

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.010

真空型有载分接开关谐波电流切换过程的电弧特性分析

张长虹¹, 范广伟², 邓 军¹, 王培人², 周海滨¹, 谢志成¹, 王 斌²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院, 广州 510620; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 真空灭弧室已被广泛应用于有载分接开关中,作为其实现切换的主要开合单元。换流变压器中应用的有载分接开关存在受谐波影响的运行工况,而目前针对真空灭弧室在谐波电流条件下的电弧等离子特性的研究尚属空白。因此,文中针对换流变压器应用的真空有载分接开关中的真空灭弧室开展相应的谐波电流条件下的电弧特性仿真,通过建立物理模型、数学模型及边界条件分析了真空灭弧室在谐波电流条件下的离子数密度、轴向电流密度、电子和离子温度等特征,并与工频电流条件下相应的特征进行了对比分析。获得的关于初始电流上升率、触头烧蚀、电弧密度、温度特性等方面对开断性能影响的研究结果将对真空型有载分接开关谐波电流切换能力的分析提供技术帮助。

关键词: 换流变压器; 有载分接开关; 谐波电流; 切换试验; 电弧; 仿真

Analysis of Arcing Characteristics During Harmonic Current Switching of Vacuum Type On-load Tap-changer

ZHANG Changhong¹, FAN Guangwei², DENG Jun¹, WANG Peiren², ZHOU Haibin¹,
XIE Zhicheng¹, WANG Bin²

(1. Electric Power Research Institute of EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Guangzhou 510620, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Vacuum interrupter has been used widely in on-load tap-changer as the main units for its switching operations. The on-load tap-changers used in converter transformer are subjected to operating conditions affected by harmonics, yet research on the arc plasma characteristics of vacuum interrupter under harmonic current conditions remains lacking. Therefore, in this paper the simulation of the arc characteristic under harmonic conditions for the vacuum interrupter used in the vacuum type on-load tap changer of converter transformer is performed. By setting up physical model, mathematical model and boundary conditions, such parameters as ion number density, axial current density, electron and ion temperature within the vacuum interrupter used in the converter transformers under harmonic current conditions are analyzed. Furthermore, a comparative analysis is conducted on the corresponding characteristics under power frequency current conditions. The findings regarding the influence of such factors as initial current rise rate, contacts ablation, arc density and temperature characteristics on the interrupting performance will provide technical support for analyzing the harmonic current switching capability of vacuum type on-load tap-changers.

Key words: converter transformer; OLTC; harmonic current; switching test; arcing; simulation

收稿日期:2026-01-13; 修回日期:2026-03-12

0 引言

有载分接开关(on-load tap-changer, OLTC)是电力变压器和直流工程用换流变压器的核心组部件,在稳定电网负荷中心电压、调节无功潮流、直流工程经济灵活运行等方面发挥重要作用^[1-5]。特别是对于特高压直流输电工程,换流变有载分接开关是实现直流输电功率调节、经济、灵活运行的关键部件^[6-10]。

由于真空灭弧室具有绝缘强度高、介质恢复强度高、允许频繁操作、免维护等特点,已广泛应用于有载分接开关中。一种典型对称布置的真空型有载分接开关的拓扑结构见图1^[11],其对应的额定参数见表1。而在直流输电系统中,由于高压直流系统阀侧的负荷电流波形影响网侧,所以直流输电中由于换相带来的谐波分量必然对有载分接开关的切换条件产生影响,特别是较高的电流上升率和恢复电压上升率及其相互作用对真空型有载分接开关中的真空灭弧室切换电流能力提出了新的挑战。而对于真空灭弧室,开断成败的关键在于对电弧的控制。因此,针对换流变压器用真空型有载分接开关中的真空灭弧室在谐波电流条件下的电弧特性开展研究是及其必要的^[11-19]。

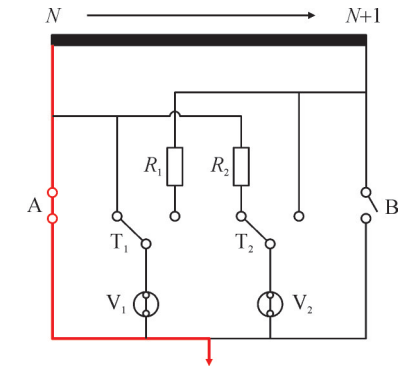


图1 对称布置的有载分接开关拓扑
Fig. 1 Symmetrically arranged on-load tap-changer topology

表1 额定参数

Table 1 Rated parameters

名称	额定容量/kVA	额定电压/kV	最大额定电流/A
额定值	6 000	6	1 300

现有的电弧仿真研究在真空电弧基础模型上已经比较成熟,但对于谐波电流条件下的开断过程真空电弧特性的研究仍处于初步阶段。现阶段真空电弧的仿真研究大多采用基于磁流体动力学模型、双温模型、粒子碰撞模型、混合模拟方法来描述等离子体的行为。有载分接开关在谐波电流条件下的切换过程中,由于电流密度和磁场条件的变

化,真空电弧的稳定性、弧柱的收缩或扩散、等离子体温度、速度和密度等特性也将发生显著的变化。因此,针对有载分接开关中的真空灭弧室开展在谐波电流条件下的电弧特性的仿真可进一步推动真空电弧特性的研究。

文中将结合直流输电系统中换流变压器的实际运行情况,并由图2所示的典型真空灭弧室结构和参数开展相应的谐波电流条件下的电弧特性仿真。通过建立物理模型、数学模型及边界条件分析了换流变用真空灭弧室在谐波电流条件下的离子数密度、轴向电流密度、电子和离子温度等特征,并与工频电流条件下相应的特征进行了对比分析。获得的关于初始电流上升率、触头烧蚀以及电弧密度和温度特性等方面对开断性能影响的研究结果将对真空型有载分接开关谐波电流切换能力的分析提供技术帮助。

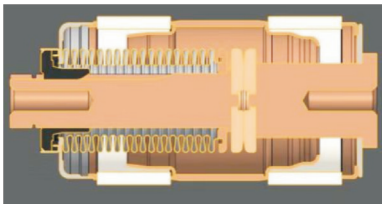


图2 真空灭弧室的剖视图
Fig. 2 Sectional view of vacuum interrupter

1 仿真计算的基本条件

1.1 真空灭弧室

文中用于仿真分析采用的真空灭弧室基本结构的剖视图见图2。本仿真依据应用于±800 kV换流变压器中的SHZV II型真空有载分接开关的真空灭弧室技术参数开展仿真计算。真空灭弧室谐波电流条件下电弧特性仿真所涉及的主要技术参数为:①触头类型为平板电极;②电极直径为42 mm;③触头材料为CuCr40;④触头有效厚度为5 mm;⑤额定开距为5.5 mm;⑥分闸速度为0.7 m/s。

1.2 电流波形

根据国内某典型换流站的HY型换流变压器和HD型换流变压器实测的谐波频谱,实际运行中的换流变压器在额定值运行下($\alpha=15^\circ$)含有谐波工况下的负载电流过零点附近的 $di/dt=2.81\text{ A}/\mu\text{s}$ 。因此,文中为了便于计算和设备裕度考虑,在谐波电流条件下电弧特性的仿真计算中在电弧熄灭时刻电流零点的斜率取 $di/dt\geq 3\text{ A}/\mu\text{s}$ 。同时根据典型换流站获得的运行谐波频谱,文中采用系统运行中谐波分量占比最大的5次谐波和7次谐波与基波电流相叠加,通过调节各自的幅值和相位达到满足对试

验电流零点斜率的要求。

因此仿真的基本条件除上述的真空灭弧室的设计参数外,还包括:①基波电流为 1 718 A;②谐波分量为 5 次谐波和 7 次谐波。

仿真输入的含有谐波分量的电流幅值及波形应与试验验证时等价。真空有载分接开关真空灭弧室切换谐波电流的实际试验电流半波波形见图 3,包括基波电流、5 次谐波和 7 次谐波,其 $di/dt \geq 3 A/\mu s$,以校核仿真输入条件的等价性。

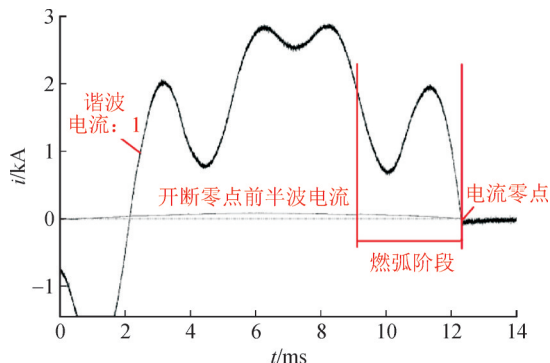


图 3 试验时要求的电流波形

Fig. 3 Current waveform during the test

根据基波电流与 5 次谐波和 7 次谐波相叠加的组合原理和计算公式^[20],并由图 4 给出了基波电流波形和满足 $di/dt \geq 3 A/\mu s$ 要求的含有谐波分量的电流仿真波形示例。

