

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.06.010

110 kV 双断口快速开关效率优化分析

和 帅, 王智勇, 吴中友, 李 钊, 李德召, 陈 新

(常州博瑞电力自动化设备有限公司, 江苏 常州 213025)

摘要: 电磁斥力效率的优化研究, 以往研究主要针对斥力盘、线圈等关键零件的结构优化和参数匹配, 以及预充电电容的电压和容值的优化分析, 很少有关于开关辅助支撑结构件对效率影响的分析研究。不同结构形式和材质的辅助支撑结构件对斥力盘效率有着不可忽视的影响。文中以快速开关支撑板作为分析研究对象, 在不改变样机结构形式的前提下, 提出了通过设计导磁板, 对支撑板开槽等方式, 降低支撑板的涡流损耗, 提高电磁斥力效率。文章最后, 基于仿真结果, 对一款 110 kV 双断口快速开关样机进行了改造设计。试验结果表明, 在容值不变情况下, 增加导磁板或者支撑板开槽可以有效降低电容预充电电压, 提高斥力机构效率。

关键词: 电磁斥力机构; 快速开关; 能效转化; 仿真分析; 优化设计

Efficiency Optimization Analysis of 110 kV Double-break Fast Switch

HE Shuai, WANG Zhiyong, WU Zhongyou, LI Zhao, LI Dezhaohao, CHEN Xin

(NR Electric Power Electronics Co., Ltd., Jiangsu Changzhou 213025, China)

Abstract: The previous study of the optimization research of electromagnetic repulsion efficiency is mainly focused on the structural optimization and parameter matching of such key elements as repulsion disks and coils, as well as the optimization analysis of the voltage and capacitance of precharged capacitors. While the analysis and study on the influence of auxiliary support structure of switch on efficiency is less. Auxiliary supporting structural parts of different materials and sizes have a non-negligible effect on the efficiency of the repulsion disk. In this paper, the fast switching support plate is taken as the analysis and research object. It is proposed under the premise of not changing structure of the prototype to reduce the eddy current loss of the support plate and improve the electromagnetic repulsion efficiency by designing the magnetic conductive plate and slotting the support plate. Finally, based on the simulation results, the improvement design of a 110 kV double-break fast switch prototype is made on the basis of the simulation result. The test results show that, in the case of keeping capacitance unchanged, addition of the magnetic conductive plate or the slot of the supporting plate can effectively reduce the precharged voltage of the capacitor and improve efficiency of the repulsion mechanism.

Key words: electromagnetic repulsion mechanism; fast switch; energy efficiency conversion; simulation analysis; optimization design

0 引言

电力工业的高速发展, 对高压直流断路器设备提出了更高的要求, 快速安全可靠成为了断路器技术革新的主要研究方向, 现有的弹操机构无法满足高压直流断路器的发展需求。基于涡流斥力原理

的新型电磁斥力机构受到了高压直流断路器的青睐, 大量的学者和机构对其进行了深入详细的研究验证工作。

2016年, 南京南瑞继保电气有限公司研制出了分闸时间 3 ms 的 15 kV 快速开关样机, 并对样机进行了仿真和实测数据对比, 并对影响电磁斥力效率

的主要结构尺寸参数进行了仿真对比研究^[1-2];2017年,国网宁夏电力公司电力科学研究院和西安交通大学对40.5 kV真空断路器进行了储能电容优化设计研究,给出了满足分闸速度的前提下,储能电容容值最小的设计方案^[3];2018年,国网新疆电力公司检修公司和山东泰开高压开关有限公司基于电磁仿真分析参数,研制出了12 kV快速开关样机,验证了仿真参数的正确性^[4]。

针对电磁斥力机构的研究,研究的主要对象可以分为关键结构件的尺寸材质(如斥力盘外径厚度材质、脉冲线圈截面尺寸匝数等)以及触发回路的电气参数匹配(如电容容值和预充电压),大量学者和研究机构对这两部分进行了深入仿真分析研究^[5-19],从而总结出电磁斥力机构设计的一般原则。然而,快速开关机构的组成除了斥力盘、线圈、电容等关键零部件外,支撑固定线圈和斥力盘的其他辅助安装结构件同样对效率有着不可忽视的影响。然而,很少有研究学者对这部分进行了分析研究,并给出相关结论。2020年,华中科技大学和南方电网科学研究院分析了导磁材料对电磁斥力机构出力效率的影响,得出选择低电导率导磁材料可以优化磁路,进而提高电磁斥力效率^[12]。

文中以110 kV双断口快速开关样机作为分析研究对象,首先对现有结构进行了电磁斥力有限元仿真分析,进而分析现有结构形式对电磁效率出力的影响,并对影响出力效果的支撑铝板进行了优化改造设计,最后对改造结构分别进行了电磁斥力仿真分析和样机改造试验。通过改造设计后的样机,出力效率明显得到了提高,降低了电容电压容值,减少了成本。

