

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.025

直流快速开关机构设计研究

贾 伟, 牛万宇, 王 瑞, 左利博

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 直流快速开关作为大容量直流供电系统安全运行的保证,其开断的分闸速度与开断的固有分闸时间直接影响到直流快速开关的快速性与合理可靠性。文中通过研究直流快速开关斥力机构工作原理,分析现有直流快速开关机构操动机构、保持机构、缓冲机构的结构形式与优缺点,总结出了直流快速开关斥力机构的2种操作机构,2种保持机构,4种缓冲机构的结构形式。根据研究成果给出直流快速开关机构设计的单线圈斥力+单线圈永磁保持以及双线圈斥力+碟簧保持两种典型方案,为直流快速开关机构的设计与试验提供了指导原则,也可为其他相关工程提供参考。

关键词: 直流快速开关; 斥力机构; 电磁保持; 碟簧保持; 优化模型

Design Research for DC High-speed Switch Mechanism

JIA Wei, NIU Wanyu, WANG Rui, ZUO Libo

(XJ Group Corporation, Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: DC high-speed switch is the guarantee of safe operation for the large capacity DC power supply system, its opening speed and inherent opening time will influence the quickness and reasonable reliability of DC high-speed switch directly. The working principle of DC high-speed repulsion mechanism, structure form, advantage and disadvantage of operating mechanism, keeping mechanism and buffering mechanism are analyzed and researched. The structure forms for two kinds of operating mechanisms, two kinds of keeping mechanisms, and four kinds of buffering mechanisms are summarized. According to the research results, the two typical schemes are the operating repulsion mechanism of one coil+keeping mechanism of permanent magnet and the operating repulsion mechanism of double coils+keeping mechanism of disc spring style, which provides guiding principles for design and testing of DC high-speed switch mechanism, and is a reference to other related engineering.

Key words: DC high-speed switch; repulsion mechanism; electromagnetic keeping; disc spring keeping; optimization model

0 引言

随着直流供电系统的飞速发展,电力敏感设备越来越多,人们对供电系统的可靠性和电能质量的要求也越来越高,当直流输电系统出现短路故障时,需保证在系统的故障电流还未上升到稳定值前开关就动作、分断故障电流,才能有效降低故障电流对整个系统的电动效应和热效应的危害^[1-2]。为此,发展直流快速开关是大容量直流供电系统安全运行的保证。

开发快速直流开关关键技术之一就是需要设计出快速的、合理可靠的快速操作机构,从而提高开关的分闸速度,并缩短其固有分闸时间^[3]。现有的弹簧、液压、气动、电磁等操作机构由于分合闸速度较低,在快速性上难以满足要求^[4]。

就快速开关而言,目前存在两种技术方式:其一是基于电磁斥力机构的;其二是基于改进型永磁操动机构的,在实际应用中,主要是利用它们的速分特性,相比之下,前者的分闸时间及触头运动时间可以做得短很多^[5],高速电磁斥力机构便成为近几年国内外快速开关最值得研究的操作机构。

1 工作原理

电磁斥力机构是一种利用涡流原理的新型操作机构,能在几十到数百微秒的时间内快速达到推力峰值^[6-7],以实现操作机构的高速动作,从而显著提高分合闸操作速度。

原理见图 1,其通过预先充电的电容器向分闸或合闸线圈放电,通过线圈放电产生脉冲电流,在该脉冲电流的作用下,线圈周围产生交变的磁场,并在斥力盘上产生涡流,此时涡流产生的磁场与线圈产生的磁场相互作用,从而在线圈和斥力盘之间产生巨大的电磁斥力,带动运动部件进行高速运动,以实现开关的分断或关合^[8-10]。其可将分闸时间缩短到 0.5 ms 左右,触头运动时间缩短到 2 ms 以内。

