

一种熔断器测压方法及电弧压力对燃弧过程影响的分析

席泽文¹, 武瑾¹, 庄劲武¹, 刘路辉^{1,2}, 袁志方^{1,2}, 岳海波¹

(1. 海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033; 2. 海军工程大学电磁能技术全国重点实验室, 武汉 430000)

摘要: 为探究熔断器燃弧过程中电弧压力的变化,文中首先设计了一种熔断器内部压力检测方法,可通过外置支架和压力传感器的配合达到测量内部压力的目的。其次,通过两组对比试验验证了测压方式的准确性和可行性,该测压方法可用于对电弧压力和燃弧过程关系的深入研究。再次,设计4组相同电路参数、不同起弧电流的分断试验,以此模拟不同电弧压力的分断试验,记录试验参数、拟合电弧电导率,分阶段对燃弧过程进行了分析。结果表明,各组试验间电弧压力与燃弧功率呈明显映射关系,电弧压力在各个燃弧阶段中对燃弧过程影响不同,在相同电弧功率密度下,电弧电导率与电弧压力存在比例关系。

关键词: 直流熔断器; 测压方法; 压力特性; 电弧电导率; 燃弧过程

Fuse Pressure Measurement Method and Analysis of the Influence of Arc Pressure on Arcing Process

XI Zewen¹, WU Jin¹, ZHUANG Jinwu¹, LIU Luhui^{1,2}, YUAN Zhifang^{1,2}, YUE Haibo¹

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China)

Abstract: For exploring the variation of arc pressure during the arcing process of fuse, a internal pressure detection method for fuse is firstly designed and the internal pressure measurement can be achieved through the coordination of external bracket and pressure sensor. Then, the accuracy and feasibility of the pressure measurement method are verified by two groups of comparative tests. This pressure measurement method can be used to deeply study the relationship between arc pressure and arcing process. After that, four sets of breaking tests with same circuit parameters but different arc ignition currents are designed to simulate the breaking tests with different arc pressures, record the test parameters, fit the arc conductivity, and analyze the arcing process by stages. The results show that there is an obvious mapping relationship between the arc pressure and the arcing power in each test set, and the arc pressure has different effects on the arcing process in each arcing stage. Under the same arc power density, the arc conductivity exhibits a proportional relationship with the arc pressure.

Key words: DC fuse; pressure measurement method; pressure characteristics; arc conductivity; arcing process

0 引言

直流熔断器作为最有效的短路保护措施之一,在保护设备中占据重要地位^[1-5]。其中混合型直流限流熔断器具有稳态温升小、分断速度快、安全性高等特点,广泛应用于舰艇短路保护系统中^[6-7]。设

计合理的熔断器可实现短路电流快速切断,同时保护系统设备不受过电压破坏^[8-14]。

在舰船等短路故障后果严重且空间狭小的场景中,急需设计一种兼顾小型化与安全性的熔断器^[15-16]。相较于传统熔断器,小型化熔断器中石英砂可压缩性小,电弧压力对电弧电导率的影响较为

收稿日期:2025-11-11; 修回日期:2026-02-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107136)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52107136).

显著。受限于熔断器复杂的燃弧过程与试验检测手段,熔断器电弧压力和电弧电导率的准确获取极为困难。

传统熔断器压力的获取往往是在内置光纤的基础上观察光谱,通过对电弧温度等的一系列复杂计算完成,各种工况计算过程无法统一,且工作量巨大。使用内置压力传感器对装置内部压力直接测量,可降低时间成本,提高工作效率。李金忠等采用内置动压力传感器的方式,对分接开关油室中电弧压力的分布进行了检测,并基于流体力学仿真对电弧爆炸过程压力的分布进行了计算^[17]。张继军等进行了小比距离、大当量的密闭空间爆炸试验,结果表明,使用隔热保护的压力变送器可满足空腔爆炸测压需求^[18],而熔断器中石英砂的存在满足这一条件。

针对压力、温度等对电弧特性影响的问题, Muhammad A 等使用光栅光谱仪记录了线形熔丝在燃弧过程中电子温度的变化,进而推断电弧电导率及电弧直径的变化,但背景为小储能、低压力分断试验,不能说明电弧压力对燃弧过程的具体影响^[19]。L. A.V. Cheim 等采用内置石英管和光纤的方式对(HBC)熔断器电弧进行了检测,并通过量子力学表达式计算了燃弧过程中电弧的温度,结果表明电弧温度约为 20 000 K 且随时间变化很小,为熔断器电弧的动态特性研究提供了帮助^[20]。P.Andre 等研究了在 1 atm 和 10 atm(1 atm=101 kPa)下熔断器中多相区和气相区电弧有效成分的数量及热力学变化,提供了模拟熔断器工作的热导率、焓和粘度等参数^[21]。

