

电流频率对真空断路器开断能力影响的仿真分析

丁 璨^{1,2}, 李凯明¹, 袁 召³, 陈立学³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002;
3. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 随着风电等新能源以及直流电网的发展, 断路器开断电流的频率呈现出多样化, 要求断路器可以开断高于或者低于50 Hz的电流。针对此问题, 文中试图从燃弧过程、磁场调控以及弧后过程3个方面去研究电流频率对真空断路器开断能力的影响。文中首先研究了不同频率下的电弧微观参数分布, 发现随着频率的增加, 电弧形态越呈现出集聚的现象, 触头呈现出局部烧蚀严重的现象, 但是由于燃弧时间变短, 触头总的烧蚀变小。频率越低, 燃弧时间越长, 触头则呈现出严重的烧蚀。然后研究了不同频率下常用杯状纵磁触头的磁场分布, 发现随着频率的增加, 磁场分布越不均匀, 对电弧等离子体的扩散作用变小, 并且由于燃弧时间的缩短, 等离子体更不易扩散。最后通过频率对弧后鞘层生长过程的影响分析发现, 频率越大, 弧后鞘层生长到满开距越慢, 从而降低开断能力。文中得出: 低频下的断路器触头整体烧蚀严重, 电弧熄弧的时候将产生大量的金属蒸气, 金属蒸气的衰减过程将主导断路器的弧后绝缘恢复过程, 而高频下的断路器的弧后绝缘恢复过程则由鞘层生长过程主导。

关键词: 电流频率; 真空电弧; 触头烧蚀; 磁场分布; 弧后过程

Simulation Analysis on Influence of Current Frequency on Breaking Capacity of Vacuum Circuit Breaker

DING Can^{1,2}, LI Kaiming¹, YUAN Zhao³, CHEN Lixue³

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;
2. Hubei Transmission Line Engineering Technology Research Center, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of such new energy as wind power as well as DC power grid, the frequency of the breaking current of circuit breaker is diversified, which requires the circuit breaker can break the current higher or lower than 50 Hz. For this problem, the influence of current frequency on the breaking capacity of vacuum circuit breaker is studied from such three aspects as arcing process, magnetic field regulation and post-arc process in this paper. Firstly, the distribution of arc micro parameters at different frequencies is studied. It is found that with the increase of frequency, the arc configuration presents the phenomenon of agglomeration, and the contact presents the phenomenon of serious local ablation. However, the total ablation of the contact becomes smaller due to the shorter arcing time. The lower the frequency, the longer the arcing time, and the contacts show serious ablation. Then, the magnetic field distribution of cup-shaped longitudinal magnetic contacts under different frequencies is studied. It is found that with the increase of frequency, the more uneven the magnetic field distribution is, the less the diffusion effect on the arc plasma becomes, and the plasma is more difficult to diffuse due to the shortening of arcing time. Finally, it is found through the analysis of the influence of frequency on the growth process of back arc sheath that the

收稿日期: 2024-05-05; 修回日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(52177143)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52177143).

greater the frequency, the slower the back arc sheath grows to the full opening distance, thus reducing the breaking capacity. It is concluded that the contact of the circuit breaker under low frequency is seriously ablated as a whole, and a large amount of metal vapor will be generated when the arc is extinguished. The attenuation process of metal vapor will dominate the post arc insulation recovery process of the circuit breaker, while the post arc insulation recovery process of the circuit breaker under high frequency is dominated by the sheath growth process.

