

无极性微型断路器换气沟槽布局对栅片利用率影响研究

林建维, 邹欣, 王浩志

(国投电力控股股份有限公司, 广西 钦州 535000)

摘要: 灭弧栅片是直流微型断路器中至关重要的灭弧部件, 直流微型断路器在开断电流时, 栅片利用率越高则灭弧效果越好。为此, 提出一种气流场仿真的方法估算了某双断口直流微型断路器的栅片利用率, 并根据分析的结果对该断路器结构进行了优化, 提高了其栅片利用率, 最后通过试验验证了优化方案的可行性。

关键词: 直流微电网系统; 微型断路器; 开断性能; 灭弧栅片

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0075-04

Study on the influence of ventilation groove layout on grid utilization of non-polar MCB

LIN Jianwei, ZOU Xin, WANG Haozhi

(Sdic Power Holdings Co., Ltd., Qinzhou 535000, China)

Abstract: The grid is a crucial arc extinguishing component in the DC miniature circuit breaker. When the DC miniature circuit breaker interrupts the current, the more the grid utilization rate, the better the interruption performance. In this study, the grid utilization rate of a double-break DC miniature circuit breaker is estimated by the method of transient airflow field simulation. Then, according to the results of simulation analysis, the circuit breaker structure is optimized to improve the grid utilization rate. Finally, the feasibility of the optimization scheme is verified by experiments.

Keywords: DC microgrid system; miniature circuit breaker; interruption performance; arc extinguishing grid

0 引言

近几年直流微网系统的蓬勃发展对直流微型断路器的灭弧性能提出了更高的要求^[1-4], 而在众多直流微型断路器中, 双断口直流微型断路器因其更良好的灭弧性能而受到广泛关注^[5-8]。由于直流灭弧过程中没有自然过零点, 因此直流断路器大多采用提升电弧压降反制电流直至过零的方法进行熄弧^[9], 灭弧栅片则是提升直流电弧压降的重要部件。

关于微型断路器的灭弧性能, 国内外学者已经进行了大量研究。吴翊等采用数值模拟方法对空气微型断路器的燃弧过程进行了仿真^[10], 并就灭弧室尺寸对电弧形态和电弧弧根运动的影响进行了充分探究^[11-12], 宁佐清等研究了微型断路器电弧收缩的影响因素^[13], 杨飞等研究了隔板烧蚀对微型断路器电弧的影响^[14], 李兴文等研究了直流空气微型断路器开断过程中的烧蚀问题^[15], 李静等研究了直流断路器弧根跃迁对灭弧性能的影响^[16], 王奥飞对磁吹、气吹等吹弧方式引起的直流断路器灭弧性能变化进行了研究^[17], 满家健等对直流微型断路器的小电流开断情况进行了研究^[18]。而关于目前双断口直流微型

断路器栅片利用率影响因素的研究目前还鲜有报道。

本文采用气流场仿真方法估算了某双断口直流微型断路器样机的栅片利用率, 并对原样机结构进行了改进优化了栅片利用率, 最后, 采用试验方法验证了本文提出的栅片利用率优化方法的有效性。

1 原样机栅片利用率仿真计算

由于目前尚未有成熟的方法衡量直流断路器中栅片的利用率, 因此本文采用了气流场仿真方法评估直流断路器的栅片利用率。

1.1 栅片利用率估算方法

图1为某双断口直流微型断路器结构示意图, 动静触头分离的过程中, 电弧在磁吹作用下进入两侧栅片中, 进而提升电弧压降, 在磁吹过程中, 换气沟槽可加强气体流动, 进而增强吹弧能力。