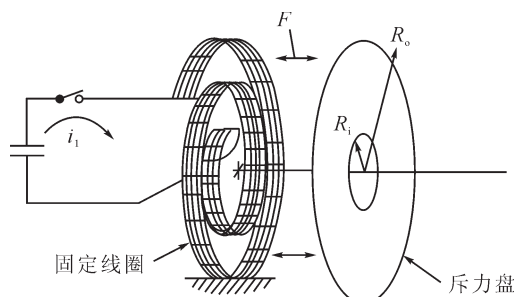


图 1 电磁斥力机构工作原理

Fig. 1 Working principle of electromagnetic repulsion mechanism

图 1 中: R_i 为斥力盘内径; R_o 为斥力盘外径; F 为线圈与斥力盘之间的电磁斥力; i_1 为电容对线圈放电电流。具体分析可知,在线圈盘电流的上升过程斥力盘中涡流产生的磁场会阻碍线圈盘磁场的增大,产生巨大斥力带动机构完成动作;而在线圈电流衰减过程,斥力盘感应出的磁场会阻碍线圈盘磁场的衰减,电磁斥力会变为电磁吸力,严重影响系统的运动。故需在设计斥力机构过程中,在放电电流上升阶段完成动作,能在极短的时间内带动开关切断电网中的故障,不适合长行程断路器使用^[11]。

2 直流快速开关机构特点及研究现状

直流快速开关机构主要有操动机构、保持机构、缓冲装置等 3 大部分组成。操动机构用以提供合、分闸所需的动力,保持机构用以维持机构在合、分闸位置的状态,缓冲装置用以缓冲机构末端速度和解决快速动作时产生的分闸弹跳等问题。下文将分别对其进行介绍。

2.1 电磁斥力操动机构

电磁斥力操动机构一般可分为盘式电磁斥力操动机构和螺线管式电磁斥力操动机构两种模型^[12]。

2.1.1 盘式电磁斥力操动机构

盘式电磁斥力操动机构根据斥力盘是否为线圈分为斥力盘—盘式线圈结构与双盘式线圈结构,见图 2、3。两者均能实现快速且高速运动,两者区别在于双盘式线圈结构作为斥力盘使用的线圈需要增加对线圈的电源供电,斥力盘—盘式线圈结构则不需要。

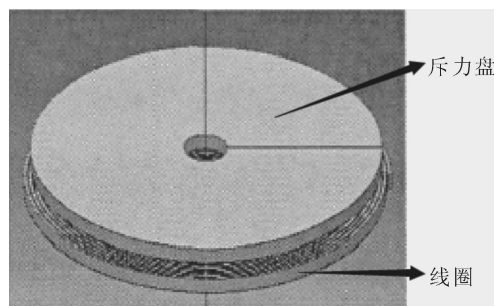


图 2 斥力盘—盘式线圈结构

Fig. 2 Construction of repulsion plate-disc coil

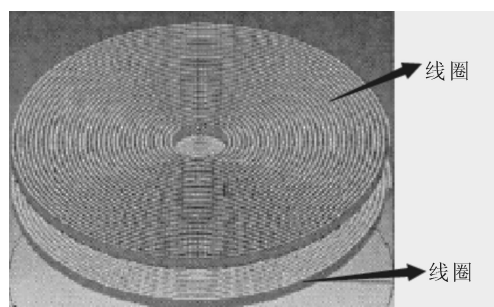


图 3 双盘式线圈结构

Fig. 3 Construction of double disc coil

双盘式线圈结构相比于斥力盘—盘式线圈结构需多增加一个线圈的电源供电,而对于一套电磁斥力机构而言,电源是直流快速开关成本中最高的一部分,其结构过于复杂,造成成本过高均制约着双线圈结构的发展,目前,此结构形式尚在理论研究中。