1 电磁斥力机构的工作原理

电磁斥力机构原理见图1。储能电容向线圈激发一个脉冲电流,脉冲电流在线圈周围产生一个时变磁场。线圈上侧的斥力盘在时变磁场的作用下产生感应涡流,同时产生一个和线圈相反方向的时变磁场。脉冲电流产生的磁场和涡流产生的磁场相互作用产生斥力互相作用,从而推动斥力盘和连杆向上运动,最终实现真空灭弧室的开合动作。

2 电磁斥力机构运动特性仿真分析

2.1 电磁斥力快速开关

电磁斥力机构主要由固封极柱(真空灭弧室)、双稳机构、线圈盘、斥力盘、液压缓冲装置组成。文中以一款110 kV双断口快速开关样机结构布置作为研究分析对象,根据其现有的结构布置形式,采

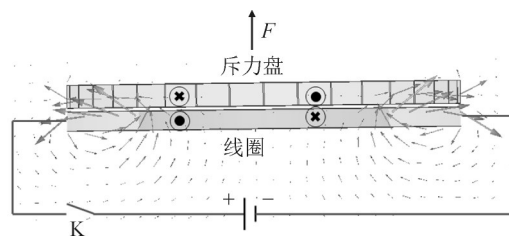


图1 电磁斥力原理

Fig. 1 Electromagnetic repulsion principle

用有限元仿真软件对其进行3D建模仿真分析,该款110 kV双断口快速开关样机单断口结构布置形式见图2。

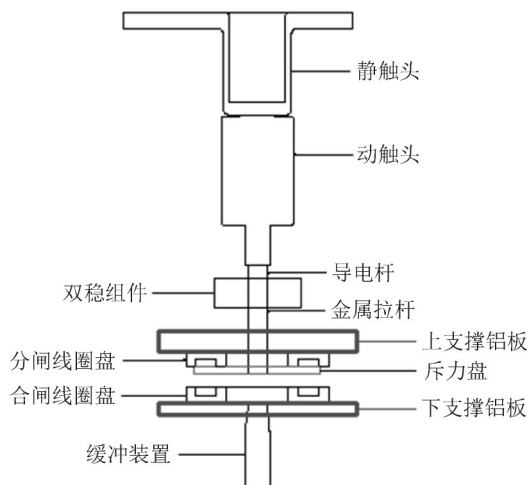


图2 样机断口原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of prototype fracture

2.2 运动特性仿真分析

为了分析该款110 kV双断口电磁斥力快速开关的分合闸特性,首先按照结构参数进行仿真三维模型设计,其参数见表1。考虑仿真计算效率,仿真模型进行了简化处理见图3。其包括关键零件斥力盘、线圈盘、支撑铝板,以及瞬态仿真运动区域Band和求解域。

表1 样机结构和电气参数

Table 1 Prototype structure and electrical parameters

参数	数值	备注
线圈规格(厚×高)/mm	1.2×10.0	材质铜
线圈外径 D_1 /mm	200	
线圈内径 D_2 /mm	130	
线圈匝数 N	16	
运动质量 m /kg	12	
初始间隙 d /mm	2.5	
电容容值 C /mF	8	
预充电压 U /V	900	
斥力盘外径 D_3 /mm	205	铝7075
斥力盘厚度 h_1 /mm	12	
线圈骨架高度 h_2 /mm	25	真空浸胶
支撑铝板高度 h_3 /mm	20	铝6063

