

新型双机构快速机械开关断路器结构与性能分析

余银钢^{1,2}, 潘天红¹

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2. 高可靠配电技术安徽省联合
共建学科重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要: 基于电磁斥力机构的快速机械开关在电力系统故障限流、电能质量控制、相控开关等领域具有广阔的应用前景。为了提高断路器的开断能力, 设计了一种新型双机构快速机械开关。该开关结合了弹簧操作机构和电磁斥力机构的优点, 在保证开断可靠性的同时, 还能够实现三相分相相控快速开断。依据电磁斥力机构工作原理, 推导了电磁斥力的计算方程, 建立了电磁斥力机构的三维有限元模型, 分析了其场路耦合的动态特性。通过分析不同机构参数, 研究了它们对电流和电磁斥力的影响规律, 给出了快速机械开关设计的指导性原则。并结合对关键部位的结构强度仿真分析, 完成了新型快速机械开关样机设计。实验结果表明, 该新型快速机械开关的全开断时间为 15.5 ms, 验证了设计方案的正确性和可靠性。

关键词: 电力系统; 电磁斥力机构; 快速开断; 新型双机构; 结构强度分析

Structure and performance analysis of a new type of fast mechanical switch circuit breaker with a double mechanism

YU Yingang^{1,2}, PAN Tianhong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Province Joint Construction Discipline Key Laboratory of High Reliable Power Distribution Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A fast mechanical switch using an electromagnetic repulsion mechanism has broad applications in fields such as power system fault current limiting, power quality control, and for a phase-controlled switch. To improve the breaking capacity of the circuit breaker, a new fast mechanical switch with a double mechanism is designed, one which combines the advantages of a spring operating mechanism and an electromagnetic repulsion mechanism. The presented switch ensures the reliability of breaking and also realizes three-phase split-phase phase-controlled rapid breaking. From its working principle, the calculation equation of the electromagnetic repulsion mechanism is deduced, and a three-dimensional finite element model of the mechanism is established. In addition, the corresponding field-path coupling dynamic characteristics are analyzed. The influence laws of different mechanism parameters on the current and electromagnetic repulsion are also analyzed. The guiding principles for the design of a fast mechanical switch are given. Combined with the structural strength simulation analysis of key parts, the prototype design of a new fast mechanical switch is completed. The experimental results show that the full breaking time of the new fast mechanical switch is 15.5 ms, which verifies the correctness and reliability of the design scheme.

This work is supported by the Scientific and Technological Innovation Project of Anhui Province (No. 202423i08050033).

Key words: power system; electromagnetic repulsion mechanism; high-speed switch; new double mechanism; structural strength analysis

0 引言

断路器是清除电力系统故障电流, 保证系统安

全运行的关键设备^[1-3]。快速操动机构是断路器的关键部件, 其核心单元是电磁斥力机构, 用于产生足够的动力, 驱动断路器快速切断电路^[4-6], 而如何优化该电磁斥力机构的参数则是实现快速而稳定开断的关键。为提升断路器中电磁斥力机构的运动速度, 文献[7]提出了一种基于电磁斥力的新型快速操动机构, 该机构的机械结构简单, 分合闸速度较快。

基金项目: 安徽省科技创新攻坚计划项目资助 (202423i08050033); 安徽省重点研究与开发计划项目资助 (202104a05020078)

与大功率电力电子器件相比, 该机构的通态损耗较低, 因此在电力系统故障限流、电能质量控制、高压直流断路器以及相控开关等多个领域中, 都具有广阔的应用前景^[8]。

电磁斥力机构 (electromagnetic repulsion mechanism, ERM) 的运动过程是储能电容放电、电磁感应耦合、连杆机械运动等多个动态子过程的相互作用, 在求解其动态特性时, 需要联合电路方程、机械运动方程、空间磁场与涡流方程^[9-10]。电磁斥力机构从结构上划分, 主要分为3种: 线盘式、双线圈式和螺线管式。文献[11]对线盘式和双线圈式电磁斥力机构进行了比较, 线盘式具有斥力峰值大、启动时间短的特点, 适用于短行程、快速开断; 双线圈式的电磁利用率较高, 但斥力较小, 启动时间较长, 适用于较长的行程。文献[12]提出了一种预测永磁机构真空断路器动作时间的新模型, 分析了励磁方式、励磁电压、环境温度和铁芯材料等因素对永磁操作机构动作时间分散性的影响。文献[13]建立了高压直流断路器中高速电磁斥力机构的多物理场耦合仿真模型, 研究了电磁斥力开关的开断过程。在此基础上, 设计并开发了电磁缓冲器, 通过合理设置电磁缓冲器的相关参数, 可以获得良好的缓冲效果。文献[14]开展了电磁场与机械系统动力学联合仿真的研究, 定性分析了金属盘尺寸结构、线圈匝数和储能电容等参数的变化对电磁斥力机构性能的影响。文献[15]不仅分析了电磁斥力机构的参数匹配, 还由此给出了电磁斥力机构参数设计的指导原则。

上述国内外研究的各电磁斥力机构解决了分闸机构快速性的问题, 而实际上, 断路器工作在不同工况时具有不同的要求^[16], 主要包括: ①在系统正常运行状态下, 断路器在合分一般性负载时, 三相触头的合分状态应具有良好的同期性; ②断路器在合分某些特殊负载时, 应具有三相分相相控合分操作的能力; ③在系统发生短路事故时, 断路器控制系统应能够进行快速事故识别, 并完成三相分相相控快速开断, 以提高灭弧室的开断能力。不难看出, 断路器应具有可靠完成系统正常运行时合分电路的能力, 同时也应具有系统发生短路事故时快速且可靠开断短路电流的能力^[17]。

显然, 基于电磁斥力原理的断路器不但要求机械结构的可靠性^[18], 要求在常规操作时使用常速分合闸机构, 而在发生短路故障时启动快速分闸机构。为此, 本文在弹簧操作机构的基础上引入了电磁斥力机构, 提出了一种新型双机构快速机械开关, 使用有限元仿真方法对电磁斥力机构进行了建模分

析。通过改变电磁斥力机构的内部机械结构和电气参数, 得到了不同的仿真结果, 并通过分析, 揭示了这些电气参数以及机械结构对电磁斥力机构运行效果的影响规律。在这些分析结果的基础上, 成功研发了一种采用电磁斥力原理的双机构快速机械开关机构样机。