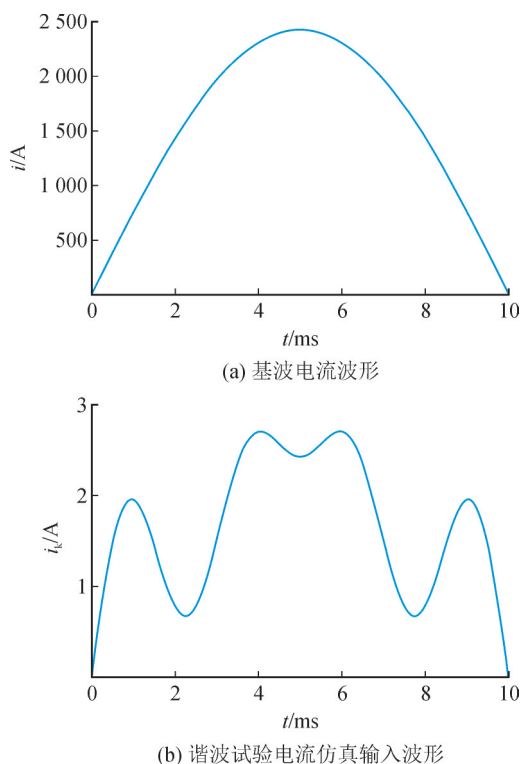


图 4 基波电流与谐波试验电流波形

Fig. 4 Power frequency current and harmonic test current waveforms

由图 4 可知,文中用于仿真输入的谐波电流与试验验证时的波形基本一致。为了证明仿真计算所施加的谐波电流能够满足 $di/dt \geq 3 A/\mu s$ 的要求,对其拟合过程进行求导,求导波形见图 5,读取电流过零点斜率 $di/dt \geq 3 A/\mu s$,满足仿真计算要求。

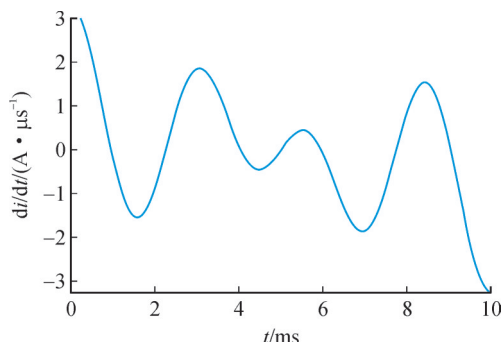


图 5 谐波试验电流求导波形

Fig. 5 Harmonic test current derivative waveform

2 仿真模型

2.1 物理模型

应用于文中进行仿真的真空灭弧室的电弧物理模型见图 6。在所示的模型中,可将真空灭弧室的电弧分为 3 个区域:阴极斑点及混合区、极间等离子区、阳极鞘层区^[21]。当电流较小时,极间等离子体主要由阴极斑点提供,阴极斑点发射的离子和电子从阴极流向阳极,形成了极间等离子体的流动。离子和电子是电流的载体,其定向运动分别形成离子电流和电子电流,电弧电流由离子电流和电子电流所组成。文中仿真研究的仿真区域是极间等离子区,阴极斑点与混合区、阳极鞘层区都只是作为仿真区域的边界。此模型中,阳极不活跃,被动地接收来自等离子体的带电粒子。

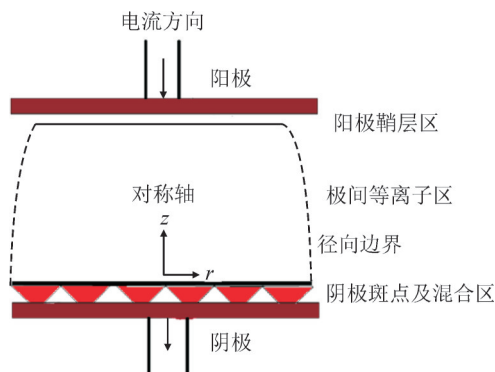


图 6 物理模型

Fig. 6 Physical model

触头盘直径为 42 mm,开距考虑电极的打开过程,初始计算时间为 0.5 ms,初始开距为 1 mm,此后以 0.7 m/s 的打开速度直到开距为 5.5 mm 的额定开

距停止打开,至9.5 ms结束计算。采用FLUENT动网格技术中的动态分层模型(dynamic layering)实现对电极打开过程的模拟。动态分层模型具体实现方式见图7。

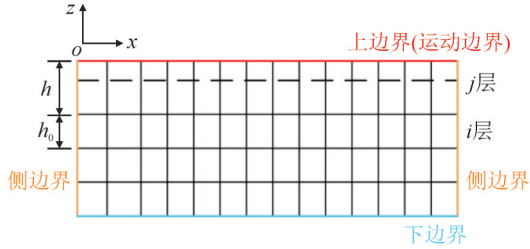


图7 动态分层模型

Fig. 7 Dynamic layered model

在文中的仿真模型中,阳极边界为动态分层网格中的移动上表面边界,阴极边界为下表面边界,侧面边界为侧边界。在FLUENT中将阳极表面设为rigid body,通过编写UDF设置控制阳极边界的运动速度,动态分层模型的分割系数 α_s 设置为0.4,起始网格的层高 h_0 为0.2 mm。

2.2 数学模型

文中所采用的数学模型需对瞬态项进行考虑,以讨论谐波电流的瞬态影响,具体计算式如下^[22-24]。

离子质量方程为

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i v) = 0 \quad (1)$$

式(1)中: n_i 为离子数密度; v 为离子定向运动速度。

离子动量方程为

$$\frac{\partial m_i n_i v}{\partial t} + m_i n_i (v \cdot \nabla) v = J \times B - \nabla p_i - \nabla p_e \quad (2)$$

式(2)中: m_i 为离子质量; B 为磁通密度; J 为电流密度; p_i 为离子压力; p_e 为电子压力。

离子能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_i k T_i + \frac{1}{2} m_i n_i v v \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{3}{2} n_i k T_i + \frac{1}{2} m_i n_i v v \right) v \right] + \nabla \cdot (p_i v) = \frac{3 m_e}{m_i} n_e f_{ei} k (T_e - T_i) + z_i e n_i v \cdot E + \nabla \cdot (\lambda_i \nabla T_i) \quad (3)$$

式(3)中: k 为玻尔兹曼常数; T_i 为离子温度; m_e 为电子质量; n_e 为电子数密度; f_{ei} 为电子与离子碰撞频率; T_e 为电子温度; z_i 为离子平均电荷数; e 为单位电荷; E 为电场强度; λ_i 为离子平均导热系数。

电子能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e k T_e \right) + \nabla \cdot \left(\frac{3}{2} n_e k T_e v_e \right) + \nabla \cdot (p_e v_e) + \nabla \cdot (-\lambda_e \nabla T_e) = -\frac{3 m_e}{m_i} n_e v_{ei} k (T_e - T_i) + \frac{J^2}{\sigma} \quad (4)$$

式(4)中: v_e 为电子定向运动速度; λ_e 为电子平均导热系数。

磁传输方程为

$$\frac{\partial B}{\partial t} - \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 B = -\frac{1}{\sigma^2} J \times \nabla \sigma + \frac{1}{\mu_0 \sigma^2} \nabla B \cdot \nabla \sigma + \nabla \times (v_i \times B) \quad (5)$$

式(5)中, v_i 为导体介质的宏观流动速度。

麦克斯韦方程为

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (6)$$

考虑准中性假设

$$n_e = z_i n_i \quad (7)$$

式(7)中, z_i 为离子平均电荷数,根据实验将其设定为1.85^[21]。

考虑理想气体假设,离子、原子、电子的状态方程如下。

离子质量方程为

$$p_s = n_s k T_s \quad (8)$$

式(8)中,下标 s 可为i、a、e,分别代表离子、原子、电子。

电导率写为

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m_e} \left(\frac{1}{f_{ei}} \right) \quad (9)$$

式(9)中, f_{ei} 为电子与离子的碰撞频率,碰撞频率写为

$$f_{ei} = \frac{\ln \Lambda / 10}{3 \times 10^{10} T_e^{3/2} z_i n_e} \quad (10)$$

式(10)中, $\ln \Lambda$ 为库伦对数; T_e 为电子温度,eV。

离子和电子的热导率可表述为

$$\begin{cases} \lambda_e = \frac{5 k^2 n_e T_e}{2 m_e f_{ei}} \\ \lambda_i \approx \left(\frac{T_i}{T_e} \right)^{5/2} \left(\frac{m_e}{m_i} \right)^{1/2} \lambda_e \end{cases} \quad (11)$$

