

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.009

基于永磁斥力机构的真空快速开关的研究

艾绍贵¹, 李秀广^{1,2}, 杜 玮³, 张礼才², 孙丽琼², 王 博¹, 王银明¹

(1. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 银川 750001; 2. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 3. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 基于永磁斥力机构的真空快速开关因结构简单、动作迅速、可靠性高、容易实现电子控制和开关智能化等优点,引起了国内外学者的重视和研究。为了进一步提高永磁斥力机构的运动速度,为真空快速开关提供技术支持,文中采用有限元方法对影响永磁斥力机构的因素进行了研究。在用Maxwell建立永磁斥力机构的简化模型后,计算了基于永磁斥力机构的真空快速开关的动作特性,并采用单一变量法研究了包括运动部分质量、金属盘尺寸及直流、外接电路参数对机构运动的影响,并根据计算结果制作了12 kV样机。仿真结果表明,减少运动部分质量、提高充电电容的电压等方式能有限提高机构的运动速度。而样机实验结果表明,该快速开关能在5 ms之内可靠分闸,动作分散度小于 ± 0.2 ms,验证了仿真结果的正确性。同时,为进一步提高真空快速开关的分闸速度,提出在不影响电磁斥力和满足机械强度的情况下,通过沿金属盘径向方向打孔的方式以降低金属盘质量的方案,并得到实验结果有效验证。

关键词: 永磁斥力机构; 真空开关; 快速开关

Study on High Speed Vacuum Switch Based on Permanent Magnetic Repulsion Mechanism

AI Shaogui¹, LI Xiuguan^{1,2}, DU Wei³, ZHANG Licai², SUN Liqiong²,
WANG Bo¹, WANG Yinming¹

(1. Electric Power Research Institute of Ningxia Electric Power Company of State Grid Corporation of China, Yinchuan 750001, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Because of the advantages of simple structure, quick action, high reliability, easy realization of electronic control and intelligent switch, high speed vacuum switch based on permanent magnetic repulsion mechanism has attracted the attention of scholars both at home and abroad. In order to improve the speed of permanent magnetic repulsion mechanism and to provide technical support for the high speed vacuum switch, this paper studies the influence factors of permanent magnetic repulsion mechanism by using the finite element method. After the simplified model of permanent magnetic repulsion mechanism is built by Maxwell, the opening operation performance is simulated by different masses of moving part and size of metal repulsion plate, different parameters of external circuit by the single variable method. A prototype of 12 kV high speed vacuum switch is made according to the simulation results. Simulation result appears the lower mass of moving part and the higher voltage of charging capacity lead to higher speed of mechanism. The experimental results agree well with the simulation and it shows that the switch can open in 5 ms reliability, and the disposability of opening operation is less than ± 0.2 ms. In the meantime, in order to improve the opening velocity of the switch, a new method is proposed that is punching in the metal plate to reduce the mass of moving parts. Because punch holes are along radial direction, eddy current effect cannot be affected. It is also verified by the experimental results.

Key words: permanent magnetic repulsion mechanism; vacuum switch; high speed switch

收稿日期:2016-07-21; 修回日期:2016-09-04

基金项目:国家电网公司科技项目(5229DK150004)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5229DK150004).

0 引言

电力变压器是电力系统中重要的输变电设备之一,提高电力变压器的运行可靠性,对整个电网的安全可靠运行具有重要的意义。近年来,随着国民经济的快速发展和居民生活水平的不断提高,城镇电力负荷水平持续上升,电网规模越来越大,造成短路容量与短路电流不断增大,严重影响电力变压器的安全运行^[1-6]。为了降低短路冲击电流对电力变压器的冲击,提高大型变压器运行可靠性,设计时将限流电抗器与变压器进行一体化设计得到的变阻抗节能变压器中,通过开关控制限流电抗器投切。正常工作时,限流电抗器被断路器短接;当短路故障发生时,断路器开断,限流电抗器投入系统,限制短路电流^[7-8]。

目前,传统断路器大多数存在开断时间长的缺点,断路器固有分合闸时间为 25~80 ms,对于 50 Hz 电流系统而言,短路后 5~10 ms 内达到冲击电流最大值。为了保护电力变压器等其他设备,需要控制电抗器投切的开关能够在较短时间内(<5 ms)将电抗器投入。因此,基于涡流原理的永磁斥力机构引起了人们的广泛关注^[9-15]。这种基于永磁斥力机构的真空快速开关应用于变阻抗节能变压器中,有效提高了开关的开断速度和开断能力,达到了保护电力变压器的要求。

