

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.007

快速直流断路器中操动机构的仿真研究

侯雨杉^{1,2}, 史宗谦², 刘少飞², 李 昇²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 直流输电电压等级的提高使之研制出相应的直流开断装置意义重大;而断路器操动机构的可靠性直接影响着其开断性能。笔者针对直流开断装置中断路器的操动机构展开研究,建立了一种基于电磁驱动、永磁弹簧保持的电磁斥力机构仿真模型,对其电磁—结构耦合过程和电磁—机械运动耦合过程进行了分析。仿真结果表明:当分闸电容的充电电压为4 000 V时,电磁斥力机构的电磁斥力峰值约为128 kN,金属盘的平均速度能达到3.7 m/s。金属盘的应力峰值出现在靠近驱动轴一侧(内侧),并从内侧至外侧逐渐减小。进一步设计并研制了实验样机,并通过实验对仿真结果进行了验证,两者具有较好的一致性。

关键词: 直流开断装置;电磁斥力机构;多物理场耦合分析

Simulation Study of Operation Mechanism in High-speed DC Circuit Breaker

HOU Yushan^{1,2}, SHI Zongqian², LIU Shaofei², LI Sheng²

(1. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The improvement of DC transmission voltage level makes it important to develop corresponding DC interrupting device, and the reliability of circuit breaker's operation mechanism directly affects its interruption performance. In this essay, the operating mechanism of the circuit breaker in the DC interrupting device is researched, and a simulation model of the high-speed operating mechanism which is driven by electromagnetic repulsion force and held by permanent magnet and spring is proposed to analyze the electromagnetic-structural coupling process and electromagnetic-mechanical coupling process of the electromagnetic repulsion mechanism (ERM). The simulation results show that when the charging voltage of switching capacitor is 4 000 V, the electromagnetic repulsion force of the ERM is about 128 kN, and the average speed of the metal plate can reach 3.7 m/s. The stress peak of the metal plate occurs near the inside of the driving axis and decreases gradually from the inside to the outside. Furthermore, a prototype of the ERM is designed and developed, and the simulation results are verified through experiments. The two results have good consistency.

Key words: DC interruption device; electromagnetic repulsion mechanism; multi-physics coupling analysis

0 引言

由于中国能源储备和电力负荷分布极不均衡,建立长距离、大容量、低损耗的输电系统已成为我国电网发展的必然趋势^[1],而高压直流输电(HVDC)

与交流输电相比,更加经济,同时线路损耗更小,因而更加适合远距离输电^[2]。然而,随着HVDC电网的发展和运行电压等级的逐渐提高,对相应的输电技术要求也就越高^[3]。其中,一项巨大的挑战就是限制短路电流的上升^[4]。

收稿日期:2019-08-21; 修回日期:2019-10-18

基金项目:国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项课题(2015GB121005);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB251001)资助。

Project Supported by National Magnetic Confinement Fusion Energy Research Project (2015GB121005), National Key Basic Research Program of China (973 Program) (2015CB251001).

这是因为一旦输电线路发生短路故障, 系统故障电流会以较快的速度上升到一个相当高的水平, 这时候需要直流断路器来迅速动作, 否则将会引起巨大的安全事故和造成经济损失^[5]。

在直流开断过程中, 由于电流不存在自然过零点, 相比于交流开断来说电弧更难熄灭。基于人工过零的直流开断原理图见图 1^[5]。主要由 3 个支路组成: i_L 所在的载流支路; i_c 所在的电流转移支路; 和 MOV 所在的能量吸收支路。电流转移支路由预充电的换流电容 C_c 、换流电感 L_c 和换流开关 S_c 串联而成。

