

电磁斥力快速开关研究

杨浩, 吕玮, 刘彬, 方太勋, 杨兵, 王宇, 石巍

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 基于电磁斥力原理的快速开关具有操作机构简单,分闸速度快等优点,在混合型直流断路器以及故障限流器等场合起关键作用。文中通过三维有限元仿真与试验验证,对影响电磁斥力机构出力特性的多个参数进行了分析。并且在样机研制和测试过程中,重点分析了快速开关分闸弹跳过大并容易导致分闸失败的原因,推导了分闸弹跳物理过程中各参数的数学关系。测试结果表明,其9 mm满行程时间为2.9 ms,分闸反弹不超过2 mm。最后在总结15 kV中压快速开关研究的基础上,提出了高压快速开关的研究方向和重点。

关键词: 快速开关; 电磁斥力机构; 有限元分析; 碰撞缓冲

New High-speed Switch with Electromagnetic Repulsion Mechanism

YANG Hao, LYU Wei, LIU Bin, FANG Taixun, YANG Bing, WANG Yu, SHI Wei

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: High-speed switch based on electromagnetic repulsion principle has a simple operating mechanism and short breaking time. It plays a key role in hybrid DC breaker and fault current limiter, etc. This paper presents a new high-speed switch with electromagnetic repulsion mechanism, and designs a 15 kV prototype by theoretical approximate calculation and finite element simulation analysis. The reason of opening bouncing and opening failure is analyzed, and mathematical relationships among all the parameters in opening bouncing process are derived. Test results show that the prototype's 9 mm-full stroke time is 2.9 ms, and opening bouncing distance is not more than 2 mm. In addition, this paper proposes the directions and priorities for research of high voltage high-speed switch.

Key words: high-speed switch; electromagnetic repulsion mechanism; finite element analysis; collision buffer

0 引言

电磁斥力快速开关因为其操作机构简单、分合闸速度快,比大功率半导体固态开关损耗低等优点在近年来得到了广泛研究,并在混合型直流断路器、故障限流器等多个领域具有广阔的应用前景^[1-11]。

电磁斥力快速开关的工作原理见图1,预先充电的储能电容向分闸或合闸线圈放电,斥力盘因为线圈上的脉冲电流产生感应涡流,涡流产生的磁场与线圈脉冲电流产生的磁场相互作用,从而推动斥力盘以及连杆运动,实现分、合闸动作^[12-14]。

文[15-16]中总结了对斥力机构出力特性产生影响的因素;文[17-18]中分别将斥力盘等效成1匝

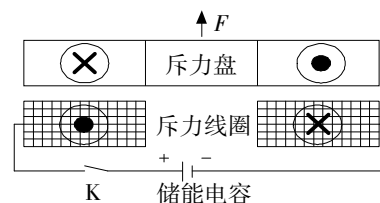


图1 斥力操作机构原理图

Fig 1 The principle of electromagnetic repulsion mechanism

和多匝线圈,推导出了斥力机构的运动特性数学解析方法。因电磁斥力快速开关分闸速度远远大于传统真空开关(0.8 m/s),导致其分闸弹跳难以控制,前人的研究都忽略了这一重要环节。文中在总结前人研究工作基础上,通过三维有限元仿真和样机测试验证,分析总结了斥力机构出力特性的影响因素,并对分闸弹跳的物理过程进行了分析推导,对电磁斥

力开关的设计具有指导意义。

1 电磁斥力快速开关

1.1 分合闸线圈、斥力盘、初始间隙

目前常见的斥力盘和线圈为扁圆盘形式,其结构具有轴对称性,见图2。

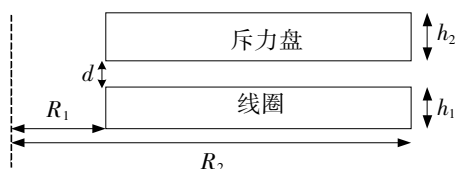


图2 斥力操作机构基本结构

Fig. 2 The structure of electromagnetic repulsion mechanism

图2中; R_1 、 R_2 分别为线圈及斥力盘的内半径和外半径,内外半径与绕制线圈的扁铜线厚度、匝数有关,此外还受斥力盘的质量所限制; h_1 、 h_2 分别为线圈及斥力盘的高度, h_1 即扁铜线高度, h_2 则受斥力盘强度以及电涡流肌肤深度的影响; d 为线圈与斥力盘初始间隙,越小越好,但受加工精度和绝缘影响。

1.2 储能及触发回路

电磁斥力快速开关的分合闸产生的动能来自储能及触发回路,其电气原理图见图3。

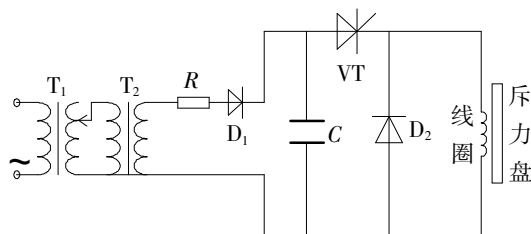


图3 储能及触发电路图

Fig. 3 Energy storage and trigger circuit

图3中; T_1 为调压器; T_2 为隔离变压器; R 为充电电阻; D_1 为整流二极管; C 为储能电容; VT 为触发半导体器件; D_2 为续流二极管。储能电容 C 通过 T_1 、 T_2 、 R 和 D_1 整流充电至预期值,当快速开关接到分合闸指令时,触发半导体器件 VT 导通,储能电容 C 对分合闸线圈放电。 D_2 的作用是防止放电电流对储能电容 C 反充电,同时起到提高放电效率的作用。

