

真空灭弧室弧后介质特性仿真分析^{*}

尚文祥, 李继鹏, 赵筱赫

(河南工学院 电气工程与自动化学院, 河南 新乡 453003)

摘要:真空断路器在直流电路中应用广泛,但故障电流强迫过零后电弧的燃烧特性较为复杂,在考虑真空电弧等离子体中电子、离子以及铜蒸气分子之间相互作用的前提下,建立真空电弧等离子体流体-化学混合模型。仿真结果表明在相同过电压下,随着纵向磁场的增大,等离子体发展到局部稳定状态时电子逐渐向电极两侧扩散,电极中心线上电子密度依次减小,并且总区域内平均电子能也依次减小,在一定程度上降低了弧后重击穿的可能性。

关键词:真空开关;电流强迫过零;电弧仿真;弧后重击穿

中图分类号:TM561.2

文献标识码:A

文章编号:2096-7772(2023)04-0022-05

0 引言

随着直流输配电技术的快速发展,在点对点的直流输配电系统基础上构建更加经济、灵活和可靠的多端柔性直流电网是未来的必然趋势^[1]。柔性直流电网发生线路短路故障时,一般会使用直流断路器快速切除故障电流和隔离故障点^[2]。相比于混合式直流断路器,机械式直流断路器具有可靠性高、损耗小、成本低、占地面积小以及无需外置冷却设备等优点^[3-5],近年来在中高压柔性直流电网领域中推广较快。

由于直流电流没有自然过零点,直流断路器若要实现在2—3ms内开断直流故障电流,技术上面临一定的挑战。机械式直流断路器的工作原理为使用LC谐振支路在主开关支路上形成人工过零点。主开关支路通常选用真空断路器作为主开关。由于LC人工过零电流下降梯度非常大,在电流过零过程中会迅速产生过电压,此过程中真空间隙很难恢复其介质绝缘水平,以至于产生重击穿,导致电弧重燃,触头间隙继续通过电流^[6]。因此,为提高真空断路器的开断能力,对真空灭弧室内弧后介质恢复特性的研究及分析尤为重要。

本文以机械式直流断路器开断故障电流过程中真空开关纵磁触头打开且电流强迫过零后的状态为

研究对象,建立真空电弧等离子体流体-化学混合模型,模型中充分考虑真空电弧等离子体中电子、离子以及铜蒸气分子之间的相互作用,仿真电子与铜原子激发、电离及铜原子碰撞产生的化学反应,从微观角度分析真空开关电流强迫过零后,在过电压下真空触头间隙放电及等离子体的发展过程,并对弧后介质恢复特性进行参数上的对比分析。

1 真空开关电弧等离子模型

1.1 碰撞反应

气体放电过程中,各种带电粒子之间不断发生相互作用,等离子体中,中性粒子和电子的碰撞主要包括电离碰撞、激发碰撞、弹性碰撞和亚稳态碰撞;中性粒子和离子的碰撞主要是弹性碰撞和电荷交换碰撞。直流电弧生成过程中,阴极的二次电子发射是维持放电的必要条件。离子轰击触头表面是最基本的过程,期间会发生系列的基本作用:电子的发射、电离、中和、表面热效应及表面损伤等。离子进入触头表面后所产生的二次碰撞是研究离子与表面相互作用的重要基础^[7-9]。

经过上述分析,对真空铜触头间电弧放电的化学反应类型可定义为:

弹性碰撞:



^{*} 收稿日期:2023-06-15

基金项目:河南省科技攻关项目(222102220102)

第一作者简介:尚文祥(1991—),男,河南新乡人,助教,硕士,主要从事电器设计及智能化研究。

激发:



电离:



重物质反应:



电极表面反应:



1.2 数学模型

本文仿真采用基于气体动力学的漂移扩散方程、电磁场计算方程,并且充分考虑真空电弧放电过程中的电子、离子与金属蒸气分子及电极间的碰撞、重组及粒子的漂移、扩散等运动过程,建立如下数学模型^[10]。

电子密度方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} - \nabla \cdot [n_e(\mu_e \cdot E) + D_e \cdot \nabla n_e] \\ = R_e - (u \cdot \nabla)n_e \end{aligned} \quad (9)$$