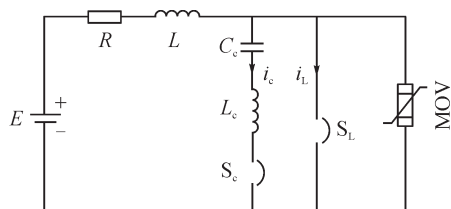


图 1 基于人工过零的直流开断原理图

Fig. 1 The DC interruption schematic diagram based on artificial zero crossing

正常运行时, 电流从载流支路中流过。当断路器收到分闸命令后, 载流开关 S_L 打开, 在电极间形成电弧, 当其开距达到一定开距时, 闭合换流开关 S_c , 换流电容通过换流电感和载流支路产生振荡电流 i_c , 与载流开关中的电流 i_L 进行叠加产生零点, 使载流开关中的电弧在电流强迫过零时熄灭, 电流转移至电流转移支路。接着, 换流电容被反向充电, 当其电压超过避雷器(MOV)动作电压时, 电流转移至能量吸收回路, 直到避雷器电流过零, 完成直流开断的全过程。

在直流开断的过程中, 载流开关需要承担将大电流迅速开断的任务, 目前应用较为广泛的载流开关是真空开关^[6]。大量的前期研究表明增加分闸速度能增大反向电流投入时刻电极间的开距, 有利于电弧熄灭后剩余等离子体的扩散, 也即增加操动机构的分闸速度有利于电弧的熄灭^[7]。目前, 配合真空开关的各传统操动机构由于结构复杂、速度较慢等原因不适合用于需要快速开断的场合^[8]。近年来, 基于涡流效应的电磁斥力机构发展迅猛, 和传统操动机构相比, 该机构结构简单, 分闸速度快, 动作分散性小^[9]。因此其应用于直流开断领域具有较强的针对性。

对于电磁斥力机构的研究最早可以追溯到 1969 年, 由国外的学者 S.Basu 和 K.D.Srivastava 等首次提出电磁斥力机构, 并推导了电磁斥力的求解过程^[10]。后来, 受到机械制造、励磁电源容量等技术的制约, 其真正应用在 20 世纪 90 年代^[11]。

对电磁斥力机构的研究, 国外以德国^[12]、日

本^[13]、荷兰^[9]等国家的科研机构研究居多, 国内以清华大学^[14-15]、西安交通大学^[5-6,16]、华中科技大学^[11,17]、山东大学^[8,18-19]、大连理工大学^[17,20-21]等高校为主, 主要集中在求解电磁斥力机构的电磁场和动力学特性, 而较少考虑到金属盘在多次分合闸情况下可能产生变形的情况。

另外, 在实际设计时, 为了保证动、静触头具有良好的接触, 以减少动静触头间的接触电阻, 需要在合闸保持位置给予动静触头间一定大小的触头压力, 该触头压力由触头弹簧提供。合闸时触头弹簧的压缩量折算到动触头沿轴线运动的距离, 称之为超行程。由于超行程的存在, 操动机构实际上是由两个运动部分(由动触头、导电夹和软连接等部件组成的运动部分以及金属盘、驱动轴、动铁心等部件组成的运动部分)通过触头弹簧连接而成, 其运动过程应包含两个运动部分之间的碰撞过程, 目前针对该过程的仿真研究较为少见。

因此, 文中针对电磁斥力机构的快速分闸过程展开研究, 获得了机构在分闸条件下的电流、电磁力等动态曲线, 分析了金属盘结构的应力分布, 判断出金属盘结构的最危险区域, 并通过对其结构进行改进, 增加了金属盘的结构强度。最后, 笔者通过实验方法对仿真结果进行了验证。

1 电磁斥力机构的工作原理

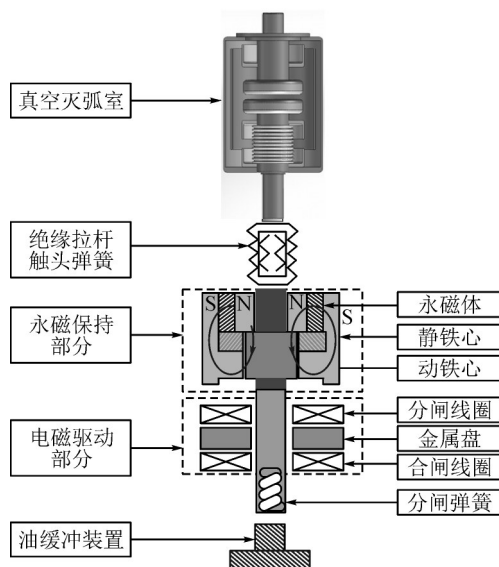
文中设计了基于电磁斥力机构的真空开关装置结构图, 见图 2。主要由真空灭弧室、绝缘拉杆、触头弹簧、永磁保持部分、电磁驱动部分及油缓冲装置等部分组成。