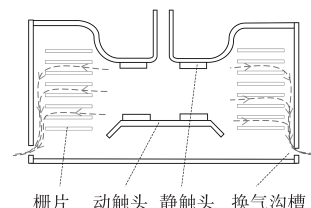


图1 灭弧室结构示意图

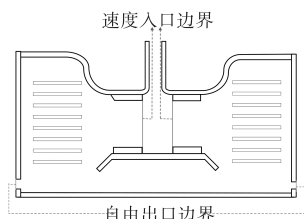
* 基金项目: 国家开发投资集团有限公司广西风电重点项目(GTGXFD/SC-QT-03-2022)

收稿日期: 2023-11-10

依据上述过程,本文采用气流场仿真,计算出栅片间的流速分布,并将满足以下条件的栅片确定有效栅片:1) 栅片间流速达到入口流速 50%以上;2) 在动静触头分开的过程中,流速达到条件 1)的时间超过分闸时间的 50%。在确定了有效利用栅片数量后,可根据式(1)计算出栅片利用率。

$$\text{栅片利用率} = \text{有效栅片数量} / \text{总栅片数量} \quad (1)$$

计算栅片利用率的过程中所需进行的气流场仿真边界条件如图 2 所示。



1) 速度入口边界,在动静触头间设置 30 m/s Velocity_inlet 边界条件以模拟电弧在磁吹作用下形成的气体流动。值得说明的是,设置的入口速度数值 30 m/s 本身并不具有实际意义,实际能确定有效栅片的是栅片前部区域速度与入口速度的比值。

2) 自由出口边界,根据实际物理环境将换气沟槽设置为 outflow 边界条件。

1.2 原样机栅片利用率计算及分析

根据 1.1 小节中所述方法,本文对某双断口直流微型断路器进行了暂态气流场仿真,仿真结果如图 3(a)~3(g)所示。磁吹产生的气流在栅片间逐渐形成,由于原样机换气沟槽位于底部,因此仅在下方栅片间形成了稳定气流,根据 1.1 节中的栅片利用率估算方法可以计算出:该样机结构的栅片利用率约为 45.5%~54.5%。

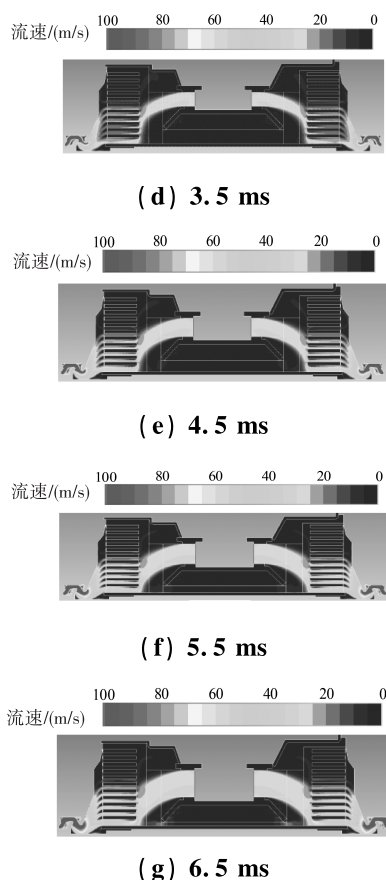
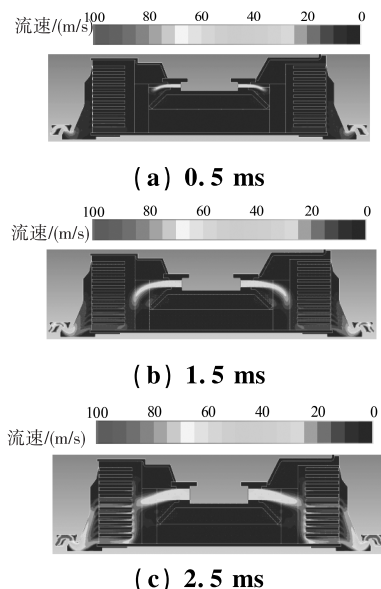