斥力盘—盘式线圈结构,该机构只需要对线圈进行供电,不要对斥力盘进行供电,相比于双盘式线圈结构而言结构简单,为国内外主流研究方向。目前,日本、韩国、荷兰等国家都在大力开展电磁斥力操动机构的研发,其中日本三菱公司已开发出 24 kV 快速真空断路器,可实现 1 ms 内触头分闸,1 周波内完成电流开断^[13]。中国电科院、清华大学、华中科技大学、西安交大、南瑞、平高等国内科研院所及企业也均已进行了大量的理论研发,但至今尚无实际产品推向市场^[14]。

2.1.2 螺线管式电磁斥力操动机构

螺线管式电磁操动机构见图 4,其由内外 2 个螺线管嵌套组成,内螺线管半径略小于外部螺线管

半径,内部螺线管为运动体。其参数一般包括内外两螺线管之间的相对大小、运动螺线管的初始位置、放电电路以及螺线管的匝数、半径等。从结构方面,与盘式操动机构相比,螺线管式斥力操动机构是盘式操动机构在空间中的三维拓展,涉及参数增多,极大的增大了研究过程中的难度与复杂程度。

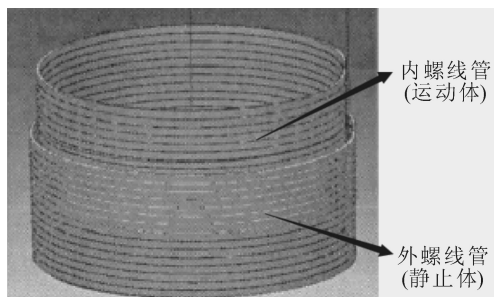


图4 螺线管式线圈结构

Fig. 4 Construction of solenoid coil

从性能方面,螺线管式电磁斥力操动机构与盘式电磁斥力操动机构相比,在相同能量下,螺线管式电磁斥力机构在运动相同路程所用时间较长,电磁力保持的时间和距离较长;盘式线圈电磁操动机构则一开始电磁力很大但保持的距离不长,随着距离的增加下降很快。现今对于螺线管式电磁操动机构国内外研究甚少。仅国内山东大学对螺线管式电磁斥力操作机构进行了一定理论研究,提出了一种螺线管式与盘式的组合式改进结构模型,见图5,在螺线管式线圈下部增设一铜盘线圈,铜盘线圈在螺线管线圈内往返运动^[15],但目前此方案未进行试验验证,有待于进一步的研究。

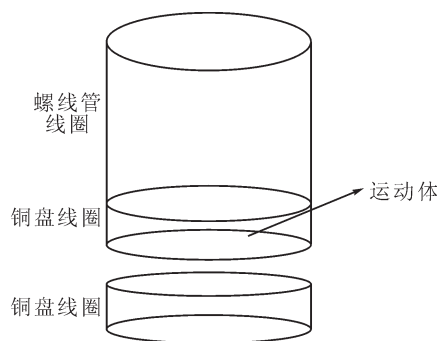


图5 组合式结构

Fig. 5 Modular structure

2.1.3 结论

综上所述,螺旋管式电磁斥力操动机构因参数复杂,目前国内外对其研究较少,有待进一步研究;盘式电磁斥力操动机构因参数相对简单,国内外对其研究比较多,尤其对斥力盘—盘式结构。考虑到实际应用,文中建议电磁斥力操动机构采用目前研究比较多的对斥力盘—盘式结构。

2.2 保持机构

保持机构的作用在于:合闸状态时,可提供克服触头弹簧反作用力与其他反力的有效合闸位置保持力,防止动、静触头受到外界因素作用下出现自动误分闸;分闸状态时,可提供使触头稳定在分闸状态的分闸保持力^[16]。

传统的操动机构设计有较复杂的脱扣、锁扣机构,结构复杂,故障率高,无法实现快速脱扣。目前,常用的保持结构有永磁保持和碟簧保持两种方案,下面就这两种保持方案分别进行介绍。