文[16-18]利用有限元方法,计算得到了金属盘、分闸线圈的结构参数及储能电容的容量对电磁斥力的影响;文[19]采用理论分析结合有限元仿真的方法,分析了电磁斥力机构驱动电容参数对电磁斥力的影响;文[20]从数学模型的角度,推导出了等效电阻、电感与脉冲电流、感应电流、电磁斥力等机构参量的数学表达式;文[21]采用一种机械弹簧式双稳保持结构,通过仿真分析研究了不同结构参数对电磁推力机构动态特性的影响。

文中采用永磁保持、电磁斥力操动相结合的方式设计真空快速开关,永磁保持部分采用分离磁路的方法进行保持,有效降低了永磁力在开关动作过程中的阻碍作用。文中通过有限元方法分析了影响真空快速开关分合闸运动的因素,提出了通过沿径向打孔减轻斥力盘质量的优化方法。根据仿真结果成功制作 12 kV 真空快速开关样机,并通过实验研究证明其结果正确性。

1 真空快速开关的工作原理

关于电磁斥力机构的研究已经具有 30 余年的

历史。目前,电磁斥力机构的结构形式主要有 4 种:①盘式线圈及金属盘;②盘式线圈及金属盘外加磁性元件;③双盘式线圈;④圆通式线圈及金属圆筒。文中采用的结构是第 1 种,其结构原理见图 1。其主要由真空灭弧室、电磁力斥力机构和永磁保持机构组成。真空灭弧室动触头经过传动杆与金属斥力盘、保持动铁心连接。在合闸位置时,永磁体产生的永磁力将保持用动铁心可靠地保持在合闸位置,通过传动杆进而将金属盘和动触头保持在合闸位置。

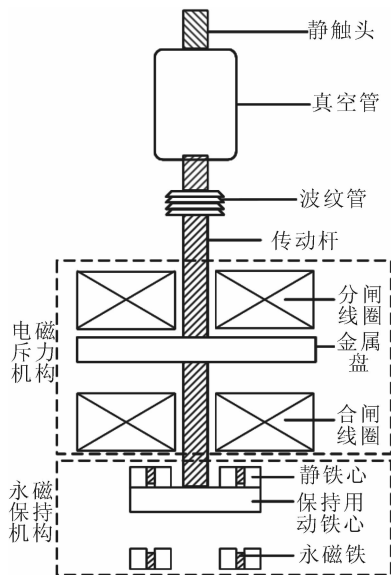


图 1 基于永磁斥力机构的真空快速开关结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high speed vacuum switch with permanent magnetic actuator

电磁斥力机构的简单模型见图 2,其基本工作原理如下:①如图 2(a),当开关接到合闸命令时,开关 K 闭合,预先充好的电容 C 向合闸线圈放电,从而产生持续几 ms 的脉冲电流,励磁线圈在此脉冲电流作用下产生变化磁场。在涡流效应的作用下,金属盘在此情况下迅速远离合闸线圈,通过传动杆驱动真空灭弧室的动触头动作,从而实现快速真空开关的快速合闸,最后由永磁保持机构保持;②如图 2(b),分闸流程与合闸流程相似,这里不再赘述。

2 真空快速开断影响因素分析

2.1 永磁机构仿真模型的搭建

文中利用 Maxwell 进行基于永磁斥力机构的真空快速开关开断过程的仿真研究。由于永磁机构是个圆周对称的,因此在建模时,文中只取了一个截面进行了分析,并将某些机构进行了省略和简化。所搭建的模型见图 3,其分为 4 个部分,分闸线圈、合闸线圈、金属斥力盘以及永磁保持机构。