1 新型双机构快速机械开关断路器的结构与工作原理

本文提出的新型双机构快速机械开关断路器的结构由电磁斥力机构、弹簧操作机构、真空开断机构及拉杆组成。其结构原理示意图如图1所示。

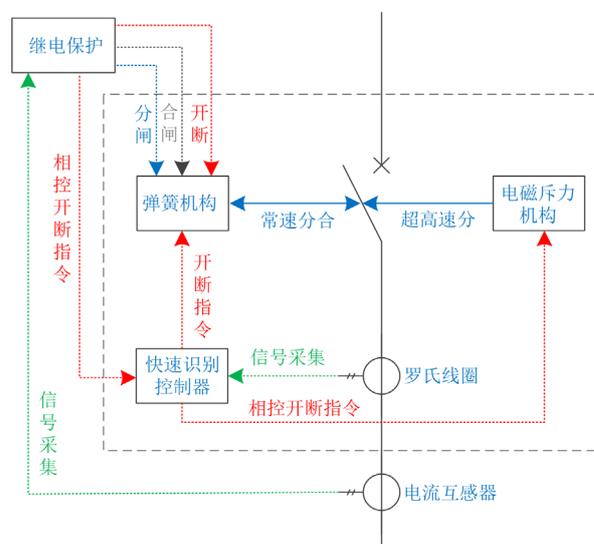


图1 新型双机构快速机械开关断路器结构原理图

Fig. 1 Schematic structure of a new circuit breaker with a double fast mechanical switch

图1中, 电磁斥力机构和弹簧操作机构皆可独自驱动真空灭弧室动触头^[19], 两驱动机构互为冗余。在合分正常负荷电路时, 使用稳定性高、冲击力小的弹簧操作机构, 在电路出现故障时, 分相相控控制器能够快速准确地识别短路事故, 并可分相相控控制三相短路电流在第一个工频过零点开断, 使用电磁斥力机构快速开断电路, 可大大提高开断短路电流的可靠性。

电磁斥力机构是实现新型双机构快速机械开关断路器在很短的时间内开断电流的关键技术。电磁斥力机构主要组成部分有: 脉冲放电回路、斥力线圈和斥力铜盘^[20], 在脉冲放电回路中, 通过对预先储能的电容进行放电, 在斥力线圈周围形成脉冲磁场。斥力铜盘随之产生感应涡流, 其所产生的磁场与线圈产生的磁场方向相反^[21-22]。由此, 在两者之间产生巨大的

电磁斥力,电磁斥力机构的运动部分在此斥力的作用下高速运动^[23]。除此之外,保持开关的稳定性也是目前需要解决的一大关键性问题^[24]。

2 电磁斥力机构的数学模型

电磁斥力机构的等效电路如图2所示,左侧是由直流电源、储能电容C、驱动线圈以及其他电力电子器件构成的驱动回路^[25],由直流电源DC给电容C充电, u_0 为电容预充电压, R_c 为充电电路电阻,VT为晶闸管,VD为续流二极管,充电完毕后使电容放电,即在线路中产生脉冲电流 i_1 , R_1 、 L_1 分别表示驱动线圈电阻与自感。右侧是将斥力铜盘等效为线圈构成的感应回路,在电容放电后,由脉冲电流 i_1 感应出电流 i_2 , R_2 、 L_2 分别表示“斥力盘线圈”电阻与自感。由于两等效线圈间存在互感M,并且在电磁斥力机构动作过程中,斥力铜盘逐渐远离驱动线圈,两等效线圈的间隙也随之逐渐变大,因此,M是随两线圈的间隙以及时间变化的中间变量。

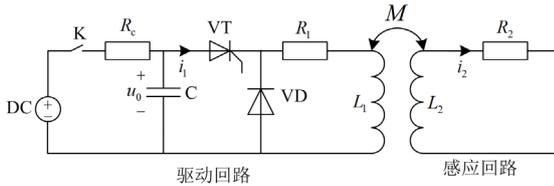


图2 电磁斥力机构等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of ERM

依据图2,可以写出两个回路的基本电路方程:

$$i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dM}{dt} = u_c(t) \quad (1)$$

$$i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt} = 0 \quad (2)$$

式中, $u_c(t)$ 表示瞬态的电容电压值, $u_c(t) = u_0 - \frac{1}{c} \int_0^t i_a(\tau) d\tau$,其中 u_0 为预充电压, c 为电容值, i_a 为电容的放电电流, τ 为时间常数。根据能量守恒定律,在机构动作时,可得

$$dA_s = dA + dw + dQ \quad (3)$$

式中: dA 为电磁斥力机构所做的功; dw 为磁场中能量的变化; dQ 为热损耗; dA_s 为电源提供的能量。

考虑到两线圈之间的磁耦合^[26],其能量平衡关系式应为

$$u_1 i_1 dt + u_2 i_2 dt = dA + dw + i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt \quad (4)$$

式中: u_1 为驱动线圈的电压; u_2 为金属盘的电压。

线圈和金属盘的磁能 w 为

$$w = \frac{1}{2} i_1^2 L_1 + \frac{1}{2} i_2^2 L_2 + i_1 i_2 M \quad (5)$$

通过联立方程(3)一式(5),可以求解出电磁斥力机构所做的功 dA 为

$$dA = \frac{1}{2} i_1^2 dL_1 + \frac{1}{2} i_2^2 dL_2 + i_1 i_2 dM \quad (6)$$

由于 L_1 、 L_2 在此处可视为常数,式(6)前两项求导结果为零,则机构的电磁斥力 F 为

$$F = \frac{dA}{dz} = \frac{i_1 i_2 dM}{dz} \quad (7)$$

由式(7)可知,电磁斥力 F 与驱动线圈电流 i_1 、感应电流 i_2 (金属盘上的)以及两等效线圈间的互感对斥力铜盘位移的导数 $dM/(dz)$ 成正比。

此外,电磁斥力机构的机械运动方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} a = \frac{F}{m_0} \\ v = \int a dt \\ s = \int v dt \end{cases} \quad (8)$$