2.3 边界条件

文中仿真的真空电弧中离子处于超音速状态,结合相关实验的测量结果,文中采用在阴极侧,离子温度为1 eV,电子温度为1.5 eV,离子速度为10 000 m/s,离子在阴极侧的静压、总压及总温为^[23,25]:

$$p_{\text{statics}} = n_i k T_i \quad (12)$$

$$p_{\text{total}} = p_{\text{static}} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (13)$$

$$T_{\text{total}} = T_i \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2 \right) \quad (14)$$

式(12)-(14)中: γ 为比热比(常数5/3); M_a 为马赫数,边界离子数密度与电流密度成正比。

3 不同条件下电弧特性的仿真结果

3.1 离子数密度

含谐波分量的电流条件下真空电弧离子数密

度特性见图 8(a), 离子数密度边界条件与电流大小成正比, 因此离子数密度在 0.5 ~ 9.5 ms 的时间内由于电流的复杂变化, 总体上呈现出与之相符的变化趋势。同时也由于电弧的自箍缩力的作用, 电弧在从阴极往阳极流动的过程中逐渐收缩, 也呈现出阳极处离子数密度更大的分布。同时, 由于在靠近电流零点时电弧的电流相比无谐波的基波电流条件下时(见图 8(b))更大, 因此离子数密度也更大, 在 9 ms 时最大值达到 $1.4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 的大小。对于真空型有载分接开关, 这可能会影响下一次开断前的介质恢复, 从而影响真空灭弧室的开合性能。

3.2 轴向电流密度

含谐波的试验电流条件下真空电弧轴向电流密度特性见图 9(a), 电流密度随时间的变化与含谐波分量的电流波形相符, 并在 4 ms 和 6 ms 时达到最大值, 同时在 3 ~ 7 ms 和 9 ms 后都维持较大的轴向电流密度。将使电弧燃烧在 3 ~ 7 ms 的时间内更为剧烈, 可能造成真空灭弧室触头更为严重的烧蚀, 对有载分接开关的寿命将造成不利的影响。

3.3 电子温度

含谐波的试验电流条件下轴向电子温度的变化见图 10(a)。阴极边界的电子温度设为 1.5 eV, 整个过程中电子温度达到的最大值约为 2.4 eV。空间分布上, 电弧同样呈现出从阴极到阳极逐渐升温, 从中心向两边逐渐温度降低的趋势。而时间上, 由于含谐波分量的电流波形更为复杂, 电子温度在 2 ms 和 8 ms 时达到极低值, 原因是此时电流密度过小所导致。但在含谐波分量的电流作用下, 电流在 9 ms 时重新回升, 因此电弧在 9 ms 及之后的电子温度更高, 靠近阳极处达到 2.4 eV, 与电子温度峰值时刻接近。

3.4 离子温度

含谐波分量的电流条件下轴向离子温度的变化见图 11(a)。阴极边界的离子温度设为 1 eV, 整个过程中离子温度达到的最大值约为 1.45 eV。离子温度也同样受到电子的换热影响。因此, 在 8 ms 后离子温度同电子温度一样会远高于基波电流条件下(见图 11(b))的情况, 并且此刻的离子数密度也高于基波条件下。所以含谐波的电流使得电弧在零点前的燃烧更为剧烈, 不利于开断。

4 仿真模型的验证

电弧离子数密度图像与实验中电弧的形貌特征的对比见图 12, 均为上部阳极, 下部阴极。因此可比较离子数密度和电弧形貌以验证模型正确性。

由图 12 可知, 离子数密度从阴极到阳极的过程

中密度逐渐增大, 并径向分布较为均匀, 仅在靠近边界处有明显的降低, 而电弧形貌的照片中, 除斑点较亮外, 靠近阳极处的亮度也较高, 并且也有着较为明显的边界。因此仿真结果与实验结果吻合较好, 证明了仿真模型结果的正确性。

5 基波与谐波电流条件下电弧仿真结果分析

基波和含谐波分量的电流条件下电弧随时间变化过程中最大的电流密度见图 13。从图 13 可以看出, 最大的电流密度以及后续介绍的最大离子数密度, 最大离子温度和最大电子温度均出现在阳极中心点附近。因此图 14-16 也是阳极中心附近电弧参数的比较。

由图 13 可知, 对于轴向电流密度, 由于电流变化速度不快, 电弧区域内磁场会很快达到准稳态, 仿真中电流根据麦克斯韦方程组由磁场计算而来。由于谐波分量的作用, 电弧在初始状态下比基波电流有更高的电流上升率, 因此含谐波分量的电流条件下初始的电流密度也会上升较快。

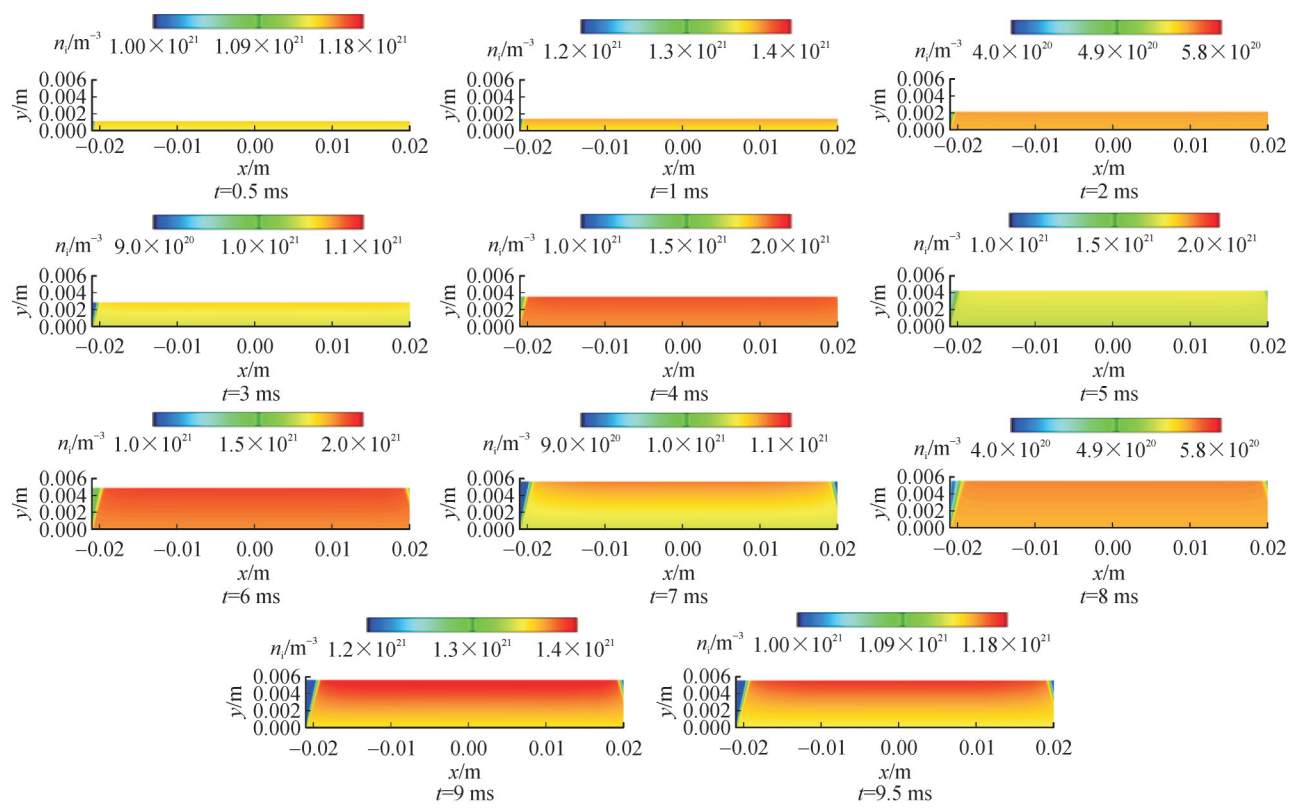
电弧随时间变化过程中离子数密度最大值见图 14。在 4 ~ 6 ms, 基波电流达到最大值的时间段内, 含谐波分量的电流条件下的电弧电流持续高于基波电流条件下, 对比仿真结果同样可以看出, 谐波电流条件下离子数密度持续在 $1.8 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 以上, 并且最大值达到 $2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, 而基波电流条件下最大值仅为 $1.7 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, 因此谐波电流条件下的电弧此时烧蚀相对会更为剧烈。