该机构利用电磁斥力实现分、合闸, 利用永磁吸力实现合闸保持, 利用弹簧实现分闸保持。为了防止触头弹跳而导致电弧的重燃, 还采用油缓冲器来减小机构运动末期的速度。

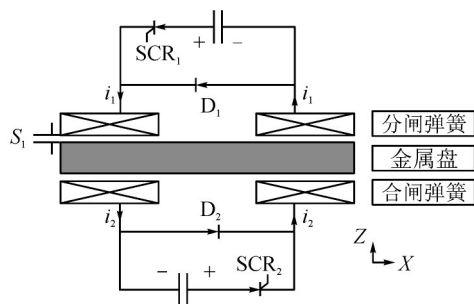
2 仿真模型的建立

多物理场的耦合分析流程见图 3。通过求解电磁斥力机构的电磁场, 获得金属盘的体积力密度和电磁力, 再分别进行金属盘的应力分析和动力学分析。

电磁斥力机构的电路拓扑结构见图 4。 C_1 为分闸电容器; L_1 和 R_1 分别为分闸线圈的电感和电阻; L_0 和 R_0 分别为线路的杂散电感和杂散电阻; D_1 为反向续流二极管; SCR_1 为晶闸管; i_1 为分闸线圈的电流。



(a) 真空开关的拓扑结构



(b) 驱动电路

图2 基于电磁斥力机构的真空开关装置结构图

Fig. 2 The structure of vacuum switch based on ERM

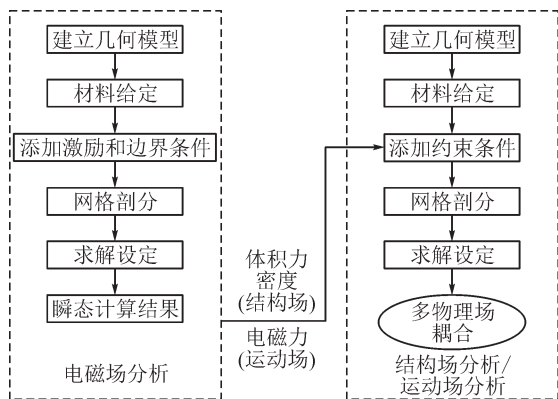


图3 多物理场耦合分析流程

Fig. 3 Multi-physics coupling analysis process

运动过程的简化几何模型见图5。 S_2 即为超行程, S_3 即为金属盘下导杆距离缓冲器的距离。运动质量 m_2 的约束关系为:其与运动质量 m_1 之间有触头弹簧力和接触力(碰撞力),与油缓冲器之间有接触力(碰撞力),与弹簧挂板之间有分闸弹簧力,同时,运动质量 m_2 还受到由驱动轴传递的电磁力,由于与电磁力和碰撞力相比,金属盘及驱动杆运动过程中的摩擦力较小,因此忽略该摩擦力的作用。