12 kV 真空灭弧室主要技术参数见表 1。对于

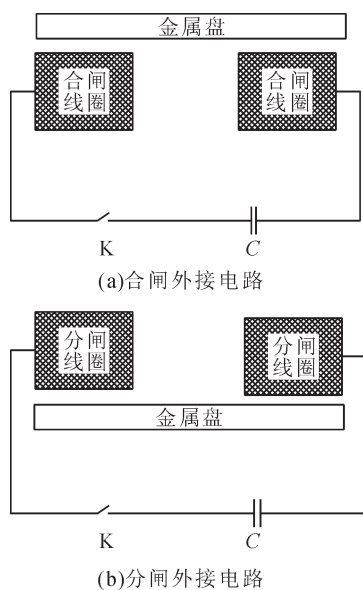


图2 电磁斥力机构模型

Fig. 2 Electromagnetic repulsion mechanism model

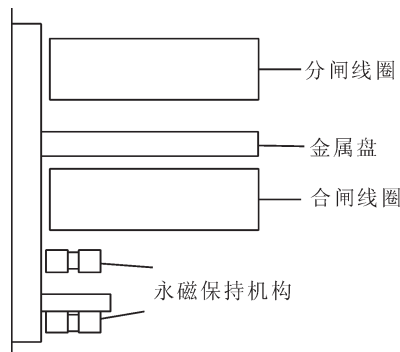


图3 基于永磁保持的电磁斥力机构仿真模型

Fig. 3 Simulation model for electromagnetic repulsion mechanism with permanent magnetic actuator

12 kV 真空灭弧室,触头弹簧压力为 5 000 N,再加上灭弧室和永磁机构运动部件的重力,保留 20%的裕量,永磁保持部分需提供约 6 000 N 左右的合闸保持力。而在分闸位置主要克服灭弧室自闭力和波纹管反力,分闸保持力需要约 1 500 N 左右。

表1 12 kV真空灭弧室主要技术参数

Table 1 Parameters of 12 kV vacuum chamber

主要机械参数	数值
触头开距/mm	9.0±1.0
超行程/mm	4.0±1.0
额定触头压力/N	4 800.0±200.0
运动部分质量/kg	3.5

为计算方便进一步简化模型,将电磁斥力部分与永磁保持部分分开建模,首先计算永磁体作用下永磁保持力随机构行程的变化曲线,将该曲线和触头弹簧力作为机构负载反力,加载到电磁斥力机构仿真模型中,最后求得斥力结构的运动特性。

永磁体作用下机构的永磁力随机构行程的变化关系见图4。从图4中可以看出,机构分闸保持力约 1 600 N,合闸保持力约 6 300 N。从永磁体的特性曲线可以看出,永磁体的磁力随气隙的变化急剧下降,说明当保持用动铁心开始运动,保持力对动铁心运动的阻碍将迅速减小,在几个毫米内几乎不再起作用,相比较传统永磁保持机构,能提高机构分闸速度。

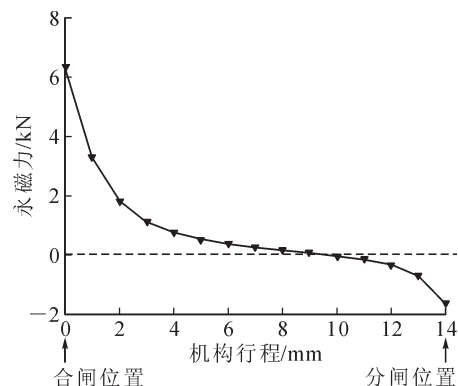


图4 永磁体作用下永磁力随机构行程的变化

Fig. 4 Permanent magnetic force vs. stroke

图5为外加LC振荡电路,为励磁线圈提供驱动电流,在仿真中通过Maxwell Circuit Editor进行建模,其中 $C_1=2\ 000\ \mu\text{F}$, $R=2\ \text{m}\Omega$,LWinding为分/合闸线圈绕组动态模型,电容初始电压 $U_{C0}=2\ 000\ \text{V}$ 。

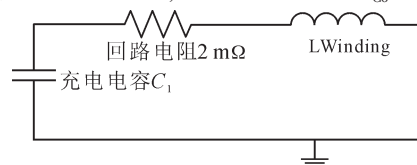


图5 外接LC振荡电路图

Fig. 5 External LC discharge circuit

在仿真中,分闸/合闸线圈的内径为 30 mm,分闸线圈的圈数为 22 圈,金属盘半径为 90 mm,厚度为 10 mm。仿真得到的基本波形见图6,为金属盘的受力曲线,金属盘的运动路径曲线与速度曲线见图7。