电弧随时间变化过程中离子温度和电子温度的最大值见图 15、16。对比电流变化的曲线图, 温度的变化是相对滞后的。在较长时间内, 谐波电流条件下的电子温度和离子温度是高于基波电流条件, 并且离子温度和电子温度最大值在谐波电流条件下也更高。尤其在 8 ms 之后, 电流接近零点前, 其电弧电流也高于基波电流条件, 并且导致此时的电弧离子数密度、离子温度、电子温度均明显偏高, 该条件下可能会对开断后介质恢复造成不利影响。

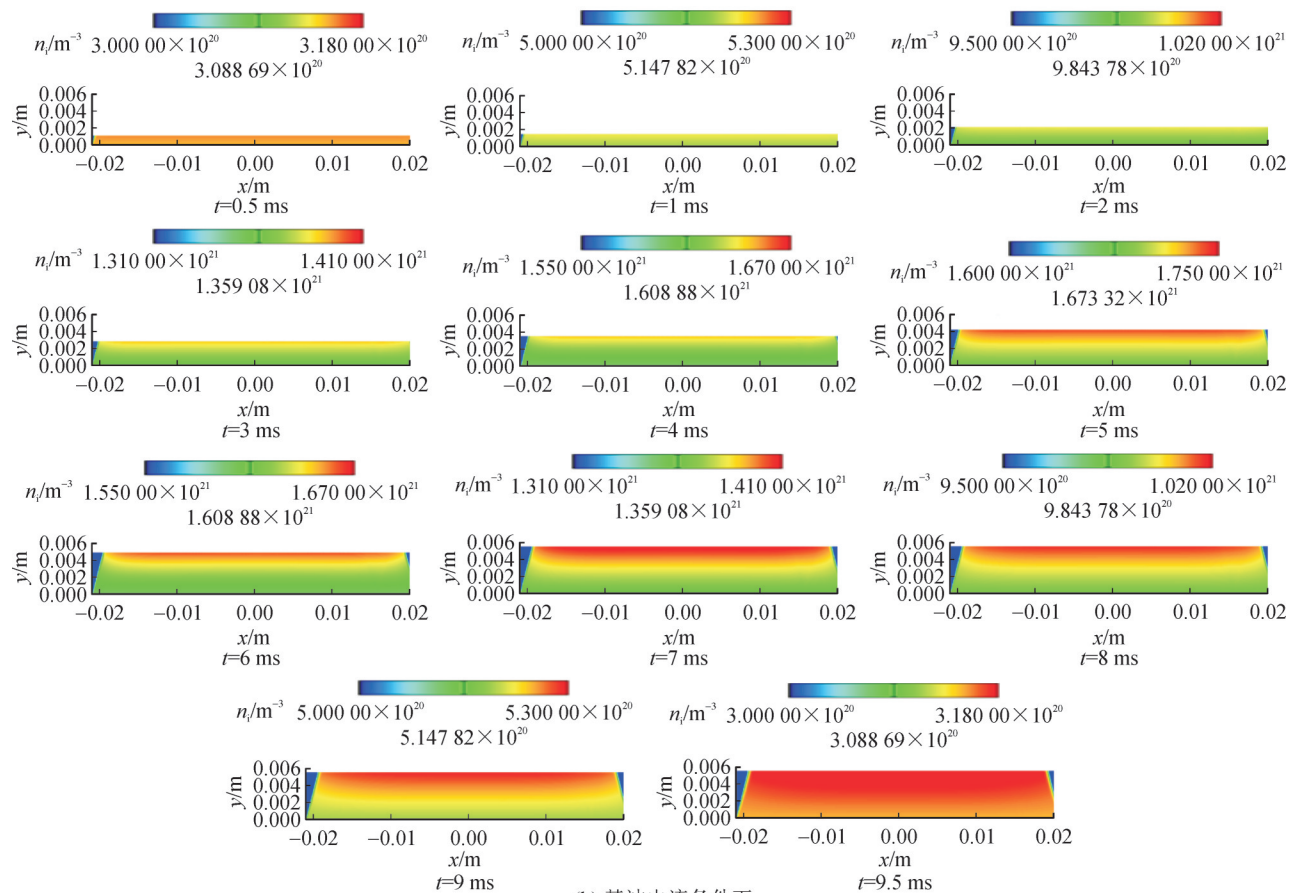
综合以上仿真结果, 总结如下:

1) 谐波电流条件下, 真空灭弧室电弧特性中的离子数密度相对基波条件下会更大, 将会影响真空灭弧室在下次开断前的介质恢复, 最终影响其开断性能。

2) 谐波电流条件下, 真空灭弧室电弧特性中的轴向电流密度会维持在较大值, 在 3 ~ 7 ms 的时间内电弧燃烧将更为剧烈, 会造成真空灭弧室触头烧蚀更加严重, 将对其寿命造成不利的影响。