Key words: current frequency; vacuum arc; contact ablation; magnetic field distribution; post-arc process

0 引言

随着水力发电、风力发电等其他新能源的快速发展,分频(或者低频)输电以其独特的优势得到了广泛的应用^[1],分频输电是在输电时降低输电频率,频率由 50 Hz 降为 50/3、50/2.5、50/2 Hz,而断路器作为保障系统安全可靠的重要元件,要求断路器能分断频率低于 50 Hz 的电流。在另一种场景中,断路器又被要求要开断高于 50 Hz 的电流,例如直流输电系统中的直流断路器,由于直流没有像交流一样的自然过零点,所以直流断路器通常使用在直流电流上叠加中高频电流分量实现人为过零点从而分断电流,此时流过断路器的电流频率远远高于 50 Hz。随着直流输电和分频输电的发展,这种断路器要开断不同电流频率的场景会越来越多。

在国内外对真空断路器的研究中大部分都是围绕开断产生的电弧以及弧后介质的恢复过程展开。一些文献通过搭建实验从宏观和微观上分析电弧形态特征和电弧等离子体特征及其他电弧参数特性^[2-4],测量弧后介质恢复状态并对弧后介质恢复过程做进一步的研究^[5-7]。还有一些文献详细研究弧后介质恢复的每个阶段,分析离子鞘层的生长过程,建立弧后的连续过渡模型^[8],研究金属蒸气从初始密度到临界密度的衰减过程^[9-10],有的则研究了真空弧后电流的测量方法^[6]。

根据现有文献的成果,真空断路器的开断能力与电极材料的侵蚀率、触头间磁场强度、燃弧能量以及与燃弧时间有关系,并得出侵蚀率越高开断能力越差,燃弧能量越大鞘层发展越慢^[11],此外阴极斑点的分布、电流的幅值和频率及轴向磁场对真空断路器开断能力有影响^[12],不同触头材料的真空断路器分断能力也不同^[13]。

综上所述,频率对断路器开断能力的影响作用还不清晰。针对此问题,文中试图从电弧燃弧过程、磁场的调控作用以及弧后过程来分析频率对真空断路器开断能力的影响。

1 频率对燃弧过程的影响分析

1.1 频率对真空电弧微观参数分布的影响分析

文中采用瞬态双温度磁流体模型对不同频率的真空电弧进行仿真计算。瞬态双温度磁流体模型需要建立求解非线性偏微分方程组,很多文献进行了详细阐述^[14-16],在此不再赘述。

采用 Ansys fluent 软件,使用 UDF 自编程瞬态双温度磁流体模型的偏微分方程组并使用 simple 二阶迎风格式求解器进行求解。当开距为 10 mm,触头半径为 30 mm,电弧电流为 10 kA 时,电流峰值时刻的不同频率下的离子密度分布见图 1,以 20、50、1 000 Hz 为例。

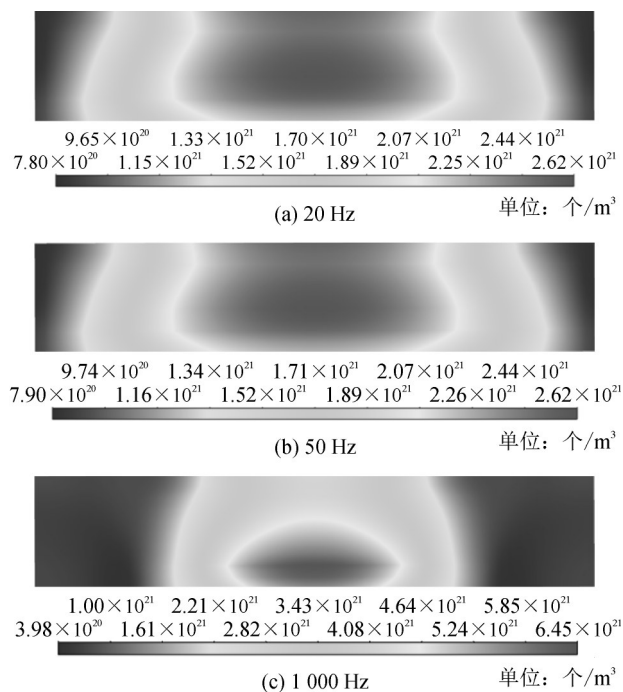


图1 电弧等离子体离子密度分布

Fig. 1 Arc plasma ion density distribution

从图1中可以看出,在频率较低的时候,20 Hz 与 50 Hz 的电弧离子密度分布区别较小,但是随着频率增加到 1 000 Hz,电弧呈现出集聚的形态,电弧等离子体更不容易扩散。中高频下的电弧等离子体的计算及其分布已有文[16]分析,文中的计算结果与其基本一致。