熔断器结构封闭,电弧成分和物理过程复杂、压力巨大,为探究电弧压力对燃弧过程的影响带来困难。立足试验数据和热力学第一定律等,建立熔断器等效电弧电导率拟合模型^[19],采集熔断器分断过程电弧压力数据,分析各燃弧阶段电弧压力与电弧电导率、电压等燃弧特性的关系是可行的工作思路。文中设计了一种通过内置压力传感器测量熔断器电弧压力的试验方法,并设计两种验证试验,验证了试验方法的可行性与准确性,并分析了压力的变化过程。基于此设计 4 组相同电路参数、不同起弧电流分断试验,采用上述内置压力传感器的方式记录电弧压力、电弧电压及短路电流等随时间变化的数据。按照文[19]方法拟合各试验等效电弧电

导率,对比分析不同燃弧阶段电弧压力与电弧电导率、功率、电弧电压等的变化规律。

1 熔断器电弧压力产生过程与检测方法

1.1 熔断器燃弧过程

短路电流发生时,熔断器狭颈薄弱环节率先起弧,并在径向和轴向不断拓展,单个断口处电弧烧蚀过程呈橄榄形。在燃弧过程中,部分金属和石英砂吸收大量系统储能形成准中性的高温气体,气体边界为尚未吸收足够气化热量的熔融层物质,熔融层一定程度上限制了高温电弧的逸散,为电弧空腔创造了高温高压环境。熔断器熔体结构示意图和烧蚀后残壳图片见图 1。

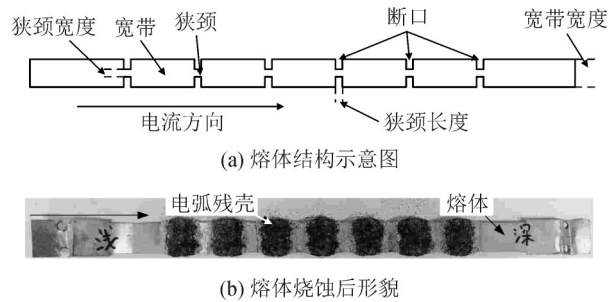


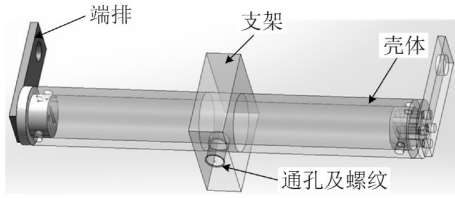
图1 熔体结构示意图及烧蚀后形貌

Fig. 1 Structure diagram of melt and morphology after ablation

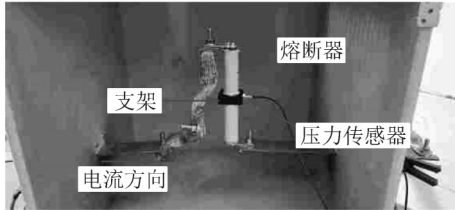
1.2 熔断器电弧压力检测方法及验证

壳体与外部支架固定且开通孔,通孔正对熔体狭颈,压力传感器通过螺纹与壳体、支架紧密连接,压敏部分进入熔断器壳体内部直接与石英砂接触,见图 2(a)。其中,熔断器壳体选用三聚氰胺玻璃纤维布层压管,熔体材料为铜,厚度约 0.1 mm;灌装用砂二氧化硅质量分数 $\geq 99.60\%$,石英砂粒度约 0.3~0.15 mm,熔断器填砂密度约 1.69 g/cm³。采用 LC 放电回路模拟系统短路电流,熔断器测压装置为 CY-YD-205 高精度压力传感器与电荷放大器。熔断器及测压装置见图 2(b),实验平台见图 2(c)、(d)。