式中, n_e 为电子密度, μ_e 为电子迁移率, E 为电场强度, D_e 为电子扩散系数, R_e 为电子源, u 为中性流体速度。

电子能量密度方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_\epsilon}{\partial t} - \nabla \cdot [n_\epsilon(\mu_\epsilon \cdot E) + D_\epsilon \cdot \nabla n_\epsilon] - \\ E \cdot [n_e(\mu_e \cdot E) + D_e \cdot \nabla n_e] = R_\epsilon - (u \cdot \nabla)n_\epsilon \end{aligned} \quad (10)$$

式中, n_ϵ 为电子能量密度, μ_ϵ 为电子能量迁移率, D_ϵ 为电子能量扩散系数, R_ϵ 为电子能量损耗。

触头间隙电场分布泊松方程:

$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \nabla U = \rho \quad (11)$$

式中, U 为电位, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, ρ 为空间电荷密度。

电磁场 Maxwell 方程:

$$\nabla \times H - \sigma(E + v \times B) = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (13)$$

式中, σ 为电导率, H 为磁场强度, B 为磁感应强度。

1.3 仿真模型

本文使用流体-化学混合模型对直流真空非平衡态电弧等离子体进行仿真。为了对以上描述的非

平衡态电弧等离子体进行建模,做出如下假设:

1)假定真空电弧模型为轴对称模型,所以模型可简化为二维模型。

2) $\lambda_D \ll d$,求解区域满足准中性条件, λ_D 为德拜长度, d 为电极间距。

3)计算域内等离子体参数满足以下近似, $l_e \ll d$,因此可以用流体理论来近似电弧放电, l_e 为电子平均自由程。

4)电弧区弱电离,极间等离子体区包含电子、离子和中性粒子的存在。

真空开关电弧物理几何模型的网格剖分如图1所示。由于真空触头间隙为轴对称结构,所以本文采用轴对称模型对电弧等离子体进行仿真。触头模型的参数设定为:触头半径20mm,触头间隙3.5mm,仿真时各反应都发生在该区域内;设上边界为阳极,阳极过电压为15kV,设下边界为阴极,阴极接地为0V,触头间隙内初始温度为3000K,初始压强为0.5 Torr,初始电子密度为 10^{13} 1/m^3 ,初始平均电子能为4eV。

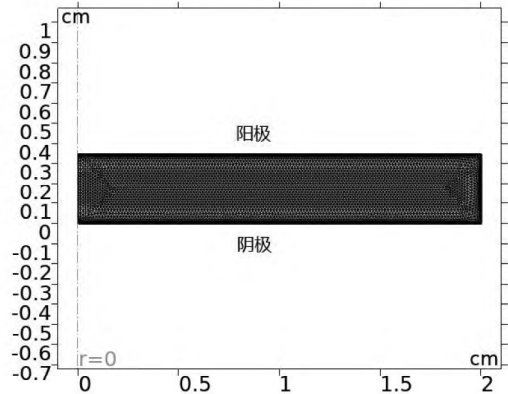


图1 仿真几何模型的剖分图

2 真空电弧等离子体仿真结果分析

2.1 真空开关电弧放电过程分析

真空金属蒸汽迅速蒸发是真空电弧引燃的开始,随着电弧的发展,金属蒸汽不断被电离,形成导电通道并维持电弧燃烧。本节对直流真空电弧金属蒸汽电离初期的发展进程进行研究。电弧放电初期时间相对较短,设定仿真时间为0.0001s。

图2为电弧等离子体发展过程中的电子数密度,可以看出随着时间的变化电子数密度逐渐增大,并在 $t=0.0001\text{s}$ 时达到最大值。这是由于在触头打开的瞬间,由于强电场的作用导致电子加速迁移,电子运动速度瞬间增大,并且伴随阴极触头表面发

射出大量电子,这些快速移动的电子与触头间隙气化的金属铜蒸汽之间发生强烈碰撞,电离反应产生大量电子并形成电子崩,电子崩首先在阳极形成,并导致阳极附近的电子数密度很大,随着时间的发展,电子崩由阳极逐渐发展到触头间隙中。