图 3 原样机气流场仿真流速分布

2 样机栅片利用率优化及仿真计算

根据 1.2 节中关于栅片利用率的仿真和分析可知,换气沟槽的位置对栅片的利用有着重要影响,本节根据这一发现对原样机进行了改进。

从 1.2 节中的原样机栅片利用率仿真分析结论可知,原样机栅片利用率低的主要原因是换气沟槽位于样机底部,导致上方栅片间难以形成气流,进而导致栅片利用率低。相比于原样机,改进后的样机结构在左右侧栅片上部附近分别增加了一个换气沟槽,如图 4 所示。

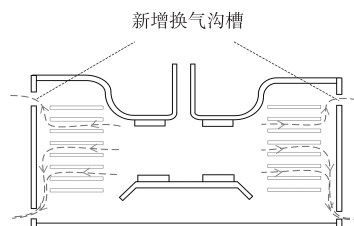


图 4 结构改进示意图

改进后的样机进行暂态气流场仿真,仿真结果如图 5(a)~5(f)所示,磁吹产生的气流在栅片间逐渐形成,由于改进后样机底部和顶部都有换气沟槽,因此仅在上下方栅片间均形成了稳定气流,根据栅片利用率计算方法可以计算出:该样机结构的栅片利用率约为 90.9%~100%。

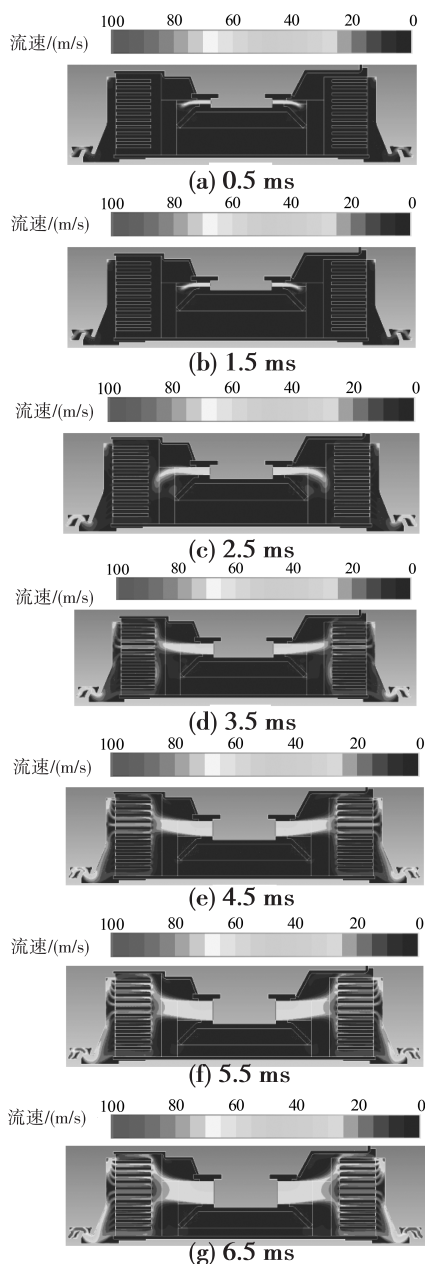


图5 改进后样机气流场仿真流速分布

3 试验验证

仿真计算分析结果表明:在该双断口直流微型断路器两侧上方增加换气沟槽可以有效提高栅片利用率。为验证该推论的可靠性,本文对原样机和改进后的样机进行了开断试验。

3.1 试验回路设计

图6是本文设计的试验回路,该试验回路可产生230 V,10 kA的直流电。首先通过保护装置断开主回路,充电装置给电容 C_1 充电,然后通过保护装置接通主回路,随后样机触发装置动作开断主回路电流,高速摄影机根据触发装置信号记录燃弧过程,同时通过霍尔元件和罗氏线圈记录主回路的电压电流曲线。