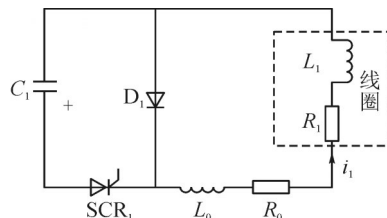


图4 电磁斥力机构的分闸电路拓扑结构

Fig. 4 The topology of the switching circuit of the ERM

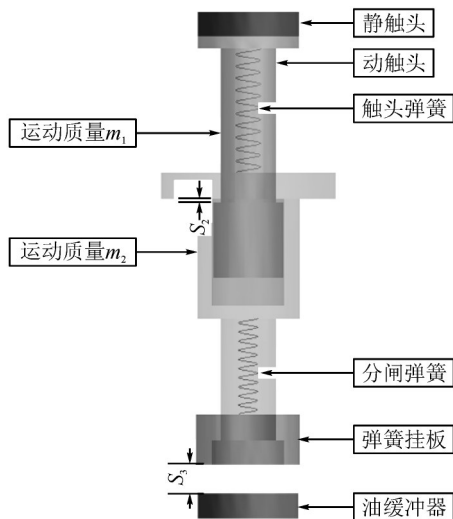


图5 电磁斥力机构的仿真模型

Fig. 5 The simulation model of ERM

需要指出的是,在现阶段的研究中,笔者主要关注机构初期运动的高速性,而油缓冲过程对于电流开断的前期过程影响较小,因此没有仿真研究机构运动末期的油缓冲特性。

各主要仿真参数的物理意义及初始设置见表1。

3 仿真结果

3.1 动态曲线

当 U_1 为4 000 V,忽略实际线路中杂散电阻和杂散电感的影响,求解出的电磁斥力机构的动态曲线见图6、7。

计算结果表明,随着线圈电流的迅速上升,电磁斥力也迅速增大,在0.125 ms时刻达到峰值,此时电磁斥力峰值高达128 kN,电流峰值约为7 900 A,此后由于二极管的续流作用,电流和电磁斥力逐渐减小,整个电容放电过程持续时间极短,约为3 ms。碰撞力的峰值较小,约为65 kN,持续时间约为0.4 ms。

运动质量 m_2 的速度最大值约为5.8 m/s,碰撞时刻约为0.6 ms,此时运动质量 m_2 的位移为3 mm,正好为超行程的值,碰撞后的速度迅速降至约为3m/s,此后其在分闸弹簧的作用下,逐渐加速。运动过程的平均速度达到3.7 m/s。

表1 主要仿真参数及其初始值

Table 1 main simulation parameters and their initial values

参数	初始值	参数	初始值	参数	初始值	参数	初始值
金属盘外半径/mm	90	线圈线径/mm	1×5	电感 L_0 /H	0	超行程 s_2 /mm	3
金属盘内半径/mm	8	线圈匝数/匝	27	电阻 R_0/Ω	0	距离 s_3 /mm	8.5
金属盘厚度/mm	20	电容 $C_1/\mu\text{F}$	250	质量 m_1/kg	2.099	—	—
线圈外半径/mm	90	电压 U_1/kV	4	质量 m_2/kg	5.051	—	—
线圈内半径/mm	40	电阻 $R_1/\text{m}\Omega$	39	间隙 s_1/mm	4.5	—	—

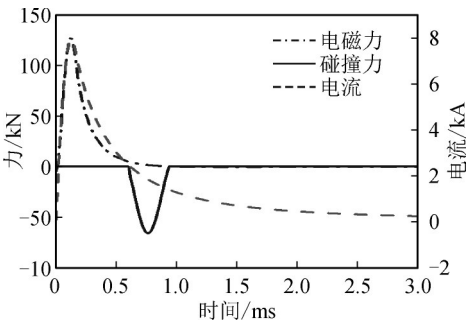


图6 电流、电磁力及碰撞力曲线

Fig. 6 Current, electromagnetic force and collision force curves

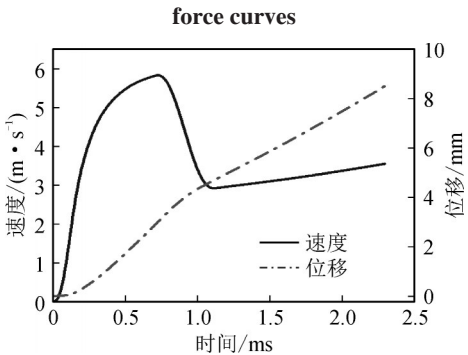


图7 运动质量 m_2 的速度及位移曲线

Fig. 7 Velocity and displacement curves of m_2

因此,电磁斥力机构的分闸过程为:分闸时,运动质量 m_2 在电磁力的作用下快速运动,运动至 S_2 (超行程)时,与运动质量 m_1 发生碰撞,此时动静触头分离,碰撞后 m_2 立即减速, m_1 立即加速,进一步地,当其运动至 S_3 处,运动质量 m_2 在油缓冲器的作用下,迅速减速,直到在分闸弹簧作用下保持在分闸保持位置。