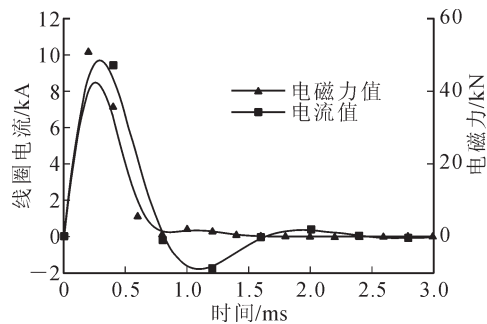


图6 金属盘所受电磁力和线圈电流曲线

Fig. 6 Force curve of metal plate and current curve

从图6中可以看出,当接到分闸命令时,外接电路接通,电容 C_1 通过电阻和分闸线圈电感进行放

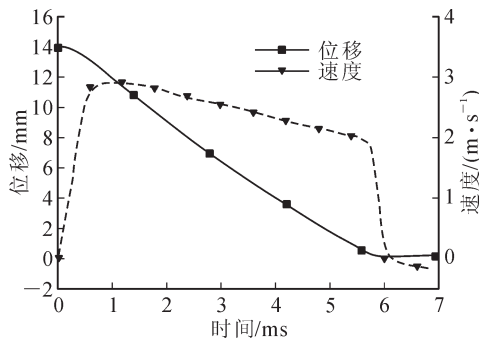


图7 斥力机构行程曲线和速度曲线

Fig. 7 Stroke curve and velocity curve of metal plate

电, 流经分闸线圈的电流在 0.2 ms 内达到最大值, 随后进行衰减振荡; 当分闸线圈中流过电流时, 金属盘电磁感应产生电磁斥力。从图 7 中可以认为金属盘的运动状态分为 3 部分: ①加速运动状态, 此时分闸线圈中电流大, 金属盘在电磁斥力的作用下做加速运动, 加速度取决于流经线圈的电流变化率的大小; ②较慢减速状态, 此时电流还在小幅震荡, 永磁保持装置的作用力很小, 此时金属盘的运动速度缓慢减速; ③快速减速状态, 由于快要到达指定开距, 碟簧装置的作用力大大增加, 金属盘做减速运动, 速度很快降为 0, 整个分闸过程完成。

2.2 金属盘尺寸及运动部分质量对分闸时间的影响

文中主要采用了单一变量法, 即在仿真时, 保证其他的条件不变, 只研究该变量对于开断的影响。

运动部分质量对于基于永磁斥力机构的真空快速开关的影响见表 2。从表 2 中可以看出, 随着运动部分质量的增加, 对于外接回路的电流值没有影响, 金属盘所受到的电磁力大小也没有变化, 运动部分的速度峰值减少, 真空快速开关的分闸时间增加。真空快速开关的分闸时间随运动部分质量的变化曲线见图 8。从拟合结果可以看出, 分闸时间与运动部分质量呈线性增加。

金属盘的外径对于分闸运动的影响见图 9, 从图 9 中可以看出, 增大金属盘的外径, 能够提高受力峰值, 可以降低分闸时间。但是增加金属盘的外径, 会增加金属盘质量和运动部分质量, 因此在增加金属盘直径时, 需要进一步做估计金属盘直径带来的影响。金属盘的厚度对于分闸运动的影响见图 10, 从图 10 中可以看出, 随着金属盘厚度的增加, 电磁力峰值和分闸时间变化不大。考虑到随着金属盘厚度增加, 运动部分质量增加, 因此, 在设计时, 保证机械强度的情况下, 金属盘厚度越薄越好。

2.3 外接电路参数对分闸时间的影响

真空快速开关是利用涡流效应来推动金属盘

表 2 金属盘质量的影响

运动机构 质量/kg	电磁力峰 值/kN	电流峰 值/kA	速度峰 值/(m·s ⁻¹)	分闸时 间/ms
4.0	50.595	10.68	4.31	3.8
4.2	50.595	10.68	4.11	4.0
4.4	50.595	10.68	3.93	4.2
4.6	50.595	10.68	3.76	4.4
4.8	50.595	10.68	3.61	4.6
5.0	50.595	10.68	3.47	4.8
5.2	50.595	10.68	3.34	5.0
5.4	50.595	10.68	3.22	5.2
5.6	50.595	10.68	3.11	5.4
5.8	50.595	10.68	3.00	5.6
6.0	50.595	10.68	2.90	6.0
6.2	50.595	10.68	2.81	6.2
6.4	50.595	10.68	2.72	6.4