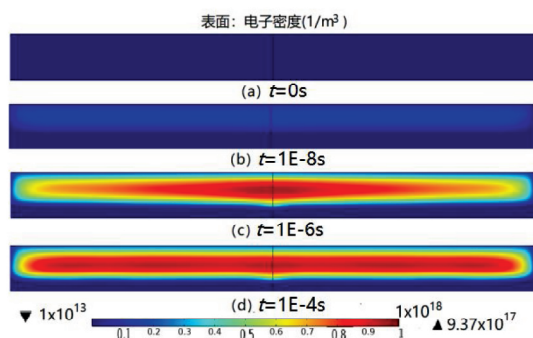


图 2 真空电弧等离子体发展初期电子密度变化云图

图 3 为电弧等离子体发展到稳定状态下的正离子数密度,由图可知中间区域的正离子发展趋势与电子数密度一致。图 4 为正离子数密度与电子数密度之差,可以看出,除了阳极表面,大部分区域内正离子数密度都大于电子数密度,这是由于电子崩的头部聚集着大量的电子,且电子的运动速度较快,大量的电子快速到达阳极,而正离子向阴极的运动速度较慢并长时间停留在空间区域。图 5 为空间电场分布图,可以看出阴极附近电场方向为负,这是由于此时正电荷形成的空间电场与初始电场方向恰恰相反,使得靠近阴极的电场方向发生了反转,该反转电场区域称为阴极鞘层,在宏观局部热力学平衡电弧中,阴极鞘层有着较大的压降,该电场阻碍电子向阳极加速。随着电离过程的发展,电子的密度逐渐减小,正离子的密度增加并逐渐超过电子的密度,靠近阳极的空间内电子与正离子相互共存,逐渐向电弧等离子体的稳态进行发展。由图 2(d)、图 3 和图 4 对比可以看出,阳极与阴极鞘层之间区域内电子数和正离子数密度很大且几乎对等,该区域内电子与正离子数达到了一种局部的动态平衡。

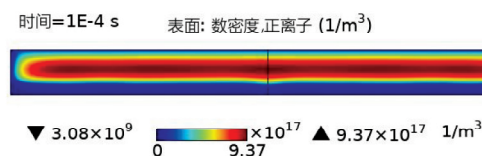


图 3 电弧等离子体发展到稳定状态下的正离子数密度

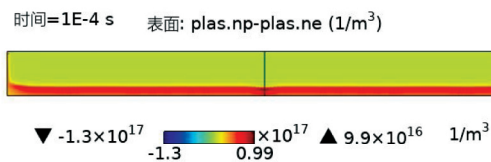


图 4 正离子数密度与电子数密度之差

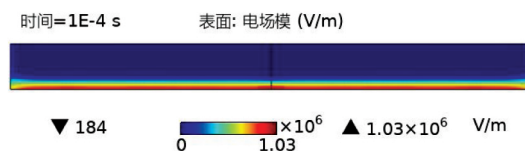


图 5 空间电场分布图

2.2 不同纵向磁场对真空电弧等离子体发展后期特性的影响分析

通过在真空触头间隙施加纵向磁场,有利于改善电弧特性,提高灭弧室的熄弧能力。根据以往的宏观试验数据分析可知,纵向磁场可以使灭弧室内电弧等离子体的形态由集聚型转变为扩散型,并且在纵向磁场作用下电弧电压较低,使得电弧能量降低,若第一个电流过零点未发生重击穿,则在第二个过零点时电弧将更易于熄灭。

采用上述模型,并在仿真时施加不同的纵向磁场,磁场方向由阳极指向阴极,磁场大小分别为 0T、0.03T、0.06T、0.25T 和 0.5T,仿真得到 $t = 0.0001s$ 时刻的电子数密度如图 6 所示。对比发现,随着纵向磁场的增大,当电弧等离子体发展到局部稳定状态时,电子逐渐向电极两侧扩散,电极中心线附近的电子密度逐渐减小。