1.2 频率对触头烧蚀的影响分析

对于触头烧蚀的熔池仿真与模拟,有较多文献进行了研究^[17-19]。文中采用了流体力学和传热学的基本方程组进行了触头熔池计算,计算方法在文献中多有阐述,在此不再赘述。文中采用Comsol 仿真软件,使用热场和流体场模块进行耦合计算。当电流为10 kA,电弧电压为20 V,触头半径为30 mm,热量分布为高斯分布时,不同频率下经过1/4周期时间的触头熔池温度(单位:K)见图2,以20、50、1 000 Hz为例。

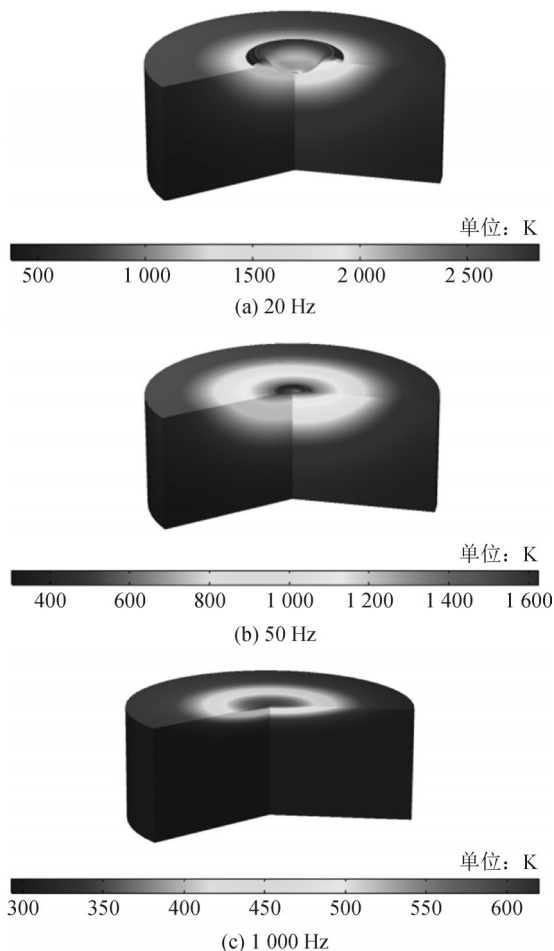


图2 触头熔池温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of contact molten pool

从图2中可以看出,文中的仿真结果与文[19]的仿真结果趋势是一致的。随着频率的增加,熔池坑越小,说明触头烧蚀量越小。这是由于频率越大,电流过零前的燃弧时间缩短,输入触头的电弧能量变小,喷溅出去的质量也小,触头的平均烧蚀程度会降低。

2 频率对触头磁场分布的影响分析

在工频下通常使用杯状纵磁触头,当电流通过的时候,触头产生纵向磁场,使电弧等离子体发生扩散,避免电弧的集聚,从而增大开断能力。但是,

在工频适用的触头在宽频率范围内是不是同样适用还需要进行分析。文中本节采用Comsol 软件的电磁场计算模块,基于麦克斯韦方程组计算了10 kA 电流峰值时刻不同频率下的杯状纵磁触头的磁场(单位:mT)分布,开距为10 mm,触头半径为30 mm,以20、50、1 000 Hz为例,见图3。