2.2.1 永磁保持机构

永磁机构是利用永磁体实现合闸保持和分闸保持,现已在中压断路器领域得到成熟应用。根据线圈数量分为单线圈、双线圈、无线圈3种形式,根据保持状态分为单稳态和双稳态两种形式,可根据实际需求进行选择组合使用。永磁机构示意图见图6。

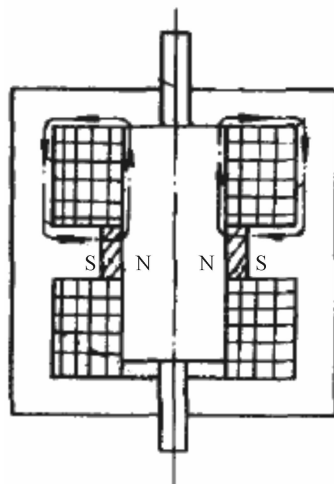


图6 永磁机构示意图

Fig. 6 Schematic diagram for permanent magnet mechanism

其性能根据组合形式不同,存在区别,但基本原理一致,以图6中的双线圈双稳态永磁机构为例。当机构处于合、分闸状态时,线圈中无电流,永久磁铁利用动、静铁心提供的低磁阻抗通道将动铁心保持在合、分闸位置。当提供动作信号时,合、分闸线圈中的电流产生磁场,动、静铁心中的磁场由线圈产生的磁场和永磁体产生的磁场叠加合成,动铁心在线圈与永磁体产生的叠加磁场力的作用下运动^[17]。

在进行直流快速开关保持机构设计时,根据直流快速开关设计需求,合闸、分闸位置均需保持其状态,使用永磁机构时建议选择双稳态形式,同时根据设计需求是否提供合、分闸动力选择单线圈、

双线圈、无线圈一种形式进行组合设计。

目前,国内大连理工、西安交大等机构已对其进行了大量的研究并通过了试验验证。

2.2.2 碟簧保持机构

碟形弹簧作为一种结构简单,故障源少的高可靠性保持机构,具有双稳态特性,可在分、合闸位置提供稳定的分、合闸保持力,提高机构的机械寿命。根据碟簧使用方式不同,分为单碟簧保持和组合碟簧保持机构两种^[18]。

因碟簧保持机构结构相对简单,目前国内外均在对其进行研究,见图 7^[19]、8。直流快速开关设计时可根据设计需求,选择合理保持机构进行设计。

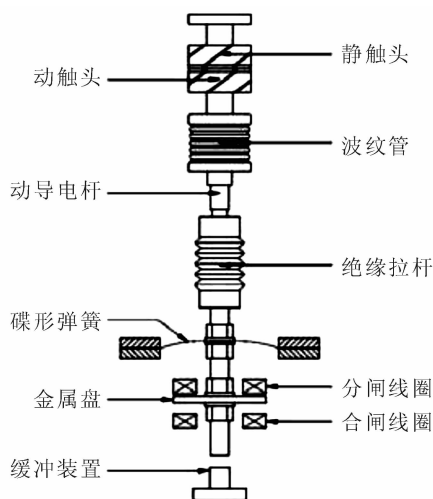


图 7 单碟簧保持示意图

Fig. 7 Schematic diagram for single disc spring keeping mechanism

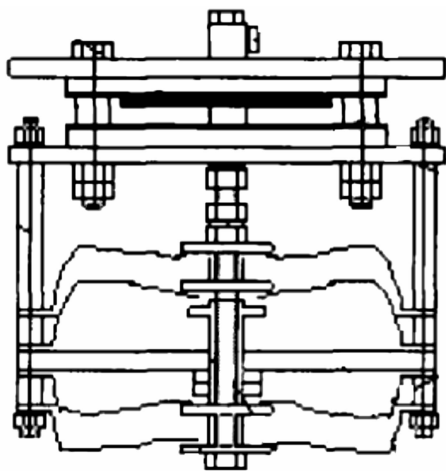


图 8 组合碟簧示意图

Fig. 8 Schematic diagram for combination of disc spring

单碟簧保持方案结构简单,但方案中对碟簧的要求较高,国内现今碟簧技术尚达不到所要求,寿命不足,需定制,技术受限于国外;对于组合式碟簧保持机构,电力科学研究院对其进行了一定的理