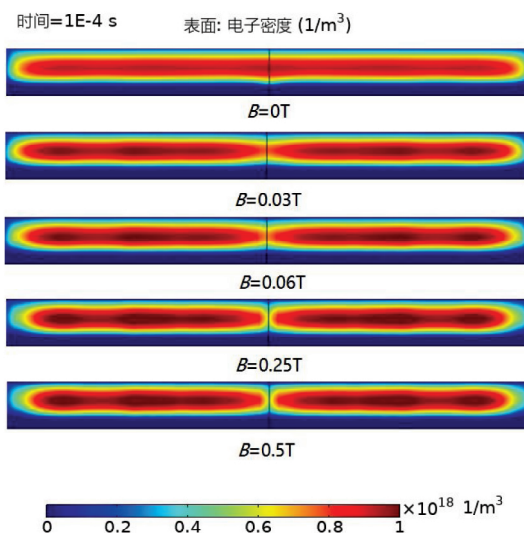


图 6 不同纵向磁场下分布图的电子数密度

图 7 为阴极鞘层中心线区域内的反向电场分布曲线,其中蓝色曲线是磁场为 0T 时的反向电场曲线,

绿色线是磁场为 0.03T 时的反向电场曲线。可以看出在阴极鞘层区域内,随着纵向磁场的加入,反向电场在相同区域内减小,并导致该区域内电场发射的电子相应减少,所以阴极鞘层区域内电子密度也相应地随着磁场的加入而减小,由于该区域内的电子密度减小,所以迁移到阳极附近的电子数也相应减少。

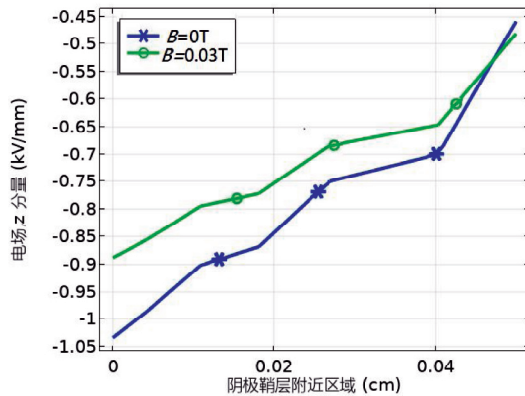


图7 阴极鞘层中心线区域内的反向电场分布曲线

电极中心直线上的电子密度如图8所示。可以看出,不同磁场下的电子密度变化趋势基本相同,都是由阴极到阳极先增大后减小,阴极鞘层区的电子密度最小,近阳极区电子密度达到最大。由不同磁场下的电子密度曲线可知,随着纵向磁场逐渐增大,电极中心位置电子密度依次减小。通过该微观仿真可以看出,电弧等离子体在纵向磁场的作用下是向周围扩散的,这与电弧试验结果具有良好的一致性,表明在一定的纵向磁场作用下,电弧会由集聚型转变为扩散型,这有利于电弧能量的稀释并减少积聚能量对电极的烧蚀。

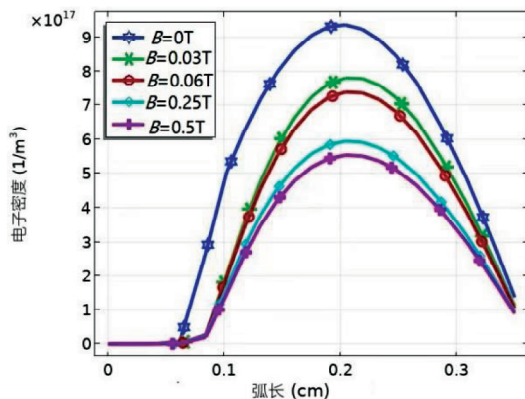


图8 不同纵磁场下电极中心直线上的电子密度曲线

图9是纵向磁场为 0T 和 0.03T 时的平均电子能云图,可以看出,当磁场为 0T 时,平均电子能的最大值为 152eV ,最小值为 4.22eV ;当磁场为

0.03T 时,平均电子能的最大值为 141eV ,最小值为 4.09eV ,平均值减小是因为在纵向磁场的作用下电子的运动轨迹发生了一定的变化,在一定程度上减小了电子的能量,降低了电子的运动速度,使其对金属蒸汽不能产生有效碰撞,进而减少了电离电子的生成。电子能量减小在另一方面也可以有效减小电弧能量,更有利于电弧的熄灭。