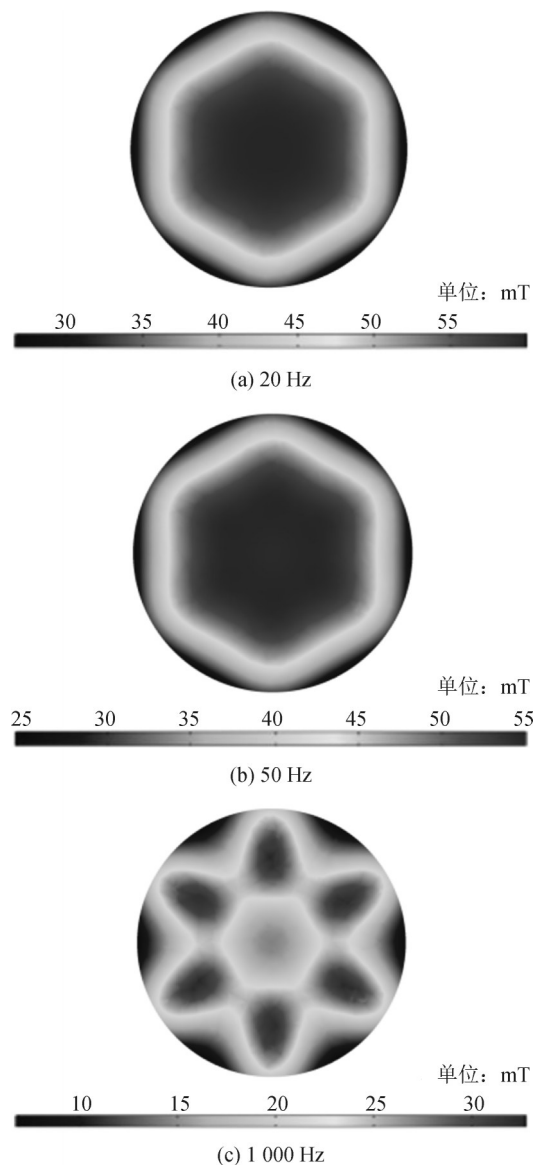


图3 不同频率磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution at different frequencies

从图3中可以看出,随着频率的增加,磁场分布越不均匀,在较低的频率下,磁场分布呈现出正六边形,能够覆盖触头的大部分区域,随着频率的增加,中心区域的磁场逐渐降低,六边形逐渐变为六角形,大大缩小了磁场分布的面积。磁场的最大值也随着频率上升,约从6 mT/kA降低到了3 mT/kA。因此,随着频率的增加,磁场对电弧等离子体的扩散作用将变小,从而降低断路器的开断能力。文中的仿真结果与文[20]的磁场分布结果是一致的。

3 频率对弧后过程的影响分析

3.1 频率对弧后鞘层发展过程的影响分析

对弧后鞘层发展阶段的研究大多采用的是 Andrews 和 Varey 提出的连续过渡模型即 CTM 模型, 该模型的提出基于电流连续性方程、动量守恒方程以及泊松方程等。CTM 模型的数学表达式及计算方法在文献中多有阐述^[8-9, 11, 21], 在此不再赘述。由此即可得出弧后鞘层发展过程中的参数变化。重击穿判据为: 新阴极表面电场强度、新阴极表面功率密度大于设定的临界值, 以此判断真空断路器开断能力。

通过改变 di/dt 的数值以此来反映电流频率的变化。为了使不同频率下的鞘层生长时间长一些, 以开距为 13 mm 为例, 触头直径为 60 mm, 电流过零前电弧等离子体分布的直径设为 42.15 mm, 分别计算 20~1 000 Hz 的鞘层生长过程。不同频率下鞘层长度、新阴极表面电场强度和新阴极表面功率密度随时间变化规律见图 4~6。