1.3 真空灭弧室、双稳态碟簧、缓冲装置

电磁斥力快速开关采用真空灭弧室作为断口。真空灭弧室的绝缘性能好,触头开距小,要求操作机构提供的能量也小,非常适合电磁斥力操作机构的特性。加上电弧电压低,电弧能量小,开断触头表面烧损轻微,因此其机械和电气寿命都很高。

真空灭弧室主要由绝缘外壳、屏蔽罩、波纹管 and 动、静触头等组成。文中采用的真空灭弧室的额定电压为17.5 kV,开距为9 mm,动触头质量为1.1 kg。

电磁斥力快速开关真空灭弧室在合闸和分闸状态时需要提供1~2 kN保持力,样机采用双稳态碟簧提供分合闸的保持力,其力学特性曲线见图4。

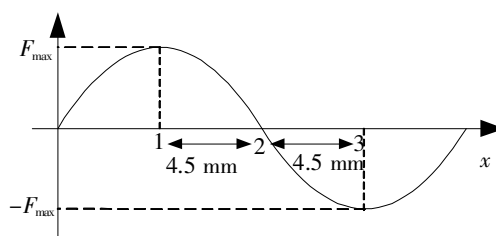


图4 双稳态碟簧力学曲线

Fig. 4 The mechanical curve of bistable disc spring

由图4可知,双稳态碟簧工作在1到3点之间,合位时其处于1点,并提供 $F_{\max}$ 的合闸保持力;分位时其处于3点,并提供 $-F_{\max}$ 的分闸保持力;2点为整个9 mm开距的中点位置。因此双稳态碟提供的力与位移 s 之间的关系为

$$F = -F_{\max} \cos\left(s \frac{\pi}{2 \times 0.0045}\right) \quad (1)$$

缓冲装置的作用是吸收快速开关分闸时整个运动部件的动能,保证碰撞后动触头弹跳不大于2 mm。快速开关分闸时的速度很快,因此分闸动能很大,缓冲装置如不能有效吸收分闸能量,双稳态碟簧失稳,有可能造成分闸失败。

样机的缓冲装置采用橡胶垫和环氧垫两种不同材料,在分闸弹跳分析部分会对比这两款材料的缓冲效果。气体缓冲器、液体缓冲器也都可以做为快速开关的缓冲装置,在选择缓冲装置时需要考虑所吸收的动能,以及有效缓冲行程等因素。假设快速开关在分闸过程中是匀加速的,则分闸动能 E_k 可按照式(2)近似求得

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{2 m s^2}{t_1^2} \quad (2)$$

式(2)中; v 为分闸速度; s 为分闸行程; t_1 为满行程时间。

2 有限元模型仿真

忽略电磁斥力快速开关其他安装金属机构件的影响,利用Ansoft Maxwell有限元软件^[19],按照表1中斥力峰值时间 t_f 的参数建立电磁斥力机构的三维仿真模型,见图5。

表1 不同匝数仿真结果

Table 1 The simulation result of different turns

$N/\text{匝}$	$L/\mu\text{H}$	t_f/ms	I_f/kA	$V_m/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	F_f/kN	t_f/ms
10	21.00	3.93	11.98	2.75	21.67	0.28
15	30.00	2.75	9.76	4.23	24.44	0.35
20	54.00	2.08	8.29	6.32	33.96	0.40

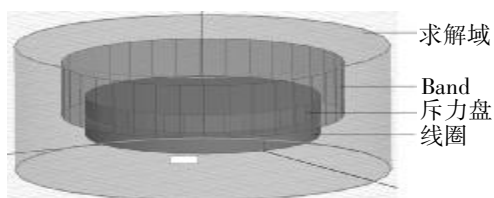
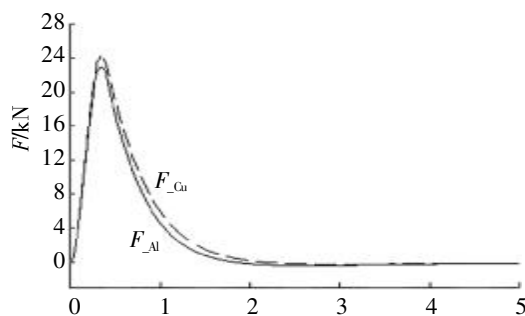
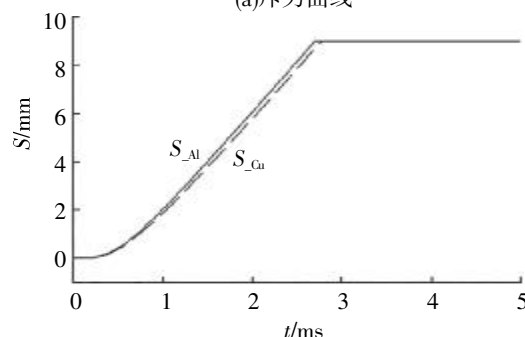