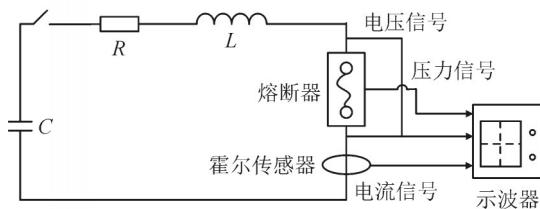
为验证内置压力传感器是否会对燃弧过程产生影响,分别设计内置压力传感器和无压力传感器对比试验,两组试验系统电路参数、熔断器熔体结构、填砂工艺等均相同,系统电路电感约 400 μ H,电阻约 40 m Ω ,电容为 30 mF/4 400 V,起弧电流约 9.5 kA;熔体宽带宽度为 13 mm,狭颈宽度为 6 mm,共 7 排断口串联。试验现场见图 3,试验波形见图 4,其中实线为内置压力传感器试验分断曲线,虚线为无压力传感器试验分断曲线。



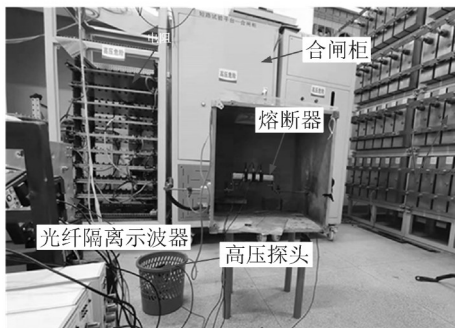
(a) 熔断器与测压装置示意图



(b) 熔断器与测压装置



(c) 试验平台电路示意图



(d) 试验平台现场图

图2 直流熔断器测压装置及短路特性试验平台

Fig. 2 DC fuse pressure measuring device and short circuit characteristic test platform



(a) 有压力传感器试验现场



(b) 无压力传感器试验现场

图3 有无压力传感器对比试验现场

Fig. 3 Comparative test site with and without pressure sensor

由图4曲线可知,两组试验熔断器均在0.87 ms时刻熔断产生电弧,电弧电压和电弧压力同时增大但电弧压力比电弧电压提前达到峰值。随后电弧压力逐渐减小,泄压速度呈现先快后逐渐减慢趋势。两组试验中弧压和短路电流有较好的一致性,

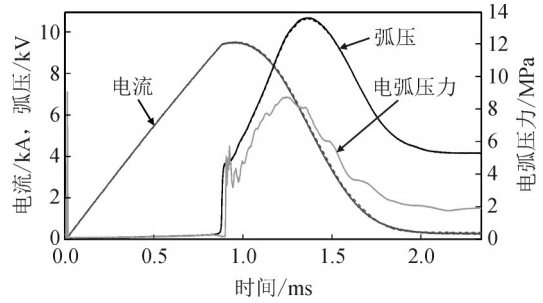


图4 有无压力传感器对比试验分断波形

Fig. 4 Comparative test breaking waveform with or without pressure sensor

压力传感器检测到完整的压力变化过程,即压力传感器的引入未对燃弧过程造成明显影响。

为验证压力传感器采集数据的准确性,设计4组重复试验测量熔断器内部同一测点处压力变化。试验系统电感208 μH ,线路电阻约40 $\text{m}\Omega$,电容为60 mF ,预充电电压2 200 V,预计起弧电流约9.4 kA;熔体宽带宽度为13 mm,狭颈宽度为6 mm,共8排断口串联,为便于比较,将各试验中单个橄榄形电弧的燃弧功率曲线置于同一波形图中,试验结果见图5。

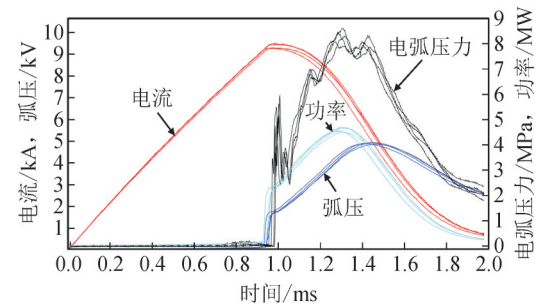


图5 测压方式准确性验证试验分断波形

Fig. 5 Breaking waveform of pressure measurement method accuracy verification test