首先针对现有的样机结构形式进行了仿真分

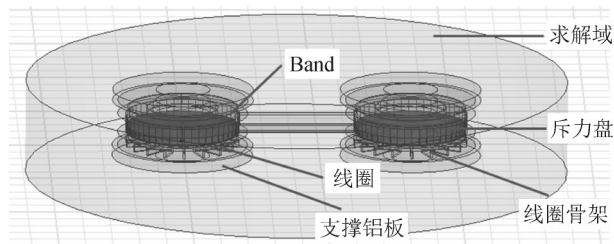


图3 双断口电磁斥力机构3D仿真模型

Fig. 3 3D simulation model of double-break electromagnetic repulsion mechanism

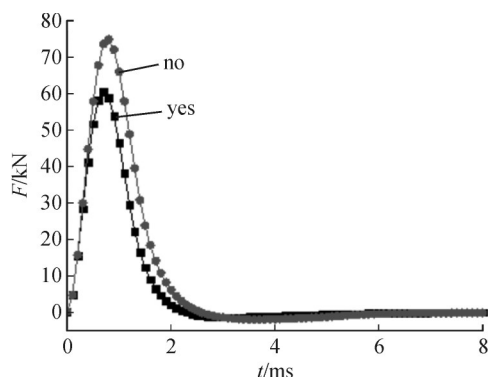
析,并用软件后处理导出了斥力机构的斥力/电流/位移/速度曲线。为了分析上下支撑铝板对电磁斥力机构效率的影响特性,进一步对仿真模型进行了优化处理,取消了线圈盘的上下支撑铝板,其他结构参数和电气参数保持不变,有无上下支撑铝板作为唯一的变量对电磁斥力机构进行了出力特性分析,同样导出了机构的响应曲线。为了更好的对比有无上下支撑铝板对效率的影响情况,将两种仿真数据做成了曲线图,见图4。图4中曲线yes为仿真模型包含支撑铝板,曲线no为无支撑铝板。通过分析曲线图发现,有无上下支撑铝板对效率影响非常明显。其中图4(a)可发现取消支撑铝板斥力峰值从大概60 kN增加到了约75 kN,增加了约25%;图4(c)满行程19 mm,取消支撑铝板仅需要5 ms,包含支撑铝板则需要约8 ms,取消支撑铝板后分合闸时间明显减小。

进一步查看仿真数据发现,上下支撑铝板内部感应出了部分涡流,消耗了部分斥力盘的转化能量,从而降低了电磁斥力机构的出力效率,见图5。

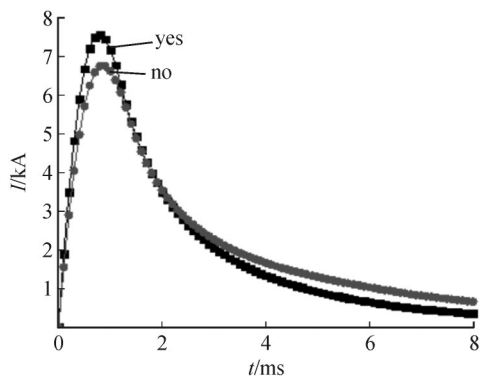
3 优化设计

结合上文仿真分析数据,分析研究发现,支撑铝板内部之所以会产生涡流,是因为其距离线圈盘较近,处于线圈感应时变磁场区域内,随着线圈电磁场的时变而感应出涡流;进一步分析发现,斥力盘为满足高强度轻质量的要求,一般多采用高强度合金铝7075,其他辅助支撑结构件一般没有高强度要求,考虑导电和轻质量一般选取合金铝6063,两种牌号铝合金的材料属性见表2。由表2发现,牌号6063合金铝导电率大约为牌号7075合金铝的2倍。因此,相同磁场强度下,合金铝6063会产生更大的涡流;进而消耗更多的能量,降低出力效率。为了减小支撑铝板感应涡流的产生,考虑从两方面着手,一方面在支撑铝板上开防涡流槽;另一方面考虑减小铝板位置的磁感应强度,如在线圈和支撑铝板间增加一块导磁纯铁板,降低外围支撑铝板处的磁感应强度,减小磁场对铝板的影响。两种方案