图5 电磁斥力机构3D仿真模型

Fig. 5 The 3D simulation model of electro-magnetic repulsion mechanism



(a)斥力曲线

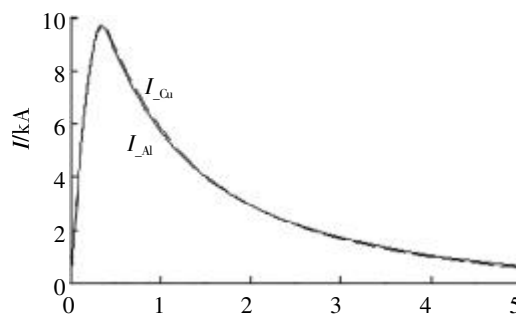


(c)位移行程曲线

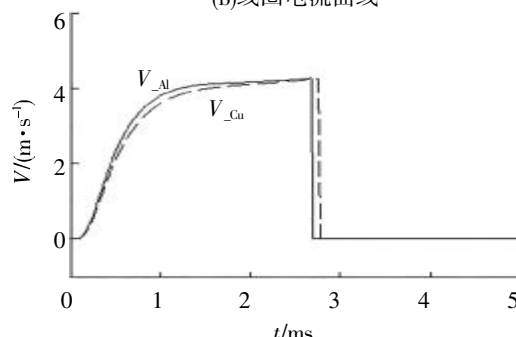
表1中: N 为线圈匝数; L 为线圈自感; t_1 为满行程时间; V_m 为最大分闸速度; I_p 为线圈峰值电流。

2.1 斥力盘材料、运动部件质量的影响

斥力盘材料、重量不同,电阻率不同,产生的感应涡流也不同,从而影响斥力大小。对铜盘和铝盘两种材料进行了仿真对比,结果见图6。



(b)线圈电流曲线



(d)分闸速度曲线

图6 铜盘与铝盘仿真结果

Fig. 6 The simulation result of copper plate and aluminum plate

从仿真结果可以看出:

1)铝盘改为铜盘后,电磁斥力峰值有所增加,说明降低电阻率能有效提高电磁出力特性;

2)铝盘改为铜盘后,最大分闸速度并没有因为斥力的增加而有明显提升,而且满行程时间反而延长了。原因是铜盘质量增大,导致增大的斥力没有完全体现到运动部件的速度上。

从以上结果就可以看出运动部件的质量对电磁斥力机构的出力特性影响很大,分别对运动部件为2、3、4 kg的模型进行了仿真,结果见图7。

由图7可以看出,运动部件质量对电流、斥力大小影响不大,但对分闸速度以及满行程时间影响很大。原因是虽然斥力做功一样,但根据动能定律,速度与质量成反比。因此,保证斥力盘以及连杆机械强度的基础上尽可能降低运动部件质量有助于提高开关的分闸速度。

2.2 线圈匝数、空气间隙的影响

线圈匝数不同,导致自感不同,相同储能电压下

的放电电流峰值以及斥力特性也不同。通过电感计算手册^[20]对10、15、20匝3种线圈的自感进行了近似计算,再通过有限元模型对在相同载荷条件下3种线圈的出力特性进行了仿真,结果见图8。

从表1可以看出,线圈峰值电流随匝数增加而降低,原因是匝数增加线圈自感及回路电阻增加。自感的增加同样导致电流及斥力峰值时间的增加,从而使得斥力作用时间更长,有利于提升分合闸时的运动速度。虽然10匝线圈电流峰值较大,但因匝数少,斥力峰值反而并不大,并且作用时间较短,导致运动速度较低,满行程时间较长。20匝线圈电流峰值较低,但其匝数大,斥力峰值较大,其作用时间较长,运动速度较大,满行程时间较短。虽然20匝的出力特性较好,但因其斥力峰值达到约34 kN,容易导致斥力盘变形,因此综合出力特性和斥力盘变形考虑,优先采用15匝的线圈较好。