3.2 金属盘应力分析

分闸条件下应力峰值时刻(0.165 ms)的金属盘等效应力分布见图8。从图8可以看出,应力从内侧至外侧逐渐减小,最大等效应力出现在金属盘的内侧(图8中Max标注),为88.55 MPa。纯铝的屈服强度为100 MPa,仿真结果表明,该仿真条件($U_1=4\,000\text{ V}$)下,金属盘的应力值未达到其屈服强度,因此该条件下铝盘不会发生明显的塑性变形。

由于金属盘内侧的应力最大,所以其内侧是金

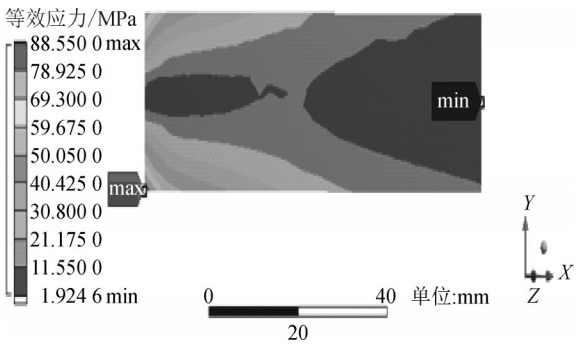


图8 应力峰值时刻的金属盘等效应力

Fig. 8 Equivalent stress of metal plate at the peak time

属盘结构的最危险区域。当需要提高其结构强度时,考虑适当增加金属盘内侧的厚度。笔者在金属盘与驱动轴的结合处进行了一定程度的加厚,加厚后的金属盘呈“碟形”,其余参数保持一致,计算结果见图9。对比图8、9发现,同等外界条件下,“碟形”的金属盘的等效应力更小,因而机械强度更高。

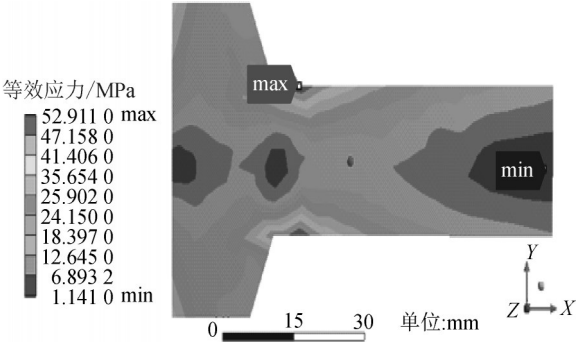


图9 “碟形”金属盘在应力峰值时刻的等效应力

Fig. 9 Equivalent stress of the disc shaped metal plate at the peak time

4 实验验证

为了验证仿真结果的正确性,笔者设计完成了快速真空开关的实验样机,见图10。其电压等级为12 kV。考虑到散热性、焊接接触面积和抗疲劳度的影响,线圈采用扁铜线绕制、环氧树脂浇注而成。真空灭弧室的型号为ZKTD630/12-25。脉冲晶闸管SCR₁/SCR₂和二极管D₁/D₂的型号分别为MKPX 050-065和ZPX 1900-65。