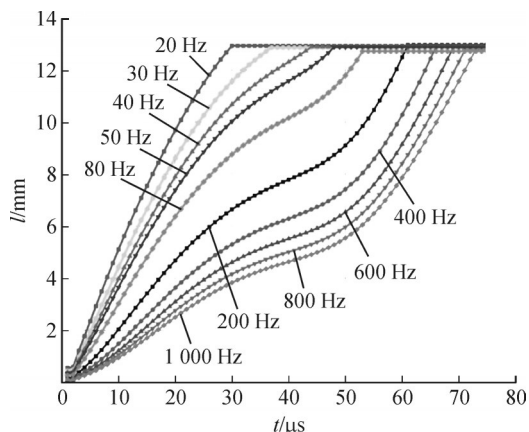


图 4 不同电流频率下鞘层长度变化

Fig. 4 Changes of sheath length under different current frequencies

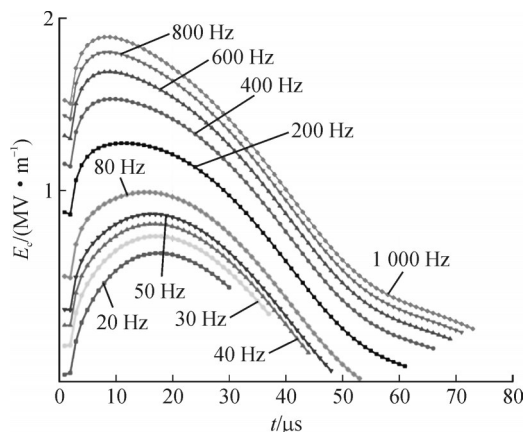


图 5 不同电流频率下新阴极表面电场强度变化

Fig. 5 Variation of electric field intensity on the surface of new cathode under different current frequencies

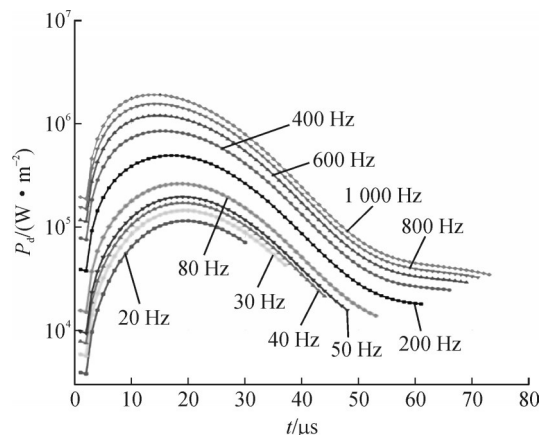


图 6 不同电流频率下新阴极表面功率密度变化

Fig. 6 Variation of surface power density of new cathode at different current frequencies

由计算结果可得出, 频率越低鞘层生长时间越短, 新阴极表面的电场强度越小, 新阴极表面功率密度越小。由于频率越大, E_c 和 P_d 越大, 因此造成重击穿的可能性增大, 从而导致真空断路器开断失败的可能性增大。这与文[11]的计算结果趋势是一样的, 文中把频率扩展到了低频。

3.2 频率对弧后金属蒸气衰减过程的影响分析

当鞘层长满整个间隙, 弧后电流变为零, 带电粒子被全部吸收, 此时弧后介质恢复的第一阶段结束, 进入以中性粒子为主导的弧后介质恢复第二阶段, 即金属蒸气衰减阶段。在此阶段中金属蒸气密度随时间的衰减变化决定了该阶段介质恢复的能力。依据文献中阐述的计算公式^[10], 可得出金属蒸气密度随时间的衰减变化。

电极的电烧蚀率影响系数和真空断路器间隙体积、烧蚀率、蒸发后电极材料的修正系数以及金属蒸气质量有关, 并假定在燃弧和弧后介质恢复阶段该影响系数不变。文中以开距 13 mm、触头半径 30 mm, 蒸发后电极材料的修正系数取 4, 金属蒸气选用铜原子, 金属蒸气温度为 2 000 K 为例。为了反映不同电流频率下触头的烧蚀程度, 随着频率的减小, 触头的烧蚀率从 61 $\mu\text{g}/\text{C}$ 逐渐增加, 衰减系数从 20 逐渐变小。

由于金属蒸气易发生电离, 当金属蒸气密度过大时随着电离的增加, 导致间隙击穿、电弧重燃的可能性增大。不同频率下的金属蒸气密度衰减曲线见图 7。

由于本节的结果是根据文[10]提供的公式进行计算的, 上述计算结果与文[10]的分析是一致的。由计算结果可得出如下结论: 频率越低, 初始金属蒸气密度越大, 衰减速度越慢, 介质恢复时间越长, 衰减至临界金属蒸气密度所用时间越长, 使得间隙