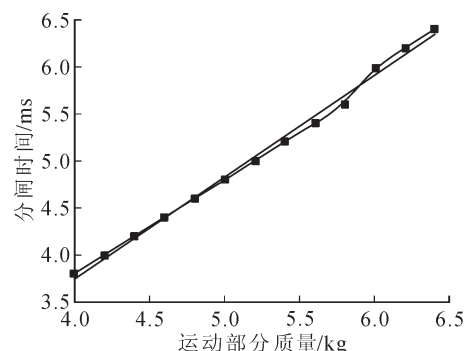


图8 运动部分质量与分闸时间的曲线

Fig. 8 Relationship between the quality of the metal plate and the switching time

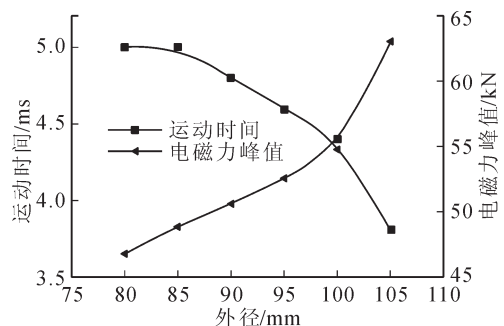


图9 金属盘外径的影响曲线

Fig. 9 Influence curve of the outer diameter of the metal plate

迅速运动, 来实现快速合闸和分闸。因此, 研究外电路对于分闸运动和合闸运动的影响是很有必要和意义的。分闸线圈匝数对分闸运动的影响见表 3 及图 11。从表 3 及图 11 可以看出, 随着分闸线圈匝数的增加, 电流峰值降低, 电磁力峰值增加, 速度峰值

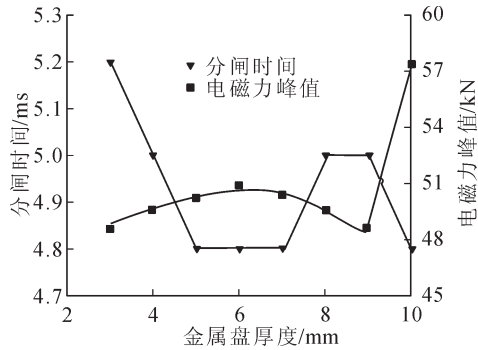


图 10 金属盘厚度的影响曲线

Fig. 10 Influence curve of the thickness of the metal plate

增加,分闸时间减小。外接电路电容充电电压对于分闸运动的影响见表4及图12。从表4及图12可以看出,随着充电电压的增加,电流峰值增加,电磁力峰值快速线性增加,速度峰值增加,分闸时间减小。从图12中可以看出,充电电压增加,虽然可以降低分闸时间,但是受力峰值大大增加,增加了对于金属盘机械强度的要求。充电电容值的大小对分闸运动的影响见表5及图13。从表5及图13可以看出,随着电容值的增加,电流峰值增加,受力峰值基本线性增加,速度峰值增加,分闸时间减小。

表 3 线圈匝数的影响

Table 3 Effect of winding turns

线圈匝数	电磁力峰值/kN	速度峰值/(m·s ⁻¹)	电流峰值/kA	分闸时间/ms
18	49.1	2.96	11.7	6.0
20	50.6	3.47	10.7	4.8
22	51.0	4.00	9.7	4.0
24	50.6	4.50	8.9	3.6
26	56.5	5.10	9.0	3.2
28	61.2	5.70	8.8	3.0

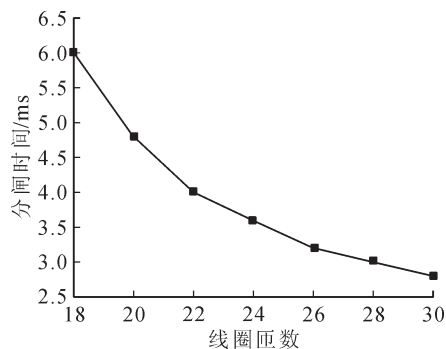


图 11 线圈匝数的影响

Fig. 11 Influence curve of the winding turns

2.4 金属盘打孔对于分闸运动的影响

文中提出了一种新的降低分闸时间的方法。通过在金属盘上沿径向打孔减少金属盘质量,来降低

表 4 充电电压的影响

Table 4 Effect of charging voltage

充电电压/kV	电磁力峰值/kN	速度峰值/(m·s ⁻¹)	电流峰值/kA	分闸时间/ms
1.8	40.98	2.79	9.6	6.8
2.0	50.60	3.47	10.7	4.8
2.2	61.22	4.24	11.7	3.8
2.4	72.86	5.60	12.8	3.2
2.6	85.51	5.95	13.9	2.8
2.8	99.17	6.90	14.6	2.4
3.0	113.84	7.91	16.0	2.2