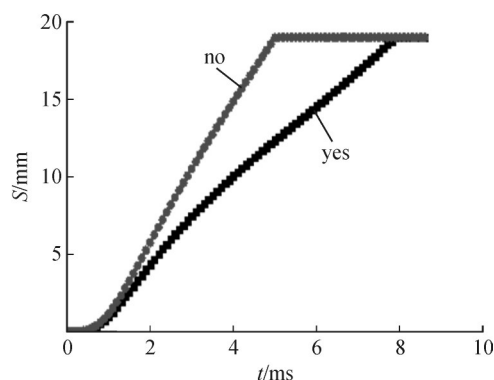
示意图见图6。



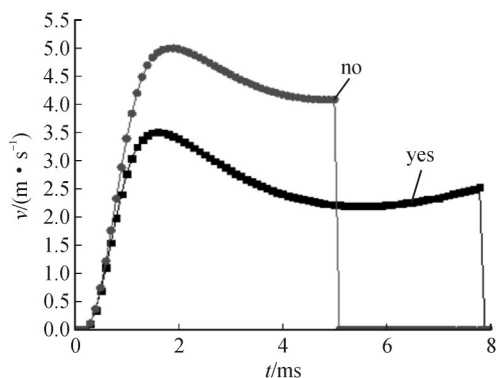
(a) 斥力瞬时曲线



(b) 线圈电流瞬时曲线



(c) 位移瞬时曲线



(d) 合闸速度瞬时曲线

图4 样机断口仿真曲线图

Fig. 4 Simulation curve of prototype fracture

3.1 增加铁板对斥力效率的影响

根据上文分析,修改三维仿真模型,分别在支

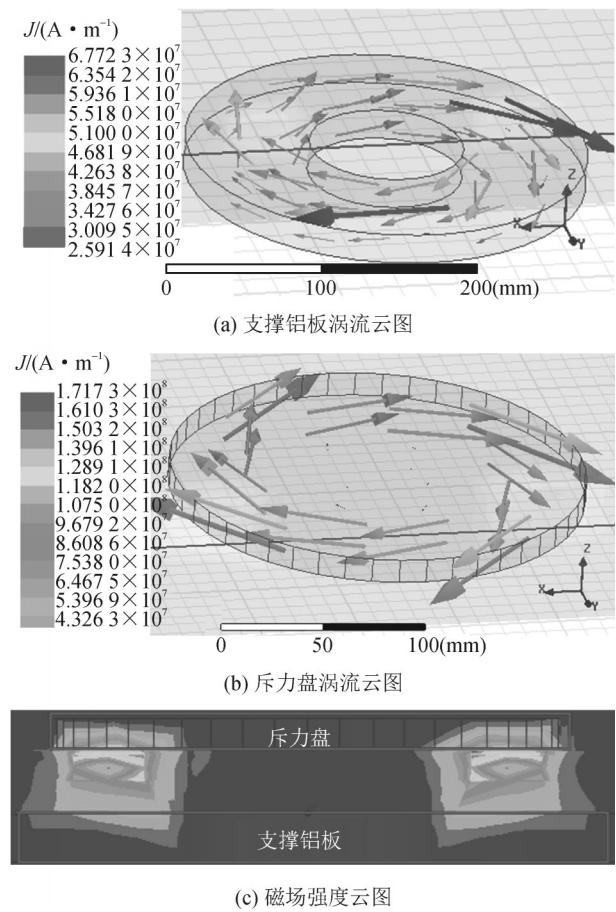


图5 样机断口仿真云图

Fig. 5 Simulation cloud of prototype fracture

表2 开关结构件材料特性

Table 2 Material characteristics of switch structural parts

项目	材质	相对磁导率	导电率/%IACS
线圈骨架	真空浸胶	1	0.00
	纯铁	<i>B-H</i> 曲线	17.76
	铝6063	1	60.34
斥力盘	铝7075	1	31.03
线圈	扁铜线	1	100.00