3.2 原样机燃弧过程及栅片利用率分析

采用图6所示试验回路对原样机进行开断试验,拍摄燃弧过程如图7所示。从图7中可以看出,在燃弧的0.5~3.5 ms内,电弧逐渐进入左右栅片的下方区域,而几乎没有进入栅片的上方区域(如图7中白框内情况),这一现象基本与原样机气流场仿真结果类似。

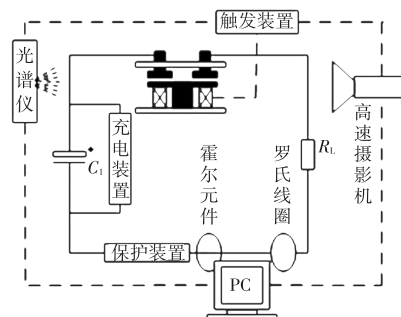


图6 开断试验回路设计

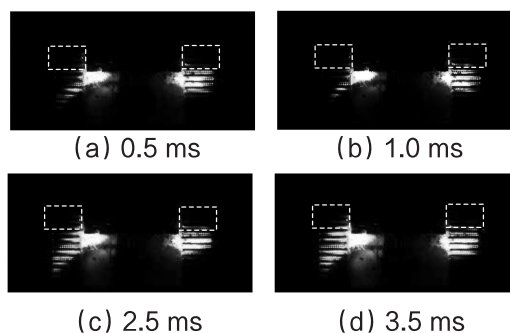


图7 原样机开断试验燃弧过程

图8是原样机开断完成后栅片烧蚀情况,从图8中可以看出左右侧栅片的下方部分烧蚀严重,而上方部分的栅片烧蚀痕迹并不明显,说明燃弧过程中电弧与上方栅片接触较少,这与仿真分析以及试验拍摄燃弧过程基本吻合,说明原样机燃弧过程中上方部分栅片可能并未得到有效利用。若假设图8红色框内栅片未利用,根据式(1)可计算出原样机栅片有效利用率为63.6%。

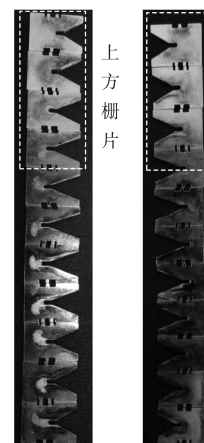


图8 原样机开断试验后栅片烧蚀情况

3.3 改进后样机燃弧过程及栅片利用率分析

采用图9所示试验回路对改进后样机进行开断试验,拍摄燃弧过程如图9所示。从图9中可以看出,在燃弧的0.5~3.5 ms内,电弧逐渐进入左右栅片,且明显有电弧进入栅片的上方区域(如图9中白色框内所示),这一现象基本与改进后样机气流场仿真结果类似。

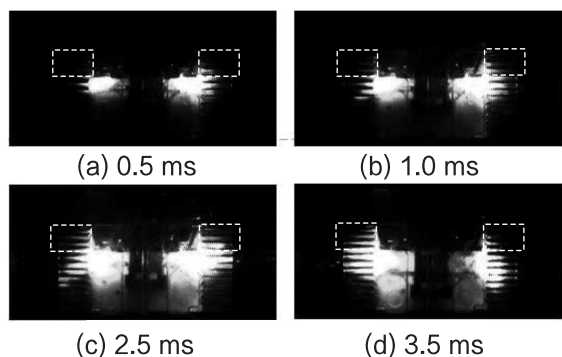


图9 改进后样机开断试验燃弧过程

图10是改进后样机开断完成后栅片烧蚀情况,从图10中可以看出,虽然左右侧栅片的下方部分烧蚀痕迹仍然比上方部分更加明显,但上方部分栅片有明显的烧蚀痕迹(如图10中红色方框内所示),这与仿真分析以及试验拍摄燃弧过程基本吻合,说明改进后样机燃弧过程中上方部分栅片得到了有效利用。若假设图10红色框内栅片有效利用,根据式(1)可计算出改进后样机栅片有效利用率为100%。