论研究,已对其申请专利保护,但未在实际中得以应用。

2.2.3 结论

由上述可知,双稳态永磁保持机构及碟簧保持机构均能实现直流快速开关分、合闸状态的保持,国内外科研机构对其均有一定的研究,直流快速开关保持机构设计时可根据研究特长进行选择设计。

2.3 缓冲装置

缓冲装置用于缓冲分闸末端力和末端速度,因末端速度过大,缓冲行程过短,缓冲设计是直流快速开关设计的难点之一,就缓冲原理来说,主要有弹簧缓冲、电磁斥力缓冲、碰撞缓冲、气(油)缓冲 4 种缓冲方式^[20]。

2.3.1 弹簧缓冲

常规分闸缓冲采用弹簧缓冲,将运动组件的动能转换为弹簧的弹性势能储存起来,既起到分闸缓冲作用,又可提高机构的合闸速度。但直流快速开关末端速度过大,所需要的缓冲弹簧的刚度极大,很难实现,采用此方案需解决安装、合闸弹跳等问题。

2.3.2 电磁斥力缓冲

基于涡流感应原理,在原有斥力机构的基础上再添加一个线圈,将其作为缓冲线圈,可通过精确的控制,在斥力盘运动到行程末期时,在缓冲线圈中通入一个脉冲电流;同理,该脉冲电流在缓冲斥力盘中产生感应涡流,从而对斥力盘施加与斥力盘运动方向相反的力,起到缓冲作用。这种缓冲装置需要精确的控制,增加了机构的复杂性和成本,降低了可靠性。采用此方案设计,必须考虑缓冲装置的复杂性及制作成本。

2.3.3 碰撞缓冲

根据动量和能量守恒定律,两物体发生碰撞时,能量会发生转移;理论上,通过合理设计碰撞物体,可使得碰撞后斥力盘等运动部件的速度降为零,很好地满足于缓冲要求。采用此方案存在增大机构体积,需考虑碰后物体的位置复位,质量需通过实验进行验证选择等问题。

2.3.4 气(油)缸缓冲

气缸缓冲的原理见图 9,其中,斥力盘等效于气缸中的活塞。斥力盘向下运动过程中,压缩气缸下部空气,拉动触头分闸,从而使得下部气压增大,上部气压减小,形成压强差,在斥力盘上产生阻碍斥力盘运动的反力,能够起到很好的缓冲作用^[21]。但生产加工精度要求很高,设计难度很大,另一方面,气缸缓冲也给其他部件带来了一定的负面影响。采用

此方案,需考虑装置的制造精度和装配加工精度。

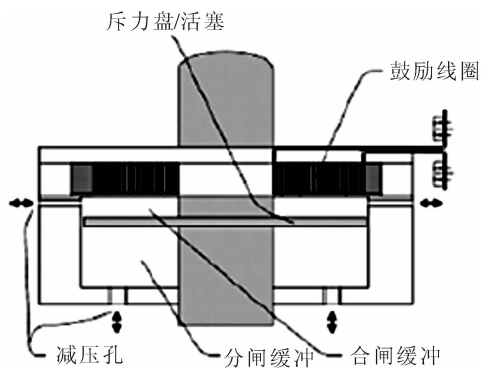


图9 气(油)缸缓冲原理

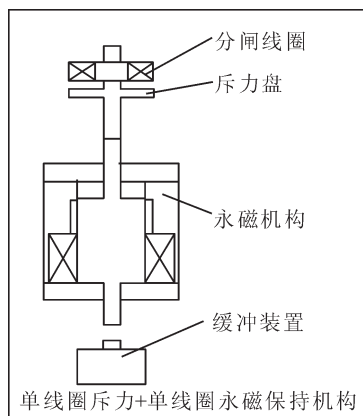
Fig. 9 Moderation theorem for air cylinder (oil cylinder)