(a) 含谐波分量的电流条件下



(b) 基波电流条件下

图8 离子数密度变化

Fig. 8 Changes in ion number density

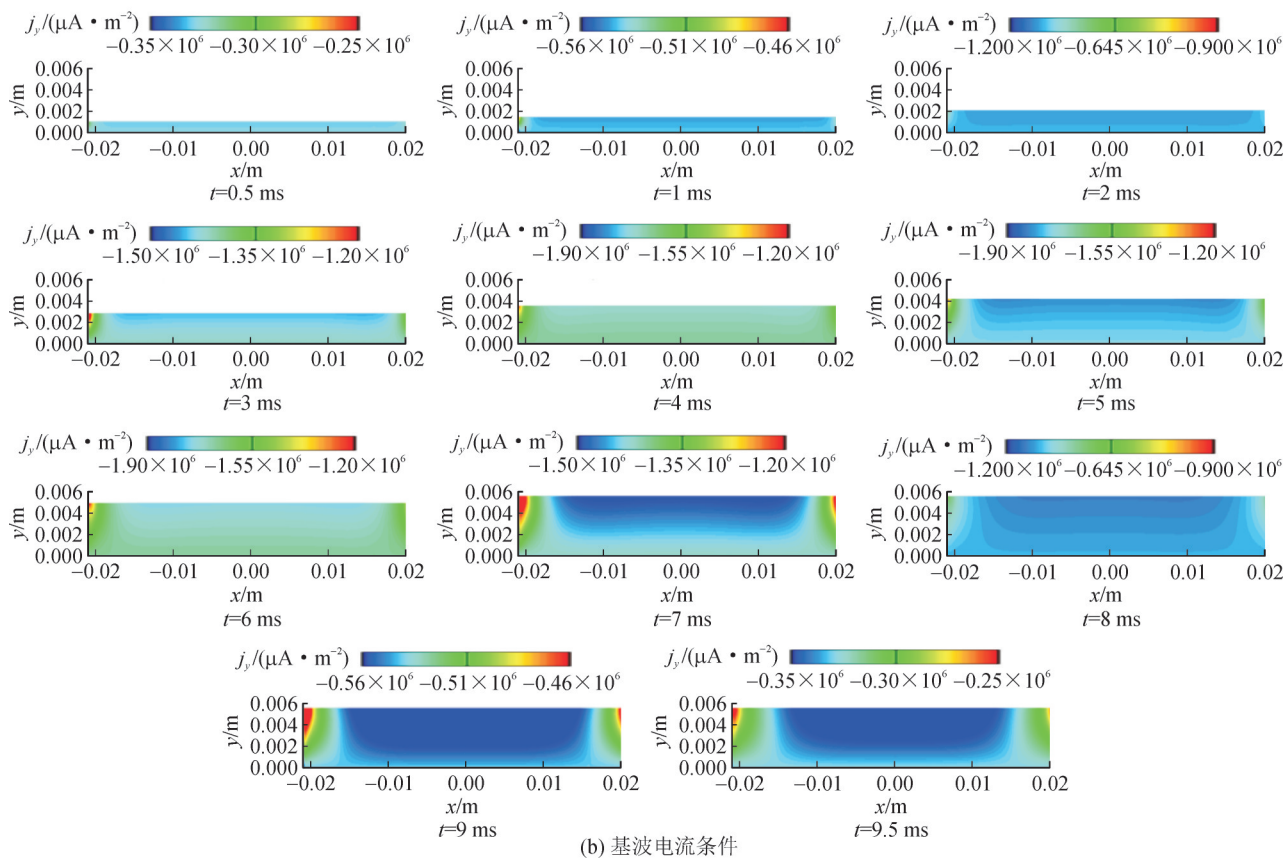