式中: a 为电磁斥力机构运动部件的加速度; m_0 为电磁斥力机构运动部件的质量; v 为运动部件的速度; s 为运动部件运动的行程。

3 电磁斥力机构仿真分析

3.1 电磁斥力机构有限元仿真模型

本文采用电磁场有限元仿真软件 Ansys Maxwell 对电磁斥力机构的动态特性进行研究^[27]。图3展示了本文所建立的电磁斥力机构的有限元模型。

电磁斥力机构在起动时的磁密云图如图4所示,其磁场大致呈中心对称,铜盘位置的磁密较小,饱和程度较低。图5为电磁斥力机构气隙磁密波形图。

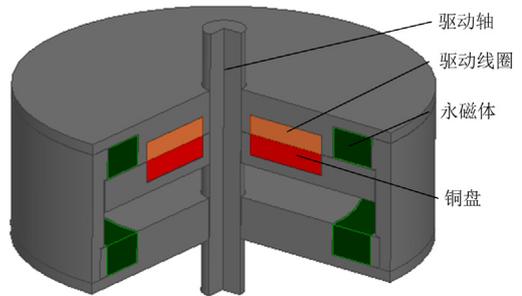


图3 电磁斥力机构的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of ERM

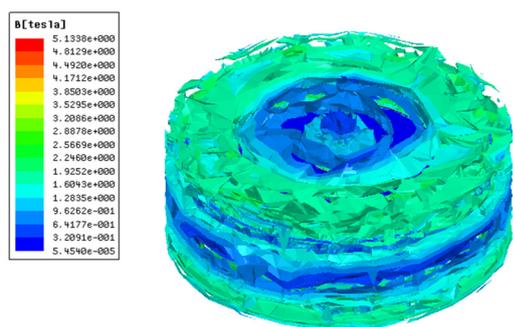
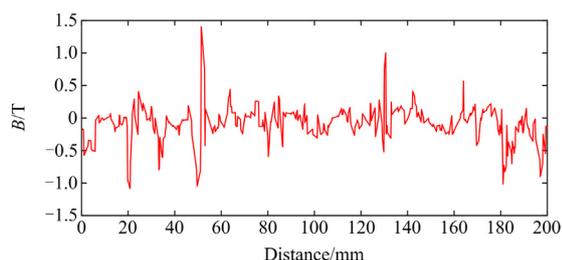
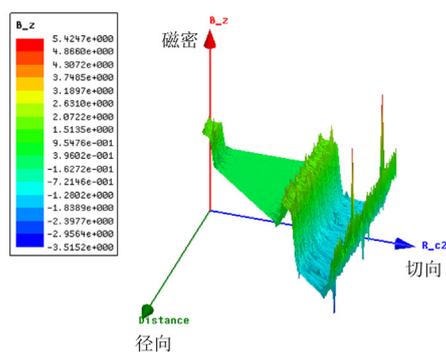


图 4 电磁斥力机构磁密云图

Fig. 4 Magnetic cloud diagram of ERM



(a) 电磁斥力机构径向气隙磁密波形



(b) 电磁斥力机构三维气隙磁密波形

图 5 电磁斥力机构气隙磁密波形图

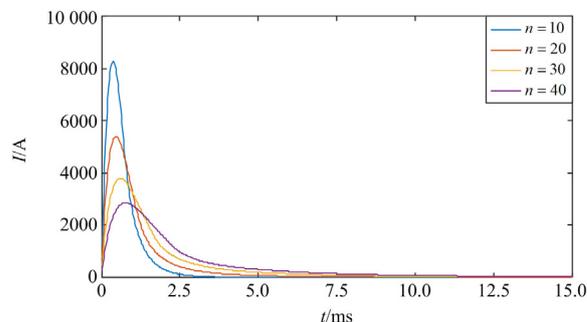
Fig. 5 Waveform of air gap magnetic density of ERM

在模拟初始时, 永磁体与铜盘外壳之间有个吸引力使得铜盘保持在初始位置, 然后通过控制电容放电使电容存储的电场能转化为驱动线圈中的磁场能, 铜盘在电磁感应的作用下受到电磁力带动驱动轴向下运动, 当运动到位移终程时, 又靠下方的永磁体使得铜盘保持在位移终程。

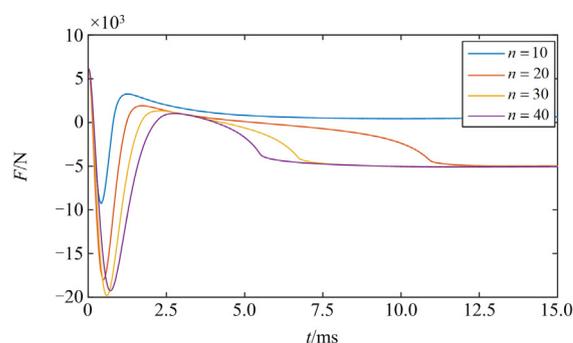
3.2 驱动线圈匝数分析

改变驱动线圈匝数对电磁斥力机构动态特性的影响如图 6 所示, 由于线圈匝数越多, 线圈的等效电感 L 和等效电阻 R 就越大, 使得线圈电流的峰值变小, 放电周期 T 也随之增加。由于模型上下两端都有永磁体, 金属盘在分闸与合闸时均受到了一个力, 使得开关保持在闭合或者断开的状态。当线圈

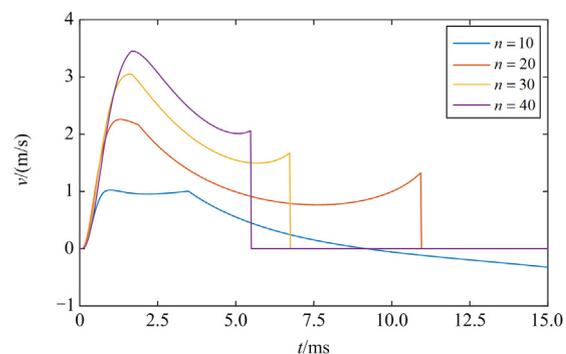
匝数为 10 时, 线圈的驱动力不能给金属盘提供足够的动能, 使得金属盘不能到达位移终程, 导致分闸失败。因此, 在设计电磁斥力机构时, 驱动线圈匝数不应低于 10。