2.3.5 结论

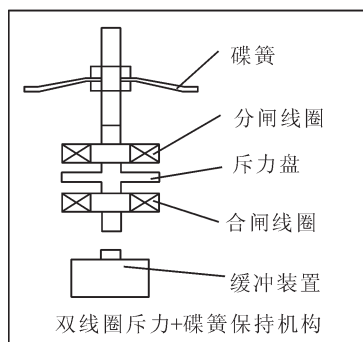
由上述可知,上述4种缓冲装置均能起到一定的缓冲作用,但各自有一些需要解决的问题,直流快速开关设计时,要综合考虑加工可行性、成本进行合理选择。

3 直流快速开关机构设计

由上文可知,直流快速开关设计需要对操动机构、保持机构、缓冲装置3部分进行规划设计,按照上文结论,文中给出如图10两种方案供大家设计参考。



(a)方案1



(b)方案2

图10 直流快速开关设计方案

Fig. 10 Design scheme for DC high-speed switch

如图10所示,方案1操动机构采用单线圈电磁斥力机构,保持机构采用单线圈永磁机构,能够实现快速分闸、慢速合闸,对合闸时间无要求的设计可参照此方案进行设计。

方案2操动机构采用双线圈电磁斥力机构,保持机构采用碟簧保持机构,能够实现快速分闸、快速合闸,需要实现快分、快合的设计可参照此方案进行设计。

4 结语

文中结合电磁斥力机构工作原理,对直流快速开关操动机构、保持机构、缓冲装置不同方案特点及研究现状进行了分析,并给出了建议,根据建议给出直流快速开关机构设计的两种典型方案,可供进一步研究设计参考,为直流快速开关机构的设计与试验提供了指导原则。

参考文献:

- [1] 彭盛家,肖文华,赵喜军. 日产BJF4型直流快速开关[J]. 船电技术,2002,22(3):20-22.
PENG Shengjia, XIAO Wenhua, ZHAO Xijun. DC high-speed switch of Japan BJF4 type[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2002, 22(3): 20-22.
- [2] 王子建,何俊佳,尹小根,等. 电磁斥力机构的动力学特性仿真与实验研究[C]//第一届电器装备及其智能化学术会议论文集. 西安: [s.n.], 2007: 124-131.
WANG Zijian, HE Junjia, YIN Xiaogen, et al. Simulation and experimental research on dynamic characteristics of electromagnetic repulsion mechanism[C]// The Academic Conference Proceedings of the First Electric Equipment and Intelligent. Xi'an: [s.n.], 2007: 124-131.
- [3] 朱天胜,史宗谦,贾申利,等. 真空直流断路器速动机构的研究[C]//第一届电器装备及其智能化学术会议论文集. 西安: [s.n.], 2007: 475-450.
ZHU Tiansheng, SHI Zongqian, JIA Shenli, et al. Investigations on high-speed operating mechanism of Vacuum dc circuit breaker[C]// The Academic Conference Proceedings of the First Electric Equipment and Intelligent. Xi'an: [s.n.], 2007: 475-450.
- [4] 贺开华. 电磁斥力机构中线圈外半径与轴向厚度之比的最优范围[J]. 船电技术, 2012, 32(12): 35-37.
HE Kaihua. The optimal range of the rate of the outer radius and the axial thickness of the coil in the electromagnetic repulsion actuator[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2012, 32(12): 35-37.
- [5] 李品德,李梦菲,陈刚. 基于快速真空断路器的深度限流装置的风险评价[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 80-84.
LI Pinde, LI Mengfei, CHEN Gang. Risk assessment of deep