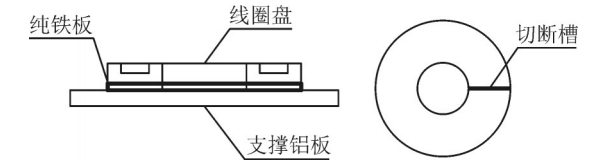


图6 方案示意图

Fig. 6 Schematic diagram

撑铝板和线圈盘之间增加3 mm和6 mm的电工纯铁板,其他结构和电气参数不变,重新进行电磁斥力仿真分析。

3.2 增加铁板仿真分析结果

增加铁板仿真曲线图见图7。

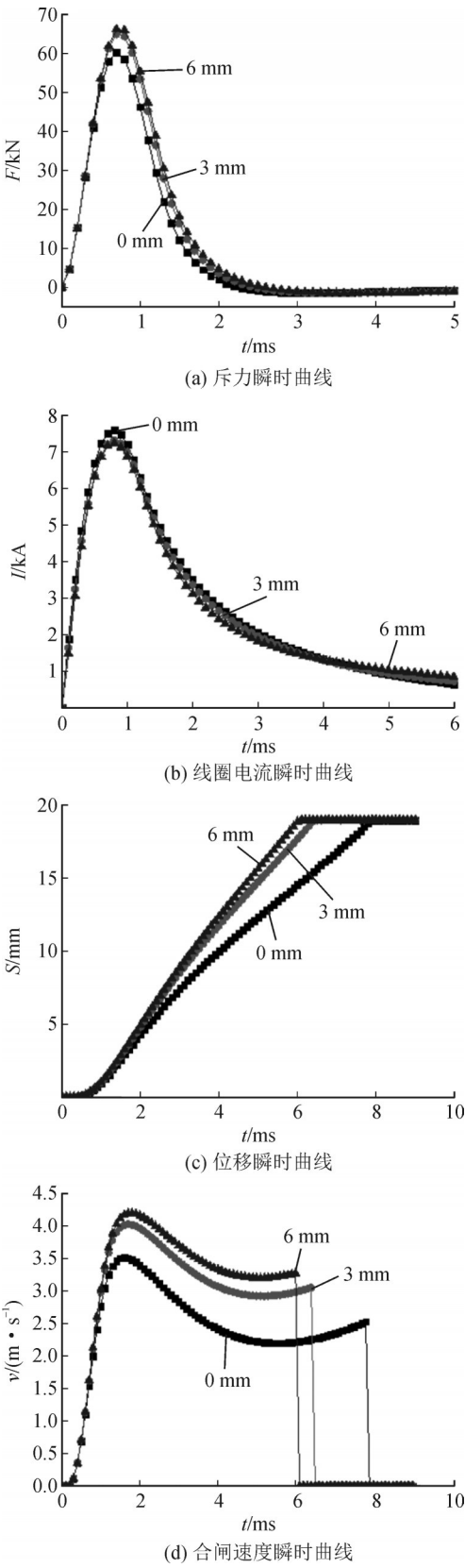


图7 增加铁板仿真曲线图

Fig. 7 Adding iron plate simulation curve

通过图7可以看出,在线圈和支撑铝板之间增加纯铁板对提高电磁效率,减小铝板损耗有明显效果。其中图7(a)瞬时斥力曲线图,增加铁板斥力峰

值从大概 60 kN 增加到了约 66 kN; 图 7(c) 位移瞬时曲线满行程 19 mm, 增加铁板大概需要 6 ms, 无铁板则需要约 8 ms, 增加铁板后分合闸时间明显减小; 进一步对比 3 mm 和 6 mm 情况可以得出, 增加铁板厚度可以提高线圈效率, 但效果不明显, 可以根据开关结构选择合适规格的铁板。

3.3 支撑铝板切断槽对斥力效率的影响

根据上文分析, 修改三维仿真模型, 在上下支撑铝板上增加切断槽, 其他结构和电气参数不变, 重新进行电磁斥力仿真分析。磁场强度云图见图 8。



图 8 磁场强度云图

Fig. 8 Cloud diagram of magnetic field strength

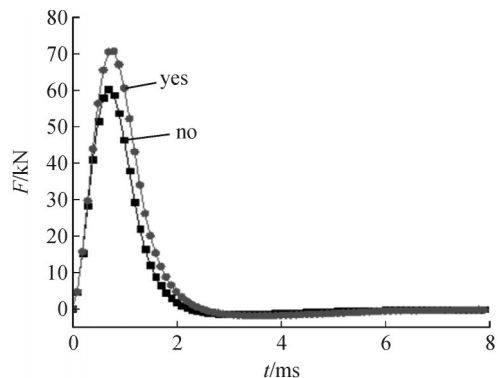
3.4 支撑铝板切断槽仿真分析结果

支撑铝板开槽仿真曲线图见图 9。通过图 9 可以发现, 在支撑铝板上开切断槽对提高电磁效率, 减小铝板损耗有明显效果。其中图 9(a) 支撑铝板开切断槽斥力峰值从大概 60 kN 增加到了约 70 kN, 图 7(c) 位移瞬时曲线满行程 19 mm, 支撑铝板开切断槽大概需要 5.5 ms, 无开槽则需要约 8 ms, 支撑铝板开切断槽后分合闸时间明显减小。

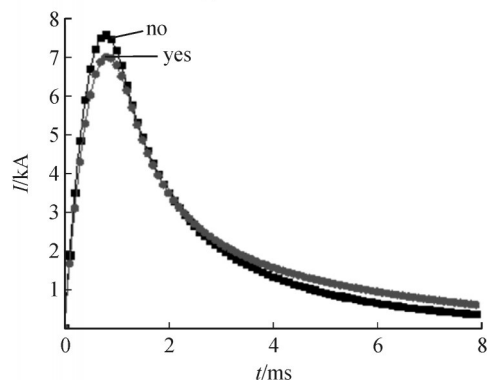
4 样机验证

针对上文分析及仿真结果, 对一款 110 kV 两断口快速开关样机进行了样机改造, 并对样机进行了试验数据收集, 见图 10、11。首先, 根据仿真结果设计制作了 3 mm 和 6 mm 纯铁板, 然后对样机进行了拆装改造。为了更明显对比 2 个断口增加铁板和无铁板的效果情况, 只对两断口其中一个断口进行了改造, 在线圈和支撑铝板之间增加了铁板, 然后进行开关分合闸试验测试。