(a) 线圈匝数对放电电流的影响



(b) 线圈匝数对电磁力的影响



(c) 线圈匝数对金属盘速度的影响

图 6 改变驱动线圈匝数的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of various turns of driving coil

驱动线圈匝数的增加会使得线路的电感与电阻增加。在线圈匝数较少的情况下, 由电容释放产生的脉冲电流峰值受到低电阻线路的影响而较大。然而, 由于线圈匝数的减少, 磁通量相应减小, 磁通变化率也相对较小, 因此感应的电磁力峰值较小。随着线圈匝数逐渐增加, 脉冲电流减小, 进而影响了斥力的大小。因此, 在设计机构时需要考虑线圈的电感、电阻以及磁通变化率等因素, 以平衡脉冲

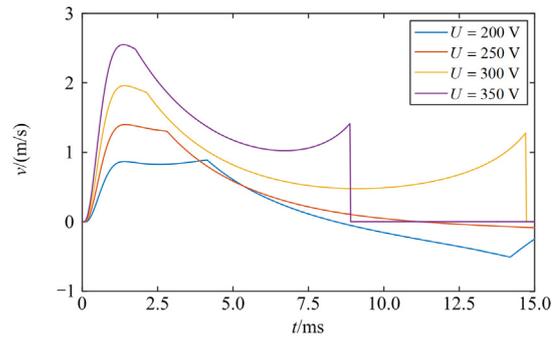
电流峰值和斥力峰值的要求,实现机构的最佳性能。

结合几种算例的仿真结果与实际成本来看,线圈匝数介于 20 和 30 之间时,斥力峰值能够达到设备要求且升时(电磁斥力达到峰值所需要的时间)较短,线圈匝数在 30 匝以上时,继续增加匝数,斥力峰值增大效果不明显且会使得升时变长,而且制作成本也在增加,因此线圈匝数在 20 和 30 之间时,机构作用效果较好且成本较低。

3.3 放电电容充电电压及电容容量分析

由于电容储存的能量与电容容量以及电容充电电压的平方成正比,所以金属盘受到的斥力峰值也随着这两个因素的变化而变化。保持电容容量不变,改变电容的充电电压,得到电磁斥力机构放电电流和电磁斥力的变化曲线,如图 7 所示。随着放电电容充电电压的提高,电流和斥力峰值也有显著的提升。可以发现,当电容充电电压较低时,金属盘不能到达位移终程,而当电容充电电压较高时,对机构以及线路绝缘强度的要求也会相应提高。因此在设计时应充分考虑到电容的安全性及充电电源的直流电压,综合考虑选择在 300 V 左右微调。

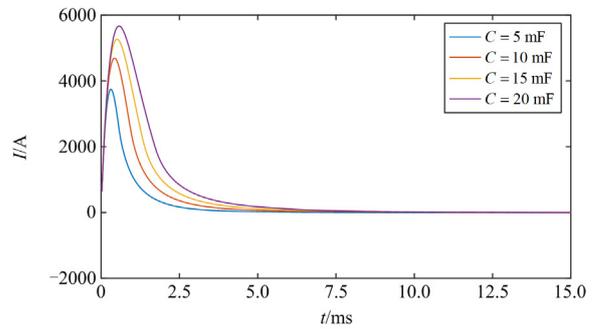
在给定电容充电电压的情况下,改变电容器容量会引起电磁斥力机构的放电电流和电磁斥力的变化。如图 8 所示,放电电流和电磁斥力的峰值随着电容容量的增加而增加。然而,这也会导致电容器的放电周期变长,从而延长了放电电流以及电磁斥



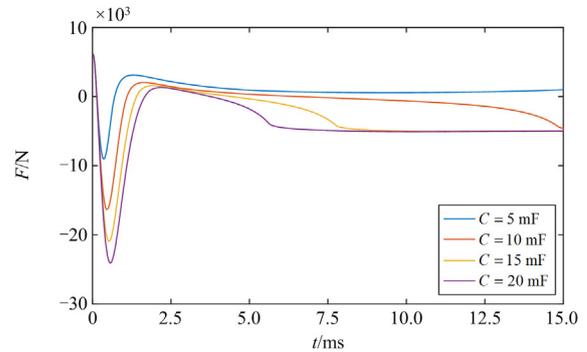
(c) 电容充电电压对金属盘速度的影响

图 7 改变电容充电电压的仿真结果

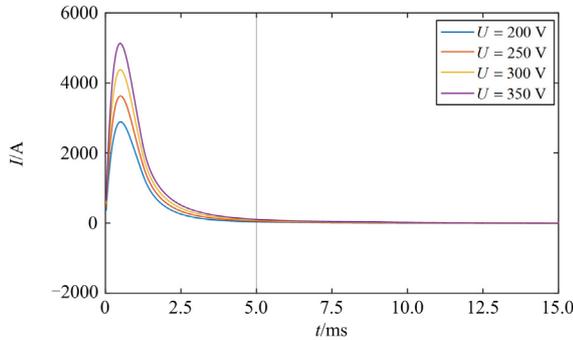
Fig. 7 Simulation results of various charging voltage of capacitor