- short-current limiting device with zero-loss based on fast-speed vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 80-84.
- [6] 刘彬, 吕玮, 石亲民, 等. 直流 20 kV 快速负荷开关设计及应用[J]. 电工电气, 2014(9): 42-45.
LIU Bin, LYU Wei, SHI Qinmin, et al. Design and application of DC 20 kV fast load switch[J]. Electrotechnics Electric, 2014(9): 42-45.
- [7] 武瑾, 庄劲武, 王晨, 等. 直流 5 kA 电磁斥力驱动式高速触头操动机构动作可靠性的优化设计[J]. 船电技术, 2013(10): 1-5.
WU Jin, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Reliability optimization design of DC 5 kA high-speed contacts operation system driven by electromagnetic repulsion mechanism[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2013(10): 1-5.
- [8] 丁振林. 熔丝型混合式直流限流开关的分析与设计[J]. 中国舰船研究, 2008, 3(1): 77-80.
DING Zhenlin. Analysis and experiment of a novel ZCS hybrid DC current-limiting switch[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2008, 3(1): 77-80.
- [9] 毛海涛, 陆恒云. 快速电磁斥力机构的有限元分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1420-1425.
MAO Haitao, LU Hengyun. Finite element analysis of fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1420-1425.
- [10] 田鹏. 一种永磁保持式新型高速斥力机构的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
TIAN Peng. The research on a novel repulsion actuator with permanent magnetic holding structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [11] 陈宇硕. 10 kV 高速组合式开关设计与优化分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
CHEN Yushuo. Design and optimization analysis of 10 kV high-speed circuit breakers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [12] 孙斌. 快速电磁操动机构的优化设计与动态特性分析[D]. 济南: 山东大学, 2013.
SUN Bin. Optimization design and dynamic characteristics analysis of fast electromagnetic mechanisms[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [13] 曹鹏飞, 金雪丰, 任志刚. 用于直流快速开关的电磁斥力机构仿真及优化设计[J]. 船电技术, 2009, 29(9): 11-13.
CAO Pengfei, JIN Xuefeng, REN Zhigang. Simulation and optimization design of electromagnetic repulsion mechanism for DC high-speed switch[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2009, 29(9): 11-13.
- [14] 郑占锋. 基于换流技术的快速直流真空开关理论与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
ZHENG Zhanfeng. Theory and application of high-speed DC vacuum switch based on active commutation circuit[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [15] 赵夏. 快速电磁操动机构的拓扑结构及放电回路优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
ZHAO Xia. Optimization topology and circuit of fast electromagnetic mechanisms[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [16] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械出版社, 2002.
LIN Xin. Permanent magnetic actuator and vacuum breaker[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [17] 邹鑫. 72.5 kV 真空断路器磁力机构的设计与仿真研究[D]. 四川: 西华大学, 2013.
ZOU Xin. Design and simulation research on 72.5 kV EMFA for vacuum circuit breaker[D]. Sichuan: Xihua University, 2013.
- [18] 孟君. 快速斥力机构的设计与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
MENG Jun. Research on structure design and application of fast repulsion mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [19] 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.
- [20] 曹鹏飞, 姜楠, 赵成宏. 电磁斥力机构缓冲方法研究[J]. 船电技术, 2014, 34(7): 35-37.
CAO Pengfei, JIANG Nan, ZHAO Chenghong. Research on damping method for electromagnetic repulsion mechanism[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2014, 34(7): 35-37.
- [21] 姜楠. 电磁斥力机构设计方法研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2013.
JIANG Nan. Research on the design method of the electromagnetic repulsion mechanisms[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2013.

贾伟(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事高、低压成套开关设备, 特高压直流输电直流场设备的研发主持工作。

牛万字(1984—), 男, 工程师, 主要从事高、低压成套开关设备, 特高压直流输电直流场设备研究工作。

王瑞(1988—), 女, 助理工程师, 主要从事高、低压成套开关设备的研究。

左利博(1990—), 男, 助理工程师, 主要从事高、低压成套开关设备的研究。