由图5分断曲线可知,狭颈电弧爆炸阶段(0.94 ms时刻),电弧仅在熔体狭颈部分燃烧,电流密度最大,腔室压力产生脉冲尖峰,该阶段仅数十 μs 。受压力波传递速度影响,电弧压力波形略滞后于电弧电压。电弧烧蚀至熔体宽带时,电弧通流面积增大,腔室压力陡降。此后,电弧电压和燃弧功率快速增大,电弧对熔体和石英砂的烧蚀速度加快,腔室压力随之增大,并于1.3 ms处与燃弧功率同时达到峰值,压力峰值约8.5 MPa。受限流作用影响,燃弧功率达到峰值后逐渐减小,电弧对石英砂的烧蚀速度减慢,腔室压力随之减小。4次重复分断试验中压力传感器所测压力一致性良好,验证了压力传感器的准确性和测压方式的可行性。

2 压力梯度试验

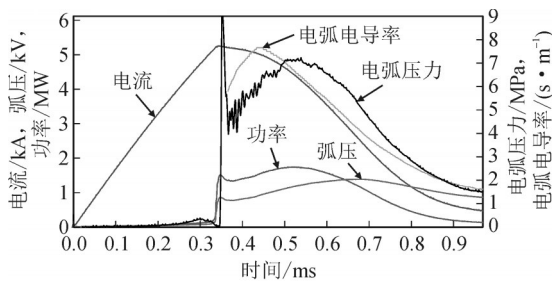
为研究熔断器内电弧压力对电弧电导率的影响,设计相同电路参数、不同起弧电流的4组对比试验,依次模拟压力梯度试验,4组试验起

弧电流依次相差约 600 A,电流上升率 16 A/ μ s,熔体宽带宽度均为 5.5 mm,断口排数为 3 排,压力传感器测量同一近电弧端测点,相关试验参数及结果见表 1,试验波形及拟合电导率见图 6。

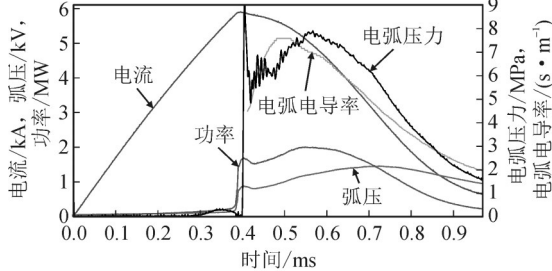
表 1 试验参数及相关实验结果

Table 1 Test parameters and related experimental results

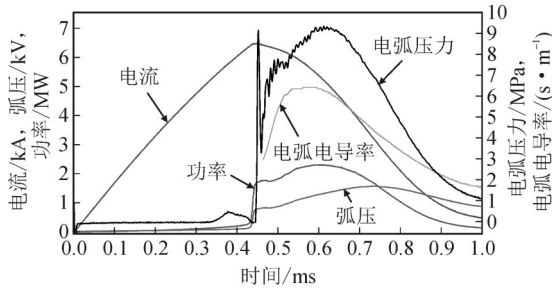
试验编号	狭颈/mm	电流峰值/kA	弧压/V	单断口功率峰值/kW	压力峰值/MPa	起弧到压力峰值时间/ μ s	起弧到弧压峰值时间/ μ s
1	2.0	5.2	1 385	1 750	6.9	201	343
2	2.4	5.8	1 422	1 975	7.7	191	337
3	2.9	6.4	1 560	2 304	9.3	172	313
4	3.4	7.0	1 691	2 722	10.7	165	292



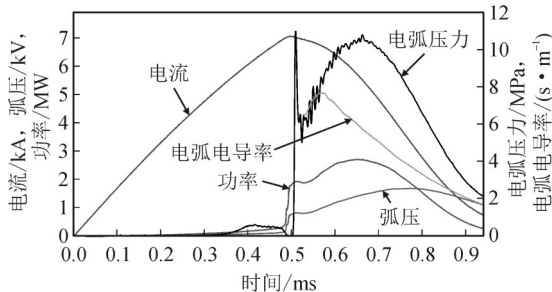
(a) 试验1分断波形



(b) 试验2分断波形



(c) 试验3分断波形



(d) 试验4分断波形

图 6 压力梯度试验分断试验波形

Fig. 6 Pressure gradient test breaking test waveform

由表 1 可知,在相同电路参数和相同熔体结构下,单个断口燃弧产生的电弧功率峰值与电弧压力峰值同比例增大。电弧压力和燃弧功率越高,电弧电压、功率及弧压达到峰值时间均越短,限流速度更快。