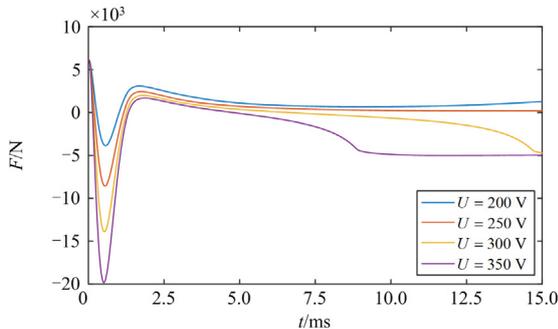
(a) 电容容量对放电电流的影响



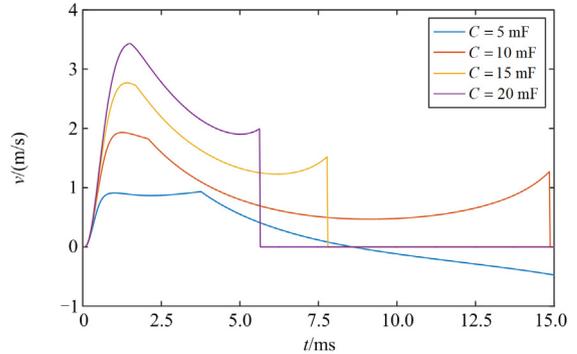
(b) 电容容量对电磁力的影响



(a) 电容充电电压对放电电流的影响



(b) 电容充电电压对电磁力的影响



(c) 电容容量对金属盘速度的影响

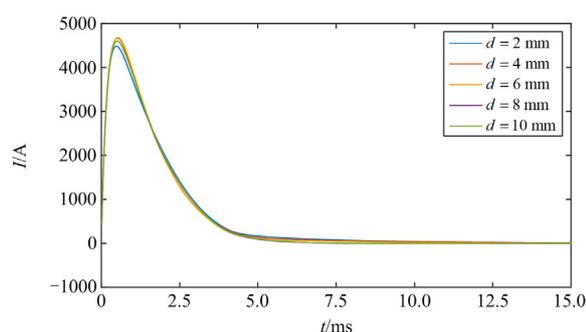
图 8 改变电容容量的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of various capacitance

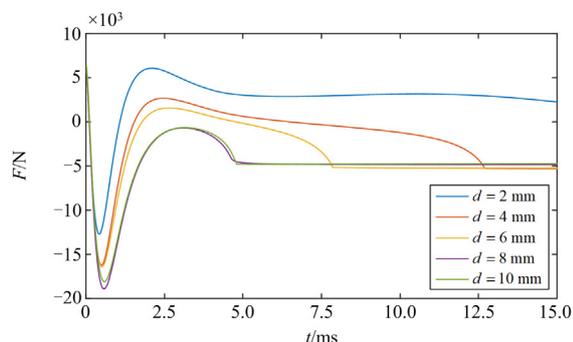
力达到峰值所需要的时间。最终导致电磁斥力机构的开关合分闸时间变长, 影响到整个开关的性能。因此, 在其他参数确定的情况下, 需要选择容量尽可能小的电容器, 以确保斥力的峰值能够达到电磁斥力机构的要求。同时, 选择较小的电容容量可以减小升时。这样可以使电磁斥力机构的开关合分闸时间变短, 提高整个系统的效率和响应速度。因此, 在设计中需要综合考虑斥力要求、电容器容量和系统响应时间的因素, 选择合适的电容容量。

3.4 斥力盘厚度分析

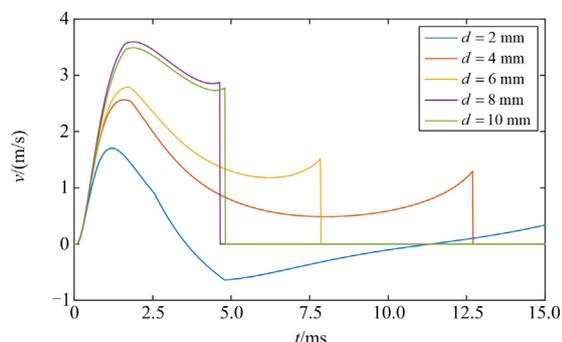
除上述分析的电气参数以外, 还要考虑到斥力铜盘厚度的因素, 为此, 选取 5 种不同厚度 d 的铜盘进行仿真分析, 其仿真结果如图 9 所示。



(a) 铜盘厚度对放电电流的影响



(b) 铜盘厚度对电磁力的影响



(c) 铜盘厚度对金属盘速度的影响

图 9 改变斥力盘厚度的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of various thickness of repulsion disk

从图 9 中不难看出, 铜盘厚度的变化对线圈放电电流的影响幅度并不显著, 厚度为 4 mm、6 mm 和 8 mm 的线圈电流峰值基本一致, 且曲线走向基本一致, 线圈电流逐渐趋于不变。铜盘厚度的变化对电磁力和金属盘速度的影响比较明显, 在铜盘厚度小于 8 mm 时, 随着铜盘厚度的增加, 电磁力和金属盘速度的增加幅度较为明显, 铜盘厚度大于 8 mm 时, 电磁力和金属盘速度反而略微下降。可以发现, 当铜盘厚度大于 8 mm 后, 进一步增加厚度不仅不能增加斥力峰值, 相反, 还会导致机构运动部件变重, 从而降低开关动触头加速度, 并影响电磁斥力机构的性能。因此, 在设计电磁斥力机构时, 从斥力的角度来分析, 只需要将铜盘厚度控制在 8 mm 左右即可。然而, 为确保斥力铜盘的工作性能达到最佳, 在设计时可以增加斥力铜盘的厚度或在其上方添加高强度的支撑结构。这样的设计综合考虑了斥力的优化和机械强度的要求, 以确保电磁斥力机构在工作时既能获得足够的斥力, 又能保持结构的稳定性和耐久性。

3.5 斥力盘耐压破坏强度仿真分析

前文对斥力盘厚度的分析中, 采用 8 mm 和 10 mm 的斥力铜盘其放电电流与电磁力的仿真结果区别并不明显, 由于本文提出的新型快速开关可以在短时间内完成分闸动作, 在电磁斥力的作用下, 运动部件会与其他固定部件产生巨大冲击, 因此需要对受力部件的机械强度进行分析来进一步确定其机械结构。通过 ANSYS Workbench 对运动部件进行有限元分析, Workbench 模型如图 10 所示。其运动部件包括斥力铜盘和移动钢盘, 斥力铜盘固定在移动钢盘内部, 随着斥力铜盘受到电磁力, 两者一起向下运动。运动部件的材料参数如表 1 所示。

由 3.4 节的分析可知, 斥力铜盘受到的电磁力可达到 20 kN 左右, 图 11 为施加 20 kN 的力时, 铜盘厚度为 8 mm 机构的应力云图和应变云图, 图 12 为