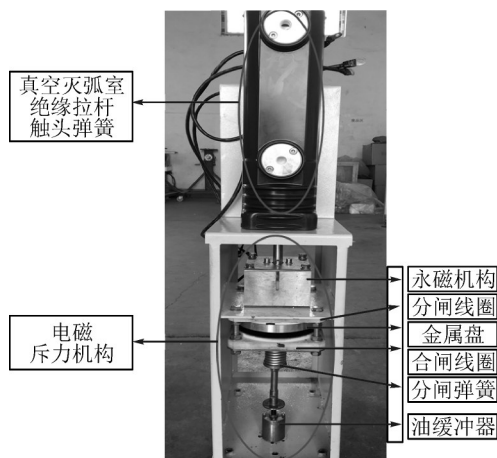


图10 实验样机

Fig. 10 Experimental prototype

设计实验电路见图11。由控制器触发晶闸管 SCR_1 和 SCR_2 的导通,触发信号为 CH_1 ,通过罗氏线圈测出线圈的电流信号 CH_2/CH_3 ,并分别传送给示波器加以显示,动静触头之间串联6 V电源和电阻(兆欧级),可通过读取动静触头两端的电压信号 CH_4 来获取操动机构的固有分闸时间。同时由高速摄影仪对金属盘的运动情况进行记录。通过对拍摄的图片进行处理,可以得到金属盘的实际位移曲线。

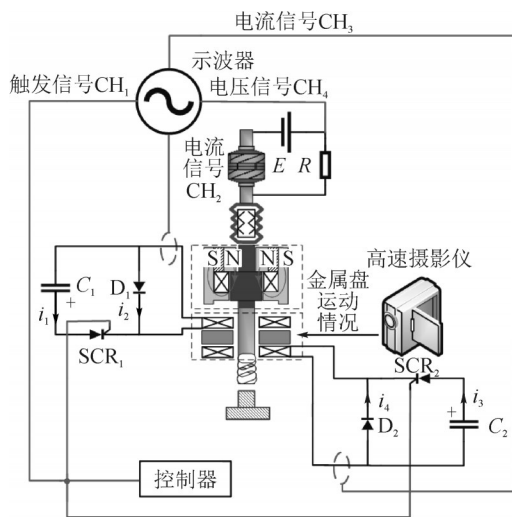
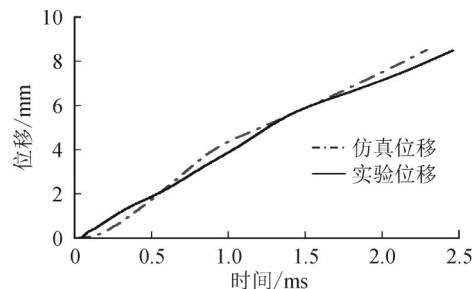


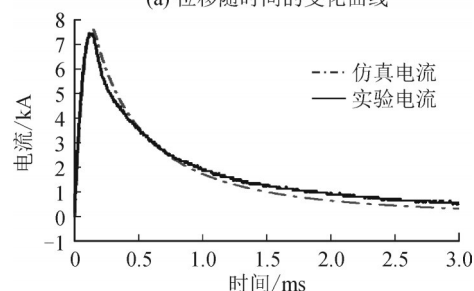
图11 实验原理图

Fig. 11 Experimental schematic diagram

经测得实验样机中线圈的电阻约为 $39\text{ m}\Omega$,线路杂散电阻 R_0 约为 $5\text{ m}\Omega$,线路杂散电感 L_0 约为 $6\text{ }\mu\text{H}$ 。仿真时将杂散电阻和杂散电感的影响因素考虑进去,对仿真模型进行修正后,将得到的仿真结果与实验结果进行对比,见图12。从图12可以看出,仿真结果与实验结果比较吻合。由此,可以证明文中所提出的仿真方法能够较为准确地反映电磁斥力机构的实际运动特性。



(a) 位移随时间的变化曲线



(b) 电流随时间的变化曲线

图12 实验结果与仿真结果对比($U_1=4\text{ }000\text{ V}$)Fig. 12 Comparison between experimental results and simulation results($U_1=4\text{ }000\text{ V}$)

5 结论

针对用于直流断路器的快速操动机构展开研究,建立了电磁—结构耦合和电磁—机械运动耦合的仿真模型,对其运动过程进行了仿真计算。主要得到了以下几点结论:

1)当分闸电容的充电电压为 $4\text{ }000\text{ V}$ 时,线圈电流峰值约为 $7\text{ }900\text{ A}$,电磁斥力峰值约为 128 kN ,金属盘的平均速度约为 3.7 m/s 。当金属盘运动至超行程时,会与动触头所在部分发生碰撞,碰撞瞬间产生的冲击力巨大,使得其速度明显减小。

2)金属盘的应力峰值出现在靠近驱动轴一侧(内侧),并从内侧至外侧逐渐减小。若在金属盘内侧进行一定程度的加厚,可以提高金属盘的结构强度。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6.
- [2] KIM B C, CHUNG Y H, HWANG H D, et al. Development of HVDC circuit breaker with fast interruption speed[C]// International Conference on Power and Energy. [S.l.]: [s.n.], 2015: 2844-2848.
- [3] 徐 政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

- XU Zheng. Flexible DC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [4] 张文亮, 吴维宁, 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9):16-18.
ZHANG Wenliang, WU Weining, HU Yi. Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9):16-18.
- [5] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11):1-9.
SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker: a review[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11):1-9.
- [6] 史宗谦, 贾申利, 朱天胜, 等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3):18-22.
SHI Zongqian, JIA Shenli, ZHU Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3):18-22.
- [7] QIN T, DONG E, WANG Y, et al. Influence of the contact opening speed on DC vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(3):878-883.
- [8] 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.
- [9] ROODENBURG B, EVENBLIJ B H. Design of a fast linear drive for(hybrid) circuit breakers—development and validation of a multi domain simulation environment[J]. Mechatronics, 2008, 18(3): 159-171.
- [10] BASU S, SRIVASTAVA K D. Electromagnetic forces on a metal disk in an alternating magnetic field[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1969, PAS-88(8): 1281-1285.
- [11] 宁少飞. 电磁斥力操动机构电磁效率优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
NING Shaofei. Study on the optimization of electromagnetic efficiency of electromagnetic repulsive operating mechanism[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.
- [12] JUNGBLUT R, SITTING R. Hybrid high-speed DC circuit breaker using charge-storage diode[C]//Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference.[S.l.]: IEEE, 1998:95-99.
- [13] TSUKIMA M, TAKEUCHI T, KOYAMA K, et al. Development of a high-speed electromagnetic repulsion mechanism for high-voltage vacuum circuit breakers[J]. Electrical Engineering in Japan, 2008, 163(1):34-40.
- [14] 李庆民, 刘卫东, 徐国政, 等. 高压快速转换开关的研制[J]. 高压电器, 2003, 39(6):6-7.
LI Qingmin, LIU Weidong, XU Guozheng, et al. Research on high voltage fast transfer switch[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6):6-7.
- [15] WEN W, HUANG Y, Al-dweikat M, et al. Research on operating mechanism for ultra-fast 40.5 kV vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2553-2560.
- [16] 史宗谦, 张营奎, 贾申利, 等. 基于人工过零的双向直流开断电路及其开断方法: CN103779828A[P]. 2014-07-10.
SHI Zongqian, ZHANG Yingkui, JIA Shenli, et al. Bi-directional DC interrupting circuit based on artificial zero crossing and its opening method: CN103779828A[P]. 2014-07-10.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李博, 董恩源, 李晓玮, 等. 基于Ansys的高速斥力机构的分析与实验[J]. 电气开关, 2006, 44(4):40-44.
LI Bo, DONG Enyuan, LI Xiaowei, et al. Analysis and experiment of high-speed repulsion driver based on Ansys[J]. Electric Switchgear, 2006, 44(4):40-44.
- [21] 董恩源, 李博, 邹积岩. 超高速斥力机构与永磁机构的实验性能对比分析[J]. 高压电器, 2007, 43(2):125-126.
DONG Enyuan, LI Bo, ZOU Jiyan. Comparison analysis of experiment performance between high-speed repulsion mechanism and permanent magnetic mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2):125-126.
- 侯雨杉(1993—), 女, 硕士, 研究方向为六氟化硫电气设备运行状况与评估。