由图 6 可知,在电弧压力快速增大阶段电弧压力曲线存在明显振荡,峰值过后振荡明显减小,原因为狭颈燃弧阶段电弧空间极小,电弧产生爆炸波,爆炸波在石英砂填料中传播并在熔断器壳体表面反射,形成振荡,振荡幅度逐渐衰减。4 组试验中燃弧功率与电弧压力呈明显正相关,同时达到峰值。电弧压力峰值早于电弧电压峰值,电弧电压在电弧压力下降速度最快时达到峰值。

4 组试验主要燃弧阶段中电弧压力、弧压、限流作用等不同,为便于观察,将 4 组试验分断波形置于同一张图,且起弧时刻置于同一时刻(试验 1 起弧时刻),见图 7。

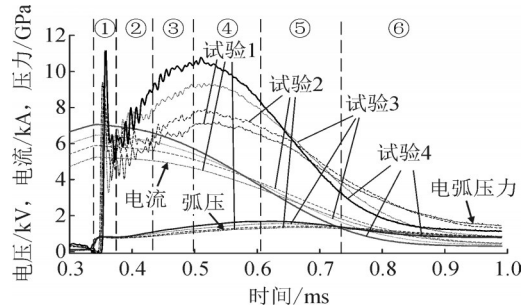


图 7 压力梯度试验处理后波形

Fig. 7 Waveform after pressure gradient test treatment

由图 7 可知,根据电弧压力的变化可将燃弧过程分为 6 个主要燃弧阶段。第 1 阶段为电弧狭颈爆炸阶段,电弧产生瞬间建立起一定弧压,并在狭小空间形成压力爆炸波,电流越大,瞬时压力爆炸波越大,但对起弧电压影响不明显;第 2 阶段中,随着燃弧功率增大,电弧压力快速增大,大量中性成分

分解, 电弧电导率逐渐增大, 电弧建压速度相对较慢; 第3阶段中, 电弧压力逐渐达到峰值, 不同试验的电弧压力上升速率不同, 电弧建压速度也存在差异, 且电弧压力越大, 建压速度越快; 第4阶段中, 电弧压力由峰值逐渐减小, 且电弧压力越大, 泄压效果越显著, 电弧电压逐渐达到峰值, 泄压速度越快, 电弧电压增大速度越快; 第5阶段中, 电弧泄压速度进一步加快, 电弧压力峰值越大, 泄压速度越快, 电弧电压从峰值逐渐减小, 限流作用逐渐减弱; 第6阶段中, 分断即将完成, 燃弧功率减小, 电弧温度逐渐降低, 电弧压力泄压速度减慢, 电弧过电压逐渐减小, 限流作用进一步减弱, 该阶段电弧压力对电弧电压影响减小。

电弧功率密度包含电弧温度、烧蚀速度等众多燃弧信息, 拟合试验电弧电导率曲线、建立电弧电导率—功率密度的函数关系有利于描述不同工况下电弧通流能力的变化规律^[22], 具体拟合过程见图8。

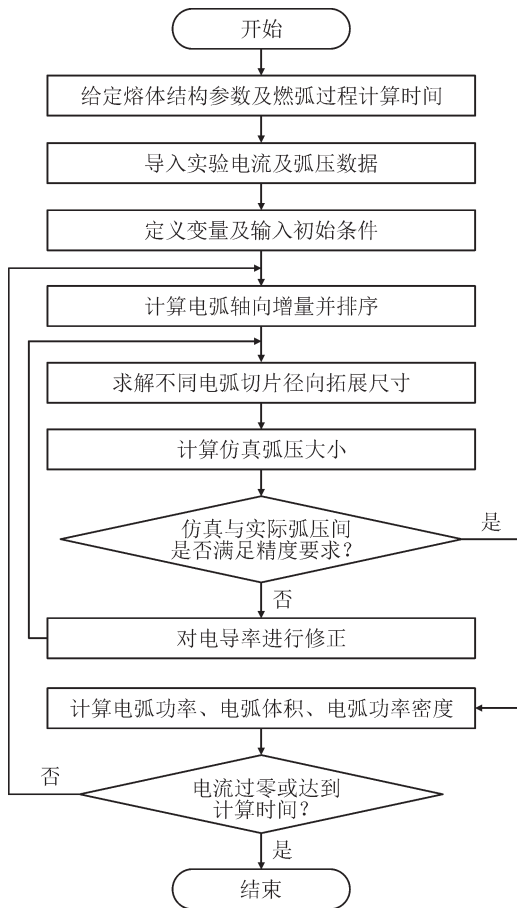


图8 熔断器电弧电导率拟合流程图

Fig. 8 Fuse arc conductivity fitting flow chart

为进一步分析电弧压力对电弧燃弧过程的影响, 拟合4组试验电弧电导率—功率密度函数关系, 并将4组试验曲线置于同一张图中, 见图9, 电弧电导率随电弧功率密度的减小而减小。