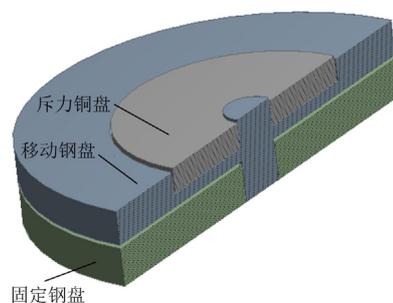


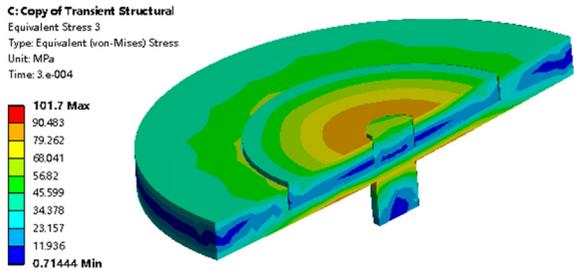
图 10 运动部件 Workbench 有限元模型

Fig. 10 Workbench finite element model of moving part

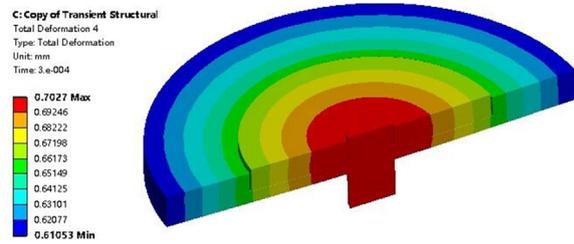
表 1 运动部件的材料参数

Table 1 Material parameters of different structures

运动部件	材料	屈服极限/MPa
斥力铜盘	铜	215
移动钢盘	10 号钢	335



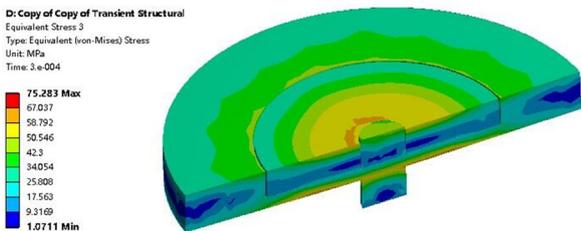
(a) 应力云图



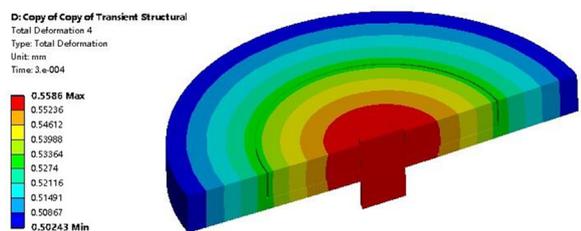
(b) 应变云图

图 11 铜盘厚度为 8 mm 时的仿真结果

Fig. 11 Simulation results when the thickness of copper disk is 8 mm



(a) 应力云图



(b) 应变云图

图 12 铜盘厚度为 10 mm 时的仿真结果

Fig. 12 Simulation results when the thickness of copper disk is 10 mm

铜盘厚度为 10 mm 时, 机构的应力云图和应变云图。其中图 12(a)代表运动部件上表面的仿真结果, 图 12(b)代表运动部件下表面的仿真结果。

由图 11 可知, 在铜盘厚度为 8 mm 时, 机构的最大应力为 101.7 MPa, 小于其材料的屈服极限, 最大应变为 0.7027 mm, 在屈服强度范围内, 其形变量不会对运动部件产生较大影响。

如图 12 所示, 铜盘厚度为 10 mm 时, 机构的最大应力和最大应变相比 8 mm 时都有所减小, 因此在铜盘为 8 mm 和 10 mm 时, 机构的运动部件均不会被应力所破坏, 考虑到机构的经济性, 铜盘厚度应选择 8 mm。

4 电磁斥力机构实验分析

基于以上分析, 得出了各参数对电磁斥力机构运行特性的影响规律, 以此设计了电磁斥力机构的样机, 该样机由电磁斥力机构、助合碟簧、绝缘拉杆和真空灭弧室构成, 并搭建了如图 13 所示的电磁斥力机构实验平台。

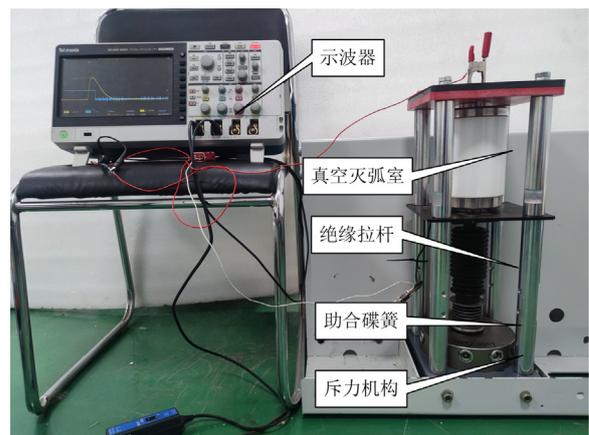


图 13 电磁斥力机构实验平台

Fig. 13 Experimental platform of ERM

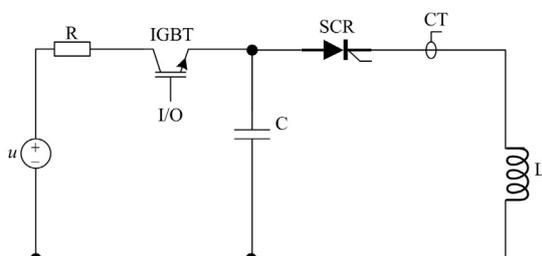
在初始位置, 由于永磁体的吸引力作用, 线圈与铜盘之间存在着初始压力, 当线圈通入脉冲电流时, 铜盘产生电磁斥力, 从而使得铜盘带动绝缘拉杆一起向下运动。当提供的电磁斥力足够时, 绝缘拉杆会到达位移终程, 开关至此完全断开。样机参数如表 2 所示。

实验时采用图 14(a)中的等效电路, 将电容充电至 393 V, 然后使电容放电, 可得到样机的实验放电电流波形。实验与仿真的放电电流波形对比如图 14(b)所示, 显然, 实验与仿真的放电电流波形基本吻合, 其峰值为 4700 A, 峰值时间为 0.55 ms。