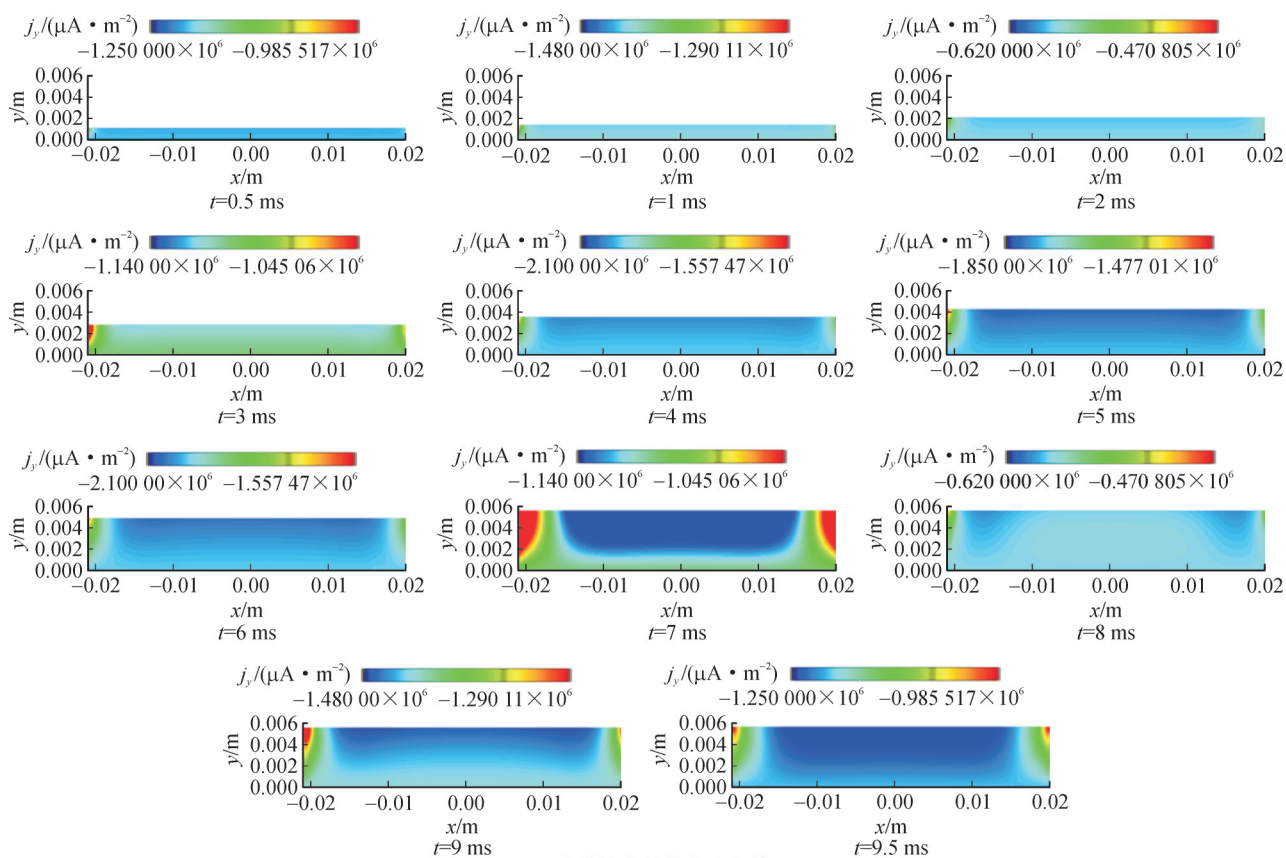
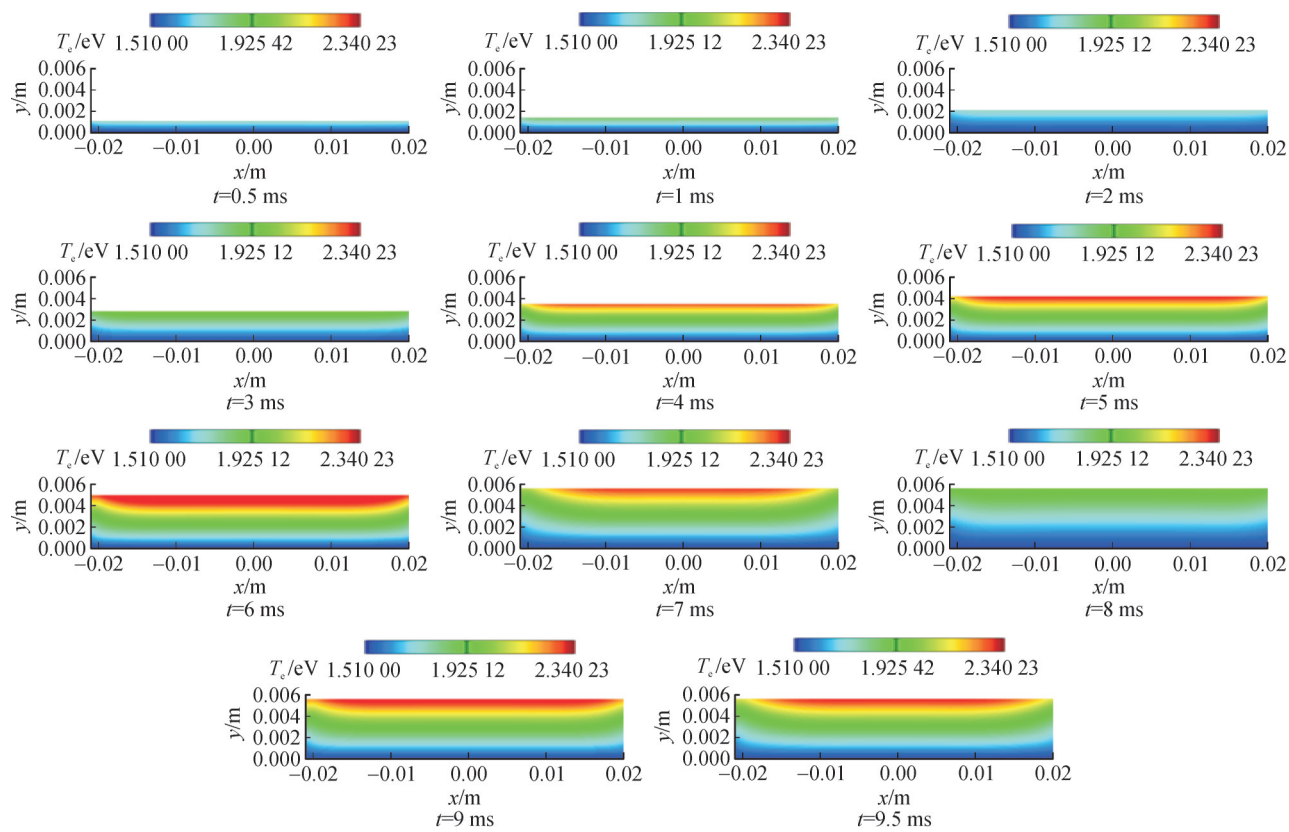
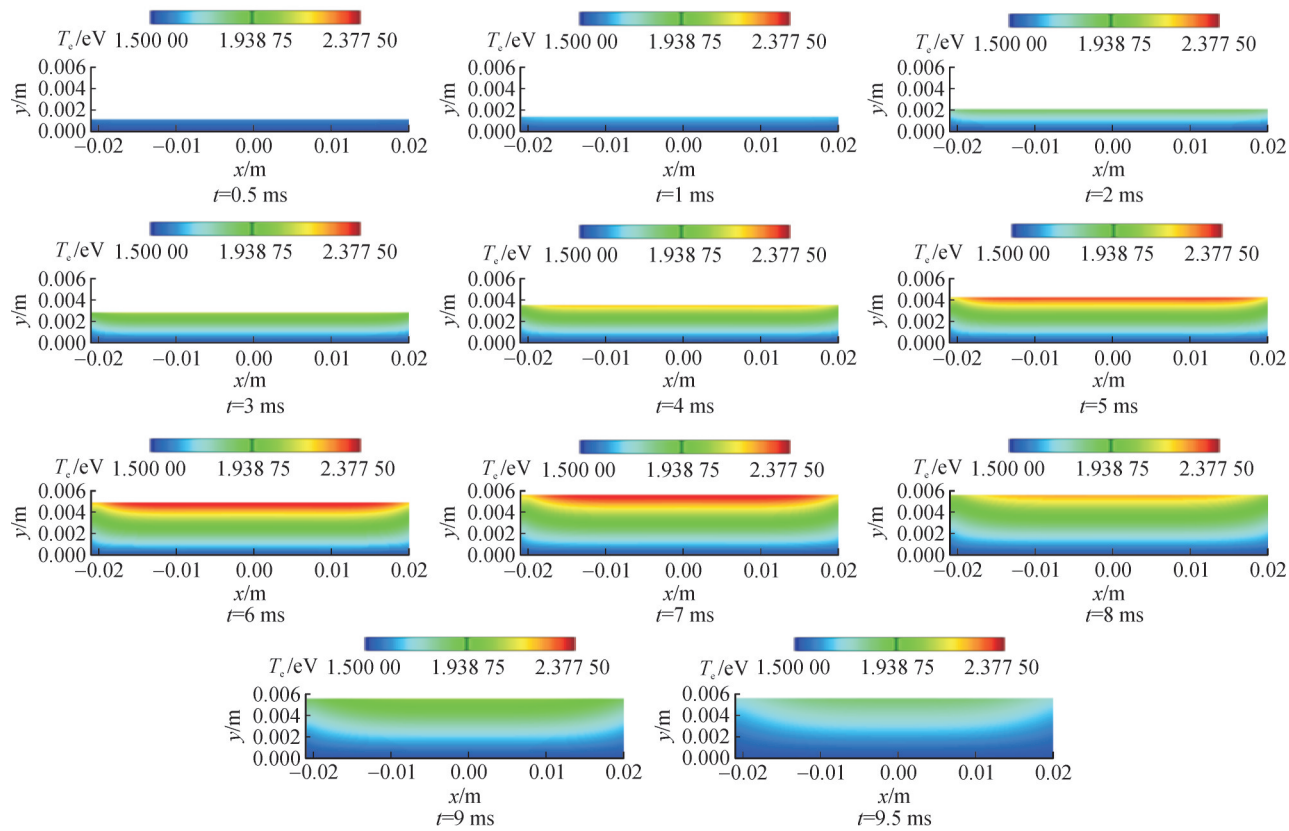