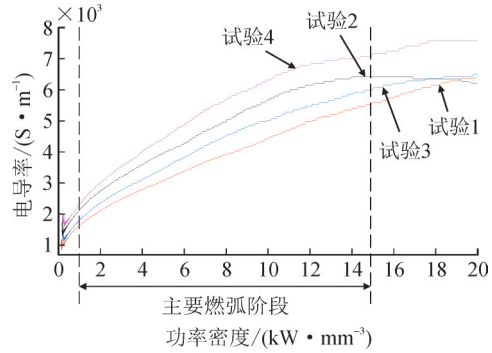


图9 压力梯度试验电弧功率密度—电导率曲线

Fig. 9 Curve of arc power density-conductivity in pressure gradient test

由前述分析可知, 在第3-5燃弧阶段中电弧压力对燃弧过程有显著影响。图9中, 电弧功率密度大于15 kW/mm³时为第1和2燃弧阶段, 燃弧时间短, 电导率随功率密度变化平缓, 对燃弧过程影响较小, 不是主要研究对象。功率密度小于1 kW/mm³为第6阶段, 电弧温度下降, 各工况下电弧压力均较小, 影响有限。主要燃弧阶段内, 相同功率密度下, 电弧压力越大, 电弧电导率越小, 限流能力越强。相同功率密度下, 各组试验间电弧电导率比值与对应时刻电弧压力的反比近似相等。

3 结语

文中设计了一种内置压力传感器的熔断器近电弧端压力测量方法, 并证明了方法的可行性, 为熔断器电弧压力的获取提供了一种手段。

试验表明, 电弧压力与燃弧功率变化趋势基本相同, 相似工况下, 燃弧功率越大, 电弧压力越大, 泄压过程中压力下降速度越快。不同燃弧阶段中, 电弧压力对限流效果影响不同, 第1、2阶段及第6阶段压力不是分断效果的主要影响因素, 第3-5阶段中电弧压力对燃弧过程影响较明显, 且电弧压力越大, 越有利于燃弧建压。

熔断器电弧压力对电弧电导率的影响具有一定规律。对于相似工况的分断试验, 在主要燃弧阶段的相同功率密度时, 对应电导率比值与对应电弧压力的反比近似相等。

参考文献:

[1] 王晨, 徐建霖. 混合型限流及开断技术发展综述[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1644-1653.
WANG Chen, XU Jianlin. Review of hybrid current limiting and breaking technology development, power system technology[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1644-1653.
[2] 谢运祥, 王季梅. 国内外熔断器发展概述[J]. 低压电器, 1991