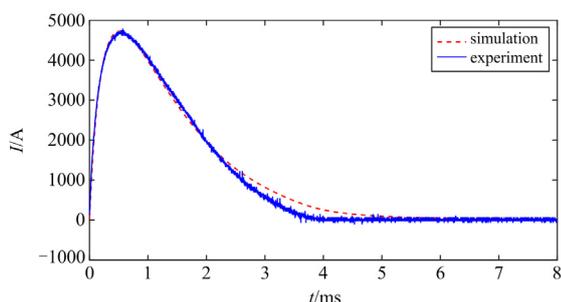
表 2 样机参数

Table 2 Parameters of the prototype

参数	数值
驱动线圈匝数	22
驱动线圈材料	纯铜
金属盘材料	纯铜
斥力盘厚度/mm	8
放电电容容量/mF	22
线路电阻/mΩ	33
线路电感/μH	5
运动部件质量/kg	6
电容充电电压/V	393



(a) 实验等效电路

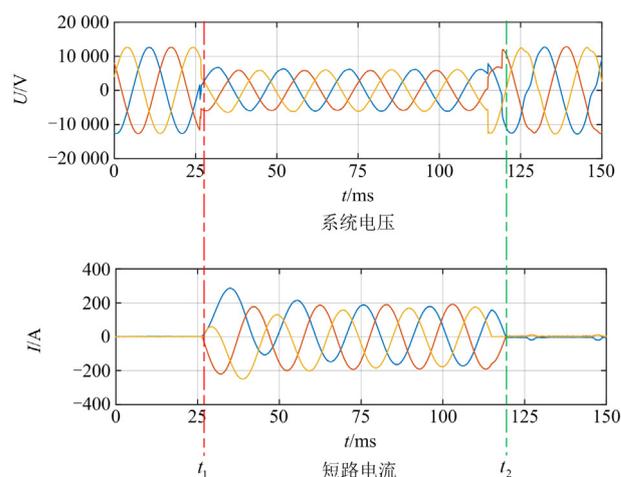


(b) 放电电流

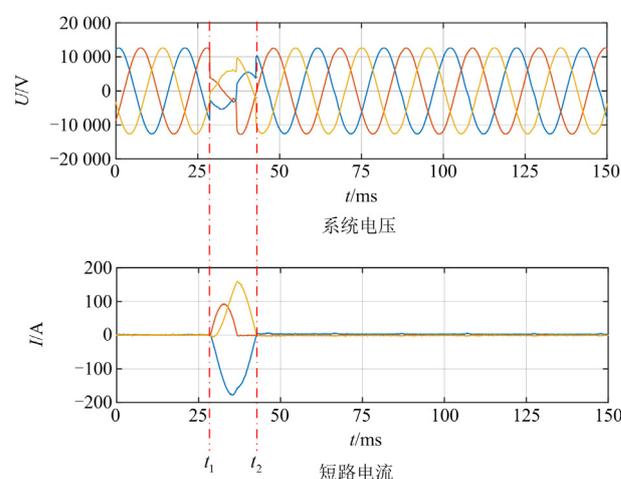
图 14 实验与仿真结果对比

Fig. 14 Comparison between experiment and simulation

配电网中使用较为广泛的断路器是 VS1 真空断路器, 其优点是可以频繁快速开断电路且灭弧不用检修。为体现本文提出的新型双机构快速机械开关性能的优越性, 本文将 VS1 真空断路器与 SS1 新型双机构快速机械开关断路器的开断性能进行比较, 测得的系统电压与短路电流如图 15 所示。从图 15(a) 中的短路电流波形可以看出, VS1 在出现短路事故时的全开断时间 $t_2 - t_1$ 将近 100 ms, 短路电流持续时间较长, 电压凹陷时间长, 而根据图 15(b) 中的短路电流波形, SS1 在出现短路事故时的全开断时间 $t_2 - t_1$ 仅为 15.5 ms 左右, 电压凹陷时间非常短。相比较之下, SS1 的开断速度更快, 性能更佳, 能在一定程度上对电路起到更好的保护作用。



(a) VS1 的系统电压和短路电流



(b) SS1 的系统电压和短路电流

图 15 VS1 与 SS1 性能比较

Fig. 15 Performance comparison between VS1 and SS1

5 结论

本文提出了一种新型双机构快速机械开关, 采用有限元法对其进行仿真分析, 并设计样机实验验证其仿真的正确性, 最终得出以下结论。

1) 在电容及其充电电压一定时, 电磁斥力峰值随驱动线圈匝数的增加而增加, 当驱动线圈匝数增加到一定值时, 电磁斥力峰值呈现饱和状态, 此时再增加匝数会起到反作用, 且驱动线圈的匝数越大, 电容的放电周期越长, 从而导致开关的分合闸时间变长。因此可以根据不同的实际情况选择最优的线圈匝数, 从而使得电磁斥力机构具有较好的动态特性。

2) 电磁斥力的峰值与电容充电电压的平方以及电容容量成正比。同时, 电容容量的增加会导致开关分合闸时间变长, 电容充电电压对开关分合闸

时间基本没有影响。

3) 铜盘厚度对放电电流影响较小, 对电磁力的影响比较明显。铜盘厚度在 8 mm 以内时, 电磁力峰值随着铜盘厚度的增加而增加, 当铜盘厚度超过 8 mm 时, 电磁力随着铜盘厚度的增加有一定程度的减小。因此, 在设计时可以适当调整铜盘的厚度, 以获得较高机械强度和较大的电磁力。

4) 设计了新型双机构快速机械开关样机进行实验, 实验与仿真结果基本吻合。本文所设计样机的全开断时间为 15.5 ms 左右, 相较于普通的 VS1 真空断路器的全开断 100 ms 左右, 该样机的开断速度更快, 能够满足断路器快速开关电路以保护电路的要求。