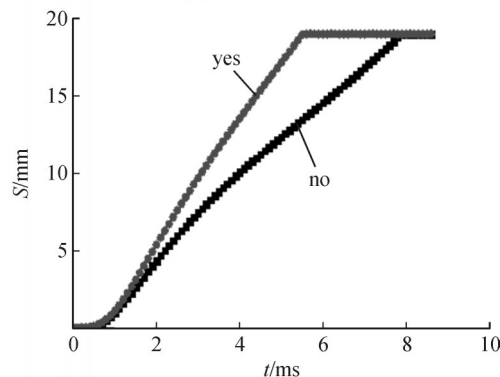
样机试验测试数据见表 3、图 12、13。通过对表 3 和图 12、13 分析, 增加铁板后所需的合闸电压明显比未增加铁板的合闸电压低, 在保证电容容值一致的前提下, 无铁板情况时, 电容需要充到 800 V 才能顺利合闸; 设计增加 3 mm 铁板的断口, 电压只需要充到 700 V 就可以完成断口的合闸动作, 增加 6 mm 铁板的断口, 电压只需要充到 650 V 就可完成合闸动作。另外, 通过示波器记录合闸动作特性录波可以看出, 在 900 V-8 mF 时, 设计增加 3 mm 纯铁板的断口需要 6.7 ms 完成合闸, 无铁板断口则需要 8.6 ms 才能完成合闸, 增加铁板后合闸时间明显减小, 说



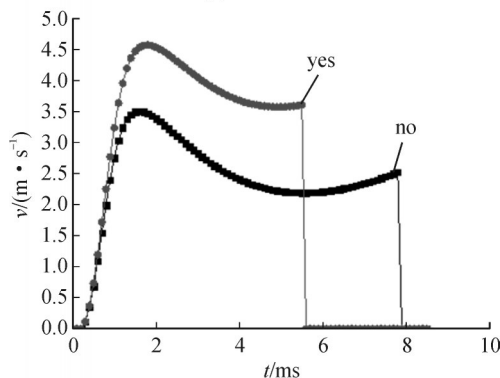
(a) 斥力瞬时曲线



(b) 线圈电流瞬时曲线



(c) 位移瞬时曲线



(d) 合闸速度瞬时曲线

图 9 支撑铝板开槽仿真曲线图

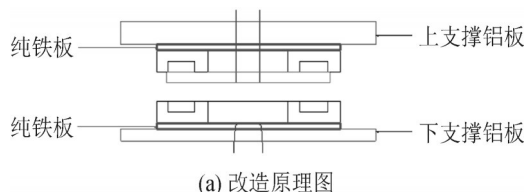
Fig. 9 Slotting simulation curve of supporting aluminum plate

明纯铁板对提高电磁效率有着明显的效果。此外, 表 3 还对比了 900 V 条件下的仿真数据, 和实测数据

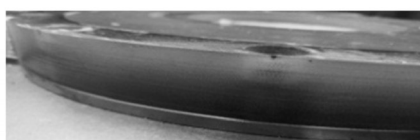


图10 110 kV 双断口快速开关样机

Fig. 10 110 kV double-break fast switch prototype



(a) 改造原理图



(b) 改造实物图

图11 样机断口改造图

Fig. 10 Modification of prototype fracture

对比,相差不大,仿真比实测速度快,和样机摩擦阻力偏大有关。

表3 样机合闸试验数据

Table 3 Prototype closing test data

电压/V	合闸时间/ms			电流峰值/kA	备注
	无铁板	3 mm	6 mm		
600	未合上	未合上	未合上	5.13	仿真数据
650	未合上	未合上	14.5	5.55	
700	未合上	14.1	10.5	5.95	
750	未合上	10.5	8.7	6.35	
800	15.8	8.5	7.5	6.75	
850	10.6	7.5	6.8	7.15	
900	8.6	6.7	6.3	7.45	
900	8.1	6.4	6.2	7.52	
950	7.3	6.1	5.8	7.85	
1 000	6.3	5.6	5.4	8.15	