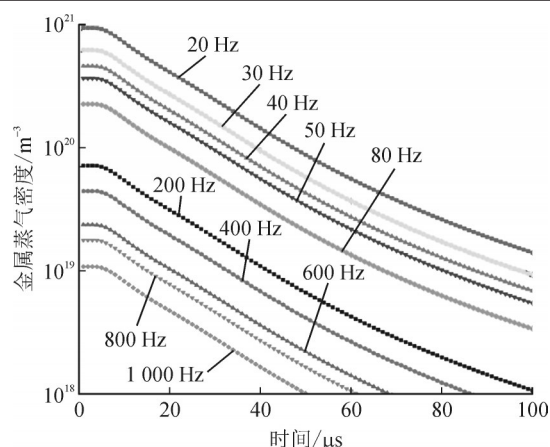


图7 不同电流频率下金属蒸气密度变化

Fig. 7 Variation of metal vapor density at different current frequencies

被击穿的可能性提高,降低了真空断路器的开断能力。因此频率越低,真空断路器的开断能力受弧后介质恢复的第二阶段的影响越大。

4 结论

由于不同场景下断路器需要开断不同频率的电流,文中研究了电流频率对真空断路器开断能力的影响,得到的结论如下。

1)通过对不同频率下真空电弧和触头熔池的仿真,发现随着频率的增加,真空电弧逐渐呈现出越来越集聚的形态,触头呈现出局部短时烧蚀的现象。随着频率的降低,触头则呈现出长时间严重烧蚀的现象。

2)随着频率的增加,杯状纵磁触头的磁场分布越不均匀,对真空电弧的扩散作用越弱,从而电弧越容易集聚。

3)频率越高,弧后鞘层生长到满开距的时间越慢,但是金属蒸气衰减更快。反之,频率越低,鞘层生长到满开距的时间越快,但金属蒸气衰减越慢。

文中认为对于低频电流开断,触头整个表面耐长时间烧蚀是提高开断能力的主要因素,而对高频电流开断,触头则是短时局部烧蚀,但电弧等离子体不容易扩散,提高等离子体扩散速度是提高开断能力的主要因素。相应的,低频和高频电流的弧后介质恢复主导过程不同。低频下的断路器触头整体烧蚀严重,电弧熄弧的时候将产生大量的金属蒸气,金属蒸气的衰减过程将主导断路器的弧后绝缘恢复过程,而高频下的断路器的弧后绝缘恢复过程则由鞘层生长过程主导。也就是说,如果电弧重燃,低频电流应该是在弧后介质恢复的第二个阶段,而高频电流则是弧后介质恢复的第一个阶段。低频电

流面临的是灭弧室长时绝缘恢复过程,高频电流面临的是灭弧室短时绝缘恢复过程。

根据以上的讨论,文中认为还有以下内容值得进一步的研究,针对不同电流频率下的弧后介质恢复特点,怎样去设计适合不同频率开断的触头以及灭弧室来提高开断能力。

参考文献:

- [1] 王锡凡,王秀丽,滕予非. 分频输电系统及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 1-6.
WANG Xifan, WANG Xiuli, TENG Yufei. Fractional frequency transmission system and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 1-6.
- [2] 董华军. 真空开关电弧形态研究及其等离子体参数诊断[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
DONG Huajun. Study on arc morphology and plasma parameter diagnosis of vacuum switch[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [3] 刘 斌,武建文. 直流真空电弧强迫开断电弧形态[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 157-163.
LIU Bin, WU Jianwen. Morphology of forcing interruption arc of DC vacuum arc[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 157-163.
- [4] 李 静,于秋婷,曹云东. 金属蒸气电弧弧前形成过程及影响因素[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(5): 492-497.
LI Jing, YU Qiuting, CAO Yundong. Formation process and influencing factors of metal vapor arc before arc[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35(5): 492-497.
- [5] 胡成博,王振兴,耿英三,等. 真空断路器弧后介质恢复试验装置[J]. 低压电器, 2011(2): 50-54.
HU Chengbo, WANG Zhenxing, GENG Yingsan, et al. Dielectric recovery experiment device after arc extinction for vacuum circuit breaker[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(2): 50-54.
- [6] 程 显,徐鹏飞,葛国伟,等. 机械式直流断路器弧后电流测量方法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(2): 24-28.
CHENG Xian, XU Pengfei, GE Guowei, et al. Research on measurement method of back arc current of mechanical DC circuit breaker[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(2): 24-28.
- [7] 李 博,包涌泉,彭振东,等. 基于改进型直流真空断路器弧后暂态仿真及介质恢复特性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1752-1760.
LI Bo, BAO Yongquan, PENG Zhendong, et al. Post-arc transient simulation and dielectric recovery analysis based on improved DC vacuum circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1752-1760.