参考文献

- [1] 陈龙龙, 张宁, 汤广福, 等. 混合式高压直流断路器例行试验方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3193-3199. CHEN Longlong, ZHANG Ning, TANG Guangfu, et al. Routine test method for hybrid high voltage direct current breaker[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3193-3199.
- [2] 辛业春, 孙浩然, 王威儒, 等. 混合式高压直流断路器开断过程整机应力特性研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 40-47. XIN Yechun, SUN Haoran, WANG Weiru, et al. Research on stress characteristics of hybrid HVDC circuit breaker during breaking process[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 40-47.
- [3] 章宝歌, 荣耀, 张振. 一种新型限流型高压直流断路器拓扑[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 34-43. ZHANG Baoge, RONG Yao, ZHANG Zhen. New topology of current limiting high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 34-43.
- [4] 张祖安, 黎小林, 陈名, 等. 160 kV 超快速机械式高压直流断路器的研制[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2331-2338. ZHANG Zu'an, LI Xiaolin, CHEN Ming, et al. Research and development of 160 kV ultra-fast mechanical HVDC circuit breaker[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2331-2338.
- [5] 陈志刚, 刘东超, 崔龙飞, 等. 基于 T 型灰色关联度的高压断路器操作机构状态评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 93-99. CHEN Zhigang, LIU Dongchao, CUI Longfei, et al. Condition assessment of high voltage circuit breaker operating mechanism based on T-type grey correlation degree[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 93-99.
- [6] 王军龙, 杨欢红, 张劲松, 等. 基于低能量直流的真空断路器短路开断能力评估[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 23-28, 44. WANG Junlong, YANG Huanhong, ZHANG Jinsong, et al. Short-circuit breaking capacity evaluation of vacuum circuit breaker based on low-energy DC[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 23-28, 44.
- [7] 何俊佳, 袁召, 经鑫, 等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3809-3818. HE Junjia, YUAN Zhao, JING Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818.
- [8] 董文亮, 郭兴宇, 梁德世, 等. 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): 1068-1075. DONG Wenliang, GUO Xingyu, LIANG Deshi, et al. A DC vacuum circuit breaker based on electromagnetic repulsion actuator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1068-1075.
- [9] 孔凡良, 徐凯, 马子文. 中压直流断路器电磁斥力脱扣机构优化设计与试验验证[J]. 电器与能效管理技术, 2021(7): 34-39. KONG Liangfan, XU Kai, MA Ziwen. Optimization design and experimental verification of electromagnetic repulsion trip mechanism of medium voltage DC circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(7): 34-39.
- [10] 刘俊翔, 彭和平, 莫文雄, 等. 驱动时间对电磁斥力机构效率及传动系统结构应力影响研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 78-84, 93. LIU Junxiang, PENG Heping, MO Wenxiong, et al. Influence of driving time on efficiency of electromagnetic repulsion mechanism and structural stress of drive system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 78-84, 93.
- [11] ZHANG Mingzhi, WANG Yi, LI Peng, et al. Comparative studies on two electromagnetic repulsion mechanisms for high-speed vacuum switch[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(2): 247-253.
- [12] 杨东文, 曾次玲, 谷丰强, 等. 配永磁机构真空断路器操动时间分散性的预测模型与影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 180-186. YANG Dongwen, ZENG Ciling, GU Fengqiang, et al. Influencing factor and forecasting model for the time dispersion of the operating mechanism of a vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 180-186.
- [13] HOU Yushan, SHI Zongqian, LI Sheng. Research on fast opening process in electromagnetic repulsion mechanism[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1-4.
- [14] 田宇, 王利, 田阳, 等. 直流断路器用快速开关多场联

- 合仿真优化方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 55-62.
TIAN Yu, WANG Li, TIAN Yang, et al. Multi-field co-simulation optimization method for high-speed switch in DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 55-62.
- [15] 温伟杰, 李斌, 李博通, 等. 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): 4102-4112.
WEN Weijie, LI Bin, LI Botong, et al. Parameters matching and optimal design of the electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4102-4112.
- [16] 范兴明, 李涛, 张鑫. 中高压直流断路器的研究与应用[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2537-2553.
FAN Xingming, LI Tao, ZHANG Xin. Research and application of medium voltage and high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2537-2553.
- [17] 周万迪, 郭亮, 魏晓光, 等. 混合式直流断路器合成开断试验方法及等效研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5233-5242.
ZHOU Wandi, GUO Liang, WEI Xiaoguang, et al. Synthetic breaking test method and equivalence analysis of hybrid DC circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5233-5242.
- [18] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [19] 孙华, 王宾. 基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 102-109.
SUN Hua, WANG Bin. Arc-quenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching and closing current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 102-109.
- [20] 王蕾, 管臣, 李欣悦, 等. 快速真空开关电磁斥力机构瞬态动力学研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 72-77.
WANG Lei, GUAN Chen, LI Xinyue, et al. Study on transient dynamic characteristics of electromagnetic repulsion mechanism for fast vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 72-77.
- [21] 张晓鹏, 朱苛姝. 基于电磁驱动的 40.5 kV 快速真空断路器研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 79-84, 102.
ZHANG Xiaopeng, ZHU Kelou. Research on 40.5 kV fast vacuum circuit breaker based on electromagnetic drive[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 79-84, 102.
- [22] 唐宗华. 面向高压电网的经济型故障限流器的关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
TANG Zonghua. Study on key technology of economical-type fault current limiter on HV grid[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [23] 张公一, 张志成, 刘博, 等. 基于电磁斥力—永磁保持式机构的快速真空开关分闸运动特性分析[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 115-122.
ZHANG Gongyi, ZHANG Zhicheng, LIU Bo, et al. Analysis of opening motion characteristics of fast vacuum switch based on electromagnetic repulsion-permanent magnet holding mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 115-122.
- [24] 曾南薰, 方春恩, 李伟, 等. 高压直流断路器用快速机械开关电磁缓冲研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 9-16.
ZENG Nanxun, FANG Chun'en, LI Wei, et al. Research on electromagnetic damping for fast mechanical switch of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 9-16.
- [25] 邹顺, 李杰, 任志刚. 电磁斥力机构设计及试验研究[J]. 船电技术, 2022, 42(8): 31-35.
ZOU Shun, LI Jie, REN Zhigang. Design and experimental research of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Marine Electric, 2022, 42(8): 31-35.
- [26] BISSAL A, MAGNUSSON J, SALINAS E, et al. Multiphysics modeling and experimental verification of ultra-fast electro-mechanical actuators[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 49(1): 51-59.
- [27] 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 the electromagnetic repulsion mechanism based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 109-113.

收稿日期: 2023-12-16; 修回日期: 2024-03-03

作者简介:

余银钢(1976—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事高压设备智能控制方面的科研工作; E-mail: yuyingang@163.com

潘天红(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、智能感知以及预测控制等方面的科研工作。E-mail: thpan@ahu.edu.cn

(编辑 周金梅)