- (3):5-9.
XIE Yunxiang, WANG Jimei. Domestic and foreign fuses development overview[J]. Low Voltage Apparatus, 1991(3):5-9.
- [3] 殷 铭,何正浩,涂志飞,等. 电动汽车直流熔断器的发展与关键问题[J]. 电器与能效管理技术, 2019(22):1-5.
YIN Ming, HE Zhenghao, TU Zhifei, et al. Development and key problems of DC fuse for electric vehicle[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(22):1-5.
- [4] 张海玉,刘 闯,晁 勤,等. 具有LVRT能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 继电器, 2015, 43(3):53-60.
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Relay, 2015, 43(3):53-60.
- [5] 黄鑫健,耿英三,石晓光,等. 直流熔断器的研究现状与发展前景[J]. 电器与能效管理技术, 2019(2):1-7.
HUANG Xinjian, GENG Yingsan, SHI Xiaoguang, et al. Research status and development prospect of DC electric fuse[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(2):1-7.
- [6] 朱俊杰,聂子玲,张银峰,等. 一种软硬件协同控制的短路限流保护方法[J]. 继电器, 2015, 43(19):49-53.
ZHU Junjie, NIE Ziling, ZHANG Yinfeng, et al. A method of short-circuit current-limiting with software-hardware coordination control [J]. Relay, 2015, 43(19):49-53.
- [7] 毛启东,沈 兵,庄劲武,等. 直流熔断器低过载电流的开断性能优化及其结构设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(11):3864-3870.
MAO Qidong, SHEN Bing, ZHUANG Jinwu, et al. Optimization and structure design of low overcurrent interruption performance of DC fuse[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11):3864-3870.
- [8] 刘志远,王 彤,孙 超,等. 石英砂熔断器的弧前时间—电流特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(2):366-371.
LIU Zhiyuan, WANG Tong, SUN Chao, et al. Pre-arcing time and current characteristics of quartz sand fuse[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):366-371.
- [9] SATPATHI K, UKIL A, POU J. Short-circuit fault management in DC electric ship propulsion system: Protection requirements, review of existing technologies and future research trends[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1):272-291.
- [10] PATRICHI Š, PLEŠČA A, NIČUČÁ C, et al. Thermal modeling and simulations for fast electric fuses[C]//2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). Iasi: IEEE, 2018: 920-923.
- [11] GRÁF T. Simulation and verification of thermal modelling to prevent from damages caused by the use of HH fuses[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(2):e12560.
- [12] 尹 凡,沈 兵,庄劲武,等. 直流熔断器并联燃弧不均机理研究及优化设计[J]. 高电压技术, 2022, 48(10):3919-3926.
YIN Fan, SHEN Bing, ZHUANG Jinwu, et al. Mechanism and optimal design of uneven arc burning in parallel of DC fuses[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10):3919-3926.
- [13] 王 帅,庄劲武,董润鹏,等. 基于半经验模型的熔断器燃弧过程计算与分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1):319-326.
WANG Shuai, ZHUANG Jinwu, DONG Rungeng, et al. Calculation and analysis of arcing process of fuses based on semi-empirical model[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1):319-326.
- [14] 陈 搏,庄劲武,肖翼洋,等. 基于半经验模型的高压限流熔断器电弧特性的计算与分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(1):282-287.
CHEN Bo, ZHUANG Jinwu, XIAO Yiyang, et al. Calculation and analysis of high-voltage current-limiting fuse's arc characteristics based on semi-empirical model[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1):282-287.
- [15] 李 枫,庄劲武,江壮贤,等. 混合型限流熔断器爆炸活塞式高速开断装置炸药腔室结构分析及优化[J]. 高电压技术, 2017, 43(7):2417-2424.
LI Feng, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Structure analysis and optimum design on explosive chamber of explosive piston type high-speed interrupter in hybrid current-limiting fuse [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7):2417-2424.
- [16] 王 晨,庄劲武,袁志方,等. 新型混合型限流熔断器方案设计及其介质恢复特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36):148-156.
WANG Chen, ZHUANG Jinwu, YUAN Zhifang, et al. Design and dielectric recovery research of novel hybrid current limiting fuse[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36):148-156.
- [17] 李金忠,汪 可,任家帆,等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20):7651-7658.
LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20):7651-7658.
- [18] 张继军,张东亮,赵建伟,等. 小比距离密闭空腔爆炸爆后气体温度和压力测量技术研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2):101-106.
ZHANG Jijun, ZHANG Dongliang, ZHAO Jianwei, et al. Study on measurement of gas temperature and pressure after explosion in closed cavity at small-scaled distance[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(2):101-106.
- [19] SAQIB M A, STOKES A D, JAMES B W, et al. Electron temperature and arc diameter in a sand-filled HBC fuse[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(7):1619-1630.
- [20] CHEIM L, ALAN F. Spectroscopic observation of high breaking capacity fuse arcs[J]. IEEE Proceedings. A. Science, Measurement & Technology, 1994, 141(2):123-128.
- [21] ANDRE P, AUBRETON J, BUSSIÈRE W, et al. Basic data: Composition, thermodynamic properties and transport coefficients applied to fuses[C]//2007 8th International Conference on Electric Fuses and their Applications. France: IEEE, 2007:95-100.
- [22] 席译文,武 瑾,庄劲武,等. 直流限流熔断器分断燃弧过程的模型优化与验证[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19):7713-7719.
XI Zewen, WU Jin, ZHUANG Jinwu, et al. Model optimization and verification of current-limiting arcing process of DC fuse[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19):7713-7719.

席译文(1995—),男,硕士,主要从事直流熔断器及电弧理论相关研究(E-mail:zewen_xi@163.com)。

刘路辉(1986—),男,博士,副研究员,主要从事直流真空断路器及电弧理论相关研究(通信作者)(E-mail:liuluhui86@163.com)。