建立了机械式直流断路器电路仿真模型，获取开断过程中 IGCT 器件承受的电流波形，然后建立 IGCT 电热耦合有限元仿真模型，得到实际工况下的 IGCT 器件电流、温度分布仿真结果，分析以上仿真结果可以得到以下结论：

1)在机械式直流断路器实际开断过程中，流过 IGCT 器件的电流为一高频振荡电流，电流最大值为 34.14 kA，持续时间为 2.5 ms，共 15 个周波。

2)机械式直流断路器实际开断过程中，IGCT 器件的温升主要在芯片和相邻的铝片部分，其他结构的温升可以忽略不计

3)机械式直流断路器实际开断过程中，IGCT 芯片阴极电极边沿处电流集中，导致局部温度升高，该区域可能为芯片的薄弱区域。

#### 参考文献：

- [1] LIANG Yingyu, HUO Yaotong, ZHAO Feng. An accelerated distance protection of transmission lines emanating from MMC-HVDC stations[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5558-5570.
- [2] MONTILLA-DJESUS M E, SANTOS-MARTIN D, ARNALTES S, et al. Optimal operation of offshore wind farms with line-commutated HVDC link connection[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 504-513.
- [3] XU Jianzhong, LU Yu, ZHAO Chengyong, et al. A model-based DC fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC systems using a simplified transmission line representation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 386-395.

- 
- [4] GUO Qixin, ZHANG Jingye, CHI Teng. Review of DC circuit breaker technology[C]//2022 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Perth, Australia: IEEE, 2022: 1-5.
- [5] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [6] SIMA Wenxia, FU Zhengzheng, YANG Ming, et al. A novel active mechanical HVDC breaker with consecutive interruption capability for fault clearances in MMC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 6979-6989.
- [7] QI L. Solid-state circuit breaker protection for DC shipboard power systems: Breaker design, protection scheme, validation testing[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 56(2): 952-960.
- [8] WEN W, WANG Y, LI B, et al. Transient current interruption characteristics of a novel mechanical DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9424-9431.
- [9] MEYER M, RUFER A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors(IGCTs)[J]. IEEE transactions on power delivery, 2006, 21(2): 646-651.
- [10] 李 斌, 李鹏宇, 温伟杰, 等. 机械式直流断路器性能分析及谐振换流方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2137-2149.  
LI Bin, LI Pengyu, WEN Weijie, et al. Performance analysis and resonant commutation method of mechanical DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2137-2149.
- [11] 周文鹏, 曾 嵘, 赵 彪, 等. 大容量全控型压接式 IGBT 和 IGCT 器件对比分析: 原理、结构、特性和应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2940-2957.  
ZHOU Wenpeng, ZENG Rong, ZHAO Biao, et al. 外文标题缺失[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2940-2957.
- [12] 陈政宇, 余占清, 吕 纲, 等. 基于 IGCT 串联的 10 kV 直流混合断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 317-326.  
CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, LYU Gang, et al. Researches on 10 kV DC hybrid circuit breaker based on IGCT series[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 317-326.
- [13] LADOUX P, SERBIA N, CARROLL E I. On the potential of IGCTs in HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(3): 780-793.
- [14] 屈 鲁, 张翔宇, 陈政宇, 等. 适用于直流开断的 IGCT 串联均压技术[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 409-416.  
QU Lu, ZHANG Xiangyu, CHEN Zhengyu, et al. IGCT series voltage-sharing technology for DC breaking[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 409-416.
- [15] 张智辉, 吴 翊, 吴益飞, 等. 直流断路器并联 IGCT 通断特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3871-3878.  
ZHANG Zhihui, WU Yi, WU Yifei, et al. On-off characteristic of parallelly connected IGCT in a DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3871-3878.
- [16] LYU G. Optimization for cell arrangement design of gate-commutated thyristors based on whole wafer model and Tabu search[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(11): 4938-4946.
- [17] LYU G. 6-in dual-gate ring commutated thyristor for DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(3): 1444-1449.
- [18] ZHOU Wenpeng. Systematic analysis and characterization of extreme failure for IGCT in MMC-HVDC system-Part II: Failure mechanism and short circuit characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(5): 5562-5573.  
黄诗洋(1996—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为交直流开关、电力电子器件的状态评估(E-mail: huang.shiyang@jibei.sgcc.com.cn)。