图9 轴向电流密度变化

Fig. 9 Changes in axial current density

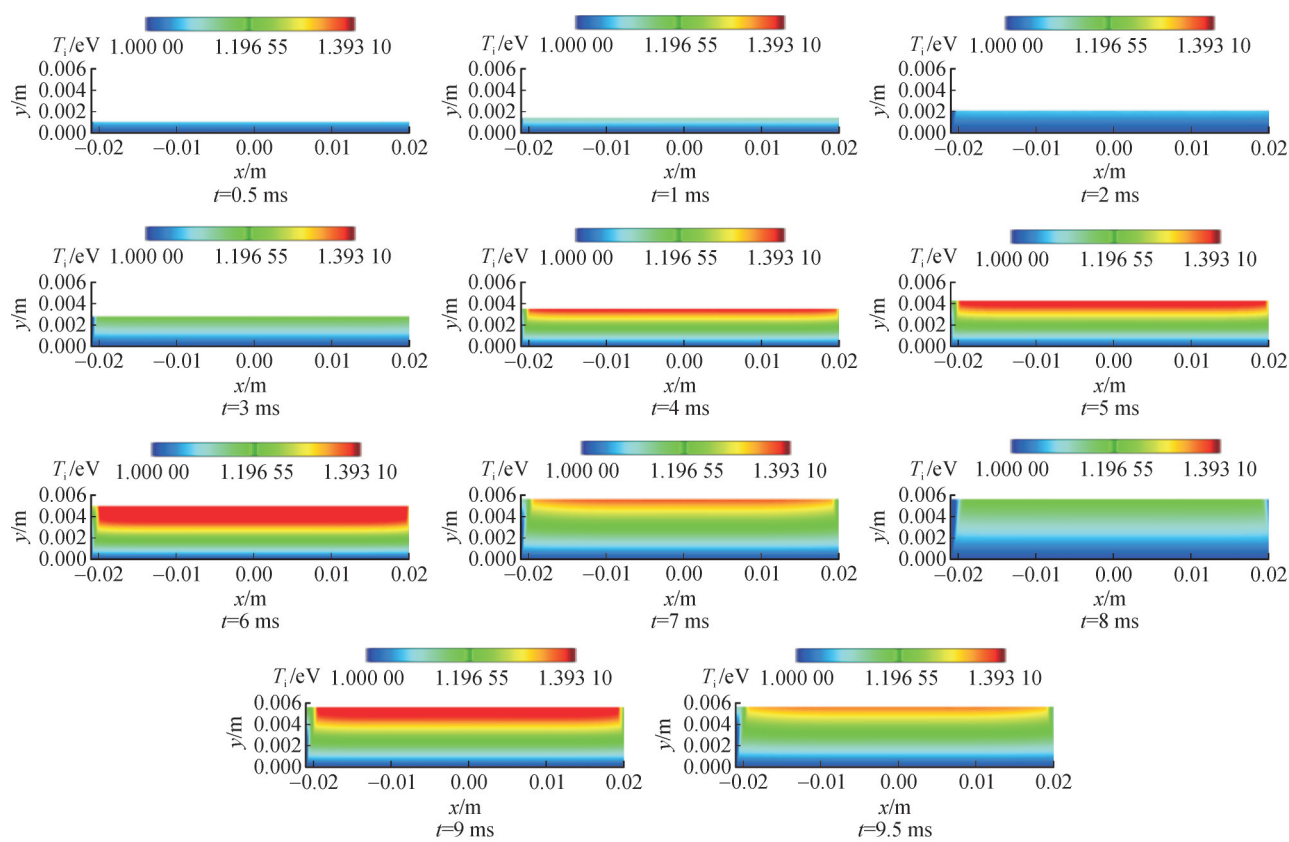


(a) 含谐波分量的电流条件下

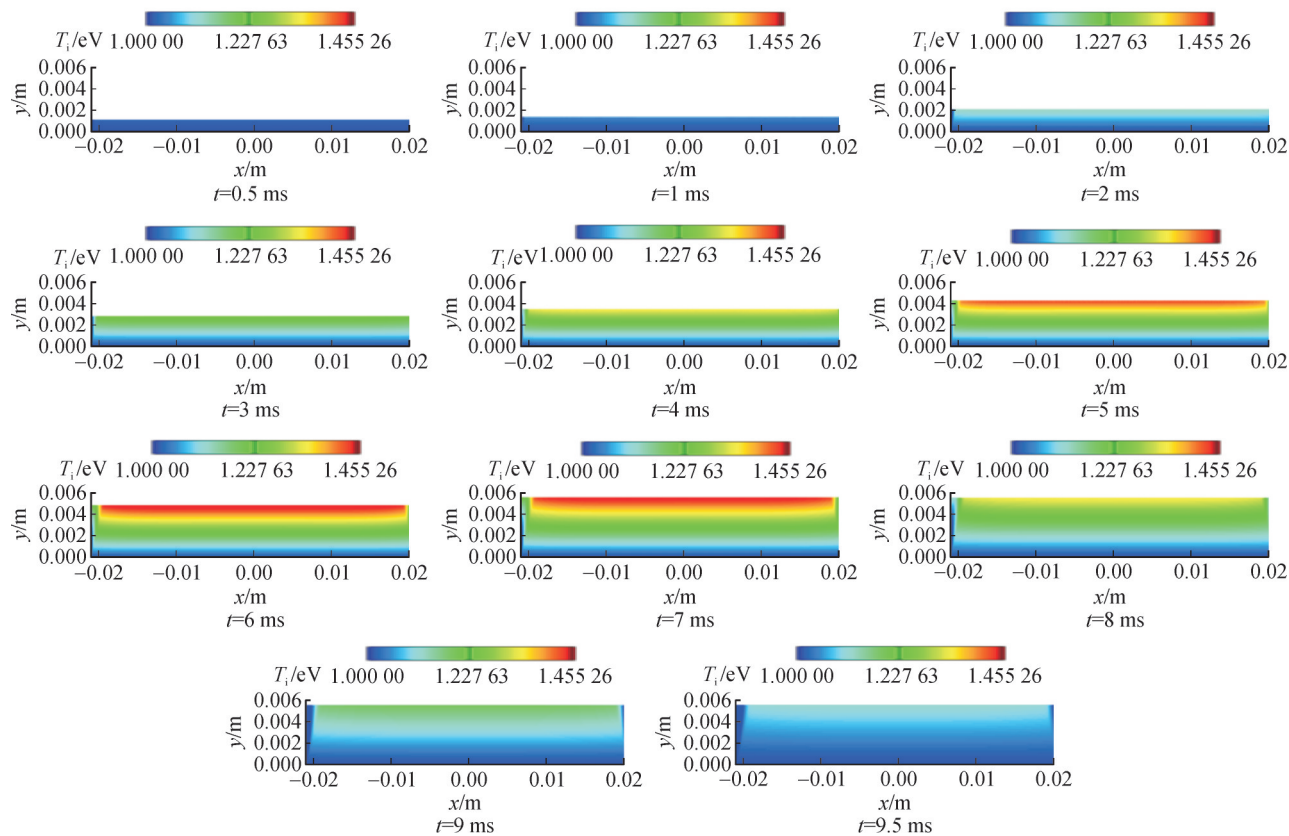


(b) 基波电流条件

图 10 轴向电子温度的变化
Fig. 10 Changes in axial electron temperature



(a) 含谐波分量的电流条件下



(b) 基波电流条件

图 11 轴向离子温度的变化
Fig. 11 Changes in axial ion temperature

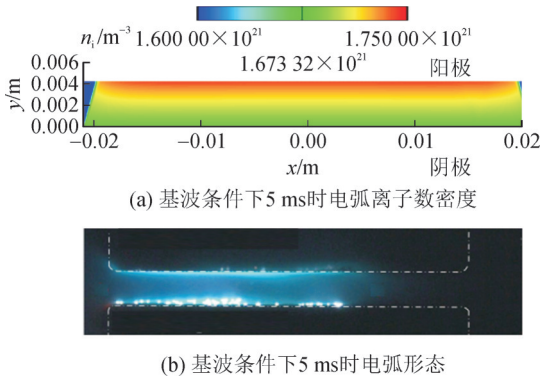


图 12 电弧离子数密度图像对比

Fig. 12 Comparison of arcing ion density images

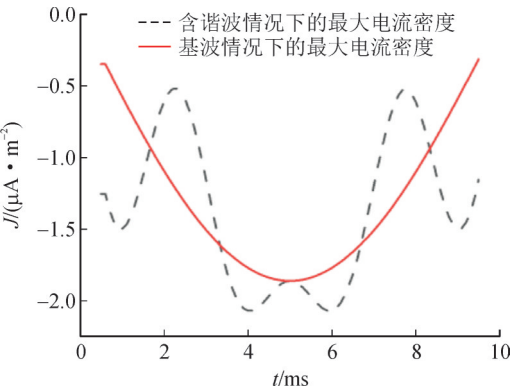


图 13 电弧随时间变化过程中电流密度最大值

Fig. 13 The maximum current density during the arcing variation with time

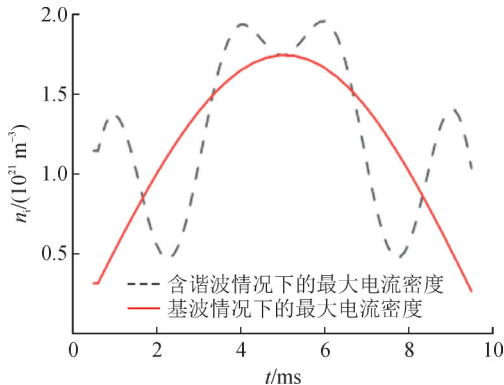


图 14 电弧随时间变化过程中离子数密度最大值

Fig. 14 The maximum ion density during the arcing variation with time

3)谐波电流条件下,真空灭弧室电弧特性中轴向电子温度在 9 ms 后更高,会接近其峰值,且将较长时间处在比较高的温度下,对真空灭弧室的开断性能将产生一定影响。

4)谐波电流条件下,真空灭弧室电弧特性中的轴向离子温度在 8 ms 后会更高,且此过程中离子数密度也增加。因此谐波电流条件下,将使得电弧在零点前的燃烧更为剧烈,将不利于真空灭弧室的正常开断。

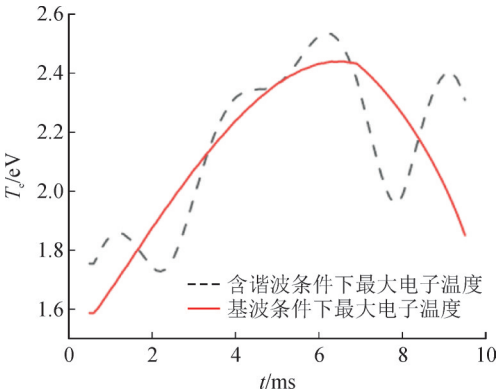


图 15 电弧随时间变化过程中电子温度最大值

Fig. 15 The maximum temperature of electron during the arcing variation with time

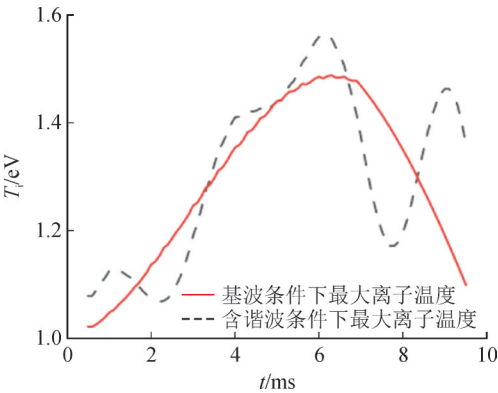


图 16 电弧随时间变化过程中离子温度最大值

Fig. 16 The maximum temperature of ion during the arcing variation with time

6 结论

文中根据直流输电系统中换流变压器的实际运行情况,并结合典型真空灭弧室的结构和参数,针对该类型真空灭弧室开展了相应的含谐波分量的电流条件下电弧特性仿真,建立了真空型有载分接开关真空灭弧室的电弧磁流体动力学模型,并对含谐波分量的负荷电流条件下的真空灭弧室的电弧特性进行了仿真分析。相比基波电流条件,主要获得了以下结论:

- 1)含谐波分量的切换电流条件下产生的更高初始电流上升率将导致初始阶段电流密度更高,将增加真空灭弧室开断的严酷度,甚至对开断能力产生不利影响。
- 2)含谐波分量的切换电流条件下在峰值附近更高的电流将导致真空灭弧室电弧燃烧更加剧烈,将对有载分接开关的电气寿命造成不利的影响。
- 3)含谐波分量的切换电流条件下电流零点前电弧更高的密度和更高的温度特性将不利于开断后的介质恢复,最终可能导致开断失败。

综上所述,文中基于仿真模型获得的仿真分析结论可以为真空型有载分接开关在含谐波分量的电流条件下研究其切换能力提供帮助。

参考文献:

- [1] 栾 兰,吕腾飞,姜良刚,等.基于TQWT及SVM算法的有载分接开关带电检测技术研究[J]. 变压器, 2024, 61(2):44-50.
Luan Lan, Lyu Tengfei, Jiang Lianggang, et al. Research on OLTC live detection technology based on TQWT and SVM algorithm[J]. Transformer, 2024, 61(2):44-50.
- [2] 张小平,石 为,阳瑞霖. 基于混沌特征的有载分接开关振动信号时域特征参数分析[J]. 电器与能效管理技术, 2025(12):40-48.
Zhang Xiaoping, Shi Wei, Yang Ruilin. Chaotic feature - based analysis of time - domain parameters for on - load tap changer vibration signals[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(12):40-48.
- [3] 鲁沛乐,严英杰,刘亚东,等.有载分接开关绝缘油中金属颗粒运动规律及其对介电性能的影响[J]. 南方电网技术, 2024, 18(5): 1-11.
Lu Peile, Yan Yingjie, Liu Yadong, et al. Movement law of metal particles in insulating oil of on-load tap-changer and its influence on dielectric properties[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5):1-11.
- [4] 陈 模,叶韩超,张翊堂,等. 配变用有载分接开关常见故障原因分析及产品可靠性提升措施[J]. 变压器, 2025, 62(8): 14-20.
Chen Mo, Ye Hanchao, Zhang Yitang, et al. Analysis of common causes of faults in on - load tap - changers for distribution transformers and measures to improve product reliability[J]. Transformer, 2025, 62(8):14-20.
- [5] 吴欣烨,胡 敏,宋人杰,等.高压输变电变压器真空有载分接开关的运维分析和检修策略[J]. 变压器, 2024, 61(9):60-64.
Wu Xinye, Hu Min, Song Renjie, et al. Operation maintenance condition analysis and overhaul strategy of transformer vacuum on-load tap-changer[J]. Transformer, 2024, 61(9):60-64.
- [6] 王绍武,李 鹏,李金忠,等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18):6893-6907.
Wang Shaowu, Li Peng, Li Jinzhong, et al. Overview of transformer vacuum-type on-load tap changers[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18):6893-6907.
- [7] 沈大中, Kraemer A, Dohnal D. 真空有载分接开关在高压直流换流变压器中的运用[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1):25-28.
Shen Dazhong, Kraemer A, Dohnal D. Application of vacuum on-load tap - changers in HVDC converter transformers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1):25-28.
- [8] 张蕙峰,李茂堂,巴秀秀,等. 换流变压器有载分接开关故障引发阀侧电流三相不平衡的诊断分析[J]. 变压器, 2025, 62(2): 66-71.
Zhang Huifeng, Li Maotang, Ba Xiuxiu, et al. Diagnosis and analysis on valve side three-phase current imbalance caused by on-load tap - changer fault of converter transformer[J]. Transformer, 2025, 62(2):66-71.
- [9] Shen D, Roeder K, Dohnal D, et al. Comparison of the overvoltages in on-load tap-changers with vacuum interrupters and overvoltages in circuit breakers[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Power Transmission & Distribution Technology, 2005:1-10.
- [10] 刘 栋,林文生,王 秘,等. 大电流核电高压厂用变压器有载分接开关用三相产品试验报告覆盖衍生产品问题探讨[J]. 变压器, 2025, 62(8):51-55.
Liu Dong, Lin Wensheng, Wang Mi, et al. Discussion on issue of covering derivative products base on test report of three - phase products for high current on-load tap-changer of transformers used in nuclear power plants [J]. Transformer, 2025, 62(8):51-55.
- [11] 张长虹,范广伟,邓 军,等. ± 800 kV 换流变压器用真空有载分接开关的谐波电流切换试验技术分析[J]. 高压电器, 2023, 59(5):62-67.
Zhang Changhong, Fan Guangwei, Deng Jun, et al. Technology analysis of harmonic current switching test of vacuum type on-load tap - changer for ± 800 kV converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5):62-67.
- [12] Kraemer A. On-load tap-changer for power transformers, operation, principles, applications and selection[M]. Germany: MR Publication, 2006.
- [13] 刘雪丽,李金忠,高 飞,等. ± 800 kV 换流变压器用真空有载分接开关关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5350-5356.
Liu Xueli, Li Jinzhong, Gao Fei, et al. Key technology research for vacuum type on - load tap - changer of ± 800 kV direct current convertor transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5350-5356.
- [14] 雷园园,赵林杰,彭在兴,等. 换流变压器有载分接开关切换过程仿真及选型技术[J]. 南方电网技术, 2018, 12(7):14-19.
Lei Yuanyuan, Zhao Linjie, Peng Zaixing, et al. Switching process simulation and type-selection technology of on-load tap changer of converter transformer[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7):14-19.
- [15] 阳少军,赵 杰,李文平. ± 800 kV 换流变压器型式试验中发现的若干问题分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1):49-52.
Yang Shaojun, Zhao Jie, Li Wenping. Analysis on the problems occurred in the type test of ± 800 kV converter transformer[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1):49-52.
- [16] 吴欣烨,胡 敏,宋人杰,等. 高压输变电变压器真空有载分接开关的运维分析和检修策略[J]. 变压器, 2024, 61(9):60-64.
Wu Xinye, Hu Min, Song Renjie, et al. Operation maintenance condition analysis and overhaul strategy of transformer vacuum on-load tap-changer[J]. Transformer, 2024, 61(9):60-64.
- [17] 张德明. 真空分接开关技术的论述(1)[J]. 变压器, 2011, 48(8): 54-56.
Zhang Deming. Discussion on the technology of vacuum tap changer(1)[J]. Transformer, 2011, 48(8):54-56.
- [18] 汪 洋,李书勇,宋述波,等. 真空有载分接开关在云广特高压直流的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(1):285-289.
Wang Yang, Li Shuyong, Song Shubo, et al. Application of vacuum on - load tap - changer to Yun - Guang UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1):285-289.

- Wu Xingtian, Zhou Peng, Liu Shaopeng, et al. Discussion on temperature rise control of medium-voltage switchgear based on temperature rise test[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 93-97.
- [10] Yao Yuan, Ouyang Xudong, Zeng Guowei, et al. Research on modularizing design of 10 kV switchgear with line outlet for live maintenance[J]. Energy Reports, 2021, 7(s1): 10-16.
- [11] 彭涛, 唐炳南, 赵莉华, 等. 中压开关柜典型接触故障下的温升特性研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4331-4340.
- Peng Tao, Tang Bingnan, Zhao Lihua, et al. Study on the temperature rise characteristics of medium-voltage switchgear under typical contact failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4331-4340.
- [12] 王增彬, 王睿, 姚聪伟, 等. 强制对流散热对开关柜温升影响规律的仿真研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1064-1074.
- Wang Zengbin, Wang Rui, Yao Congwei, et al. Simulation study on the influence of forced convection heat dissipation on temperature rise of switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1064-1074.
- [13] 王睿, 王立军, 马信友, 等. 大电流开关柜温升及其影响因素的建模仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 31-40.
- Wang Rui, Wang Lijun, Ma Xinyou, et al. Modeling and simulation study of temperature rise and related influence factors of high current switch cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 31-40.
- [14] 马信友, 王立军, 王睿, 等. 故障条件下中压开关柜温升特性的仿真研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2276-2282.
- Ma Xinyou, Wang Lijun, Wang Rui, et al. Simulation study of temperature rise characteristics of medium voltage switchgear under fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2276-2282.
- [15] Holm R. Electric contacts: theory and applications[M]. Berlin, Germany: Springer, 1967.
- [16] 任君鹏, 王栋, 杜志叶, 等. 强迫空气冷却高压开关柜三维气流—温升仿真分析[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 12-18.
- Ren Junpeng, Wang Dong, Du Zhiye, et al. Simulation analysis of 3-D airflow-temperature rise for high-voltage switchgear under forced air cooling[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 12-18.
- [17] GB/T 11022—2020 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S].
- GB/T 11022—2020 Common technical requirements for high voltage AC switchgear and control equipment standards[S].
- [18] 王睿. 基于多物理场耦合仿真的开关柜温升及潜伏性故障评估研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- Wang Rui. Research on temperature rise and latent fault evaluation of switchgear based on multiphysics coupled simulation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2020.
- [19] 李晓林. 基于电磁流体温度多物理场耦合的充气柜温升建模仿真研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- Li Xiaolin. Simulation study on temperature rise of inflatable cabinet based on electromagnetic fluid temperature multiphysics coupling[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018.
- [20] 王欣. 基于磁—热耦合的高压开关柜热分析及温升预测[D]. 南宁: 广西大学, 2021: 117-119.
- Wang Xin. Thermal analysis and temperature rise prediction of high-voltage switchgear based on magnetic-thermal coupling[D]. Nanning: Guangxi University, 2021: 117-119.
- [21] 杨次. 10 kV 移开式开关柜异常发热原因分析及整改措施[J]. 电工技术, 2020(5): 117-119.
- Yang Ci. Analysis of the causes of abnormal heat generation in 10 kV removable switchgear and rectification measures[J]. Electric Engineering, 2020(5): 117-119.
- [22] 马建鹏, 桑嘉荠, 张国梁. 手车断路器梅花触头部位发热原因与对策[J]. 电子技术, 2021, 50(3): 182-183.
- Ma Jianpeng, Sang Jiaji, Zhang Guoliang. Causes and countermeasures of heating in the contact parts of plum blossoms of handcart circuit breakers[J]. Electronic Technology, 2021, 50(3): 182-183.
- 王立军(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为开关电器电弧理论及其应用、电力设备数字化设计及智能运维、放电等离子体技术及其应用(通信作者)(E-mail: lijunwang@mail.xjtu.edu.cn).
- 吕文卿(2000—), 女, 硕士, 主要研究方向为电力设备仿真。
- (上接第 111 页)
- [19] 张德明. 真空分接开关技术的论述(7)[J]. 变压器, 2012, 49(2): 52-56.
- Zhang Deming. Discussion on the technology of vacuum tap changer(7)[J]. Transformer, 2012, 49(2): 52-56.
- [20] 张长虹, 范广伟, 邓军, 等. 换流变真空有载分接开关谐波电流切换试验技术的研究与分析[J]. 高压电器, 2025, 61(2): 26-34.
- Zhang Changhong, Fan Guangwei, Deng Jun, et al. Research and analysis on harmonic current switching test technology of vacuum type on-load tap-changer for converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(2): 26-34.
- [21] 王立军, 胡丽兰, 周鑫, 等. 大尺寸电极条件下大电流真空电弧特性的仿真[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 163-170.
- Wang Lijun, Hu Lilan, Zhou Xin, et al. Simulation of high-current vacuum arc characteristics with big-size electrode conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 163-170.
- [22] Wang L, Jia S, Zhou X, et al. Three-dimensional model and simulation of vacuum arcs under axial magnetic fields[J]. Physics of Plasmas, 2012, 19(1): 013507.
- [23] Kutzner J, Miller H C. Integrated ion flux emitted from the cathode spot region of a diffuse vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1992, 25(4): 686-693.
- [24] Shang Wenkai, Dullni E, Fink H, et al. Optical investigations of dynamic vacuum arc mode changes with different axial magnetic field contacts[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 923-928.
- [25] Kutzner J, Miller H C. Ion flux from the cathode region of a vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(5): 688-694.
- 张长虹(1983—), 男, 教授级高工, 高级技师, 从事高电压技术研究工作(通信作者)(E-mail: 183048839@qq.com)。