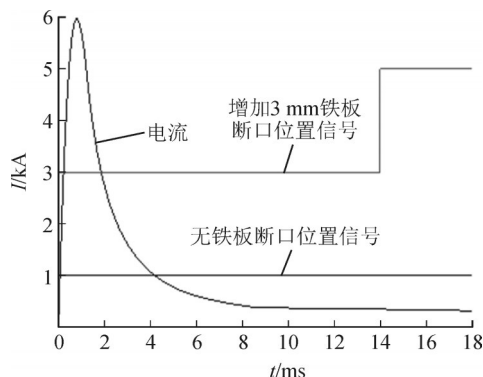


图12 700 V 波形图

Fig. 12 700 V waveform

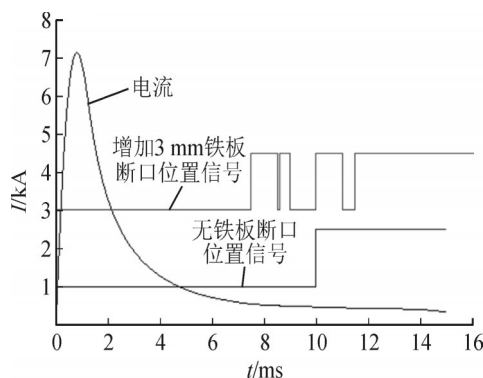


图13 850 V 波形图

Fig. 13 850 V waveform

5 结论

文中研究了快速开关辅助结构件对电磁斥力机构效率的影响,通过三维仿真分析得到了不同条件下开关的斥力、运动和位移曲线,最后通过样机进行了试验验证。

辅助结构件对电磁效率的影响很大。

1)线圈周围支撑铝板会产生涡流消耗部分转化能量,不利于电磁效率的转化。

2)支撑结构件应选用磁导率高,导电率小的材质,如纯铁、硅钢等。

3)支撑结构件如果是导电材质,应采取开槽隔环流的措施,避免涡流损耗能量,原则上切槽越多,隔环流效果越好。

4)考虑磁饱和问题,支撑板应尽量设计厚一些,使导磁板出力点在膝点以下范围内。

参考文献:

- [1] 杨 浩,吕 玮,刘 彬.电磁斥力快速开关研究[J]. 高压电器,2016,52(3):147-154.
YANG Hao, LYU Wei, LIU Bin. Research on the electro-magnetic repulsive fast switch[J]. High Voltage Apparatus, 2016,52(3):147-154.

- [2] 刘 彬,于海波,许元震.面向工程应用的高效率电磁斥力机构设计及试验[J]. 高压电技术,2020,46(12):4283-4290.
LIU Bin, YU Haibo, XU Yuanzhen. Design and experiment of high efficiency electromagnetic repulsion mechanism for engineering application[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12):4283-4290.
- [3] 高 峰,任 力,张博健.基于正交试验设计的40.5 kV真空断路器电磁斥力机构储能电容优化设计研究[J]. 高压电器,2017,53(3):223-229.
GAO Feng, REN Li, ZHANG Bojian. Research on energy storage capacitor optimization design of electromagnetic repulsion mechanism of 40.5 kV vacuum circuit breaker based on orthogonal test design[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 223-229.
- [4] 姜东飞,谢文刚,宫瑞磊.基于有限元法的电磁斥力机构仿真分析与设计[J]. 高压电器,2018,54(8):109-113.
JIANG Dongfei, XIE Wengang, GONG Ruilei. Simulation analysis and design of electromagnetic repulsion mechanism based on finite element method [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54 (8): 109-113.
- [5] 宁少飞.电磁斥力操作机构电磁效率优化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
NING Shaofei. Research on optimization of electromagnetic efficiency of electromagnetic repulsive operating mechanism[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [6] 张 宁,魏晓光.快速机械开关线圈型电磁斥力机构优化设计[J]. 电网技术,2018,42(8):2512-2518.
ZHANG Ning, WEI Xiaoguang. Optimized design of fast mechanical switch coil type electromagnetic repulsion mechanism[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2512-2518.
- [7] 卢彦辉,荣命哲.高速电磁斥力机构运动特性影响因素研究[J]. 高电压技术,2015,51(8):29-34.
LU Yanhui, RONG Mingzhe. Research on influencing factors of motion characteristics of high-speed electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2015, 51(8): 29-34.
- [8] 武 瑾,庄劲武.基于电磁耦合双线圈模型电磁斥力机构结构参数的优化分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):205-211.
WU Jin, ZHUANG Jinwu. Optimization analysis of structural parameters of electromagnetic repulsion mechanism based on electromagnetic coupling double coil model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 205-211.
- [9] 袁 召,喻新林.线圈型电磁斥力机构综合优化[J]. 高压电技术,2015,41(12):4207-4212.
YUAN Zhao, YU Xinlin. Comprehensive optimization of coil electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41 (12): 4207-4212.
- [10] 劳斯佳,王 荀.线圈型电磁斥力机构的分闸效率仿真及影响因素分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(27):39-45.
LAO Sijia, WANG Xun. Simulation of the opening efficiency of coil-type electromagnetic repulsion mechanism and analysis of influencing factors[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(27): 39-45
- [11] 温伟杰,李 斌.电磁斥力机构的参数匹配与优化设计[J]. 电工技术学报,2018,33(17):4102-4110.
WEN Weijie, LI Bin. Parameter matching and optimization design of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2018, 33(17): 4102-4110.
- [12] 黎小林,朱哲晓.导磁材料对电磁斥力机构出力效率的影响[J]. 高电压技术,2020,46(2):586-593.
LI Xiaolin, ZHU Zhexiao. The effect of magnetically conductive materials on the output efficiency of electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 586-593.
- [13] 孙良友.高磁性背板对斥力机构能量利用率的影响研究[J]. 船电技术,2016,36(5):31-33.
SUN Liangyou. Research on the influence of high magnetic backing plate on the energy utilization rate of repulsion mechanism[J]. Marine Electric Technology, 2016, 36(5): 31-33.
- [14] 何俊佳,袁 召,经 鑫,等.电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术,2018,43(12):3809-3816.
HE Junjia, YUAN Zhao, JING Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2018, 43(12): 3809-3816.
- [15] 刘昊挺.快速斥力机构的结构设计和应用研究[D]. 保定:华北电力大学,2016.
LIU Haoting. Research on structure design and application of fast repulsion mechanism[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [16] 王子建,何俊佳,尹小根,等.基于电磁斥力机构的10 kV快速真空开关[J]. 电工技术学报,2009,24(11):68-75.
WANG Zijian, HE Junjia, YIN Xiaogen, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 68-75.
- [17] 娄 杰,李庆民,孙庆森,等.快速电磁推力机构的动态特性仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):23-29.
LOU Jie, LI Qingmin, SUN Qingsen, et al. Dynamic characteristics simulation and optimal design of the fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 23-29.
- [18] 董文亮,郭兴宇,梁德世.基于电磁斥力机构的直流真空断路器模块[J]. 电工技术学报,2018,33(5):1068-1074.