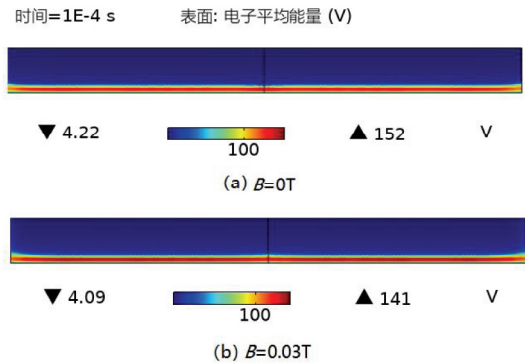


图9 不同纵磁场作用下的平均电子能

3 结论

本文从微观角度分析了真空断路器弧后燃弧特性,通过对真空电弧等离子体仿真,研究了电弧等离子体发展的动态过程。在真空触头间隙添加纵向磁场,可以有效改变真空电弧等离子体形成前期和后期的发展特性,纵向磁场有利于电流过零后电子和正离子的扩散,并且使得阴极鞘层反向电场降低,进而减小电子密度。纵向磁场的施加也有利于平均电子能降低,从而降低电弧等离子体中电子和离子运动的能力,可以有效降低电流过零后重击穿的可能性。

(责任编辑 王 磊)

参考文献:

- [1] 张祖安,黎小林,陈名,等. 160kV 超快速机械式高压直流断路器的研制[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2331-2338.
- [2] 郭彦勋. 柔性高压直流电网故障分析与故障清除技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [3] 周万迪,郭亮,魏晓光,等. 混合式直流断路器合成开断试验方法及等效研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5233-5242.
- [4] 阮绵晖,陈建福,刘博,等. 一种 10kV 机械式高压直流断路器的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 260-266.
- [5] 李黎,程勇,俞斌,等. 一种适于快速高压直流断路器的过零振荡电路[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3118-3125.
- [6] 邹振球. 高压并联电容器投切开关重击穿抑制技术[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(2): 161-164.
- [7] 翟国富,薄凯,李庆楠,等. 直流电弧运动过程中重击穿现象及

- 机理研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 105-113.
- [8] 李 静, 杨光, 曹云东, 等. 低压断路器触头电弧非平衡态燃弧过程分析[J]. 电器与能效管理技术, 2016, (15): 7-12.
- [9] 刘春园. 磁场对真空电弧等离子体特性的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [10] 李静, 杜志鹏, 曹云东, 等. 纵向磁场对真空电弧微观特性影响的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 63-69.

Simulation and Analysis of Dielectric Characteristics after Arc in Vacuum Interrupter

SHANG Wenxiang, LI Jipeng, ZHAO Xiaohe

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Vacuum circuit breakers are widely used in DC circuits, however, the combustion characteristics of the arc after the fault current forcing over zero are more complicated. A fluid-chemical hybrid model of the vacuum arc plasma is established by considering the interaction among electrons, ions, and copper vapor molecules in the vacuum arc plasma. The simulation results show that under the same overvoltage, with the increase of the longitudinal magnetic field, electrons gradually diffuse towards both sides of the electrode when the plasma develops to a locally stable state, and the electron density in the center line of the electrode decreases successively, which reduces the possibility of secondary breakdown after arc to some extent.

Key words: vacuum switch; current forced zero crossing; arc simulation; back-arc heavy breakdown

(上接第 6 页)

Research on Electrochemical Manufacturing Technology of Terahertz Metal Rectangular Waveguide Concave Microcavity

BI Xiaolei^{1,2,3}, CHENG Xueli^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Xinxiang Additive Manufacturing Engineering Technology Research Center, Xinxiang 453003, China;

3. Henan Province Mechanical and Electrical Equipment Digital Design and Manufacturing
Engineering Technology Research Center, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The requirements of terahertz metal rectangular waveguides with a high-working-frequency have become increasingly urgent with the rapid development of terahertz technology. However, the precision fabrication of high-working-frequency terahertz metal hollow-core rectangular waveguides is difficult due to its cavity characteristics of small end face size and edge radius, strict surface roughness. In this paper, the precision fabrication of terahertz metal rectangular waveguide concave microcavity was studied, wire electrochemical micromachining, gold electrochemical deposition, and copper electrochemical deposition were combined. A terahertz metal hollow-core rectangular waveguide concave microcavity with end face size of $124.3 \mu\text{m} \times 253.2 \mu\text{m}$, edge radius less than $8 \mu\text{m}$ and internal surface roughness less than $0.1 \mu\text{m}$ were obtained, which provides the basis for the combined fabrication of terahertz metal hollow-core rectangular waveguide.

Key word: terahertz metal hollow-core rectangular waveguide; wire electrochemical micromachining; gold electrochemical deposition; copper electrochemical deposition