斥力盘与线圈之间的初始间隙影响感应涡流的产生,从而对斥力特性产生影响。对1、2、3 mm 3种间隙进行了仿真,结果见图9。

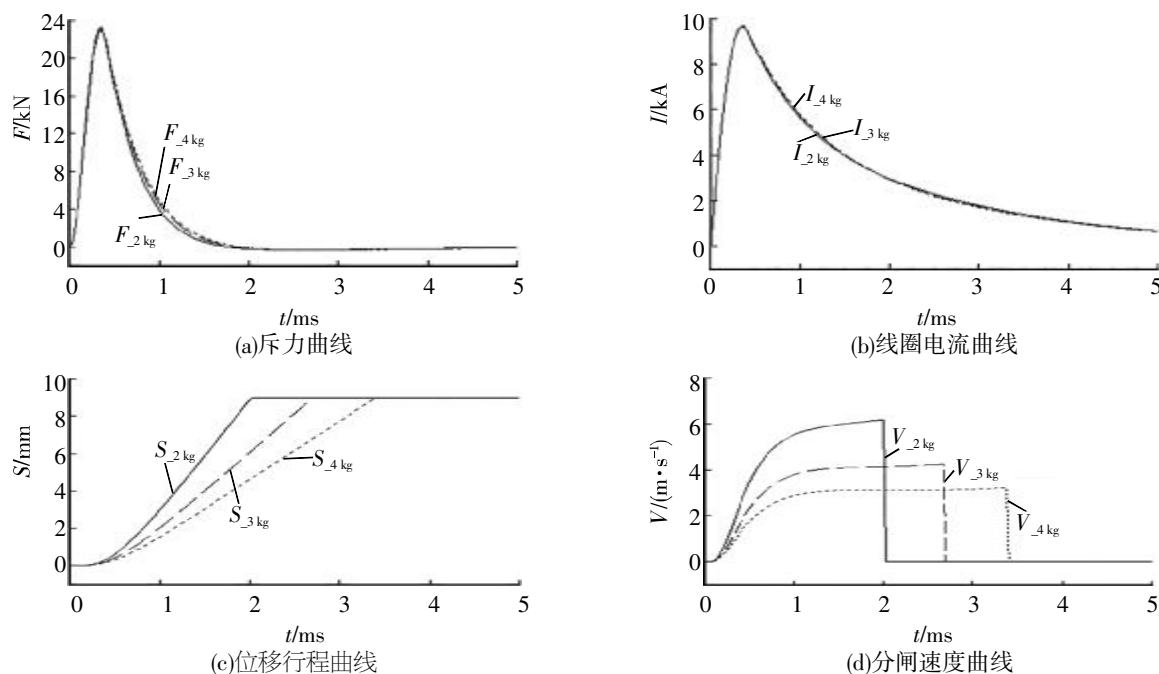


图7 不同运动部件质量仿真结果

Fig. 7 The simulation result of different weight

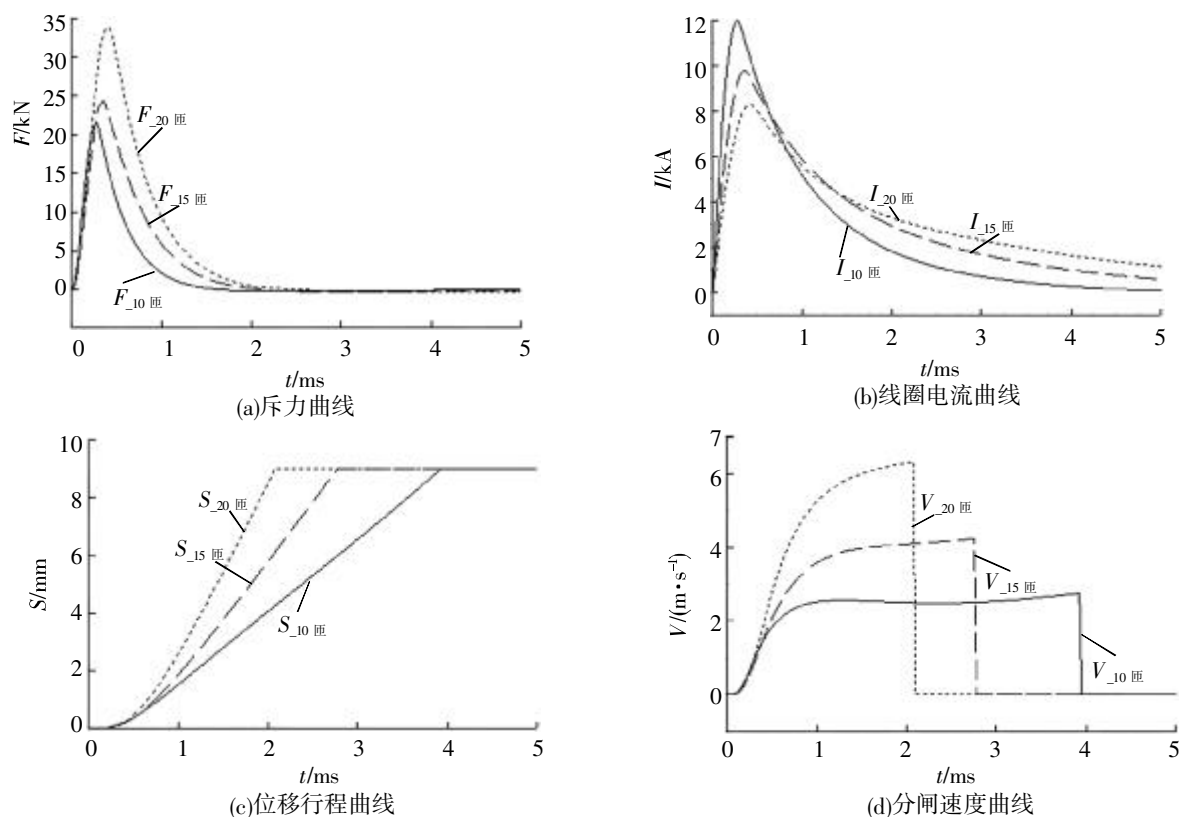


图8 不同线圈匝数仿真结果

Fig. 8 The simulation result of different turns

从图9可以看出,初始间隙1 mm时斥力峰值比2 mm和3 mm高30%,达到了35 kN。因此分闸速度大,满行程时间短。但考虑样机结构件实际的加工精度以及斥力盘机械强度,在满足满行程时间要求基础上选择2 mm或更大的空隙间隙更有利于开关样机的加工组装。