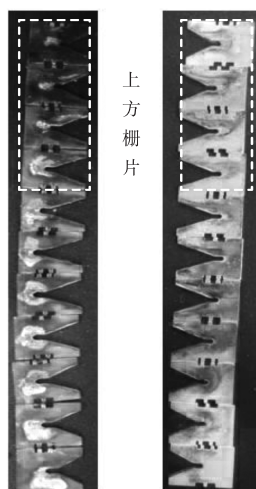


图10 改进后样机开断试验后栅片烧蚀情况

4 结束语

本文基于暂态气流场仿真,分析计算了某双断口直流微型断路器的栅片利用率,并依据仿真结果改进了该双断口直流微型断路器的换气沟槽布局,提高了栅片利用率,并对优化前后栅片利用情况进行了对比试验验证,结果表明:

1) 在双断口直流微型断路器两侧上部分区域增加换气沟槽可有效提高栅片利用率。

2) 本文中提出的栅片利用率计算方法与试验结果具有良好的相似性,该方法对于定性判断栅片利用率优劣情况具有较高的应用价值。

3) 本文中采用的提高栅片利用率方法可以为其他类型的微型直流断路器的设计提供参考。

参考文献

- [1] 林婷,高亮. 含电动汽车的微电网规划研究[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 53-58.
- [2] 杨景刚,刘洋,苏伟,等. 苏州同里±10 kV 柔性直流配电系统直流故障特性研究[J]. 江苏电机工程, 2021, 40(6): 113-120.
- [3] 全年,李燕青,申宏威,等. 基于改进黑洞算法的微电网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5): 113-119.
- [4] 李博通,李斌,李永丽,等. 低压微网接地技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 53-59.
- [5] 陈羽,石巍,杨兵,等. 混合式高压直流断路器控制保护系统[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 164-170, 199.
- [6] 阮锦晖,郑建平,刘尧,等. 离网直流微网群混合储能容量优化配置方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 99-105.
- [7] 何俊佳,袁召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
- [8] 张鹏,张杰,朱毅,李燕燕,等. 空气直流断路器开断特性的分析验证[J]. 机电工程, 2017, 34(4): 412-415.
- [9] 荣命哲,杨飞,吴翊,等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1-9.
- [10] WU Y, RONG M Z, SUN Z Q, et al. Numerical analysis of arc plasma behaviour during contact opening process in low-voltage switching device[J]. Journal of Physics D (Applied Physics), 2007, 40(3): 795-802.
- [11] WU Y, RONG M Z, LI X W, et al. Numerical analysis of the effect of the chamber width and outlet area of the motion of an air arc plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2831-2837.
- [12] WU Y, RONG M Z, YANG F, et al. Numerical modeling of arc root transfer during contact opening in low-voltage air circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4): 1074-1075.
- [13] 宁佐清,罗锦华. 直流空气断路器缩小弧区的研究[J]. 船电技术, 2004, 24(2): 28-29.
- [14] YANG F, RONG M Z, WU Y, et al. Numerical analysis of the influence of splitter-plate erosion on an air arc in the quenching chamber of a low-voltage circuit breaker[J]. Journal of Physics D (Applied Physics), 2010, 43(43): 434011-434023.
- [15] 李兴文,吕启深,田甜,等. 直流空气电弧作用下触头烧蚀特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1970-1977.
- [16] 李静,钱宇,王奥飞,等. 磁吹直流空气断路器弧根跃迁及对开断特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1651-1661.
- [17] 王奥飞. 不同驱弧方式下直流空气断路器全动态电弧特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [18] 满家健,孙昊,宁嘉琦,等. 直流空气断路器小电流开断试验研究[J]. 低压电器, 2015(8): 8-11.

作者简介:林建维(1991—),男,硕士研究生,工程师,研究方向:新能源技术监督、新能源运行管理。