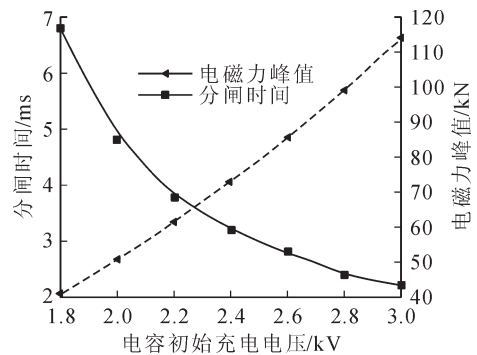


图 12 充电电压的影响曲线

Fig. 12 Influence curve of the charging voltage

表 5 电容值的大小影响

Table 5 Effect of capacity

电容值/μF	电磁力峰值/kN	速度峰值/(m·s ⁻¹)	电流峰值/kA	分闸时间/ms
1 800	45.08	2.88	10.1	6.4
2 000	50.60	3.47	10.7	4.8
2 200	55.89	4.11	11.2	4.0
2 400	60.96	4.77	11.7	3.4
2 600	65.82	5.47	12.2	3.0
2 800	70.45	6.19	12.6	2.6
3 000	74.88	6.92	13.0	2.4

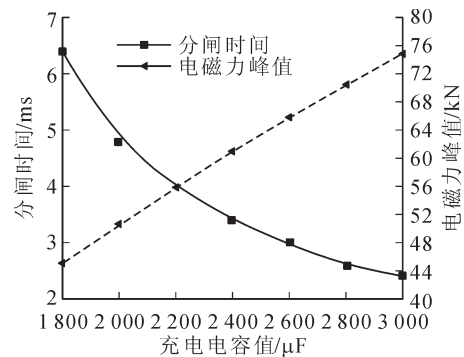


图 13 充电电容值的影响曲线

Fig. 13 Influence curve of the capacity

分闸时间,见图13。打孔深度和宽度对于分闸运动

影响分别见图 14、15。从图 14 中可以看出,当打孔深度在 10~70 mm 之间时,分闸时间和受力峰值基本保持不变;从图 15 中可以看出,打孔的宽度增加时,分闸时间降低,电磁力峰值增加。

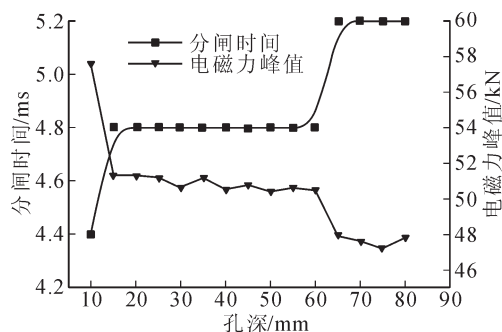


图 14 孔深的影响曲线

Fig. 14 Influence curve of the depth of the hole

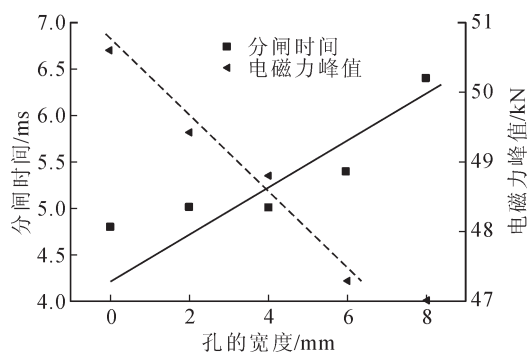


图 15 孔的宽度的影响曲线

Fig. 15 Influence curve of the width of the hole

3 仿真和实验结果比较

实际产品图见图 16,运动机构质量为 4 kg,外接电路中,分闸线圈匝数为 22 圈,分闸电容值为 2 200 μF ,充电电压为 1 100 V。分闸行程曲线仿真结果和实验结果对比图见图 17。从图 17 中可以看出,机构能在 5 ms 内完成整个分闸动作,且实验结果与仿真结果基本一致,验证了仿真方法的正确性。

4 结论

文中通过仿真与实验相结合的方法,以 12 kV 真空快速开关分闸过程为例,分析了金属斥力盘、外接电路参数等对分闸时间的影响,主要结论如下:

- 1) 分闸时间随着运动部分质量减小而减小,随着金属盘直径增加和厚度减小而减小。
- 2) 外接电路中,充电电容值的增加和充电电压的增加,线圈匝数的增加都能有效降低分闸时间。
- 3) 沿径向打孔,对于分闸运动基本无影响,但由于该种方式能够减少金属盘质量,从而降低分闸时间。

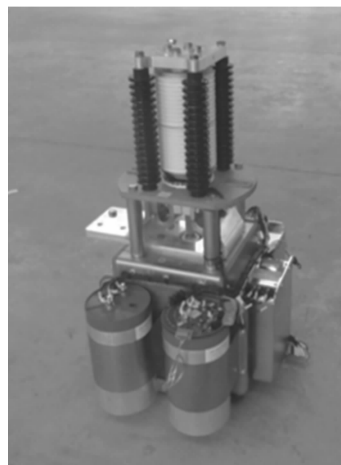


图 16 12 kV 真空快速开关样机

Fig. 16 Prototype of 12 kV high speed vacuum switch

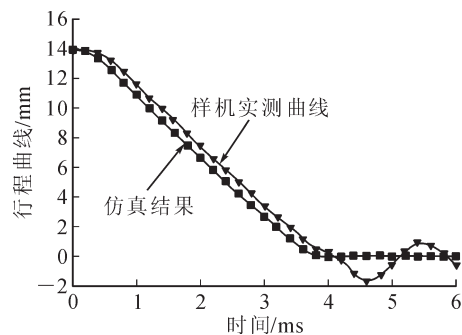


图 17 分闸行程曲线仿真与实验结果对比

Fig. 17 Stroke curve during opening operation simulation vs. experiment

参考文献:

- [1] 黄伟昭. 220 kV 高温超导故障限流器在深圳电网的应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
HUANG Weizhao. Application of 220 kV high temperature superconducting fault current limiter to the Shenzhen power grid[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2014.
- [2] 林金娇. 冀北电网短路电流限制措施的研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
Lin Jinjiao. Research on short-circuit current limiting methods for Jibei electric power grid[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.
- [3] 计 伟. 包头地区电网短路电流限制措施探讨及解决方案[D]. 北京:华北电力大学,2015.
JI Wei. A study on short-circuit current limit of Baotou grid [D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
- [4] 陈 成. 乌鲁木齐 220 kV 电网短路电流限制措施研究 [D]. 北京:华北电力大学,2013.
CHEN Cheng. Study on the short-circuit current limiting measures in Urumqi 220 kV power grid[D]. Beijing:North China Electric Power University,2013.

- [5] 袁娟,刘文颖,董明齐,等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术,2007,31(10):42-45.
YUAN Juan,LIU Wenying,DONG Mingqi,et al. Application of measures limiting short circuit currents in northwest China power grid[J]. Power System Technology,2007,31(10):42-45.
- [6] 舒彬,陈志莉,任安林,等. 超导限流器在解决电网短路电流中的应用分析[J]. 电网与清洁能源,2012,28(5):19-23.
SHU Bin,CHEN Zhili,REN Anlin,et al. Application of superconducting fault current limiters in resolving short-circuit currents in power grids[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2012,28(5):19-23.
- [7] 刘凯,陈红坤,林军,等. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(7):147-151.
LIU Kai,CHEN Hongkun,LIN Jun,et al. Study situation of applications of fault current limiter in power system[J]. Power System Protection and Control,2010,38(7):147-151.
- [8] 卫元朋,韩松,许逵. 串联谐振型高压故障限流器研究及应用进展述评[J]. 高压电器,2013,49(7):104-109.
WEI Yuanpeng,HAN Song,XU Kui. Critical review on high-voltage series resonance type fault current limiter[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(7):104-109.
- [9] 武瑾,庄劲武,王晨,等. 电磁斥力机构数学模型的简化与求解[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):175-182.
WU Jin,ZHUANG Jinwu,WANG Chen,et al. Simplification and solution of the mathematical model to electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(24):175-182.
- [10] 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.
- [11] 袁召,喻新林,魏晓光,等. 线圈型电磁斥力机构综合优化[J]. 高电压技术,2015,41(12):4207-4212.
YUAN Zhao,YU Xinlin,WEI Xiaoguang,et al. Comprehensive optimization of coil-coil electromagnetic repulsive actuators[J]. High Voltage Engineering,2015,41(12):4207-4212.
- [12] 刘红星,柳庆东. 基于快速斥力开关的新型故障限流器设计与仿真研究[J]. 电工电气,2014(2):4-7.
LIU Hongxing,LIU Qingdong. Design and simulation study of new type fault current limiter based on high-speed electromagnetic repulsion switch[J]. Electrotechnics Electric,2014(2):4-7.
- [13] 吴振跃,谭东现,肖登明. 基于电磁斥力机构的快速接地开关的仿真与设计[J]. 电器与能效管理技术,2014(18):18-24.
WU Zhenyue,TAN Dongxian,XIAO Dengming. Simulation and design of fast earthing switch based on electromagnetic repulsion mechanism[J]. Low Voltage Apparatus,2014(18):18-24.
- [14] 王子建. 基于快速真空开关的电弧电流转移型故障限流器[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
WANG Zijian. Arc current-transferring type fault current limiter based on high speed vacuum switch[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2009.
- [15] 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.
- [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] 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.
- [18] 江壮贤,庄劲武,王晨,等. 电磁斥力机构中驱动电容参数对触头初始电气间隙的影响[J]. 船电技术,2012,32(2):1-4.
JIANG Zhuangxian,ZHUANG Jinwu,WANG Chen,et al. Effect of the driving capacitor of electro-magnetic repulsion mechanism on the initial gap of contact[J]. Marine Electric & Electronic Technology,2012,32(2):1-4.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 娄杰,李庆民,孙庆森,等. 快速电磁推理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