2.3 储能电容影响

储能电容的能量一定情况下,容值不同对斥力机构的影响见图10。

从仿真结果可以看出,当容值较小时,斥力峰值稍大,但峰值时间较短,作用在开关运动部件上的持续时间短,导致分闸速度不高,满行程时间稍长。当

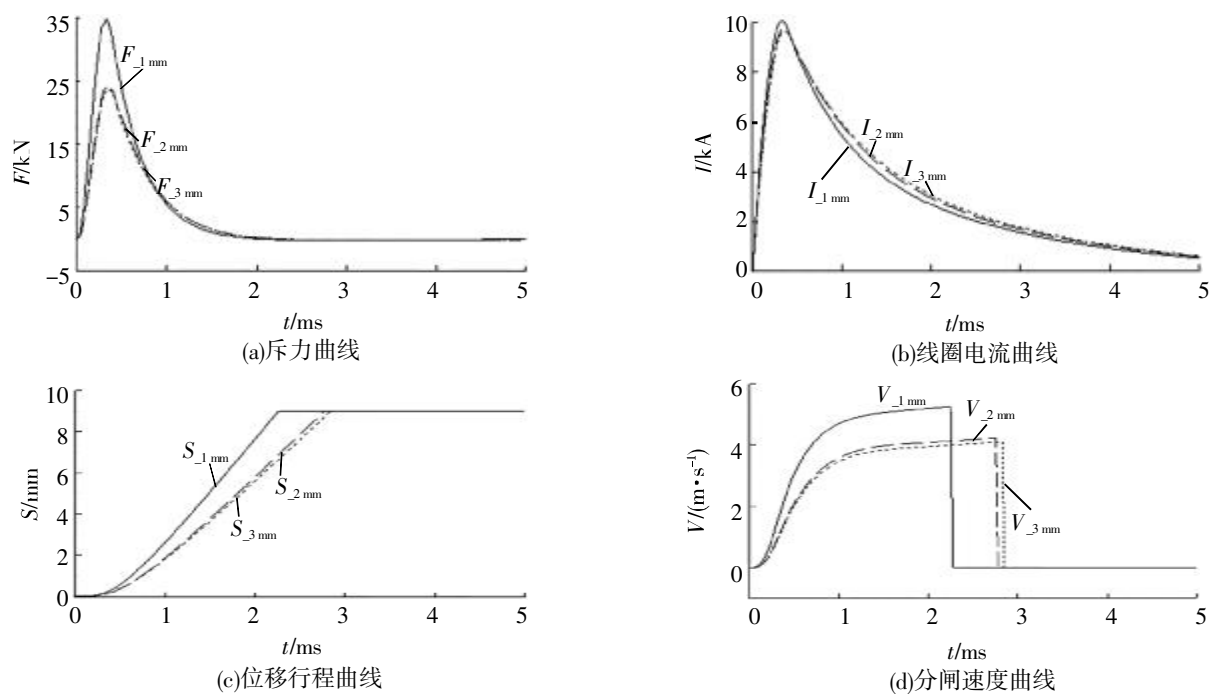


图 9 不同初始间隙仿真结果

Fig. 9 The simulation result of different spacing

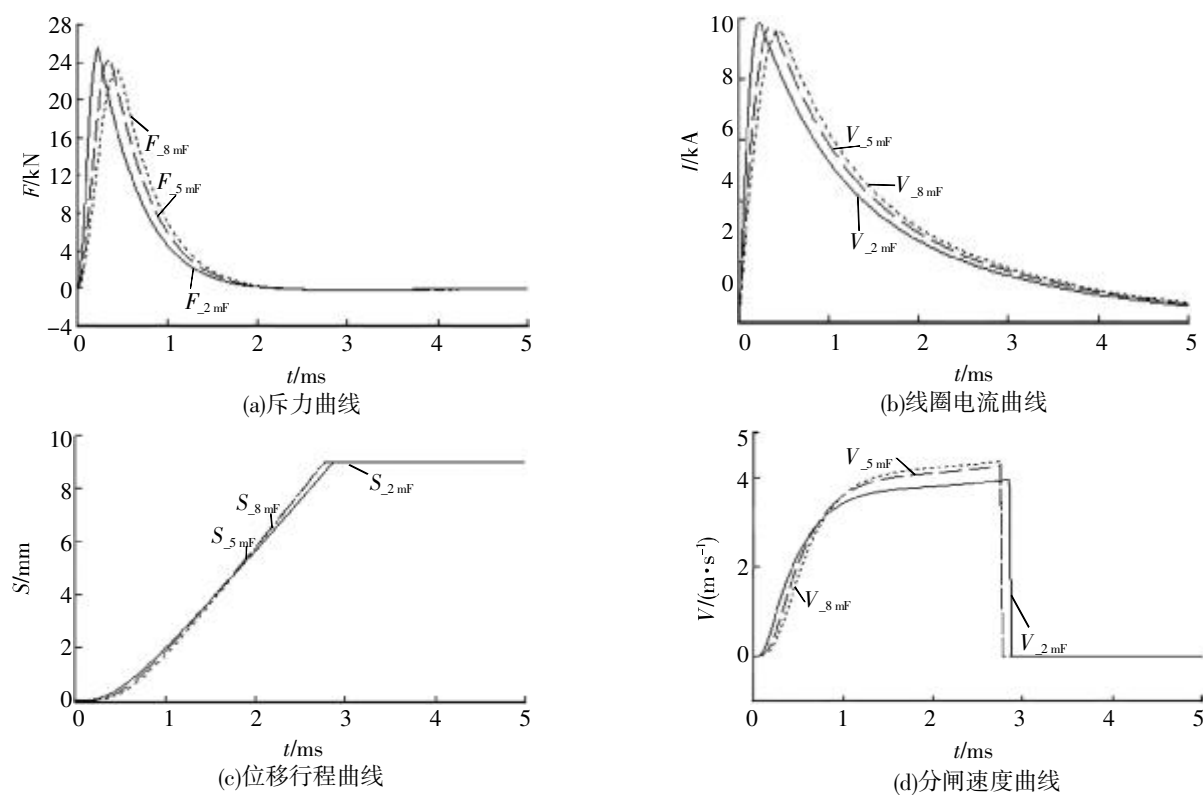


图 10 不同容值仿真结果

Fig. 10 The simulation result of different capacitance value

容值较大时,斥力峰值较小,峰值时间较长,作用在开关运动部件上的持续时间较长,有利于提高分闸速度,但因斥力上升变慢,使得固有分闸时间延长,也不利于缩短满行程时间。3种储能能量一样,容值不同的仿真结果也可以看出,满行程时间基本差不多,

说明电容储存的电量最终转化为分闸动能的效率基本上是恒定的。

此外,容值大小影响储能电容的耐压水平和体积尺寸的选择。因此容值的确定也需要根据实际情况综合确定,在满足满行程分闸时间要求的基础上

综合考虑耐压水平和体积尺寸。

3 样机研制测试

根据以上电磁斥力机构关键参数的仿真结果及分析,研制的快速开关样机主要参数见表2。表2中斥力盘材料为铝。

表2 样机参数

Table 2 The parameters of prototype

参数	数值
线圈外半径 R_1/mm	80
线圈内半径 R_2/mm	50
线圈高度 h_1/mm	10
线圈匝数 N	16
斥力盘及连杆质量 m/kg	4
初始间隙 d/mm	2
储能电容容值 C/mF	8
斥力盘半径 r/mm	80

3.1 运动特性测量

15 kV 快速开关设计目标是在 3 ms 内完成 9 mm 的行程开距,平均速度为 3 m/s,最大速度有可能接近 5 m/s,加速度也非常大。因此需要采用高采样率、高分辨率、速度量程大的设备进行测量。