- [8] ANDREWS G J. Sheath growth in a low pressure plasma [J]. *Phys Fluid*, 1971, 14(2):339-343.
- [9] 刘晓明, 于德恩, 邹积岩. 基于连续过渡模型的直流真空断路器弧后介质恢复分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(12):1285-1289.
LIU Xiaoming, YU De'en, ZOU Jiyang. Simulation of post-arc dielectric recovery characteristics of DC vacuum circuit breaker[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2014, 34(12):1285-1289.
- [10] LAFFERTY J. 真空电弧理论和应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.
LAFFERTY J. Vacuum arc theory and applications[M]. Beijing:China Machine Press, 1985.
- [11] 丁 璨, 袁 召, 何俊佳. 机械式真空直流断路器反向电流频率的选择方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(8):2670-2676.
DING Can, YUAN Zhao, HE Junjia. Method for selecting reverse current frequency of mechanical vacuum DC circuit breaker[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(8):2670-2676.
- [12] SHKOL'NIK S M, AFANAS'EV V P, BARINOV Y A, et al. Distribution of cathode current density and breaking capacity of medium voltage vacuum interrupters with axial magnetic field[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(5):1511-1518.
- [13] LIN Renjie, WANG Lijun, SHI Weixin, et al. Experiment investigation on triggered vacuum arc under the different contact materials[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPEST). China:IEEE, 2017:598-601.
- [14] WANG L, JIA S, SHI Z, et al. High-current vacuum arc under axial magnetic field: Numerical simulation and comparisons with experiments[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(11):213-313.
- [15] WANG L, JIA S, LIU K, et al. Numerical simulation of high-current vacuum arc characteristics under combined action of axial magnetic field and external magnetic field from bus bar[J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16(10):1511.
- [16] DING C, YUAN Z, HE J. Effect of vacuum arc cathode spot distribution on breaking capacity of the arc - extinguishing chamber[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(10):106001.
- [17] HUANG X, WANG L, DENG J, et al. Modeling of the anode surface deformation in high - current vacuum arcs with AMF contacts[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(7):075202.
- [18] BO Kai, ZHOU Xue, ZHAI Guofu, et al. Simulation of metal droplet sputtering and molten pool on copper contact under electric arc[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2018(9):691-698.
- [19] 田云博, 王振兴, 马 慧, 等. 大电流真空电弧阳极熔蚀过程的热力学仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(4):1021-1027.
TIAN Yunbo, WANG Zhenxing, MA Hui, et al. Thermodynamics simulation of the anode erosion process under high - current vacuum arcs[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(4):1021-1027.
- [20] 丁 璨, 李 江, 袁 召, 等. 基于NSGA-II和BP神经网络的杯状纵磁触头结构优化设计[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(23):6074-6082.
DING Can, LI Jiang, YUAN Zhao, et al. Structural optimization design of cup - shaped longitudinal magnetic contact based on NSGA - II and BP neural network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(23):6074-6082.
- [21] WANG Zhenxing, GENG Yingsan, LIU Zhiyuan. Simulation of metal vapor breakdown after interrupting a vacuum arc[C]//2012 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Tomsk:IEEE, 2012:53-56.

丁 璨(1982—),男,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为电工装备设计、模拟及实验(E-mail:dingcan@ctgu.edu.cn)。