(下转第67页)

- on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Tours, France:[s.n.],2002:323-326.
- [11] HOMMA M,SAKAKI M,KANEKO E,et al. History of vacuum circuit breaker and recent development in Japan [C]//Proceedings-XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Yalt, Ukraine:[s.n.],2004:378-383.
- [12] 王季梅. 国内外真空断路器高电压等级开发动态[J]. 华通技术,2013(4):13-14.
WANG Jimei.Development dynamics on high voltage level of VCB both at home and abroad[J]. Huatong Technology, 2013(4):13-14.
- [13] 黄瑜珑,王静君,徐国政. 配永磁操动机构真空断路器运动特性控制技术的研究[J]. 高压电器,2013,41(5):321-323.
HUANG Yulong,WANG Jingjun,XU Guozheng. Investigation on the controlling techniques of moving contact behaviors for vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2013,41(5):321-323.
- [14] 王恪典,徐海波. 虚拟样机实验仿真技术及其在真空断路器操动机构中的应用[J]. 高压电器,2003,39(6):1-3.
WANG Kedian,XU Haibo.Experimental simulation technology of virtual prototype and its application in the design of operating mechanism of vacuum circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus,2003,39(6):1-3.
- [15] 杨茜,张英,叶祖标. 永磁操动机构真空断路器的机械特性受温度影响的研究[J]. 高压电器,2013,49(7):46-52.
YANG Qian,ZHANG Ying,YE Zubiao.Research on mechanical characteristics of permanent-magnetic vacuum circuit breaker influenced by temperature[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(7):46-52.
- [16] 刘韬,马志瀛,谭盛武. 126 kV 真空断路器的运动建模与优化设计[J]. 电工技术学报,2004,19(12):10-14.
LIU Tao,MA Zhiying,TAN Shengwu.Kinematical modeling and optimal design for 126 kV vacuum circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(12):10-14.
- [17] 张红军,王文文,张强. 断路器绝缘拉杆的动力学仿真分析与实验研究[J]. 高压电器,2012,48(10):83-87.
ZHANG Hongjun,WANG Wenwen,ZHANG Qiang. Dynamics simulation analysis and experimental study of circuit-breaker's insulation pull rod[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(10):83-87.
- 王亮(1983—),男,博士研究生,研究方向为配电自动化新技术及其应用。

(上接第 60 页)

CSEE,2005,25(16):23-29.

艾绍贵(1960—),男,教授,从事电力系统故障限流技术及串联补偿方面的研究工作。

李秀广(1981—),男,硕士,工程师,从事电气设备性能技术监督工作。

杜玮(1983—),男,博士,工程师,主要从事新型一次设备技术研究。

张礼才(1991—),男,硕士研究生,研究方向为高压直流断路器技术。

孙丽琼(1981—),女,博士,研究方向为真空断路器操动机构技术。

王博(1975—),男,硕士,主要从事电力系统高压试验、变电检修。

王银明(1968—),男,高级工程师,研究方向为变电设备运维技术。