采用 MTS10 H 型磁栅尺进行测量,该磁栅尺的最大测量频率 300 kHz,最大速度 12 m/s,分辨率 10 μm 。磁栅尺的磁带固定在绝缘拉杆上,可随绝缘拉杆上下运动,磁栅头固定在斥力开关托盘上不动。安装方式见图 11。

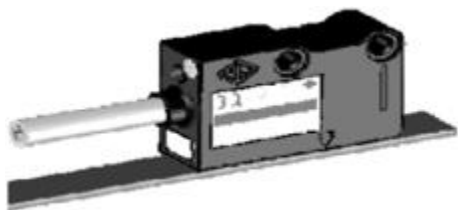


图 11 磁栅尺安装示意图

Fig. 11 The installation schematic of magnetic scale

试验时用示波器对储能电容的电压、放电电流、固有分闸时间以及磁栅尺输出的模拟量信号进行了测量,见图 12。

利用对磁栅尺输出模拟量的数学求解,可获得快速开关样机储能电容电压分别为 450、500、530、600 V 时分闸的速度和位移时程曲线,见图 13、14。

从图 13、14 可以看出,储能电压越高,分闸速度越快,满行程时间越短,但随着电压升高,分闸反弹的幅值也相应提高。

3.2 分闸弹跳分析

快速开关分闸到达额定开距后运动部件的速

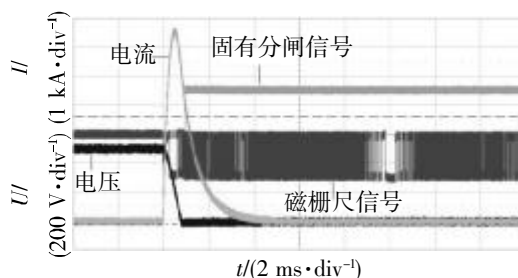


图 12 示波器记录波形

Fig. 12 The curve of oscilloscope

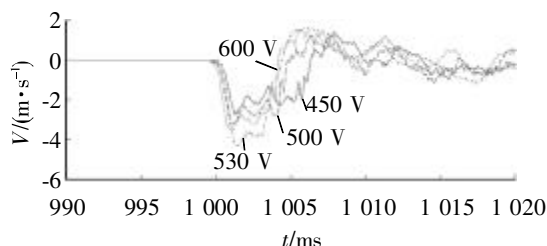


图 13 不同储能电压速度曲线

Fig. 13 The speed curve of different capacitance voltage

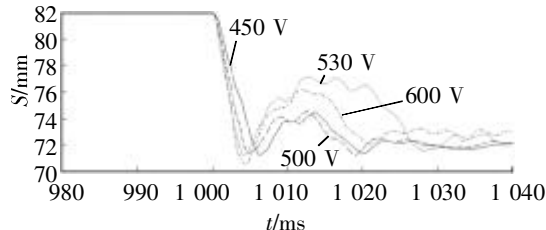


图 14 不同储能电压位移曲线

Fig. 14 The displacement curve of different capacitance voltage

度仍然很高,需要进行缓冲,保证其超程和反弹在合理范围内,样机真空灭弧室对反弹幅值的要求是不大于 2 mm。运动部件和缓冲之间是弹性撞击还是非弹性撞击,假设撞击后运动部件初速度为 v_2 ,即要求 2 mm 内,外部合力对金属杆做功 A 能够将初速度 v_2 降至 0。因运动部件重量较小可忽略,外部合力主要是碟簧的反作用力和真空泡的自闭力,碟簧作用力与自闭力方向相反,可得