- 绝缘结构优化设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 258-269.
- ZHANG Yutong, WU Zehua, XU Jiazhong, et al. Optimization design of insulation structure for post insulator in UHVAC GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 258-269.
- [23] 徐 洋, 刘卫东, 高文胜. 使用粉尘图法研究交流电压下典型GIS绝缘表面缺陷的电场电荷分布[J]. 电瓷避雷器, 2020(5): 211-218.
- XU Yang, LIU Weidong, GAO Wensheng. Research on distribution of the electric field and surface charge of typical defects on GIS insulators with dust figure[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(5): 211-218.
- [24] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- QIU Yuchang. GIS device and its insulation technology[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [25] 孙继星, 戴 琪, 边 凯, 等. 自由导电微粒受迫运动过程与振动特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5224-5232.
- SUN Jixing, DAI Qi, BIAN Kai, et al. Forced movement process and vibration characteristics of free conductive particle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5224-5232.
- [26] 胡智莹, 耿秋钰, 魏 来, 等. 直流GIS/GIL中驱赶电极与微粒陷阱的协同抑制作用及优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3338-3349.
- HU Zhiying, GENG Qiuyu, WEI Lai, et al. Synergistic inhibitory effect and optimal design method of driving electrode and particle trap in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3338-3349.
- [27] 陈 仓, 张 杰, 赵满江, 等. GIS典型绝缘故障案例及原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 7-10.
- CHEN Cang, ZHANG Jie, ZHAO Manjiang, et al. Analysis of typical insulation fault cases of GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(6): 7-10.
- [28] 严玉婷, 王亚舟, 倪学锋, 等. 复合绝缘线路避雷器运行情况的分析研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 123-128.
- YAN Yuting, WANG Yazhou, NI Xuefeng, et al. Analysis and research on the operation of lightning arresters for composite insulated lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 123-128.
- [29] 衣雪梅. 金相显微组织的计算机分析与识别系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- YI Xuemei. Computer analysis and recognition system of metallographic microstructure[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2006.
- [30] 杨 春, 朱衍勇, 钟振前. 用扫描仪采集低倍照片新方法的探索和分析[J]. 物理测试, 2009, 27(6): 41-43.
- YANG Chun, ZHU Yanyong, ZHONG Zhenqian. Exploration and analysis of a new method of collecting low power photos by scanner[J]. Physics Examination and Testing, 2009, 27(6): 41-43.
- [31] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- WEN Bangchun. Mechanical design manual[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- [32] 傅源杰, 张海生, 黄 娟, 等. 辐照后Zr-2合金包壳管小负荷维氏硬度分析[J]. 核动力工程, 2012(s2): 35-38.
- FU Yuanjie, ZHANG Haisheng, HUANG Juan, et al. Hardness analysis of irradiated victorinox Zr-2 clad tube under small load[J]. Nuclear Power Engineering, 2012(s2): 35-38.
- 胡义涛(1989—), 男, 工程师, 硕士, 从事变电设备检修及相关研究工作(E-mail: 805592685@qq.com)。

(上接第79页)

- DONG Wenliang, GUO Xingyu, LIANG Deshi. A DC vacuum circuit breaker based on electromagnetic repulsion actuator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1068-1074.
- [19] 秦立军, 汤卓凡. 基于高速斥力机构的72.5 kV双断口真空断路器研究综述[J]. 电气技术, 2017, 18(8): 17-20.
- QIN Lijun, TANG Zhuofan. Review of 72.5 kV double-break vacuum circuit breaker with rapid repulsion actuator [J]. Electrical Engineering, 2017, 18(8): 17-20.
- 和 帅(1990—), 男, 工程师, 硕士, 从事电力设备产品结构与工艺研究(E-mail: hes_br@nrec.com)。