$$A = A_{\text{碟簧}} - A_{\text{自闭}} = mv_2^2/2. \quad (3)$$

因碟簧工作在 1、2、3 点,运动部件从第 3 点开始回弹 2 mm,碟簧做的功为阴影部分的面积。

因 $dA_{\text{碟簧}} = dF \times dx$, 可得

$$A_{\text{碟簧}} = \int_D dA_{\text{碟簧}} = \int_D dF \times dx \quad 11.5 < x < 13.5. \quad (4)$$

自闭力做功

$$A_{\text{自闭}} = F_{\text{自闭}} \times \Delta x = 150 \times 0.002 = 0.3 \text{ J}. \quad (5)$$

双稳态碟簧做功示意图见图 15。

将式(3)、(4)、(5)代入式(6),得出反弹不超过 2 mm 时,碟簧峰值力 F_{max} ,运动部件质量 m 和反弹初速度 v_2 之间的函数关系为

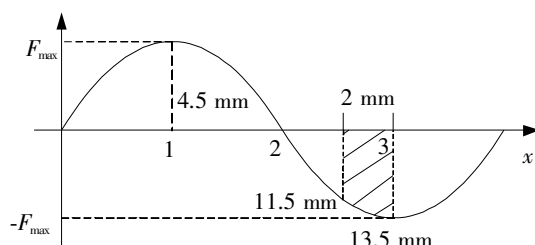


图 15 双稳态碟簧做功示意图

Fig. 15 The acting of bistable disc spring

$$F_{\max} = 271.3mv_2^2 + 162. \quad (6)$$

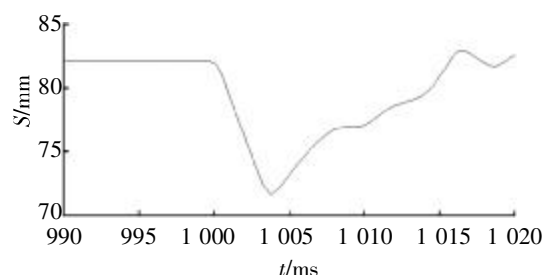
通过式(6)可以看出,运动部件质量越大或者撞

击后反弹初速度越大,就需要越大的碟簧保持力来控制反弹。

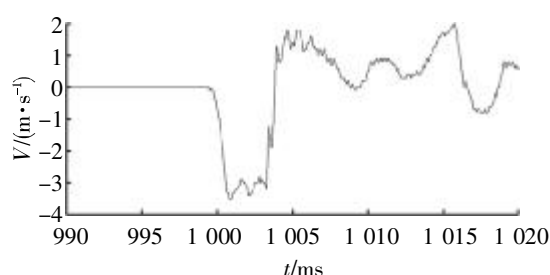
以样机采用碟簧 $F_{\max} = 2\,000\text{ N}$, 运动部件质量 $m = 4\text{ kg}$ 计算,可计算出反弹初始速度 $v_2 = 1.3\text{ m/s}$ 。即若缓冲效果不佳,使得反弹初速度 v_2 超过 1.3 m/s ,现有的碟簧将无法满反弹距离不超过 2 mm 的要求,甚至反弹过大可能造成分闸失败的危险。

3.3 分闸弹跳试验验证

样机试验时分别使用了橡胶垫和聚氨酯两种材料作为缓冲,测试结果见图 16、17。



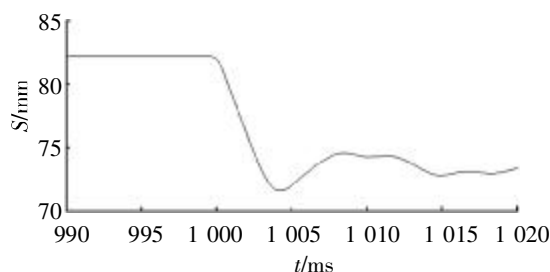
(a) 分闸失败位移波形



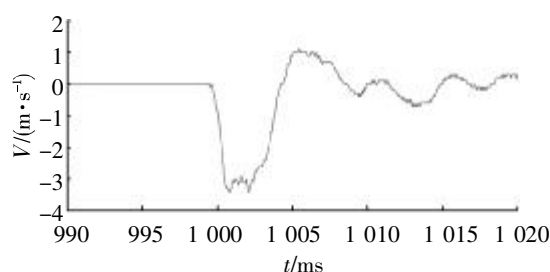
(b) 分闸失败速度波形

图 16 橡胶垫缓冲分闸失败位移、速度波形

Fig. 16 The failed opening curve of displacement and speed using rubber



(a) 分闸成功位移波形



(b) 分闸成功速度波形

图 17 聚氨酯缓冲分闸成功位移、速度波形

Fig. 17 The success opening curve of displacement and speed using polyurethane

从图 16、17 可以看出,采用橡胶垫缓冲运动部件与其碰撞后反弹最大速度约为 1.8 m/s ,超过了 2 mm 反弹幅值要求的 1.3 m/s ,最终导致分闸失败;而采用聚氨酯材料缓冲,碰撞后反弹最大速度约为 1 m/s ,低于 1.3 m/s ,反弹幅值为 1.5 mm ,整个 9 mm 满行程时间约为 2.9 ms ,过冲约为 1 mm ,最大分闸速度约为 3.8 m/s ,分闸成功。

将仿真结果与分闸成功的实际测试结果进行了对比,仿真与实测值接近,见表 3。

表 3 仿真与实测结果对比

Table 3 The comparison between simulation and measured

参数	仿真值	实测值
满行程时间/ms	2.75	2.90
最大分闸速度/(m·s ⁻¹)	4.20	3.80
脉冲电流峰值/kA	9.76	8.97
电流峰值时间/ms	0.40	0.45

实测值比仿真值稍大的原因是实际线圈的电感比有限元模型提取的电感值大,影响了脉冲电流,最终影响了斥力机构的出力特性。

4 结论

文中采用理论近似计算和有限元模型仿真,对 15 kV 电磁斥力快速开关的斥力操作机构进行参数求解,并通过试验样机的研制和测试验证了理论近似计算和有限元仿真的可靠性。在样机测试过程中,着重关注分闸碰撞缓冲物理过程,总结出了各物理量之间的数学关系,并通过试验证明对碰撞缓冲分析的正确性。

在此基础上,针对高压快速开关的研制可从以下几点出发:①提高真空灭弧室单断口耐压能力;②通过串联方式提高整体耐压能力;③采用 SF_6 等其他绝缘方式的断口形式;④解决斥力操作机构与开关

断口间的高压绝缘问题。

参考文献:

- [1] YUKIMORI K, KENICHI K, HIROYUKI S, et al. Development of the high speed switch and its application[C]//Thirty-Third IAS Annual Meeting Industry Applications Conference. Louis, USA: IEEE, 1998: 2321-2328.
- [2] HOLAUS W, FROHLICH K. Ultra-fast switches-A new element for medium voltage fault current limiting switchgear[C]//2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.[S.l.]: IEEE, 2002: 299-304.
- [3] SKARBY P, STEIGER U. An ultra-fast disconnecting switch for a hybrid HVDC breaker-A technical breakthrough[C]//CIGRE.Canada: IEEE, 2013: 9-11.
- [4] JUNGBLUT R, SITTIG R. Hybrid high speed dc circuit breaker using a charge-storage diode[C]//Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Edmonton Alta, Canada: IEEE, 1998: 95-99.
- [5] 郑敏, 李兴源, 刘俊勇, 等. 具有串联补偿作用的新型故障限流器的拓扑结构和仿真[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 52-55.
ZHENG Min, LI Xingyuan, LIU Junyong, et al. Topology and simulation of a new fault current limiter with series compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 52-55.
- [6] TAKEDA M, YAMAMOTO H, HOSOKAWA Y, et al. A low loss solid-state transfer switch using hybrid switch devices[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Beijing, China: [s.n.], 2000: 235-240.
- [7] SHI J, ZOU J Y, HE J J. Triggered vacuum switch based fault current limiter[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(1): 51-53.
- [8] 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.
- [9] 董力, 李庆民, 刘卫东, 等. 两次电流转移型短路电流限制器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 21-24.
DONG Li, LI Qingmin, LIU Weidong, et al. Investigation of a double current-transferring type short circuit current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 21-24.
- [10] HOLAUS W, FROHLICH K. Ultra-fast switches-A new element for medium voltage fault current limiting switchgear[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA: IEEE, 2002: 299-304.
- [11] 陈金祥, 董恩源, 邹积岩. 具有串联补偿作用的新型故障限流器(FCL)的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 48-51.
CHEN Jinxiang, DONG Enyuan, ZOU Jiyan. Study of a new fault current limiter (FCL) with series compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 48-51.
- [12] 李庆民, 刘卫东, 钱家骊. 电磁推力机构的一种分析方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 20-24, 40.
LI Qingmin, LIU Weidong, QIAN Jiali. An analytical method for electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 20-24.
- [13] GENJI T, NAKAMURA O, ISOZAKI M, et al. 400 V class high-speed current limiting circuit breaker for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1428-1435.
- [14] 左全璋, 胡双, 左才科. 双稳态永磁操动机构结构设计和性能计算(II)[J]. 华通技术, 2002(3): 20-28.
ZUO Quanzhang, HU Shuang, ZUO Caike. Structural design and performance calculation for flip-flop permanently magnetic operating mechanism(II)[J]. Huatong Technology, 2002(3): 20-28.
- [15] 庄劲武, 张晓峰, 杨锋, 等. 船舶直流电网短路限流装置的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 26-30.
ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, YANG Feng, et al. Analysis and design of fault current limiter for ship DC powersystem[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 26-30.
- [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] 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.
- [18] 娄杰, 李庆民, 肖茂友, 等. 基于快速开关的串联谐振型故障限流器的仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 80-83.
LOU Jie, LI Qingmin, XIAO Maoyou, et al. Simulation of an series resonant type FCL based on fast transfer switch [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 80-83.
- [19] 刘国强, 赵凌云, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [20] 卡兰塔罗夫(苏), 采依特林(苏). 电感计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
杨浩(1979—), 男, 硕士研究生, 高工, 从事高压电力电子技术研究工作。
吕玮(1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压电器方面的研究(通讯作者)。